



Enpodishango Na-tha-hi:

Divulgación científica en la región Laja-Bajío

AÑO 2 ♦ NÚMERO 2 ♦ Septiembre 2025

ISSN: (En trámite)

Número Especial

**“Divulgación del conocimiento
de la Industria 4.0”**

Revista electrónica de libre acceso y sin costo por publicación



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



**TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CELAYA**

DIRECTORIO

Ernesto Lugo Ledesma
Director

Julián Ferrer Guerra
Subdirector Académico

Nayelli del Carmen Ramírez Segovia
Subdirectora de Planeación y Vinculación

Teodoro Villalobos Salinas
Subdirector de Servicios Administrativos

COMITÉ EDITORIAL

Mauro Santoyo Mora
Editor Jefe

Juan José Martínez Nolasco
Coordinador Editorial

Juan Manuel Barrera Fernández
Secretario Técnico



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO®



Enpodishango Na-Tha-Hi: Divulgación científica en la región Laja-Bajío, Año 2, No. 2, es una publicación semestral publicada y editada por el Tecnológico Nacional de México (Avenida Universidad 1200, Alcaldía Benito Juárez, C.P. 03330, Ciudad de México, teléfono 5536002511 ext. 65092, correo d_vinculacion05@tecnm.mx) a través del Instituto Tecnológico de Celaya (Avenida Antonio García Cubas esq. Av. Tecnológico No. 600 Pte., Col. Alfredo Vázquez Bonfil, C.P. 38010, Celaya, Guanajuato, teléfono 4616117575 ext. 5171, correo mauro.santoyo@itcelaya.edu.mx). Editor responsable: Mauro Santoyo Mora. Reserva de Derechos al Uso Exclusivo No. 04-2024-121916371200-102, ISSN: (en trámite), ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número: Departamento de Mecatrónica, Mauro Santoyo Mora, en el Instituto Tecnológico de Celaya (Avenida Antonio García Cubas esq. Av. Tecnológico No. 600 Pte., Col. Alfredo Vázquez Bonfil, C.P. 38010, Celaya, Guanajuato, teléfono 4616117575 ext. 5171, correo mauro.santoyo@itcelaya.edu.mx).

Queda prohibida la reproducción total o parcial en cualquier medio del contenido de la presente revista electrónica sin contar con la autorización del Instituto Tecnológico de Celaya.



Comité Editorial

Editor Jefe

Mauro Santoyo Mora

Coordinador Editorial

Juan José Martínez Nolasco

Secretario Técnico

Juan Manuel Barrera Fernández

Miembros del Comité Editorial

Dr. Mauro Santoyo Mora, *Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México*

Dr. Juan José Martínez Nolasco, *Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México*

Dra. Coral Martínez Nolasco, *Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México*

Dr. José Alfredo Padilla Medina, *Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México*

Dr. Micael Gerardo Bravo Sánchez, *Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México*

Dr. José Guadalupe Zavala Villalpando, *Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México*

Dr. Víctor Manuel Sámano Ortega, *Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México*

Mtra. Esperanza Peña Morales, *Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México*

Dr. Juan Pablo Aguilera Álvarez, *Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México*

Dr. Alonso Alejandro Jiménez Garibay, *Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México*

Dra. Sonia Guadalupe Sayago Ayerdi, *Tecnológico Nacional de México / IT de Tepic*,
México

Dr. Sergio Sandoval Pérez, *Tecnológico Nacional de México / IT de Ciudad Guzmán*,
México

Dr. Agustín Vidal Lesso, *Universidad de Guanajuato*, México

Dr. Carlos Villaseñor Mora, *Universidad de Guanajuato*, México

Dr. Hugo Antonio Méndez Guzmán, *Universidad Politécnica Bicentenario*, México

Dra. Araceli Zapatero Gutiérrez, *Universidad Anáhuac*, México

Dra. Virginia Campos Sanabria, *Universidad de Celaya*, México

Mtra. Rosalinda Cerda Sánchez, *Universidad de Celaya*, México

Dr. Julio Alberto García Rodríguez, *Universidad de Guanajuato*, México

Dra. Georgina del Carmen Mota Valtierra, *Universidad Autónoma de Querétaro*,
México

Mtro. Juan Manuel Barrera Fernández, *Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial*,
México

Dr. Julio César Solano Vargas, *Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial*, México

Mtra. Sandra Bermúdez Ramírez, *Centro de Estudios Tecnológico Industrial y de
Servicios No. 115*, México

Mtra. Selene Ramírez Rosales, *Universidad Autónoma de Querétaro*, México

Dr. Cristian Hamilton Sánchez Saquín, *Universidad Tecnológica de Querétaro*,
México

Mtro. Luis Antonio Díaz Jiménez, *Universidad Autónoma de Querétaro*, México

Dr. Edrei Reyes Santos, *Tecnológico de Monterrey*, México

Mtro. Jorge Luis Pérez Ramos, *Universidad Autónoma de Querétaro*, México

Dra. Ana Marcela Herrera Navarro, *Universidad Autónoma de Querétaro*, México

Mtro. José Felipe Arzate Rivas, *Centro de Investigación y Estudios Avanzados del
Instituto Politécnico Nacional*, México

Dr. Cuauhtémoc Sandoval Sánchez, *Universidad de Guanajuato*, México

Dr. José Alfredo Manzo Preciado, *Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial*,
México

Dr. Leonardo Aurelio Baldenegro Pérez, *Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial*, México

Dr. Alejandro Gómez Hernández, *Universidad Tecnológica de Querétaro*, México

Dr. Enrique Martínez Franco, *Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial*, México

Dr. Tomás Salgado Jiménez, *Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial*, México

Dra. Luz María Cardona Torres, *Instituto Mexicano del Seguro Social / Hospital General Zona 4*, México

Dr. Jorge Aurelio Brizuela Mendoza, *Universidad de Guadalajara*, México

Dr. Leonardo Barriga Rodríguez, *Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial*,
México

Dr. Carlos González Figueredo, *ITESO*, México

Dr. Fernando Israel Gómez Castro, *Universidad de Guanajuato*, México

Mayra M Bañuelos, *Brown University*, Estados Unidos

M. C. Kevin Miramontes Escobedo, *Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial*,
México

M. C. Angélica Gudiño Pereida, *Universidad Politécnica de Querétaro*, México

Mtra. Claudia Figueroa Padilla, *Benemérita Universidad Autónoma de Puebla*,
México

Tabla de contenido

Carta del Comité Editorial.....	8
Sensores inalámbricos: los sentidos digitales del mundo moderno	10
Cuando la Tecnología Enseña: Realidad Aumentada en la Industria 4.0.....	17
IA y Análisis de Datos: Claves para la PyME Mexicana en la Industria 4.0.....	24
Integración de la Inteligencia Artificial en la Formación Humanística de Ingenieros: Hacia una Educación Universitaria Ética y Tecnológicamente Pertinente	29
Alimentando al Mundo del Mañana: La Evolución Tecnológica de la Agricultura	35
Revolución Verde: La transformación de la Agricultura a través de la Mecatrónica	42
¿Es este un buen día para las plantas? Una forma tecnológica simple de revisar el ambiente en cultivos de interior	49
Cómo un sistema inteligente está revolucionando el cultivo de hortalizas de hoja verde a través de la transpiración	57
La Realidad Virtual transformando la Agricultura en la actualidad.....	65
Propuesta de desarrollo de una aplicación digital para su uso como herramienta de apoyo para niños con TDA	70
Neurocontrol: Diademas EEG y su Rol en la I4.0	78
Electromiografía en la Industria 4.0: Una herramienta auxiliar para la salud ocupacional....	85
La nueva cara de la salud impulsada por Six Sigma	91
Matemáticas en la ingeniería para la Industria 5.0: del cálculo automatizado al pensamiento crítico y ético.....	99
Aplicación de la geometría analítica en la planeación de rutas	106
¿Qué es la regresión lineal? Una forma sencilla de entender los mínimos cuadrados	113
Solución de ecuaciones diferenciales ordinarias por colocación ortogonal en microcontrolador PIC.....	122
Creación de una librería en Maple para las matrices de Colocación Ortogonal	129
Programación de un Robot Bípedo de propósito para caminata recta de 150 cm.....	137

Vehículos eléctricos: consumidores de corriente o una opción para salvar el ambiente.....	142
LISN en CD para mediciones EMI conducido en convertidores de potencia de una micro red de CD.....	149
Generador de señales senoidales multinivel basado en amplificadores operacionales: una herramienta didáctica para electrónica de potencia	157
Análisis de simetría térmica en motores.....	169
Metodología para la obtención de la curva esfuerzo-deformación usando el método de elemento finito inverso IFEM con pruebas Small Punch	176
Estudio de la producción de frijol (<i>phaseolus vulgaris l.</i>) en la región del Bajío: un análisis estadístico multivariado.....	186
Fenotipado de plantas de frijol (<i>Phaseolus Vulgaris</i>) usando técnicas de visión por computadora	196
Ceiba Pentandra aplicada a la recuperación de derrame de petróleo	204

Carta del Comité Editorial

La primera Revolución Industrial quedó marcada por la máquina de vapor, lo que continuó con la incorporación de la energía eléctrica y el establecimiento de cadenas de producción, dando un salto a un segundo peldaño dentro de la industria. Posteriormente, con el surgimiento de la electrónica y la creación de las primeras computadoras, se pudieron ir estableciendo mecanismos más complejos hasta poder dar “vida” a grandes dispositivos de manipulación, los robots. Estas máquinas, que marcaron un tercer paso revolucionario, sólo podían ser imaginadas a principios del siglo XX, siendo ejemplo el escritor de ciencia ficción como Karel Čapek al bautizar estas máquinas partiendo del término checo *robota*, que significa trabajo forzado. Hoy en día, la Cuarta Revolución Industrial, denominada Industria 4.0, sigue recurriendo a sistemas computacionales que no sólo cuentan con mayor potencia de cálculo, sino que nos permiten acceder a una cantidad de información inimaginable que sirve para crear máquinas y productos inteligentes interconectados a través de Internet. Como podemos ver, actualmente, no sólo estamos atravesando el crecimiento de la Industria 4.0, sino viviendo la transición a una nueva era donde ya se pretende unir en un ente a la colaboración entre el ser humano y la máquina y/o elementos automatizados con los distintos recursos que nos brinda la digitalización.

Bajo esta línea y con motivo del Primer Congreso Nacional de Divulgación Científica y Tecnológica promovido por la Red de Investigación Nacional Aplicación de las Tecnologías de la Industria 4.0 (Red AT4.0), este número de la revista Enpodishango Na-Tha-Hi tiene el objetivo de exponer y divulgar temas relacionados con el desarrollo de la Industria 4.0. Para esta edición, el equipo de trabajo decidió no limitarse sólo al campo industrial, pues existen otras áreas que se benefician de la tecnología de la Industria 4.0 como son la Salud, la Educación y la Agricultura. Por ello, este número se ha redactado con la intención de exponer una historia partiendo de los desarrollos dentro de la Industria 4.0, seguido de cómo impacta la industria en la educación, la producción de alimentos, la salud y el estudio de fenómenos físicos. Le extendemos un enorme agradecimiento a todos y cada uno de los autores por su participación con el envío de sus trabajos, pues esto nos permite acercarnos más a la población en general con la intención de que conozcan sobre tecnología y ciencia. De igual manera, agradecemos a los representantes de la Red AT4.0 por considerar a nuestra revista

como un aliado para esta labor de divulgación. Finalmente, extendemos un agradecimiento a las autoridades de nuestro Instituto por las facilidades otorgadas para que esta revista siga creciendo, persiguiendo la visión de estar a la mano como un recurso educativo para nuestra sociedad.

Atentamente

Comité Editorial

Enpodishango Na-Tha-Hi: Divulgación Científica en la Región Laja-Bajío



Sensores inalámbricos: los sentidos digitales del mundo moderno

Omar Josué Arzate Rivas *

Tecnológico Nacional de México / IT de
Celaya,
Celaya, Guanajuato, México

Juan José Martínez Nolasco

Tecnológico Nacional de México / IT de
Celaya,
Celaya, Guanajuato, México

Víctor Manuel Sámano Ortega

Tecnológico Nacional de México / IT de
Celaya,
Celaya, Guanajuato, México

Micael Gerardo Bravo Sánchez

Tecnológico Nacional de México / IT de
Celaya,
Celaya, Guanajuato, México

* Autor de correspondencia: d2503064@itcelaya.edu.mx

Resumen: Vivimos rodeados de objetos que "sienten" lo que sucede a su alrededor: desde lámparas que se encienden al detectar movimiento hasta dispositivos que miden la calidad del aire o el consumo de energía. Estos sentidos digitales los proporcionan los sensores inalámbricos, pequeñas herramientas que, como si fueran nuestros propios sentidos, perciben variables como la temperatura, el voltaje o la humedad, y comparten esta información en tiempo real gracias al Internet de las Cosas (IoT). En este artículo, explicamos de forma sencilla cómo funcionan estos sensores, qué partes los componen y cómo se pueden utilizar en la vida diaria. Mostramos también un ejemplo concreto: un sensor que mide el consumo eléctrico de un aire acondicionado y envía los datos a una plataforma digital. Esta tecnología ayuda a tomar mejores decisiones en el hogar, la industria o la investigación, acercándonos a un mundo cada vez más inteligente y conectado.

Palabras clave: energía, Internet de las Cosas, monitoreo, sensores inalámbricos, tecnología.

1. Introducción: lo que debemos saber de inicio

En el mundo moderno, así como los seres humanos usamos nuestros sentidos para percibir el entorno, como la vista, el olfato o el tacto, las máquinas también necesitan formas de “sentir” lo que ocurre a su alrededor. Para lograrlo, emplean sensores: dispositivos que actúan como los sentidos digitales de la tecnología. Dentro de los más comunes encontramos sensores de temperatura, humedad, distancia, etc.

Un sensor es un objeto capaz de detectar acciones o estímulos externos y responder en consecuencia, además de variar una propiedad ante magnitudes físicas o químicas, y transformarlas en variables eléctricas. Existen diferentes tipos de sensores de acuerdo con la variable que se quiera observar (Angles-Angeles, 2019).

El Internet de las Cosas, o IoT por sus siglas en inglés, es una tecnología que permite que objetos cotidianos, como refrigeradores, luces, autos o relojes, se conecten a internet y puedan enviar o recibir información. Esto hace posible que estos dispositivos “piensen” un poco por sí mismos y tomen decisiones simples, gracias a la programación humana, como encenderse cuando detectan algún movimiento o avisarte si necesitan mantenimiento. Gracias al IoT, vivimos en un mundo donde cada vez más aparatos están conectados entre sí, lo que mejora nuestra comodidad, seguridad, salud y también ayuda a las empresas a trabajar de forma más eficiente (Salazar & Silvestre, 2016).

Gracias al Internet de las Cosas, los dispositivos han adquirido la capacidad de comunicarse entre sí y colaborar como nodos dentro de redes de sensores. Esto les permite generar información de mayor calidad y en menor tiempo, en comparación con los sensores tradicionales (Raghavendra, Sivalingam & Znati, 2006).

En este contexto, una de las tecnologías clave que posibilita esta interacción y colaboración entre dispositivos son las redes de sensores inalámbricos. Una red de sensores inalámbricos (WSN, por sus siglas en inglés) se refiere a un grupo de sensores inalámbricos o grupo de nodos de sensado que se encuentran distribuidos. Normalmente, estos sensores inalámbricos constan de cuatro partes fundamentales: microcontrolador, sensor, fuente de poder y conexión a internet (Aakvaag & Frey, 2006). Las redes de sensores inalámbricos son sistemas formados por pequeños dispositivos que detectan lo que pasa a su alrededor, como la temperatura, el movimiento o la humedad. Estos dispositivos, llamados nodos sensores, se comunican entre ellos sin necesidad de cables y envían la información que recogen hasta un punto central conectado a internet. Son muy útiles cuando se necesita vigilar un lugar de

forma constante, especialmente en zonas donde sería difícil instalar sensores con cables. Como consumen poca energía y se pueden colocar en casi cualquier parte, se usan en áreas como la agricultura, la salud, el medio ambiente o la industria. Además, son ideales para trabajar en lugares donde el acceso físico es complicado, ya que pueden seguir funcionando sin que alguien tenga que revisarlos todo el tiempo (Romero Amondaray, Artigas Fuentes & Calderón, 2020).

Así como el cuerpo humano está compuesto por células y órganos que detectan lo que sucede en su entorno, procesan información y se comunican con el cerebro, una red de sensores inalámbricos está formada por nodos que cumplen funciones similares. Cada nodo actúa como una célula sensorial que detecta variables específicas (como temperatura o movimiento) y transmite esta información a un centro de control, que podría considerarse el cerebro del sistema (Romero Amondaray, Artigas Fuentes & Calderón, 2020). Esta analogía ayuda a comprender cómo la interacción entre múltiples nodos sensores permite monitorear ambientes complejos de forma continua y autónoma (Aakvaag & Frey, 2006).

El objetivo de este trabajo es presentar el funcionamiento de un sensor inalámbrico dentro de una red IoT, describiendo su estructura, capacidades y ventajas, así como su aplicación en entornos donde el monitoreo remoto y continuo es crucial.

2. Fundamentos Teóricos: *reglas y principios científicos importantes*

Para construir un sensor inalámbrico de bajo costo, capaz de medir variables de interés de forma remota a través de internet, se requieren cuatro componentes fundamentales, representados en la Figura 1:

1. Microcontrolador: un microchip que ejecuta instrucciones programadas e interpreta señales provenientes de los sensores. Este puede compararse con el cerebro humano, que interpreta la información de los sentidos y envía órdenes al cuerpo.
2. Fuente de energía: esencial para alimentar el sistema. Así como los humanos obtenemos energía de los alimentos para realizar nuestras actividades diarias, este componente permite que el sensor funcione de forma autónoma.
3. Sensor: mide variables físicas del entorno, como temperatura, humedad o energía. En la analogía con el cuerpo humano, este componente representa nuestros sentidos (vista, tacto, olfato, gusto y oído), los cuales nos permiten percibir el mundo exterior.

4. Conexión a internet: permite la transmisión de los datos recolectados a través de una red Wi-Fi. En términos humanos, equivale a la comunicación: es como decir “hace mucho frío” o “esto está caliente” a otra persona.

En la Figura 1, del lado izquierdo se presentan los componentes tecnológicos necesarios para que una máquina "sienta" y comparta información; del lado derecho, se ilustran sus equivalentes en el cuerpo humano.

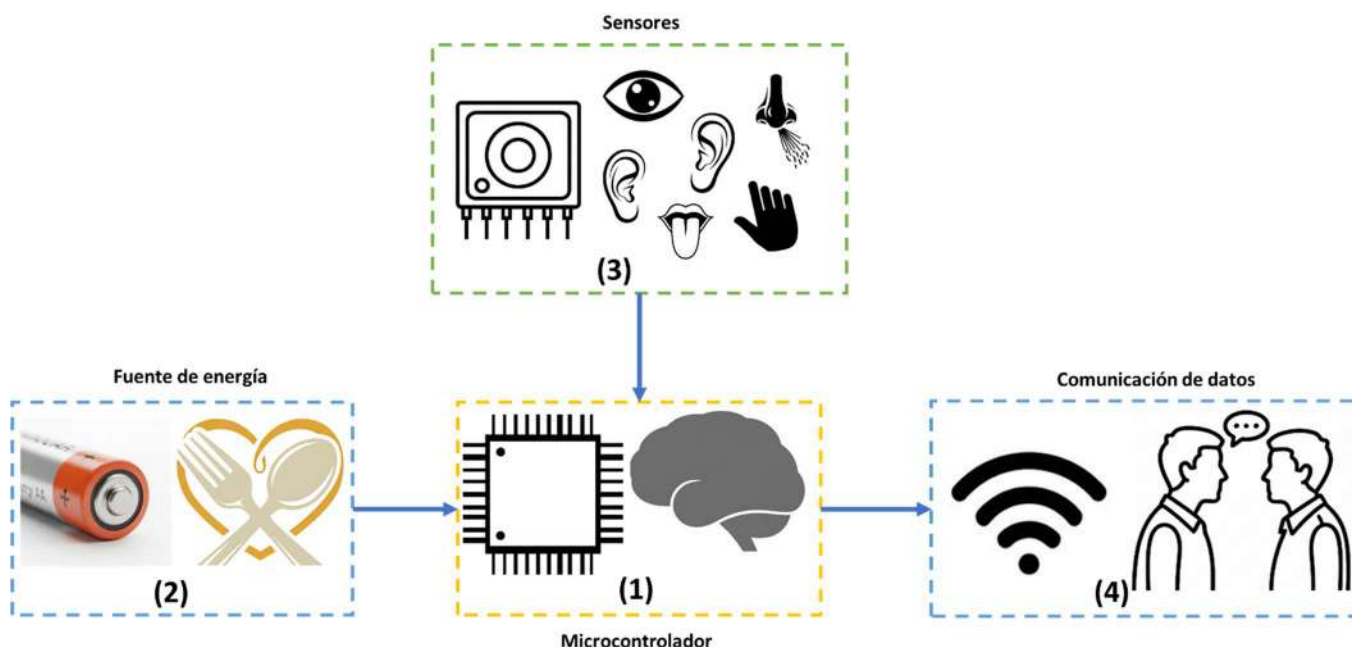


Figura 1 Analogía entre los componentes de un sensor inalámbrico y el cuerpo humano (1) Microcontrolador; (2) Fuente de energía; (3) Sensor; (4) Conexión a Internet.

Obtenida de: elaboración propia.

3. Desarrollo del Trabajo: *aplicando las reglas y principios científicos*

Como se mostró en la Figura 1, se construyó un sensor inalámbrico de bajo costo compuesto por cuatro partes principales. La primera es el microcontrolador (1), un pequeño dispositivo que funciona como el "cerebro" del sistema y que interpreta la información que recibe. Este se alimenta a través de una fuente de energía (2), que proporciona la electricidad necesaria para su funcionamiento. A través de un sensor (3), el dispositivo puede medir distintas variables del entorno, como la electricidad que pasa por un cable. Finalmente, cuenta con

una conexión a internet (4), lo que permite enviar los datos recopilados a otros dispositivos o a la nube, facilitando el monitoreo a distancia.

Una vez que se integraron todos los elementos necesarios del sensor inalámbrico, se procedió a medir el consumo de energía eléctrica de un equipo específico. En este caso, se eligió un aire acondicionado como carga de prueba, con el objetivo de registrar de forma continua cuánta energía consume durante su funcionamiento.

El uso del sensor inalámbrico permitió que la medición se realizara de manera automática y sin necesidad de intervención humana. Para lograrlo, fue necesario programar el dispositivo con un algoritmo repetitivo, de modo que los datos capturados por el sensor pudieran ser enviados de forma constante a la plataforma digital *ThingSpeak*.

ThingSpeak es una herramienta en la nube que almacena, visualiza y procesa datos enviados por sensores. Gracias a esta plataforma, se puede observar en tiempo real lo que los sensores están midiendo, generar gráficos automáticos y acceder a esta información desde cualquier dispositivo móvil con acceso a internet. Así, se facilita la conexión entre el mundo físico y el digital.

Los datos capturados por el sensor son enviados automáticamente a la plataforma *ThingSpeak*, donde son recibidos por una aplicación web. Esta plataforma procesa la información en cuanto llega y genera gráficos en tiempo real de manera automática, sin necesidad de intervención adicional. Por ejemplo, puede mostrar curvas de temperatura, voltaje o consumo energético conforme se actualizan los valores, como se observa en la Figura 2.

Gracias a esta información, podemos darnos cuenta de cómo estamos usando la energía en casa o en algún equipo. Esto nos ayuda a tomar decisiones más inteligentes, como desconectar aparatos que no usamos, ajustar el uso del aire acondicionado o buscar formas de ahorrar electricidad en nuestro día a día.

4. Conclusiones: lo que podemos aprender de este artículo

Así como nuestros sentidos nos ayudan a entender el entorno para actuar con inteligencia, los sensores inalámbricos permiten que los dispositivos “perciban” su alrededor y tomen decisiones útiles. En este trabajo se desarrolló un sensor inalámbrico de bajo costo que demuestra cómo el Internet de las Cosas (abreviado como IoT de las palabras en inglés

Internet of Things) puede utilizarse para monitorear el consumo de electricidad de manera automática. Gracias a plataformas como *ThingSpeak*, es posible ver en tiempo real cuánta energía se está usando, lo que ayuda a las personas a tomar decisiones más conscientes para ahorrar energía o usar mejor sus aparatos eléctricos. Estos sensores, por ser pequeños, económicos y no necesitar cables, se pueden colocar en lugares difíciles de alcanzar y son ideales tanto para el hogar como para industrias. Este ejemplo muestra cómo la tecnología puede actuar como una extensión de nuestros sentidos, ayudándonos a vivir y trabajar de forma más eficiente.



Figura 2 Corriente del aire acondicionado registrada por el sensor inalámbrico, un dispositivo móvil.

Obtenida de: *ThingSpeak.com*

5. Referencias: *por si quieres seguir conociendo más*

- Angeles-Angeles, F. (2019). Sensor. *Con-Ciencia Boletín Científico de la Escuela Preparatoria No. 3*, 6(12), 21-22.
- Salazar, J., & Silvestre, S. (2016). Internet de las cosas. *Techpedia*.
- Raghavendra, C. S., Sivalingam, K. M., & Znati, T. (Eds.). (2006). *Wireless sensor networks*. Springer.
- Aakvaag, N., & Frey, J. E. (2006). Redes de sensores inalámbricos. *Revista ABB*, 2(2006), 39-42.

Romero Amondaray, L., Artigas Fuentes, F. J., & Calderón, C. A. (2020). Redes de Sensores Inalámbricos Definidas por Software: revisión del estado del arte. *Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones*, 41(2), 39-50.



Cuando la Tecnología Enseña: Realidad Aumentada en la Industria

4.0

Juan Manuel Fortuna Cervantes *

Tecnológico Nacional de México / IT de San

Luis Potosí,

San Luis Potosí, San Luis Potosí, México

David Antonio González Gómez

Dive In Learning,

Ciudad de México, México

Elizabeth Rivera Bravo

Tecnológico Nacional de México / IT de San

Luis Potosí,

San Luis Potosí, San Luis Potosí, México

Norma Orocio Castro

Tecnológico Nacional de México / IT de San

Luis Potosí,

San Luis Potosí, San Luis Potosí, México

* Autor de correspondencia: juan.fc@slp.tecnm.mx

Resumen: Este artículo presenta un primer acercamiento sobre el uso de la Realidad Aumentada (RA) con el enfoque a la enseñanza y capacitación técnica dentro del contexto de la Industria 4.0. Se aborda la problemática de los métodos tradicionales de formación y se propone una solución basada en tecnologías disruptivas, capaz de optimizar la retención de conocimiento y reducir errores operativos. A través del desarrollo e implementación de aplicaciones con el uso de herramientas como Unity y Vuforia, se diseñan escenarios interactivos que permiten simular entornos industriales reales para mejorar los procesos de enseñanza y aprendizaje. Por lo tanto, se desarrollan dos aplicaciones, una para el entrenamiento sobre el cambio de llantas y otro para la enseñanza de la robótica industrial. Los resultados obtenidos muestran que el uso de RA no solo facilita una comprensión más profunda de los procedimientos técnicos, sino que también permite una adaptación más eficiente a entornos industriales modernos, marcando un avance significativo hacia entornos de capacitación más inteligentes, inmersivos y accesibles.

Palabras clave: Aprendizaje técnico, industria 4.0, FLANN, ORB, realidad aumentada, SIFT, SURF, Unity, Vuforia.

1. Introducción: *lo que debemos saber de inicio*

En la era de la Industria 4.0, la transformación digital ha impulsado cambios profundos en los procesos productivos, la gestión de datos y, especialmente, en la forma en que las empresas capacitan y desarrollan a su capital humano. Además, las características de la población estudiantil o generación Z, quienes son nativos digitales muestran que los medios tradicionales de enseñanza son de poco interés para esta generación. Tecnologías emergentes como la Realidad Aumentada (RA), la inteligencia artificial y la conectividad del internet de las cosas se consolidan como pilares de esta nueva revolución industrial. La RA, en particular, ofrece una alternativa innovadora a los métodos tradicionales de formación, permitiendo enriquecer la experiencia de aprendizaje mediante la superposición de información digital sobre el entorno físico. Por ejemplo, los centenials han crecido con fuertes conocimientos de robótica recreativa, desde el punto de vista que siempre buscan soluciones innovadoras y es necesario crear aplicaciones para la enseñanza de la robótica industrial que capten mejor su interés. Esta capacidad de generar contextos interactivos, inmersivos y dinámicos resulta especialmente valiosa en entornos industriales donde la comprensión técnica, la seguridad y la eficiencia son prioritarias.

Sin embargo, a pesar de estos avances tecnológicos, muchas empresas o instituciones educativas continúan utilizando estrategias de enseñanza y capacitación convencionales que no logran reproducir de forma realista los desafíos del entorno laboral actual. Esto se traduce en problemas como una curva de aprendizaje prolongada, mayor propensión a errores operativos, y resistencia a la adopción de nuevas tecnologías. La necesidad de entrenamientos más contextualizados, personalizados y eficientes ha llevado a la exploración de soluciones basadas en RA. No obstante, su implementación enfrenta retos importantes: desde la accesibilidad tecnológica hasta el diseño de contenidos adecuados que se integren eficazmente a los sistemas de formación existentes. Ante este escenario, surge la necesidad de analizar cómo integrar de forma efectiva la RA en programas de enseñanza y capacitación técnica, en consonancia con las exigencias de la Industria 4.0.

Diversas investigaciones respaldan el uso de RA en entornos industriales y educativos: en (Brüggemann et al., 2020) exploran su impacto en el mantenimiento inteligente dentro de fábricas automatizadas; y (Chu & Liu, 2023) evalúan su eficacia para la formación de operarios en plantas de producción avanzadas; (Bacca et al., 2014) y (Akçayır & Akçayır, 2017) destacan sus beneficios pedagógicos en contextos educativos y técnicos; también en (Moro et al., 2017) realizan una revisión sistemática sobre su efecto en el aprendizaje en entornos digitales. En este contexto, se propone el desarrollo de una serie de aplicaciones de RA utilizando Unity y Vuforia, integrando algoritmos de visión por computadora y elementos de inteligencia artificial, con el objetivo de diseñar herramientas interactivas para la formación técnica y la simulación de procesos industriales.

2. Fundamentos Teóricos: reglas y principios científicos importantes

En el mundo de la inteligencia artificial, enseñar a una máquina a “ver” implica mucho más que tomar una fotografía. Y en este proceso de enseñanza es necesario identificar los patrones más interesantes de la imagen original como la que se requiere comparar. Por lo que, necesario utilizar herramientas como ORB, un método que encuentra las características más importantes de una imagen. ORB utiliza técnicas matemáticas para seleccionar las partes más representativas y hacerlo a diferentes escalas, como si se viera desde distintas distancias (Rublee et al., 2011). Otros métodos, como SIFT y SURF, permiten analizar imágenes con gran detalle, aunque cambien de tamaño o se vean desde distintos ángulos como establecen (Lowe, 2004) y (Bay et al., 2006).

Si la máquina o el sistema ha logrado identificar las características más representativas en ambas imágenes, el reto siguiente es comparar y encontrar las coincidencias. Es decir, el sistema comienza a buscar qué partes de la imagen son similares a las de la otra. En este caso, para realizar este proceso, se utiliza una herramienta llamada FLANN, ideal para identificar de forma rápida similitudes entre grandes cantidades de datos (Muja & Lowe, 2009). Su principio se basa en la comparación de distancias matemáticas entre los puntos detectados en las dos imágenes (Fischler & Bolles, 1981).

Con la información recolectada, a la imagen que se quiere comparar se le aplica una transformación de ajuste para que alinee a la imagen original, como si ambas formaran parte del mismo entorno. Este proceso es importante para crear lo que es la realidad aumentada,

donde los componentes se superponen a imágenes en tiempo real (vea Figura 1). Así, una máquina no sólo puede reconocer objetos, sino también interactuar con ellos visualmente. La RA en este caso forma parte de los avances en visión artificial, una rama de la inteligencia artificial, el cual trata de replicar la capacidad humana de percibir y comprender el entorno. Con estas técnicas, ahora es posible desarrollar sistemas de entrenamiento, aplicaciones industriales y tecnologías que ayuden a automatizar y comprender procesos complejos mediante el análisis visual. En resumen, estamos enseñando a las máquinas a “ver y a entender lo que ven”.

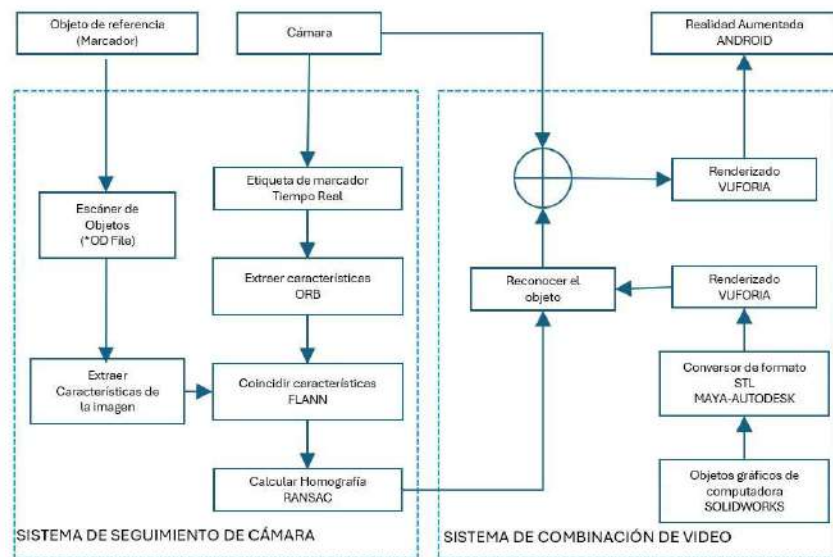


Figura 2 Diagrama del proceso para aplicar la Realidad Aumentada.

Obtenida de: elaboración propia.

3. Desarrollo del Trabajo: *aplicando las reglas y principios científicos*

Dentro de la búsqueda para realizar la implementación del sistema basado en RA, se pueden contemplar dos enfoques tecnológicos, el uso de librerías de código abierto como OpenCV en Python, o el empleo de entornos especializados como Unity y Vuforia. Unity, desarrollado por Unity Technologies, es un motor gráfico versátil y multiplataforma que ha revolucionado la creación de contenido interactivo en 2D y 3D, especialmente en la industria del videojuego. Se acuerdan del juego de AMONG US (“El impostor”), este fue desarrollado en esta multiplataforma para crear y gestionar el videojuego.

Por otro lado, Vuforia es una plataforma robusta para el desarrollo de aplicaciones de RA y Realidad Mixta (RM), que ofrece capacidades avanzadas de seguimiento y un alto rendimiento en diversos dispositivos, desde teléfonos inteligentes hasta visores de RM, como se muestra en la Figura 2. Considerando estas ventajas, se optó por utilizar Unity junto con Vuforia para el desarrollo de aplicaciones demostrativas, lo cual marca el inicio de la fase práctica del presente trabajo. En este caso, a manera de difundir los alcances que la RA tiene en cuanto a la enseñanza y el entrenamiento, se demuestran dos aplicaciones con la capacidad de reproducir videos a partir múltiples marcadores, ver Figuras 3 y 4.



Figura 2 Diagrama del proceso para la creación del App's con RA (OpenCV vs Unity - Vuforia).

Obtenida de: elaboración propia.



Figura 3 La aplicación de entrenamiento permite capacitar de una manera diferente. Ver en <https://youtu.be/jp0INyU-sFw>.

Obtenida de: elaboración propia.



Figura 4 El proyecto de RA permite comprender aplicaciones básicas de la robótica industrial, como el Pick & Place. Ver en <https://www.youtube.com/shorts/XOVdyfwTwVs>.

Obtenida de: elaboración propia.

4. Conclusiones: lo que podemos aprender de este artículo

La importancia de integrar la Realidad Aumentada en la Industria 4.0 permite optimizar recursos de operación, capacitación y de aprendizaje. Por lo tanto, el desarrollo de aplicaciones e integración de estas abre la oportunidad de que el usuario aprenda de una manera diferente a lo tradicional. En este sentido se ha adaptado el uso de Unity - Vuforia para el desarrollo de proyectos con RA. Así mismo, el desarrollo de los casos de éxito que se presentan a manera de divulgación brinda una visión de los alcances que se pueden lograr. Como trabajo futuro es seguir perfeccionando cada escena dentro de Unity, así como buscar nuevas herramientas que permitan mejorar el entorno sobre visores de RA. Además, este enfoque y el diseño del mundo virtual, permitirá diseñar otras aplicaciones que estén enfocadas en áreas de robótica, mantenimiento, gemelos digitales entre otras.

5. Referencias: por si quieres seguir conociendo más

- Akçayır, M., & Akçayır, G. (2017). Advantages and challenges associated with augmented reality for education: A systematic review of the literature. *Educational research review*, 20, 1-11.
- Bacca, J., Baldiris, S., Fabregat, R., & Graf, S. (2014). Augmented reality trends in education: a systematic review of research and applications.
- Bay, H., Tuytelaars, T., & Van Gool, L. (2006). Surf: Speeded up robust features. *Computer Vision–ECCV 2006: 9th European Conference on Computer Vision*, Graz, Austria, May 7-13, 2006. Proceedings, Part I 9,
- Brüggemann, H., Stempin, S., & Meier, J.-M. (2020). Consideration of digitalization for the purpose of resource efficiency in a learning factory. *Procedia Manufacturing*, 45, 140-145. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.085](https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.085)
- Chu, C.-H., & Liu, Y.-L. (2023). Augmented reality user interface design and experimental evaluation for human-robot collaborative assembly. *Journal of Manufacturing Systems*, 68, 313-324.
- Fischler, M. A., & Bolles, R. C. (1981). Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. *Communications of the ACM*, 24(6), 381-395.
- Lowe, G. (2004). Sift-the scale invariant feature transform. *Int. J.*, 2(91-110), 2.
- Moro, C., Štromberga, Z., Raikos, A., & Stirling, A. (2017). The effectiveness of virtual and augmented reality in health sciences and medical anatomy. *Anatomical sciences education*, 10(6), 549-559.
- Muja, M., & Lowe, D. G. (2009). Fast approximate nearest neighbors with automatic algorithm configuration. *VISAPP* (1), 2(331-340), 2.

Rublee, E., Rabaud, V., Konolige, K., & Bradski, G. (2011). ORB: An efficient alternative to SIFT or SURF. *2011 International conference on computer vision*.

IA y Análisis de Datos: Claves para la PyME Mexicana en la Industria

4.0

Jhoan Carlos Hernández González *

*Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya,
Celaya, Guanajuato, México*

* Autor de correspondencia: m2403115@itcelaya.edu.mx

Resumen: La Industria 4.0 impone desafíos complejos a las Pequeñas y Medianas Empresas (PyMEs) mexicanas, incluyendo barreras de recursos, habilidades y tecnológicas. Este artículo explora cómo la Inteligencia Artificial (IA) y el Análisis de Datos como elementos estratégicos para la competitividad de estas empresas. Se analiza su potencial para optimizar decisiones y procesos mediante aplicaciones accesibles y emergentes como gemelos digitales o IA generativa. Se argumenta que la adopción exitosa va más allá de la tecnología, requiriendo abordar factores organizacionales y humanos (cultura, habilidades, aceptación) con un enfoque adaptado al contexto PyME, reconociendo la necesidad de estrategias incrementales y focalizadas para superar obstáculos como la integración con sistemas legados y asegurar un retorno de la inversión. El objetivo es ofrecer una visión clara del rol transformador de estas herramientas para la supervivencia y crecimiento de las PyMEs en el nuevo paradigma industrial.

Palabras clave: *Adopción tecnológica, análisis de datos, competitividad, industria 4.0, inteligencia artificial, PyMEs Mexicanas.*

1. Introducción: lo que debemos saber de inicio

La Industria 4.0, o cuarta revolución industrial, se basa en la digitalización avanzada, la interconexión de sistemas y el uso inteligente de los datos para transformar la producción y los modelos de negocio a escala global. Para las Pequeñas y Medianas Empresas (PyMEs),

que constituyen una parte vital del tejido económico mexicano, adaptarse a este cambio es fundamental para mantener su competitividad y asegurar su crecimiento futuro. Sin embargo, el camino hacia la Industria 4.0 está lleno de obstáculos específicos para ellas. Frecuentemente, las PyMEs operan con recursos limitados, tanto financieros como humanos, y enfrentan una notable brecha en cuanto a conocimientos técnicos y habilidades digitales especializadas (Forbes México, 2023). A esto se suman retos como la necesidad de integrar nuevas soluciones con sistemas tecnológicos antiguos, una conectividad a internet que puede ser deficiente en ciertas zonas (Forbes México, 2023), y una tendencia histórica de baja inversión en tecnologías digitales avanzadas, como lo demuestra el dato de que solo un 23% de las MiPyMEs mexicanas había logrado dar pasos significativos en esta migración hasta 2019 (Forbes México, 2023). En este escenario, gestionar la información de manera eficaz y desarrollar capacidades analíticas deja de ser una simple mejora para convertirse en un factor crítico de éxito. La Inteligencia Artificial (IA) y el Análisis de Datos se presentan como herramientas poderosas para afrontar estos retos, pero su implementación efectiva demanda un enfoque estratégico y adaptado a las particularidades del entorno PyME mexicano (Buenrostro Mercado, 2022).

2. Fundamentos Teóricos: reglas y principios científicos importantes

Para comprender cómo la IA y el Análisis de Datos pueden ayudar a las PyMEs, es útil entender algunos conceptos básicos, explicados aquí de forma sencilla. El Análisis de Datos es el proceso de examinar conjuntos de datos con el fin de sacar conclusiones sobre la información que contienen. Utiliza técnicas y herramientas para encontrar patrones, tendencias y relaciones. Dentro de este campo, el Business Intelligence (BI) se refiere a las tecnologías y estrategias usadas por las empresas para el análisis de datos de información de negocio. Las herramientas de BI, como los dashboards (paneles de control visuales), permiten a las empresas monitorear indicadores clave y entender mejor su desempeño. La Inteligencia Artificial (IA) es un campo más amplio de la informática dedicado a la creación de sistemas que pueden realizar tareas que normalmente requieren inteligencia humana, como el aprendizaje, la resolución de problemas y la toma de decisiones. Una rama importante de la IA es el Aprendizaje Automático (Machine Learning), que permite a los sistemas aprender de los datos sin ser programados explícitamente. Por ejemplo, un sistema

puede aprender a predecir las ventas futuras basándose en datos históricos. Otra área relevante es la IA Generativa, capaz de crear contenido nuevo (texto, imágenes, código) a partir de patrones aprendidos (CIEDO, 2025). Finalmente, la Industria 4.0 se apoya en la integración de estas y otras tecnologías (como el Internet de las Cosas - IoT, la nube, la ciberseguridad) para crear "fábricas inteligentes" donde sistemas físicos y digitales se comunican y colaboran. El objetivo es lograr procesos más eficientes, flexibles y personalizados.

3. Desarrollo del Trabajo: *aplicando las reglas y principios científicos*

La aplicación de IA y Análisis de Datos en PyMEs mexicanas, aunque desafiante, ofrece caminos concretos para mejorar la competitividad. Más allá de los beneficios generales como la optimización de recursos o la mejora en decisiones basada en datos históricos (Business Intelligence), el valor reside en habilitar nuevas capacidades estratégicas. Por ejemplo, el análisis predictivo básico puede ayudar a una PyME a anticipar la demanda de sus productos ajustándose a factores locales, mientras que aplicaciones más avanzadas pueden optimizar el consumo energético o personalizar ofertas para diferentes segmentos de clientes. Explorar aplicaciones emergentes, adaptándolas a la escala PyME, puede marcar una diferencia significativa. La Visión Artificial, un campo de la IA que permite a las computadoras interpretar y comprender información del mundo visual como imágenes y videos, puede automatizar el control de calidad en líneas de producción pequeñas con una inversión inicial amortizable por la reducción de errores (CIEDO, 2025). Los Robots Colaborativos (Cobots), diseñados para interactuar de forma segura con humanos en un entorno de trabajo compartido, pueden asumir tareas repetitivas o ergonómicamente difíciles sin necesidad de rediseñar completamente el espacio de trabajo (Datision Blog, 2024). La IA Generativa, (modelos de IA capaces de crear contenido nuevo como texto, imágenes o código a partir de patrones aprendidos), usada estratégicamente, puede ayudar a crear borradores de contenido de marketing o documentación técnica, liberando tiempo del personal (CIEDO, 2025). El Análisis Prescriptivo, que va un paso más allá de predecir, puede sugerir acciones concretas, como ajustar precios o planificar mantenimientos. Incluso los Gemelos Digitales, definidos como réplicas virtuales de un proceso o sistema físico que

se actualizan con datos en tiempo real, permiten simular mejoras o cambios antes de implementarlos físicamente, reduciendo riesgos y costos (Datision Blog, 2024).

Para ilustrar con un ejemplo práctico, una PyME mexicana del sector agroindustrial podría utilizar análisis de datos para cruzar su historial de ventas con variables climáticas y de temporada. Esto le permitiría predecir con mayor certeza la demanda de productos específicos, como salsas o conservas, optimizando su producción y logística para responder de manera más ágil que competidores de mayor tamaño.

Sin embargo, la implementación tropieza con obstáculos que no son puramente tecnológicos. La calidad de los datos es primordial; sin datos fiables, cualquier análisis será defectuoso. Fomentar una cultura organizacional que valore la toma de decisiones basada en datos es esencial, lo que implica un cambio de mentalidad apoyado desde la dirección y acompañado de capacitación continua para desarrollar las habilidades necesarias en el personal. La aceptación de la tecnología por parte de los empleados es otro factor crítico. Si bien modelos teóricos como TAM o UTAUT explican que la utilidad y facilidad de uso percibidas son importantes, en el contexto PyME de economías emergentes, factores como la presión competitiva, el soporte organizacional real (condiciones facilitadoras) y la percepción de seguridad de los datos pueden ser igualmente o más determinantes. Finalmente, la dificultad para integrar nuevas herramientas con sistemas antiguos (Oracle México, 2023) y las limitaciones de recursos aconsejan un enfoque incremental, comenzando con proyectos piloto bien definidos y escalando progresivamente (CSUSB ScholarWorks, 2021).

4. Conclusiones: *lo que podemos aprender de este artículo*

La adopción de Inteligencia Artificial y Análisis de Datos ha dejado de ser una opción futurista para convertirse en una necesidad estratégica para la supervivencia y el crecimiento de las PyMEs mexicanas en el entorno de la Industria 4.0. Aunque los desafíos relacionados con la inversión, la infraestructura tecnológica preexistente y, sobre todo, la capacitación y adaptación del talento humano son considerables y particulares del contexto nacional, las oportunidades que estas herramientas ofrecen son transformadoras. Permiten no solo optimizar operaciones existentes, sino también explorar modelos de negocio más ágiles, personalizados y eficientes. El camino hacia la transformación digital requiere un

enfoque pragmático y adaptado: comenzar con aplicaciones de impacto claro, priorizar la calidad de los datos, invertir en el desarrollo de habilidades y gestionar activamente el cambio cultural y la aceptación tecnológica. Para las PyMEs dispuestas a emprender este viaje de forma estratégica y gradual, la IA y el Análisis de Datos representan habilitadores claves para fortalecer su resiliencia y asegurar su potencial de crecimiento en un mercado cada vez más digitalizado.

5. Referencias: *por si quieres seguir conociendo más*

- Adebayo, M. (2021). Overcoming the Challenges of Big Data Analytics Adoption for Small and Medium Sized Enterprises in the Manufacturing Industry. *CSUSB ScholarWorks*. <https://scholarworks.lib.csusb.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2373&context=etd>
- Buenrostro Mercado, E. (2022). Propuesta de adopción de tecnologías asociadas a la industria 4.0 en las pymes mexicanas. *Entreciencias: Diálogos en la Sociedad del Conocimiento*, 10(24), 1-18. <https://doi.org/10.22201/enesl.20078064e.2022.24.81347>
- CIEDO. (2025, Abril 17). *Guía completa para integrar inteligencia artificial en la pyme*. <https://ciedo.org/guia-completa-para-integrar-inteligencia-artificial-en-la-pyme/>
- Datision Blog. (2024, 25 de noviembre). *Integración de la Inteligencia Artificial en la Industria 4.0*. *Datision*. <https://datision.com/blog/integracion-de-la-inteligencia-artificial-en-la-industria-4-0/>
- Loredo, D. (2023, 5 de agosto). Estos son los retos de México frente a la cuarta revolución industrial o industria 4.0. *Forbes México*. <https://forbes.com.mx/estos-son-los-retos-de-mexico-frente-a-la-cuarta-revolucion-industrial-o-industria-4-0/>

Integración de la Inteligencia Artificial en la Formación Humanística de Ingenieros: Hacia una Educación Universitaria Ética y Tecnológicamente Pertinente

Adriana Berenice Martínez Tiscareño *

*Universidad Autónoma de San Luis Potosí,
San Luis Potosí, San Luis Potosí, México*

Carlos Alberto Conde Pérez

*Universidad Autónoma de San Luis Potosí,
San Luis Potosí, San Luis Potosí, México*

* Autor de correspondencia: d2403003@itcelaya.edu.mx

Resumen: La Industria 4.0 ha cambiado el entorno laboral mediante tecnologías como la inteligencia artificial (IA), lo que exige nuevas competencias en los profesionales. Ante este reto, la educación superior debe adaptar sus modelos para formar estudiantes con habilidades técnicas, éticas y comunicativas. En la Facultad de Ingeniería de la UASLP, en la asignatura Técnicas de la Comunicación Oral y Escrita, se implementaron actividades que integran la IA como apoyo pedagógico. Los estudiantes utilizaron estas herramientas para buscar información, elaborar presentaciones y diseñar carteles científicos, fomentando así la reflexión crítica y la comunicación efectiva. La actividad culminó en una exposición de carteles de divulgación, donde se evidenció el potencial de la IA para enriquecer el aprendizaje. Se concluye que, al ser bien utilizada, la inteligencia artificial contribuye a una formación más integral, combinando el desarrollo de competencias digitales con una visión ética y humanista.

Palabras clave: Competencias digitales, educación superior, formación profesional, industria 4.0, inteligencia artificial.

1. Introducción: lo que debemos saber de inicio

La Cuarta Revolución Industrial ha impulsado una transformación profunda en los sectores productivos, caracterizada por la automatización, la conectividad digital y el uso de

tecnologías como la inteligencia artificial (IA). Esta nueva realidad demanda que los ingenieros no solo dominen herramientas técnicas avanzadas, sino que también cuenten con competencias transversales como el pensamiento crítico, la creatividad, la colaboración y la conciencia ética (Pérez & López, 2020). En respuesta, las instituciones de educación superior deben repensar sus modelos formativos para integrar enfoques interdisciplinarios y tecnologías emergentes que permitan formar profesionales capaces de liderar con responsabilidad social.

Diversos estudios han señalado que la IA puede ser una herramienta poderosa en el ámbito educativo, especialmente al aplicarse en tareas como la personalización del aprendizaje, la retroalimentación automatizada y la creación de contenidos adaptativos (Gámez & González, 2021; Andone & Dron, 2020). Sin embargo, su uso también plantea desafíos éticos, pedagógicos y sociales, por lo que su integración en la educación universitaria requiere un enfoque crítico y reflexivo.

En el contexto de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP), el área de Formación Humanística en las asignaturas de Técnicas de comunicación oral y escrita ha promovido el uso de la IA en actividades como la búsqueda de información, la elaboración de presentaciones profesionales y la creación de carteles de divulgación científica. Estas prácticas no solo fortalecen las competencias digitales de los estudiantes, sino que también fomentan su participación en la producción de conocimiento y en la reflexión sobre el impacto social de la tecnología (Castillejos López, 2022; Domínguez & Rodríguez, 2019).

Así, el uso didáctico de la IA se convierte en una estrategia educativa clave para articular el conocimiento técnico con la formación ética, preparando a los futuros ingenieros para enfrentar los retos de un entorno complejo, automatizado y en constante cambio, con una perspectiva humanista e inclusiva.

2. Fundamentos Teóricos: reglas y principios científicos importantes

El trabajo se basa en la observación directa del impacto de la Industria 4.0 y la inteligencia artificial (IA) en la educación y formación de ingenieros, utilizando datos reales de la UASLP. Se plantea la hipótesis de que la incorporación de la IA mejora las competencias digitales y humanísticas de los estudiantes. La investigación incluye la aplicación práctica de la IA en

actividades educativas como presentaciones y elaboración de carteles, garantizando la posibilidad de replicar y adaptar estas estrategias en otras asignaturas de la UASLP. Se realiza un análisis crítico que considera tanto los beneficios como los dilemas éticos asociados al uso de la IA, manteniendo objetividad y evitando prejuicios. Finalmente, el estudio reconoce la importancia de la actualización constante, permitiendo que las conclusiones evolucionen con nuevas evidencias y avances tecnológicos. Como se muestra en la Figura 1, con la exposición de carteles por parte del estudiantado.



Figura 1 Exposición de carteles.

Obtenida de: elaboración propia.

3. Desarrollo del Trabajo: *aplicando las reglas y principios científicos*

En el área de Formación Humanística de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP), se diseñó una actividad pedagógica orientada al desarrollo de competencias digitales, comunicativas y éticas mediante el uso de herramientas de inteligencia artificial (IA). Esta experiencia se enfocó en tres fases: búsqueda de información asistida por IA, elaboración de presentaciones profesionales y creación de un cartel de divulgación científica.

1. Búsqueda de información con apoyo de IA: Los estudiantes comenzaron utilizando asistentes de IA, como motores de búsqueda inteligentes y modelos generativos, para explorar temas relacionados con ética profesional, impacto de la tecnología, responsabilidad social en la ingeniería, y dilemas morales de la IA. Esta etapa tuvo el objetivo de promover el pensamiento crítico, evaluar la calidad de las fuentes, identificar sesgos algorítmicos y reflexionar sobre la credibilidad de la información.

Los estudiantes aprendieron a formular preguntas efectivas, a verificar datos obtenidos por IA con fuentes académicas confiables, y a tomar decisiones sobre qué información utilizar, promoviendo una actitud responsable ante el uso de tecnología.

2. Elaboración de presentaciones profesionales: Con la información recolectada, los equipos prepararon presentaciones profesionales utilizando herramientas como PowerPoint, Canva y plataformas asistidas por IA. En esta fase, se enfatizó el desarrollo de habilidades de comunicación oral, síntesis de información, diseño visual, y argumentación ética. Se promovió un diseño visual claro y coherente, el uso de lenguaje técnico apropiado y la integración de elementos visuales generados o sugeridos por IA. Además, se fomentó el trabajo colaborativo, la organización de ideas y la responsabilidad en el uso de contenidos generados con asistencia tecnológica.
3. Elaboración de cartel de divulgación científica: La actividad culminó con la creación de un cartel de divulgación científica, destinado a comunicar, de forma accesible y visualmente atractiva, los aprendizajes obtenidos. Esta producción integró tanto el contenido como el diseño gráfico con el uso de herramientas como Adobe Express, Canva o plataformas con IA generativa para imágenes y esquemas.

El cartel debía responder a un criterio de divulgación: claridad conceptual, atractivo visual, uso ético de fuentes, y capacidad de generar reflexión en un público general. Los estudiantes fueron orientados a presentar temas como: el rol del ingeniero en la era de la IA, dilemas morales en el uso de algoritmos, o la responsabilidad social del desarrollo tecnológico.

La experiencia interdisciplinaria permitió a los estudiantes fortalecer sus competencias digitales, mejorar sus habilidades de comunicación científica, reflexionar críticamente sobre el impacto social y ético de la tecnología, e integrar conocimientos técnicos y humanísticos en productos como carteles y presentaciones. Además, se promovió una actitud ética frente al uso de IA, haciendo énfasis en su carácter complementario al pensamiento humano, no como reemplazo, sino como herramienta de apoyo para la creatividad, el análisis y la divulgación del conocimiento.

4. Conclusiones: lo que podemos aprender de este artículo

Integrar la Inteligencia Artificial (IA) en la educación universitaria, especialmente en carreras como la ingeniería, representa una gran oportunidad para preparar mejor a los estudiantes. No se trata solo de enseñarles a usar nuevas herramientas tecnológicas, sino de ayudarlos a desarrollar habilidades importantes como pensar de forma crítica, comunicarse con claridad, trabajar en equipo y actuar con responsabilidad ética.

La experiencia realizada en la Facultad de Ingeniería de la UASLP demostró que la IA puede ser mucho más que una herramienta: puede convertirse en un apoyo para aprender de manera más creativa, reflexiva y comprometida con la sociedad. Actividades como buscar información, hacer presentaciones o diseñar carteles científicos, permitieron a los estudiantes no solo mejorar sus capacidades digitales, sino también pensar en cómo la tecnología influye en nuestras vidas y qué responsabilidad tenemos al usarla.

Además, al usar la IA de forma responsable, los estudiantes aprendieron a analizar mejor la información, a cuestionar lo que encuentran en línea y a tomar decisiones más informadas. Así, la universidad cumple con su papel de formar profesionales preparados para los retos actuales, no solo por lo que saben hacer, sino también por cómo piensan y actúan frente a los cambios del mundo moderno.

En resumen, esta experiencia muestra que, si se usa bien, la IA puede ser una gran aliada en la educación. No reemplaza al pensamiento humano, pero sí lo complementa, ayudando a formar personas más completas, creativas y conscientes del impacto que pueden tener en su entorno.

5. Referencias: por si quieres seguir conociendo más

- Andone, D., & Dron, J. (2020). Inteligencia artificial en la educación: posibilidades y límites en el contexto universitario. *REDIE: Revista Electrónica de Investigación Educativa*, 22(1), 1–15. <https://doi.org/10.24320/redie.2020.22.e01.2410>
- Castillejos López, B. (2022). Inteligencia artificial y los entornos personales de aprendizaje: atentos al uso adecuado de los recursos tecnológicos de los estudiantes universitarios. *Educación*, 31(60), 9–24. <https://doi.org/10.18800/educacion.202202.001>
- Domínguez, J., & Rodríguez, S. (2019). Ética y tecnología en la formación de ingenieros: desafíos de la educación superior ante la inteligencia artificial. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 20(3), 255–264. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2019.20.3.039>

- Gámez, R., & González, M. (2021). Aplicaciones de la inteligencia artificial en la educación superior: Un enfoque crítico. *Perfiles Educativos*, 43(172), 45–60.
<https://doi.org/10.22201/iisue.24486167e.2021.172.59000>
- Pérez, L., & López, J. (2020). La formación humanística en la ingeniería: Integrando la inteligencia artificial en el currículo. *Revista Digital Universitaria*, 21(3), 1–12.
<https://www.revista.unam.mx/2020v21n3/la-formacion-humanistica-en-la-ingenieria>



Alimentando al Mundo del Mañana: La Evolución Tecnológica de la Agricultura

Cristal Yoselin Moreno Aguilera *

Tecnológico Nacional de México / IT de

Celaya,

Celaya, Guanajuato, México

Juan José Martínez Nolasco

Tecnológico Nacional de México / IT de

Celaya,

Celaya, Guanajuato, México

Raúl Omar Herrera Arroyo

Tecnológico Nacional de México / IT de

Celaya,

Celaya, Guanajuato, México

Ricardo Yáñez López

Tecnológico Nacional de México / IT de Roque,

Celaya, Guanajuato, México

* Autor de correspondencia: d2403003@itcelaya.edu.mx

Resumen: La agricultura moderna ha evolucionado radicalmente, pasando de la siembra manual a la gestión de cultivos mediante dispositivos móviles. Esta transformación ha impactado en la producción, la sociedad y el conocimiento. La agricultura consiste en la transformación de ecosistemas naturales para producir alimentos, siendo fundamental para la seguridad alimentaria. Este artículo presenta una revisión documental de la evolución de la agricultura desde sus inicios hasta la era de los sensores y la Inteligencia Artificial, destacando la importancia de entender los desafíos futuros para una agricultura eficiente y sostenible.

Palabras clave: *Agricultura, evolución, futuro agrícola, historia, transformación digital.*

1. Introducción: lo que debemos saber de inicio

Cuando escuchamos la palabra agricultura, muchas personas aún imaginamos a un campesino arando la tierra con herramientas tradicionales. Sin embargo, esto ha cambiado totalmente con la llegada de la agricultura moderna. Gracias a los avances tecnológicos, hoy

podemos monitorear y controlar el crecimiento de los cultivos desde una aplicación móvil. Desde ahí se pueden regular parámetros de riego, la nutrición de las plantas y las condiciones ambientales, mejorando el proceso y con una precisión que era difícil de imaginar. Pero realmente ¿Cómo pasamos de sembrar manualmente a monitorear y controlar cultivos desde el celular? Esta transformación no solo ha cambiado la forma en que cultivamos, a su vez también cambió la manera en que vivimos, el conocimiento que adquirimos y la organización de la sociedad. Por definición, la agricultura es la modificación de los ecosistemas naturales para transformarlos en agroecosistemas (Sarandón, 2020), asimismo es la base para la producción de alimentos y es fundamental para la seguridad alimentaria (Fan, 2021). En este artículo se hace un recorrido por la evolución de la agricultura, comenzando con las raíces ancestrales hasta la era moderna de sensores y la inteligencia artificial. Actualmente, las tecnologías modernas están marcando la transformación y es importante conocer los desafíos a los que nos enfrentamos en el futuro, entendiendo cuál es la clave para una agricultura más eficiente y sostenible.

2. Fundamentos Teóricos: *reglas y principios científicos importantes*

La agricultura es la base fundamental para el desarrollo humano y ha experimentado transformaciones radicales a lo largo de la historia, adaptándose a las necesidades de la época, a los avances de conocimiento y a los tecnológicos. Desde las prácticas agrícolas rudimentarias hasta la integración de la inteligencia artificial, se han marcado etapas que reflejan no solo los cambios en la producción de los alimentos, sino que también la forma en la que vivimos, trabajamos y como comprendemos nuestro entorno. Es importante comprender que la evolución agrícola se basa en teorías y conceptos de la economía, la sociología, la tecnología y las ciencias agrícolas.

La clave para entender esta evolución es la teoría del cambio tecnológico que presenta el desarrollo y las nuevas tecnologías digitales como motores fundamentales para el crecimiento económico y la transformación social. En este contexto, cada transformación tecnológica agrícola es un avance significativo en la aplicación de nuevos conocimientos y herramientas para producir alimentos (Narwane, 2022). Asimismo, la intensificación agrícola, al centrarse en la sostenibilidad, implica aumentar la producción de alimentos mediante prácticas que disminuyan el impacto ambiental y promuevan el manejo responsable del

suelo y la biodiversidad (Pretty, 2018). Por otro lado, para comprender los factores que influyen en las tecnologías digitales y prácticas sostenibles de los agricultores se adapta la teoría de la adopción de innovaciones, que considera la desigualdad digital y la interpretación del peligro (Dutta, 2023). Finalmente, la teoría de los sistemas socio-técnicos permite analizar la transformación hacia sistemas alimentarios sostenibles, considerando la relación entre la tecnología, la política, el mercado y la práctica social en la agricultura digital y la agricultura ecológica (Markard, 2012).

3. Desarrollo del Trabajo: *aplicando las reglas y principios científicos*

El cambio de la agricultura tradicional a la Agricultura 5.0 visto en la Figura 1, no solo ha aumentado la capacidad para producir alimentos, sino que también ha moldeado la manera en que vivimos, como nos organizamos como sociedad y cómo generamos conocimiento. A lo largo del tiempo se han transformado tres ejes importantes: (1) la forma de producir y cuánto producimos, (2) quienes somos y cómo participamos en este proceso de producción y (3) que conocimientos se generan y cómo podemos transmitirlos.

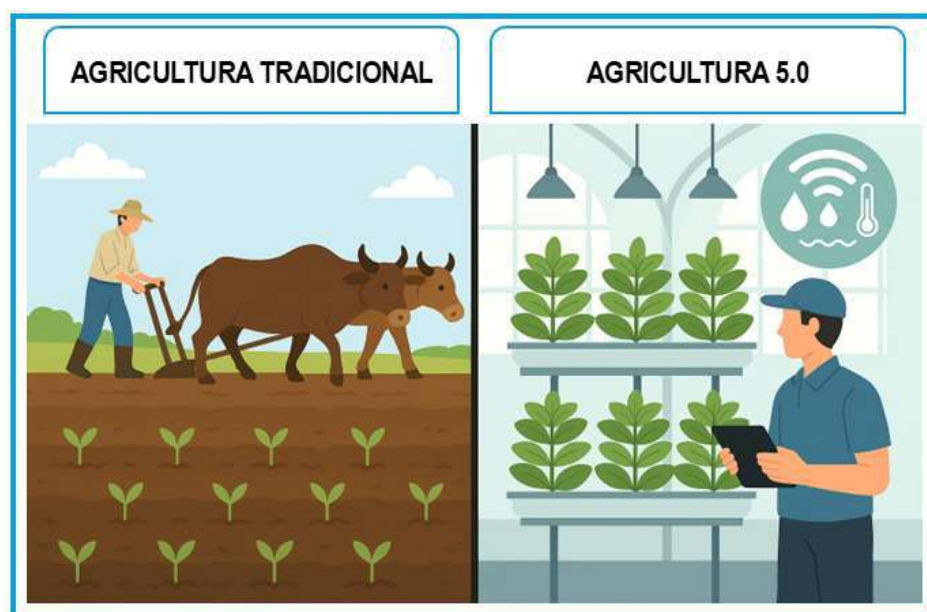


Figura 3 Comparación de agricultura tradicional con la agricultura moderna.

Obtenida de: elaboración propia.

En la agricultura tradicional, por ejemplo, la producción dependía mayormente del esfuerzo físico humano y del conocimiento empírico que se trasmitía entre las generaciones. Un agricultor sembraba, regaba y cosechaba con herramientas simples, basándose en el calendario agrícola heredado de sus antepasados. Esta producción era local, con baja escala y dependía totalmente de los cambios climáticos. En lo social mantenía a las comunidades rurales en movimiento con altos niveles de trabajo físico, sin escolarización y dependiente del entorno natural. Los conocimientos se basaban en la experiencia directa y en conocimientos tradicionales. Actualmente esta agricultura se sigue basando en prácticas heredadas, trabajo manual, con uso limitado de la tecnología, cultivos estacionales y con conocimientos empíricos.

En cambio, la Agricultura 5.0 representa la revolución integrando la inteligencia artificial, robótica, los sensores, análisis de datos y la conectividad en tiempo real. En esta etapa la producción de alimentos se vuelve eficiente, automatizada y precisa. Por ejemplo, un invernadero inteligente puede regular de forma autónoma la temperatura, el pH del agua y la cantidad de luz que reciben las plantas, con la finalidad de maximizar el rendimiento, minimizando el uso de los recursos. En la sociedad, esto transforma los perfiles laborales ya que no se requiere solo la fuerza física, sino capacidades técnicas de programación y análisis de datos. Esto requiere nuevos perfiles de ingenieros, analistas de datos y agrónomos. Los conocimientos se generan y aplican con una ciencia multidisciplinaria que une diferentes ramas como la biología, informática, electrónica y sostenibilidad, igualando el acceso de datos con plataformas digitales.

Los cambios de la agricultura se han visto en cinco etapas importantes como se observa en la Figura 2, marcadas por la innovación y buscando aumentar la producción de alimentos, la eficiencia y la sostenibilidad.

Agricultura 1.0

Esta etapa inicial se caracteriza por la agricultura de autoconsumo, donde el trabajo manual y el trabajo con animales eran las principales fuentes de energía. Las técnicas de cultivo utilizadas eran primitivas, con dependencia de las condiciones climáticas resultando en una productividad relativamente baja (Anguiano, 2022).

Agricultura 2.0

Destaca en esta etapa la Revolución Verde que introdujo semillas de alto potencial, fertilizantes y pesticidas químicos. Además, se inició la mecanización, impulsando potencialmente la producción global de alimentos. Esta modernidad científica y tecnológica ayudó a evitar hambrunas y superar la escasez de alimentos (Cabral, 2022).

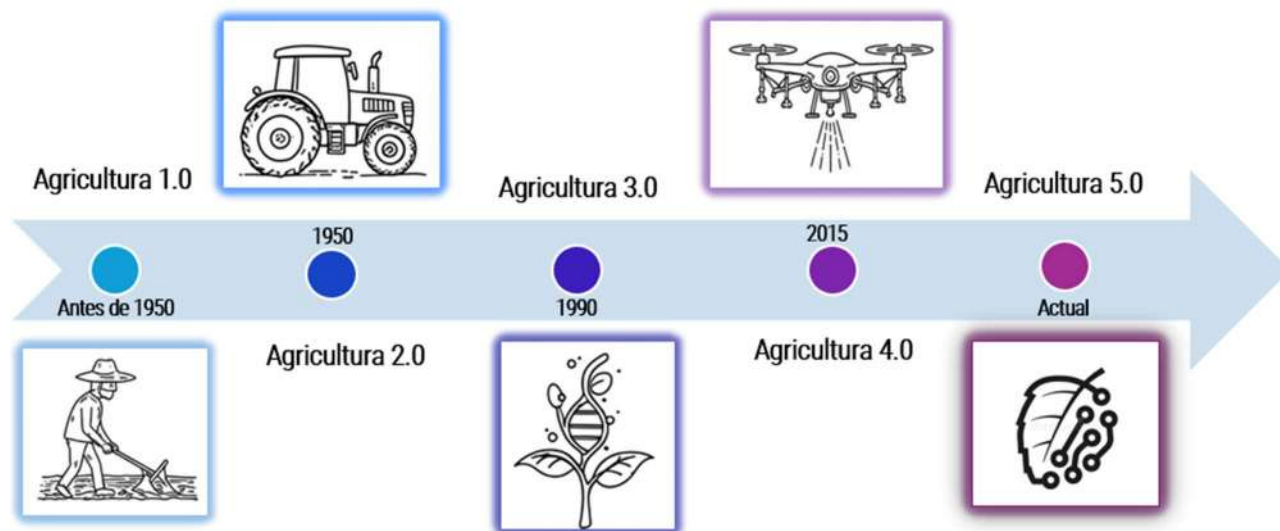


Figura 2 La evolución de la agricultura.

Obtenida de: elaboración propia.

Agricultura 3.0

La llegada de la biotecnología transformó la agricultura con el desarrollo y la adopción de cultivos genéticamente modificados. Esta etapa se destacó por la aplicación de la ingeniería genética para alterar el ADN de las plantas, aportando características de interés agronómicos y nutricionales (Phillips, 2022). Estos resultados genéticos mejoraron los métodos de cultivo convencionales y se lograron productos con resistencia a las plagas y a los herbicidas (Cvejić, 2022).

Agricultura 4.0

La agricultura de precisión surgió con la revolución tecnológica agrícola, esta es una estrategia de gestión que recopila, analiza y procesa datos temporales, combinados con información adicional que respalda las decisiones en los cultivos con la finalidad de mejorar

la eficiencia en el uso de los recursos, la productividad, la calidad, la rentabilidad y la sostenibilidad de la producción de alimentos agrícolas. Esto utilizando sensores, vehículos aéreos no tripulados, recopilación de datos, sistemas de posicionamiento global y análisis de grandes volúmenes de datos (Carrer, 2022).

Agricultura 5.0

La investigación más reciente de la agricultura inteligente en pleno desarrollo se centra profundamente en la aplicación y el potencial de la inteligencia artificial, la robótica, el internet de las cosas (IoT) y la computación en la nube, aplicadas en el cultivo de plantas y el censado remoto en agricultura (Martos, 2021), promoviendo prácticas agrícolas más eficientes y sostenibles. Esta revolución tecnológica fue diseñada para abordar desafíos actuales como el cambio climático, la degradación ambiental y el incremento en la demanda de alimentos (Quintana, 2025).

4. Conclusiones: lo que podemos aprender de este artículo

La agricultura ha experimentado una sorprendente evolución, desde las primitivas técnicas manuales de la Agricultura 1.0 hasta la integración de sensores, inteligencia artificial y cómputo en la nube de la Agricultura 5.0. Esta trayectoria tecnológica, impulsada por la teoría del cambio tecnológico y adaptándose a la necesidad de un aumento sostenible de la producción, ha transformado no solo la producción de alimentos, sino también la estructura social y nuestra perspectiva sobre la producción de alimentos.

La Agricultura 4.0 construyó las bases con la agricultura de precisión y el manejo de grandes datos, allanando el camino para la Agricultura 5.0, donde la autonomía, la conectividad y el análisis predictivo garantizan una nueva etapa de eficiencia y sostenibilidad.

A pesar de que cada etapa ha presentado sus propios cambios y desafíos, la tendencia actual destaca un futuro donde la tecnología es una herramienta indispensable para lograr una agricultura más productiva, resiliente y ambientalmente responsable, mitigando así la creciente demanda de alimentos de una población mundial que se encuentra en constante aumento.

5. Referencias: *por si quieres seguir conociendo más*

- Anguiano, G. F.-H. (2022). Revisión conceptual e histórica de las prácticas de agricultura urbana. En Transformar el territorio en un contexto de cambio climático. *El trabajo universitario como base para el cambio* (p. 73).
- Cabral, L. P. (2022). Epic narratives of the green revolution in Brazil, China, and India. *Agriculture and Human Values*, 39(1), 249-267.
- Carrer, M. J. (2022). Precision agriculture adoption and technical efficiency: An analysis of sugarcane farms in Brazil. *Technological Forecasting and Social Change*, 177, 121510.
- Cvejić, S. J. (2022). Innovative approaches in the breeding of climate-resilient crops. En *Climate Change and Agriculture: Perspectives, Sustainability and Resilience* (pp. 111-156).
- Dutta, S. B. (2023). *Transforming Agriculture and Securing Food Using Digital Technologies: Past Evolution, Present Practices and Challenges, and Future Perspectives*.
- Fan, S. T. (2021). Food system resilience and COVID-19—Lessons from the Asian experience. *Global Food Security*, 28, 100501.
- Markard, J. R. (2012). Sustainability transitions: An emerging field of research and its prospects. *Research Policy*, 41(6), 955-967.
- Martos, V. A. (2021). Ensuring agricultural sustainability through remote sensing in the era of agriculture 5.0. *Applied Sciences*, 11(13), 5911.
- Narwane, V. G. (2022). Deciphering the challenges of IoT adoption in the Indian agricultural and food supply chain. *Smart Agricultural Technology*, 2, 100035.
- Phillips, P. W. (2022). *A meta-analysis of GM crops regulatory approval costs*.
- Pretty, J. B. (2018). Global assessment of agricultural system redesign for sustainable intensification. *Nature Sustainability*, 1(8), 441-446.
- Quintana, A. L. (2025). Integración de tecnologías de Agricultura 5.0 en la educación superior: Un enfoque hacia la sostenibilidad agropecuaria. *Journal of Science and Research*, 10(1), 142-154.
- Sarandón, S. J. (2020). *El papel de la agricultura*. Friedrich Ebert Stiftung, 47.



Revolución Verde: La transformación de la Agricultura a través de la Mecatrónica

Raúl Omar Herrera Arroyo *

*Tecnológico Nacional de México / IT de
Celaya,
Celaya, Guanajuato, México*

Juan José Martínez Nolasco

*Tecnológico Nacional de México / IT de
Celaya,
Celaya, Guanajuato, México*

Coral Martínez Nolasco

*Tecnológico Nacional de México / IT de
Celaya,
Celaya, Guanajuato, México*

Cristal Yoselin Moreno Aguilera

*Tecnológico Nacional de México / IT de
Celaya,
Celaya, Guanajuato, México*

* Autor de correspondencia: m2303045@itcelaya.edu.mx

Resumen: La integración de la mecatrónica en la agricultura está revolucionando la producción de alimentos al combinar ingeniería mecánica, electrónica, informática y sistemas de control. Este artículo describe cómo tecnologías como sensores, drones, vehículos autónomos, robots, fábricas de plantas y gemelos digitales están transformando la agricultura. Estas tecnologías permiten automatizar la forma en la que se cultivan los alimentos, teniendo un mejor uso de recursos y mejorando la toma de decisiones, contribuyendo a una producción más eficiente y respetuosa con el medio ambiente. El uso de estas tecnologías promete hacer la agricultura más adaptable a las necesidades que surjan en un futuro, sin embargo, aún hay obstáculos que enfrentar como los altos costos y la necesidad de capacitar a las personas.

Palabras clave: Agricultura 4.0, automatización, mecatrónica agrícola, sensores y robótica en cultivos.

1. Introducción: *lo que debemos saber de inicio*

La necesidad de aumentar la producción de alimentos de manera sostenible, debido al aumento de la población y el cambio climático, ha impulsado la búsqueda de soluciones tecnológicas en la agricultura. La mecatrónica es la combinación entre la ingeniería mecánica, electrónica, informática y sistemas de control (Baque et al, 2022). Esta rama de la ingeniería permite desarrollar sistemas capaces de automatizar tareas agrícolas, mejorando la productividad, reduciendo costos, minimizando el impacto ambiental y facilitando el trabajo a los agricultores (González & Ortiz, 2021; González, Aponte & Solaque, 2015). Este artículo muestra un pequeño recorrido histórico de cómo la mecatrónica ha influido en la agricultura, además de describir las principales aplicaciones agrícolas de esta rama de la ingeniería y los beneficios que estos tienen.

2. Fundamentos Teóricos: *reglas y principios científicos importantes*

La mecatrónica debe entenderse como una disciplina integrada que combina la mecánica, electrónica, informática y los sistemas de control. Esta fusión permite desarrollar soluciones capaces de automatizar procesos, recolectar e interpretar datos en tiempo real y tomar decisiones de manera autónoma y eficiente. Este tipo de soluciones aplicadas a la agricultura tradicional, la ha transformado en lo que se conoce como agricultura inteligente o agricultura 4.0 (Espinosa et al, 2021).

La aplicación de la mecatrónica en la agricultura se divide en tres etapas a lo largo del tiempo, como se observa en la Figura 1 (Negrete, 2018):

- Mecanización básica (siglo XIX – XX): En esta fase la agricultura experimentó un cambio muy grande en la forma en la que, hasta en ese momento, se realizaba, esto debido a la introducción de máquinas como tractores y sembradores mecánicos, sustituyendo al trabajo manual y animal, permitiendo cubrir mayores extensiones de terreno, aumentando la productividad.
- Automatización parcial (décadas 1980 – 2010): Durante estos 30 años, se introdujo el uso de componentes electrónicos como sensores de temperatura, humedad, iluminación, temporizadores, etc. Permitiendo automatizar algunas tareas como el riego programado en base al tiempo.

- Autonomía inteligente (2010 – actualidad): Actualmente, la agricultura se encuentra inmersa en una etapa de transformación digital. El uso de inteligencia artificial (IA), internet de las cosas (IoT), análisis de datos, robótica avanzada, etc. Permiten el diseño de sistemas agrícolas inteligentes capaces de adaptarse a los entornos mediante al análisis continuo de información. Equipos como drones, tractores autónomos, estaciones meteorológicas, monitoreo por satélite, etc. Sirven para tomar decisiones personalizadas a las condiciones de cada parcela.



Figura 4 Evolución tecnológica en la agricultura.

Obtenida de: elaboración propia.

3. Desarrollo del Trabajo: *aplicando las reglas y principios científicos*

La combinación de la ingeniería mecatrónica con la agricultura ha traído muchas aplicaciones prácticas que están cambiando la manera en la que se siembra, cuida y se protege lo que se cosecha. Estas novedosas tecnologías son de gran ayuda para aprovechar mejor los recursos, que los productos sean de mejor calidad, enfrentar de mejor manera los problemas del medio ambiente y producir más alimentos de una manera más efectiva. A continuación, se muestran algunas de las aplicaciones más significativas de la mecatrónica en la agricultura.

3.1 Sensores y agricultura de precisión

En la agricultura de precisión, el terreno de cultivo se divide en diferentes secciones, cada una se maneja según lo que necesita específicamente (Ríos, 2021). Para hacer esto, se utilizan diversos sensores para medir las variables como temperatura, humedad, pH, etc. Esta información es procesada por computadoras y algunos expertos para saber en qué

secciones hay que regar y fertilizar, evitando malgastar recursos donde no se necesitan (Agrotech, 2024). Por ejemplo, si el terreno en una sección está sumamente seco, pero contiene suficientes nutrientes, solo se le coloca agua sin fertilizante evitando gastar recursos de más.

3.2 Drones agrícolas y vehículos autónomos

Los vehículos aéreos no tripulados o drones se han vuelto muy importantes para vigilar los cultivos desde el cielo. Estos dispositivos cuentan con cámaras para observar diferentes aspectos como temperatura, enfermedades de las plantas, falta de agua, presencia de plagas, etc. Estas aeronaves vuelan sobre grandes extensiones de terreno en poco tiempo, recolectando información y tomando las fotos suficientes para analizar y decidir qué hacer en el campo (FAO, 2020).

Por otro lado, los vehículos autónomos como tractores y sembradores con navegación por GPS permiten hacer diversas labores como la siembra, fertilización y fumigación con mucha precisión sin necesidad de intervención humana. Estos sistemas reducen el error y el desperdicio a la hora de aplicar los recursos, trabajando más eficientemente, sobre todo en campos grandes (Hernández et al, 2023).

3.3 Robótica agrícola

Una de las áreas más avanzadas de la mecatrónica aplicada a la agricultura es la robótica en la cosecha. En cultivos especializados como fresa, tomate, arándano y pimiento, se han desarrollado robots que utilizan visión artificial y aprendizaje automático para identificar la madurez óptima de los frutos y recolectarlos, evitando daños tanto en el producto como en la planta (Ferreira González, 2023).

De la misma manera, también existen brazos robóticos diseñados para clasificar por tamaño, color o peso, el empaque automatizado y el transporte de las plantas cosechadas. Estas soluciones no solo aumentan la velocidad de los procesos, sino que también aseguran que los productos sean tratados de manera adecuada (Robotnik, 2022).

3.4 Fábricas de plantas

Las fábricas de plantas son lugares cerrados donde se cultivan plantas de manera vertical haciendo uso de técnicas de cultivo sin suelo como hidroponía. En estos lugares en vez de

utilizar la luz del sol, se utilizan luces LED especializadas y sistemas que controlan las condiciones ambientales como la temperatura y la humedad. Estas instalaciones, al no necesitar del clima exterior, permiten producir alimentos todo el año, con un mejor uso del agua y la energía (Guillén, Sarmiento, & Martínez, 2024). Este tipo de lugares son de suma importancia en lugares donde el espacio para cultivar es escaso, también, se considera una solución sostenible ya que se reduce el uso de recursos como agua (Castellanos, Castellanos, Gómez & Pérez, 2024).

3.5 Gemelos Digitales

Los gemelos digitales son replicas computarizadas de sistemas reales que permiten simular, predecir y mejorar algunos procesos en tiempo real. En la agricultura, estos modelos por computadora recolectan datos de diversos sensores, estaciones climáticas, imágenes por satélite y algunos otros parámetros de las plantas para simular el comportamiento de una parcela (Ariesen-Verschuur, Verdouw, & Tekinerdogan, 2022). Los gemelos digitales en agricultura permiten predecir cómo será la cosecha, ajustar las estrategias de cultivo y adaptarse mejor a cualquier cambio que ocurra (Peladarinos et al., 2023). Por ejemplo, un gemelo digital puede simular el desarrollo de un cultivo con diferentes riegos, fertilizaciones, épocas del año, etc. Ayudando a tomar decisiones sin poner el riesgo un cultivo real.

4. Conclusiones: lo que podemos aprender de este artículo

La mecatrónica en la agricultura está cambiando la forma en la que se cultivan los alimentos. Utilizar sensores, drones, vehículos autónomos y robots especializados hace que sea más eficiente el uso de recursos, permitiendo una agricultura basada en los datos recopilados. Estas tecnologías ya son utilizadas actualmente, teniendo un potencial enorme para asegurar que todos tengamos los alimentos suficientes para vivir.

Además, innovaciones como las fábricas de plantas son nuevas formas de producir alimentos en ambientes controlados y con poco terreno, también los gemelos digitales son de gran ayuda, pudiendo probar nuevas estrategias para cultivar sin necesidad de afectar plantas reales. Sin embargo, todavía hay desafíos que afrontar, como los altos costos iniciales y la capacitación a las personas que utilizaran los dispositivos. Superar estos obstáculos será clave para hacer que la agricultura inteligente sea accesible para todos.

5. Referencias: *por si quieres seguir conociendo más*

- Agrotech Campus. (2024). *Captación de datos con sensores en agricultura*. Recuperado el 6 de mayo de 2025, de <https://agrotechcampus.com/blog/captacion-de-datos-con-sensores-en-agricultura/>
- Ariesen-Verschuur, N., Verdouw, C., & Tekinerdogan, B. (2022). Digital twins in greenhouse horticulture: A review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 199, 107183. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107183>
- Baque Castro, B. I., Marcillo Parrales, K. G., Cedeño Ferrín, J. A., & Gutiérrez García, J. L. (2022). La mecatrónica y su importancia en la sociedad. *Journal TechInnovation*, 1(1), 46–54. <https://doi.org/10.47230/Journal.TechInnovation.v1.n1.2022.46-54>
- Castellanos Serrano, L. T., Castellanos Suárez, J. A., Gómez Águila, M. V., & Pérez Vivar, M. A. (2024). Revolucionando la producción de alimentos: análisis de los sistemas de fábricas de plantas: Plant Factory Systems: The food production revolution. *E-CUCBA*, (23), 82–89. <https://doi.org/10.32870/e-cucba.vi23.362>
- Espinosa, A., Ponte, D., Gibeaux, S., & González, C. (2021). Estudio de Sistemas IoT Aplicados a la Agricultura Inteligente. *Revista Plus Economía*, 9(1), 33–42. Recuperado de <https://revistas.unachi.ac.pa/index.php/pluseconomia/article/view/479>
- González, D. S., Aponte, J. A., & Solaque, L. E. (2015). Integración de la mecatrónica al desarrollo de la agricultura de precisión aplicada al control mecánico de maleza. *Revista EIA, Memorias*. <https://revistas.eia.edu.co/index.php/mem/article/view/842>
- González, M., & Ortiz, L. (2021). Introducción a la mecatrónica agrícola. *Revista Ingeniería y Tecnología Rural*, 12(1), 15–28.
- Guillén P., V. M., Sarmiento, A., & Martínez-Herrera, O. E. (2024). Características y comparación de los sistemas de producción agrícola en campo, invernaderos y recintos de ambiente controlado con iluminación artificial (PFAL). *PRISMA Tecnológico*, 15(1), 1–9. <https://doi.org/10.33412/pri.v15.1.2859>
- Negrete, J. C. R. (2018). *Introducción al estudio de mecatrónica agrícola: Mecatrónica agrícola en México*. Editorial Académica Española.
- Peladarinos, N., Piromalis, D., Cheimaras, V., Tserepas, E., Munteanu, R. A., & Papageorgas, P. (2023). Enhancing smart agriculture by implementing digital twins: A comprehensive review. *Sensors*, 23(16), 7128. <https://doi.org/10.3390/s23167128>

Ríos Hernández, R. (2021). La agricultura de precisión. Una necesidad actual. *Revista Ingeniería Agrícola*, 11(1), e10. Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola.
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=586269368010>

Robotnik. (2022). *Aplicaciones de la robótica en la agricultura*. Obtenido de <https://robotnik.eu/es/aplicaciones-de-la-robotica-en-la-agricultura/>



¿Es este un buen día para las plantas? Una forma tecnológica simple de revisar el ambiente en cultivos de interior

Coral Martínez Nolasco

*Tecnológico Nacional de México / IT de
Celaya,
Celaya, Guanajuato, México*

Juan José Martínez Nolasco

*Tecnológico Nacional de México / IT de
Celaya,
Celaya, Guanajuato, México*

José Guadalupe Zavala Villalpando

*Tecnológico Nacional de México / IT de
Celaya,
Celaya, Guanajuato, México*

Armando Figueroa Martínez *

*Tecnológico Nacional de México / IT de Roque,
Celaya, Guanajuato, México*

* Autor de correspondencia: m2403011@itcelaya.edu.mx

Resumen: Este trabajo se pregunta si es posible saber si un lugar es bueno para que crezcan las plantas solo observando los datos del ambiente. Para responderlo, se desarrollaron tres herramientas sencillas usando información real de un cultivo hidropónico de acelga, donde se controlaron variables como la temperatura, la luz, la humedad y el dióxido de carbono (CO₂). Con estos datos se crearon indicadores que permiten clasificar los días como buenos, aceptables o poco favorables para el crecimiento de las plantas. La idea es que tanto productores como estudiantes e investigadores puedan usar esta información para tomar mejores decisiones, cuidar recursos como la luz y la electricidad, y acercarse de manera práctica al conocimiento sobre el ambiente y los cultivos.

Palabras clave: Ambiente de cultivo, cámara de crecimiento, eficiencia ambiental, iluminación, sensores.

1. Introducción: *lo que debemos saber de inicio*

En ciertos experimentos o cultivos se emplean cámaras de crecimiento, espacios controlados donde se regulan factores como la luz, temperatura, humedad y dióxido de carbono, para favorecer el desarrollo óptimo de las plantas mediante la fotosíntesis. Para asegurar el buen funcionamiento de las cámaras de crecimiento se utilizan sensores que registran variables como temperatura, iluminación, humedad y CO₂. Sin embargo, el verdadero desafío es interpretar esos datos y determinar si las condiciones son favorables para las plantas, lo que requiere herramientas que transformen los datos en información útil, dotando a la cámara de una especie de "cerebro". La evaluación del ambiente durante el cultivo comienza con la recolección de datos de iluminación, temperatura, humedad relativa y CO₂ a lo largo de un mes. Posteriormente, se aplica la fórmula de Grados Día de Crecimiento (GDD), una herramienta que permite determinar si las plantas recibieron suficiente "calor útil" para desarrollarse. Este cálculo promedia la temperatura máxima y mínima diaria, restando una temperatura base (en este caso, 5 °C), que marca el umbral a partir del cual las acelgas dejan de crecer. El calor no es el único factor que influye en el crecimiento de las plantas; también es fundamental contar con suficiente iluminación en el momento adecuado. Para evaluar esto, utilizamos un indicador llamado Eficiencia Ambiental, que determina el porcentaje del día en el que se mantuvieron simultáneamente condiciones óptimas de iluminación y temperatura. Es similar a la hora de comer: no basta con tener comida, también es importante contar con un espacio cómodo, ni demasiado frío ni a oscuras. Finalmente, se diseñó un indicador que resume todo eso: el Índice de Calidad de Fotoperiodo (IQF) (fotoperiodo: duración diaria de iluminación que recibe una planta). Este considera tres aspectos: ¿Cuánta iluminación total hubo? (intensidad media), ¿Qué tan estable fue esa iluminación? (variación), ¿Cuánto tiempo se mantuvo la iluminación dentro del rango ideal para las plantas? (entre 200 y 400 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$).

Con estos tres valores —GDD, Eficiencia Ambiental e IQF— se pudo identificar cuáles días fueron realmente buenos para el cultivo, y detectar si hacía falta mejorar la iluminación o la temperatura para tener más días ideales. Con esta propuesta se busca apoyar a investigadores, estudiantes o personas que cultivan plantas en interiores a tomar mejores decisiones sobre sus entornos de cultivo. Al usar indicadores como los GDD, la eficiencia ambiental y el IQF, es posible mejorar las condiciones sin necesidad de medir directamente el crecimiento de la planta. Por ejemplo, es posible reducir el consumo de energía eléctrica

al determinar con precisión el momento y la duración óptimos para encender las lámparas. Además, en caso de que surja alguna enfermedad, el análisis de estos datos permiten descartar causas ambientales y comprender mejor los factores que podrían haber influido en su aparición. Los GDD dan una idea de cuándo una planta ha alcanzado suficiente “madurez térmica” para pasar a la siguiente etapa del cultivo. Es como si la planta cumpliera 18 años... y estuviera lista para sacar su licencia de conducir. Esta propuesta vale la pena porque convierte los datos en información útil. Tener sensores no es suficiente si no se sabe cómo interpretar lo que miden. Estos indicadores permiten transformar simples números en decisiones prácticas para cuidar mejor el entorno del cultivo. También abren la puerta a la automatización. En el futuro es posible tener un sistema inteligente que ajuste la iluminación, la temperatura o el riego de forma automática, como un “asistente virtual” que cuida tus plantas. Con herramientas como estas, no solo se logra ahorrar recursos, sino también entender mejor a las plantas, anticiparse a sus necesidades y actuar a tiempo. Es como pasar de ser un espectador, a convertirse en el médico —o el investigador— que tiene más herramientas para cuidarlas y estudiarlas.

2. Fundamentos Teóricos: reglas y principios científicos importantes

Las plantas requieren condiciones adecuadas para crecer sanas, siendo esenciales factores como la luz, temperatura, humedad relativa y dióxido de carbono (CO_2). La acelga, como muchas otras plantas, pertenece al grupo de las plantas C_3 , lo que significa que realizan el tipo más común de fotosíntesis. Estas plantas forman un compuesto con tres carbonos al capturar CO_2 , y requieren temperaturas moderadas y buena iluminación para funcionar de manera eficiente. Si no reciben suficiente iluminación, no pueden hacer bien la fotosíntesis. La fotosíntesis es el proceso que usan las plantas para producir su propio alimento. Lo hacen tomando la luz del sol, el dióxido de carbono (CO_2) del aire y el agua (H_2O) del suelo. Con esos ingredientes, y gracias a una sustancia verde que tienen en sus hojas llamada clorofila, las plantas crean glucosa (una forma de azúcar que les da energía) y liberan oxígeno al ambiente. Por otra parte, si la temperatura es muy baja, el crecimiento se detiene; y si es demasiado alta, la planta entra en estrés, como cuando los seres humanos necesitan con urgencia un vaso de agua después de correr. El exceso de humedad y el frío pueden provocar enfermedades como los hongos en las plantas. Para evaluar si recibieron el “calor útil”

necesario, se utilizan los Grados Día de Crecimiento (GDD), que se calculan promediando la temperatura máxima y mínima diaria y restando una temperatura base, que indica el valor a partir del cual la planta empieza a crecer. Sumando estos valores día con día, es posible estimar si las condiciones han sido adecuadas para el desarrollo del cultivo. En algunos casos, este valor ayuda a predecir en qué momento una planta puede pasar a otra etapa, o incluso cuándo sería buen momento para cosechar. Es como tener un termómetro del progreso: ni dejar a la planta “sin cobija” (con frío), ni “demasiado tapada” (con exceso de calor). En general, la eficiencia se refiere a qué tanto se aprovechan los recursos. En este caso, se habla de eficiencia ambiental como una medida de cuánto se aprovecha el ambiente durante el día para que las plantas crezcan en condiciones ideales. En las cámaras de crecimiento, donde se consume energía continuamente para mantener condiciones ideales, es crucial evaluar si vale la pena tener el sistema encendido todo el tiempo. Para ello, se calcula el porcentaje del día en que coinciden temperatura adecuada e iluminación óptima para el cultivo de acelga. La Eficiencia Ambiental indica el porcentaje del día en que se cumplen simultáneamente condiciones óptimas de temperatura e iluminación; un valor de 0.5 significa un 50 % de eficiencia. Esta medida revela si el ambiente fue bien aprovechado o si hubo pérdidas. Además, no solo importa la cantidad de luz, sino también su estabilidad y calidad, ya que variaciones bruscas pueden afectar negativamente el desarrollo de las plantas. El Índice de Calidad de Fotoperiodo (IQF) es una herramienta que combina tres aspectos clave, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$IQF = \alpha \cdot PPF \text{ media} - \beta \cdot CV \text{ del PPF} + \gamma \cdot \text{Proporción ideal} \quad (1)$$

- La intensidad promedio de iluminación (PPF media) representa la cantidad total de iluminación útil para la fotosíntesis.
- El coeficiente de variación del PPF (CV) indica qué tan estable fue esa iluminación.
- Y la proporción ideal representa el porcentaje del tiempo diario en que la iluminación estuvo dentro del rango fotosintético óptimo (200–400 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$), donde las plantas C3 trabajan con mayor eficiencia.
-

Al integrar estos tres factores en una sola fórmula, el IQF permite comparar la calidad del ambiente lumínico entre diferentes días. Además, es una herramienta flexible, ya que se puede ajustar o adaptar según el tipo de planta o el objetivo del cultivo.

3. Desarrollo del Trabajo: *aplicando las reglas y principios científicos*

La presente sección describe el desarrollo del trabajo realizado (Ver Figura 1) de manera resumida.

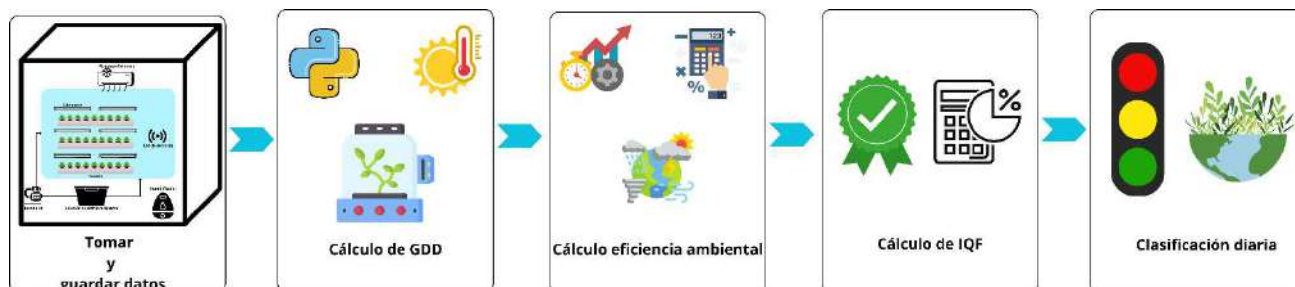


Figura 1 metodología resumida.

Obtenida de: elaboración propia.

Durante un mes completo, del 3 de marzo al 3 de abril de 2025, se recopilaban datos en una cámara de cultivo, un espacio cerrado diseñado para controlar las condiciones óptimas de crecimiento de las plantas. En este estudio, se analizaron cuatro factores clave: la temperatura, la humedad relativa, el dióxido de carbono (CO_2) y la cantidad de iluminación fotosintética, fundamental para su desarrollo.

Los datos se obtuvieron con sensores colocados dentro de la cámara, que registraban las condiciones cada 5 minutos. Luego, se calcularon promedios por hora para analizar con mayor claridad cómo se comportaba el ambiente durante cada día. La información es la base con la que se construyeron tres indicadores que nos ayudaron a entender si el ambiente estaba siendo realmente útil para las plantas.

El primero fue el GDD, que indica si hubo suficiente calor para que las acelgas pudieran crecer. Es como ir sumando los días en los que hizo el clima ideal para que la planta “avance”. El segundo indicador fue la eficiencia ambiental, que muestra qué tanto del día se cumplieron al mismo tiempo dos condiciones: buena temperatura y presencia de iluminación. Si eso pasaba durante muchas horas, considerábamos que había sido un buen día para las plantas. Y, por último, se propone un índice que resume la calidad de la iluminación en cada día: el IQF, o Índice de Calidad de Fotoperiodo. Este indicador combina tres aspectos: cuánta iluminación hubo en promedio, qué tan estable fue esa iluminación durante el día (es decir, si no hubo muchas subidas o bajadas bruscas), y cuánto tiempo la se mantuvo dentro del rango ideal para que la acelga haga fotosíntesis.

Con estos tres valores, dan una idea mucho más clara de cuáles días fueron buenos, aceptables o críticos para el desarrollo de las plantas, sin necesidad de medir partes o datos de las plantas directamente. Además, como el IQF se puede ajustar según el tipo de cultivo, es útil para comparar la calidad de la iluminación entre distintos días o condiciones. Todos los cálculos fueron realizados en Python.

Ya con estos indicadores, se realizaron varios análisis para entender mejor cómo se comportaba el ambiente cada día. Por ejemplo, se tomó el valor más alto de GDD registrado y se usó como base para construir un “escenario ideal”. Eso permitió comparar cuánto desarrollo térmico se podría haber tenido si todos los días hubieran sido tan buenos como ese. Así se puede visualizar claramente el margen de mejora.

Para la eficiencia ambiental y el IQF, se creó una clasificación tipo semáforo, dividiendo los valores en tres rangos iguales: ● Crítico: de 0 a 0.33 ● Aceptable: de 0.34 a 0.66 ● Óptimo: de 0.67 a 1.00

Esto nos ayuda a identificar con facilidad cuáles días ofrecieron condiciones ideales, cuáles fueron funcionales pero mejorables, y cuáles resultaron poco favorables para el cultivo.

Las gráficas generadas (Ver Figura 2 y 3) muestran cómo cambiaron los tres indicadores a lo largo del tiempo, y también cómo se relacionaron entre sí. En especial, se encontró una correlación fuerte ($r \approx 0.90$) entre el IQF y la eficiencia ambiental, lo que confirma que este índice es un buen resumen de la calidad lumínica útil para las plantas.

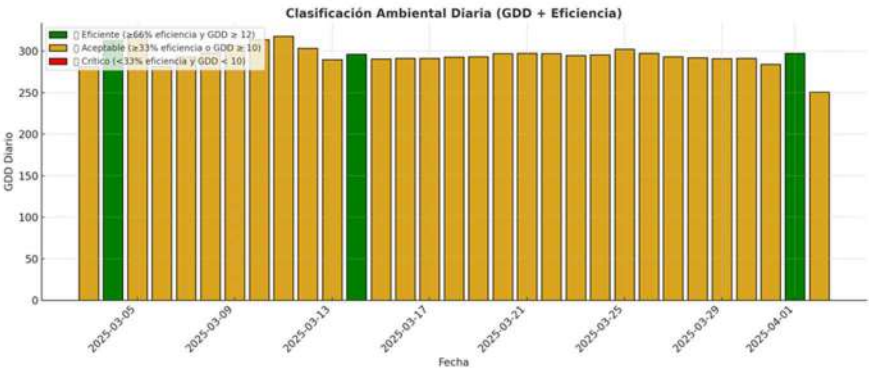


Figura 2 Grafico ejemplificativo De clasificación diaria.

Obtenida de: elaboración propia

Se concluyó que es posible evaluar el ambiente de cultivo mediante modelos simples, sin medir directamente a las plantas. Sensores comunes y cálculos básicos permiten analizar

cantidad y calidad de la iluminación, siempre que se consideren las necesidades específicas del cultivo.

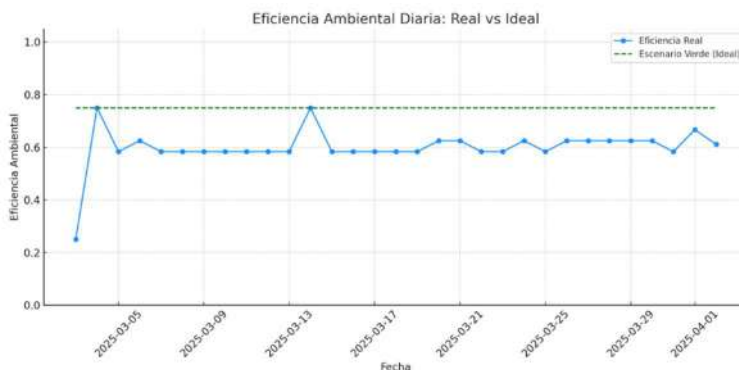


Figura 3 Grafico ejemplificativo De clasificación diaria.

Obtenida de: elaboración propia.

4. Conclusiones: lo que podemos aprender de este artículo

Este trabajo demuestra que no es necesario contar con equipos complejos para evaluar si un ambiente es favorable para el crecimiento vegetal. A través de mediciones básicas y un análisis accesible, se logró identificar condiciones óptimas o críticas en función del calor acumulado (GDD), la eficiencia ambiental diaria y la calidad del fotoperiodo (IQF). Aunque en este estudio no se midieron directamente variables morfológicas del cultivo, la literatura científica respalda que valores elevados de GDD y estabilidad lumínica están correlacionados con un mayor desarrollo foliar en plantas C3 como la acelga (Yamori et al., 2014; Taiz & Zeiger, 2015). Por tanto, los días clasificados como óptimos se pueden asociar hipotéticamente con mejores condiciones de crecimiento, lo que será objeto de futuros estudios. Además, los indicadores propuestos permiten comparar distintos escenarios de cultivo y podrían emplearse para planear estrategias de eficiencia energética, como el encendido automático de lámparas o sistemas de alerta. En el futuro, se espera que estas herramientas se integren en sistemas inteligentes de control ambiental, que no solo reaccionen ante desviaciones, sino que anticipen condiciones desfavorables. En suma, este enfoque propone una forma concreta y replicable de traducir datos ambientales en decisiones prácticas, abriendo la puerta a sistemas automatizados y accesibles para investigadores, docentes o productores que buscan optimizar sus cultivos sin recurrir a tecnologías costosas.

5. Referencias: *por si quieres seguir conociendo más*

- G. S. McMaster and W. W. Wilhelm. (1997). Growing degree-days: One equation, two interpretations. *Agric. For. Meteorol.*, 87(4), 291–300, 1997. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(97\)00027-0](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(97)00027-0)
- G. D. Massa, H. Kim, R. M. Wheeler, and C. A. Mitchell. (2008).)Plant productivity in response to LED lighting. *HortScience*, 43(7), 1951–1956. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.43.7.1951>
- L. Taiz, E. Zeiger, I. M. Møller, and A. Murphy. (2015). *Plant Physiology and Development*, 6th ed. Sunderland, MA, USA: Sinauer Associates.
- N. El Bassam, *Handbook of Bioenergy Crops: A Complete Reference to Species, Development and Applications*. London, U.K.: Earthscan, 2010.
- R. Flores Palacios and E. Martínez Hernández, Eds. (2012). *Requerimientos agroecológicos de cultivos*, 2nd ed. México: INIFAP.
- W. Yamori, K. Hikosaka, and D. A. Way. (2014). Temperature response of photosynthesis in C3, C4, and CAM plants: Temperature acclimation and temperature adaptation. *Photosynth. Res.*, 119 (1–2), 101–117. <https://doi.org/10.1007/s11120-013-9874-6>

Cómo un sistema inteligente está revolucionando el cultivo de hortalizas de hoja verde a través de la transpiración

Luis Alberto López González

*Tecnológico Nacional de México / IT de
Celaya,
Celaya, Guanajuato, México*

Coral Martínez Nolasco *

*Tecnológico Nacional de México / IT de
Celaya,
Celaya, Guanajuato, México*

Juan José Martínez Nolasco

*Tecnológico Nacional de México / IT de
Celaya,
Celaya, Guanajuato, México*

Luis Ramón Sánchez Rico

*Tecnológico Nacional de México / IT de Roque,
Celaya, Guanajuato, México*

* Autor de correspondencia: coral.mn@celaya.tecnm.mx

Resumen: Este artículo presenta un sistema que ayuda a los agricultores a controlar la transpiración ideal de las hortalizas de hoja verde. Usando sensores, un programa inteligente y una pantalla fácil de usar, el sistema mantiene el "Déficit de Presión de Vapor" (VPD) en niveles óptimos que regulan perfectamente cómo las plantas "sudan" o transpiran. En nuestras pruebas con diversos cultivos como espinaca, lechuga y acelga, las plantas crecieron más uniformes, se redujo el desperdicio, se usó menos agua y disminuyeron las enfermedades. Lo mejor es que esta tecnología está al alcance del agricultor.

Palabras clave: *agricultura protegida, hortalizas, inteligencia artificial, sensores, vapor.*

1. Introducción: lo que debemos saber de inicio

Las hortalizas de hoja verde como espinacas, lechugas y diversas variedades de verduras están ganando popularidad por su alto contenido nutricional y su adaptabilidad a sistemas de cultivo protegido. Son relativamente fáciles de cultivar, pero para obtener cosechas

óptimas en calidad y cantidad, los agricultores necesitan mantener condiciones ambientales precisas, algo que tradicionalmente ha sido complicado y costoso.

¿Se han preguntado alguna vez por qué algunas plantas crecen mejor que otras, incluso cuando parecen recibir el mismo cuidado? La respuesta podría estar en el aire que las rodea, específicamente en algo llamado "Déficit de Presión de Vapor" o VPD. Este término puede sonar técnico, pero básicamente describe la "sed" que tiene el aire, es decir, cuánta humedad puede absorber a cierta temperatura (Figura 1).

Para las hortalizas de hoja verde, mantener este valor en un rango ideal (entre 0.4 y 0.8 kilopascales "kPa") puede marcar la diferencia entre cultivos mediocres y extraordinarios. Sin embargo, controlar este valor ha sido históricamente difícil, especialmente para pequeños agricultores que no pueden permitirse sistemas costosos.

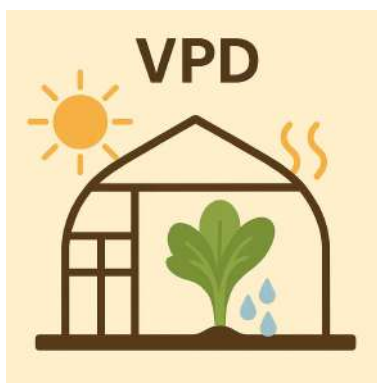


Figura 1. El VPD describe cuánta sed tiene el aire, no la planta. Pero cuanto más sediento esté el aire, más agua le "roba" a la planta.

Obtenida de: elaboración propia.

Como señalan Zhang et al. (2018), Milošević et al. (2012), Garcia-Caparros et al. (2017) e Iwabuchi et al. (1996), en la etapa vegetativa de cultivos similares, el mantenimiento de un VPD entre 0.4 y 0.8 kPa promueve un desarrollo foliar óptimo. Este rango permite un equilibrio ideal entre la transpiración y la absorción de agua, maximizando el crecimiento de las hojas y el contenido de clorofila.

El cultivo de hortalizas de hoja en ambientes protegidos presenta desafíos particulares debido a su sensibilidad a las condiciones ambientales. Un VPD demasiado bajo puede crear condiciones favorables para patógenos fúngicos, mientras que valores excesivamente altos pueden provocar estrés hídrico y reducir la calidad del producto final. El manejo manual de

estos parámetros resulta prácticamente imposible debido a las fluctuaciones constantes y las complejas interacciones entre diferentes variables ambientales.

2. Fundamentos Teóricos: reglas y principios científicos importantes

El Déficit de Presión de Vapor (VPD)

Imaginen que el aire es una esponja: cuando está caliente puede absorber mucha agua, y cuando está fría absorbe menos. El VPD nos dice qué tan "sedienta" está esa esponja, y se mide en una unidad llamada kilopascal (kPa).

Para calcularlo, necesitamos conocer dos valores: cuánta humedad podría contener el aire a cierta temperatura (presión de vapor saturado) y cuánta humedad contiene realmente (presión de vapor actual). La diferencia entre estos dos valores es el VPD. Matemáticamente, lo expresamos así con la ecuación (1):

$$VPD = es(T) - ea \quad (1)$$

Donde:

VPD = Déficit de presión de vapor (kPa) (1)

es(T) = Presión de vapor de saturación a la temperatura del aire T (kPa)

ea = Presión de vapor actual del aire (kPa)

Para las hortalizas de hoja verde, mantener el VPD entre 0.4-0.8 kPa es importante ya que este rango optimiza la absorción de nutrientes y el desarrollo foliar mientras minimiza el riesgo de enfermedades fúngicas. El VPD afecta directamente a la transpiración de las plantas, proceso mediante el cual el agua se evapora de las hojas.

Una tasa de transpiración adecuada es esencial para el transporte de nutrientes y la termorregulación. Cuando el VPD es demasiado bajo, la transpiración se reduce, limitando la absorción de nutrientes y aumentando el riesgo de enfermedades. Por otro lado, un VPD excesivamente alto incrementa la tasa de transpiración, pudiendo provocar estrés hídrico y cierre estomático, lo que afecta negativamente a la fotosíntesis y, consecuentemente, al crecimiento de la planta.

Shamshiri et al. (2018) observaron que cultivos de hoja se presentan un desarrollo óptimo cuando el VPD se mantiene entre 0.4 y 0.8 kPa, con una temperatura ambiental entre 18-

22°C. Estos rangos permiten un equilibrio ideal entre la transpiración y la absorción de agua, maximizando el crecimiento y la calidad del producto final-

Los ojos y oídos: sensores inteligentes

Se instaló en el invernadero pequeños dispositivos (sensores) que funcionan como "ojos y oídos" en el cultivo. Estos sensores miden constantemente la temperatura del aire, la humedad en el ambiente y otros factores ambientales importantes. Estos dispositivos envían lecturas cada determinado tiempo, permitiéndonos tener una imagen detallada y en tiempo real de lo que está ocurriendo en el invernadero.

Aprendizaje Automático aplicado a la agricultura

El Aprendizaje Automático (*Machine Learning*) es una forma de enseñar a las computadoras a tomar decisiones basadas en ejemplos previos, similar a cómo los humanos aprendemos de la experiencia. En nuestro caso, utilizamos un método llamado "Bosque Aleatorio" (*Random Forest Regressor*, abreviado como "RFR"), que funciona como si tuviéramos muchos "jardineros expertos" opinando sobre las condiciones ideales para las plantas, y luego tomáramos una decisión basada en la mayoría de las opiniones.

De acuerdo con Cletus & John (2024), el funcionamiento interno del algoritmo RFR implica varios procesos clave que contribuyen a su eficacia en aplicaciones de agricultura de precisión. Durante la fase de entrenamiento, cada árbol en el "bosque" se construye utilizando un subconjunto aleatorio de los datos originales. Esta diversidad de perspectivas permite al sistema hacer predicciones más precisas sobre el VPD ideal para diferentes condiciones ambientales.

3. Desarrollo del Trabajo: *aplicando las reglas y principios científicos*

El desarrollo del sistema para el control de VPD en cultivos de hoja verde integró diferentes tecnologías y metodologías que se detallan a continuación:

Infraestructura sensorial y de almacenamiento

Se instaló en el invernadero pequeños dispositivos (sensores) que funcionan como "ojos y oídos" en el cultivo. Estos sensores miden constantemente la temperatura del aire, la

humedad en el ambiente y otros factores ambientales importantes. Estos dispositivos envían lecturas cada 5 minutos, permitiendo tener una imagen detallada y en tiempo real de lo que está ocurriendo en el invernadero.

Se implementó una base de datos PostgreSQL (versión 14.3) con una arquitectura modular diseñada para manejar eficientemente los diferentes tipos de datos generados por el sistema. La comunicación entre sensores y la base de datos se realizó mediante scripts en Python utilizando la biblioteca psycopg2, que permite conexiones eficientes a PostgreSQL. Se implementó un sistema de colas para gestionar picos en la recopilación de datos, asegurando que ninguna lectura se pierda incluso durante interrupciones temporales de la conexión.

Sistema inteligente de predicción y recomendación

Toda la información recopilada por los sensores llega a la base de datos, donde entra en juego nuestro "jardinero digital" - el programa de inteligencia artificial RFR. Este programa analiza todos los datos y aprende patrones que le permiten predecir cuál será el VPD basándose en las condiciones actuales, recomendar ajustes para mantener el ambiente ideal y mejorar con el tiempo, aprendiendo de nuevos datos.

El modelo de RFR se implementó en Python 3.9 utilizando scikit-learn 1.2.2. La preparación de datos comenzó con la recopilación de variables ambientales de sensores distribuidos en el invernadero. Estos datos fueron sometidos a un proceso de limpieza para eliminar valores atípicos y completar datos faltantes mediante interpolación lineal.

Un componente clave del sistema es el algoritmo de recomendaciones que genera sugerencias específicas para ajustar las condiciones ambientales actuales (Figura 2). Este algoritmo toma en cuenta no solo las predicciones del modelo RFR, sino también restricciones prácticas como la capacidad de los sistemas de control ambiental y el costo energético de las intervenciones. Las recomendaciones se generan buscando mantener el VPD en el rango óptimo mientras se minimiza el consumo energético.

Interfaz amigable para el agricultor

La interfaz se compone de varios módulos funcionales interconectados. El panel de control principal muestra un resumen en tiempo real de las condiciones actuales del invernadero, destacando el VPD actual y su tendencia reciente. Un sistema de codificación por colores

permite una interpretación rápida del estado del sistema: verde para condiciones óptimas, amarillo para advertencias y rojo para alertas.



Figura 2. Estado, condiciones y recomendaciones actuales para el cultivo.

Obtenida de: elaboración propia.

La sección de gráficos (Figura 3) permite a los usuarios explorar tendencias en diferentes variables a lo largo del tiempo. Los usuarios pueden seleccionar períodos específicos para análisis detallado y exportar datos en formato de Excel para análisis adicionales. El sistema de alertas mantiene a los usuarios informados sobre condiciones que requieren atención inmediata.

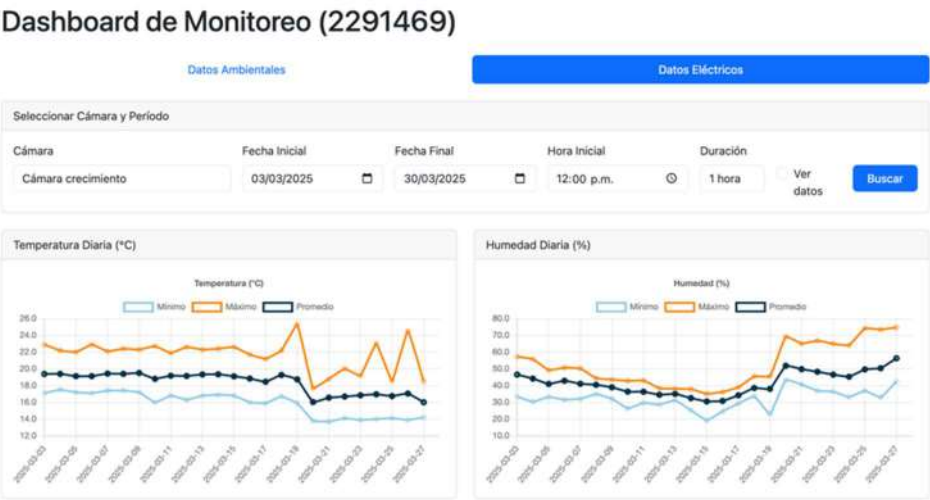


Figura 3. Interfaz de monitoreo de VPD mostrando gráficos de tendencias y alertas.

Obtenida de: elaboración propia.

El módulo de recomendaciones traduce los resultados del modelo RFR en acciones concretas que el agricultor puede implementar. Estas recomendaciones se presentan en lenguaje sencillo y se acompañan de explicaciones breves sobre su fundamento científico, fomentando así el aprendizaje continuo del usuario.

Se probó el sistema en un invernadero experimental durante ciclos completos de cultivo con diferentes hortalizas de hoja verde. Los resultados fueron relevantes en cada caso: las plantas no solo crecieron más uniformes y con mejor apariencia, sino que también se desperdició menos producto, se usó menos agua y disminuyeron significativamente las enfermedades causadas por hongos.

4. Conclusiones: *lo que podemos aprender de este artículo*

El sistema para controlar el VPD en cultivos de hoja verde demuestra que la tecnología avanzada no tiene que ser complicada ni costosa para ser efectiva. Con componentes accesibles y programas de código abierto, creamos una solución que permitió plantas con crecimiento más uniforme y mejor calidad, reducción significativa del desperdicio de producto, ahorro importante en el consumo de agua y disminución de enfermedades causadas por hongos.

Lo más valioso de esta investigación es comprobar que un factor ambiental a menudo ignorado como el VPD puede tener un impacto tan significativo en el desarrollo de las plantas. Además, demostramos que es posible controlar este factor utilizando tecnologías accesibles, poniendo las ventajas de la agricultura de precisión al alcance de agricultores con distintos niveles de recursos.

Lo más importante es que este sistema está al alcance de agricultores con diferentes niveles de recursos y conocimientos técnicos. No es necesario ser un experto en tecnología o tener grandes inversiones para beneficiarse de la agricultura de precisión.

Actualmente estamos trabajando para perfeccionar el sistema, ampliando su aplicación a más variedades de cultivos de hoja y adaptándolo para que funcione incluso sin conexión a internet. Con soluciones como esta, buscamos democratizar el acceso a las técnicas avanzadas de cultivo, permitiendo a más agricultores producir alimentos de mejor calidad, usando menos recursos y cuidando mejor nuestro planeta.

5. Referencias: *por si quieres seguir conociendo más*

- Cletus, F., & John, A. E. (2024). Comparative Analysis Of Machine Learning Models For Greenhouse Microclimate Prediction. *Brilliance: Research of Artificial Intelligence*, 4(1), 162–175. <https://doi.org/10.47709/brilliance.v4i1.3783>
- Iwabuchi, K., Saito, G., Goto, E., & Takakura, T. (1996). EFFECT OF VAPOR PRESSURE DEFICIT ON SPINACH GROWTH UNDER HYPOBARIC CONDITIONS. *Acta Horticulturae*, 440, 60–64. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1996.440.11>
- Milošević, T., Milošević, N., Glišić, I., & Mladenović, J. (2012). Fruit quality attributes of blackberry grown under limited environmental conditions. *Plant, Soil and Environment*, 58(7), 322–327. <https://doi.org/10.17221/33/2012-pse>
- PostgreSQL Global Development Group. (2023). *PostgreSQL Documentation (Version 15)*. Recuperado de <https://www.postgresql.org/docs/>
- Shamshiri, R. R., Jones, J. W., Thorp, K. R., Ahmad, D., Man, H. C., & Taheri, S. (2018). Review of optimum temperature, humidity, and vapour pressure deficit for microclimate evaluation and control in greenhouse cultivation of tomato: A review. *International Agrophysics*, 32(2), pp. 287–302). Walter de Gruyter GmbH. <https://doi.org/10.1515/intag-2017-0005>
- Zhang, X., He, D., Niu, G., Yan, Z., & Song, J. (2018). Effects of environment lighting on the growth, photosynthesis, and quality of hydroponic lettuce in a plant factory. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 11(2), 33–40. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20181102.3420>

La Realidad Virtual transformando la Agricultura en la actualidad

Martín Galindo Jaramillo *

*Tecnológico Nacional de México / IT de
Celaya,
Celaya, Guanajuato, México*

Karla Militza Mendoza Ramos

*Tecnológico Nacional de México / IT de
Celaya,
Celaya, Guanajuato, México*

Genaro Rico Baeza

*Tecnológico Nacional de México / IT de
Celaya,
Celaya, Guanajuato, México*

Micael Gerardo Bravo Sánchez

*Tecnológico Nacional de México / IT de
Celaya,
Celaya, Guanajuato, México*

* Autor de correspondencia: m2403135@itcelaya.edu.mx

Resumen: Este artículo explora cómo la Realidad Virtual (RV) potencia la Agricultura 4.0, transformando datos de sensores y gemelos digitales en experiencias inmersivas que facilitan el monitoreo, la simulación de escenarios y la capacitación práctica. A través de ejemplos reales como creación de fincas virtuales, pruebas con agricultores y estudiantes, y la validación en campo. Se descubrirá cómo la RV permite tomar decisiones más rápidamente, refuerza el aprendizaje y aporta una herramienta accesible para una agricultura más eficiente, rentable y sostenible.

Palabras clave: *Agricultura 4.0, realidad virtual, simulación inmersiva, sostenibilidad.*

1. Introducción: lo que debemos saber de inicio

En los últimos diez años, la Agricultura 4.0 ha pasado de ser un concepto futurista para convertirse en realidad en fincas de todo tamaño. Gracias a la integración de sensores de Internet de las cosas (abreviado como IoT por la abreviatura del inglés *Internet Of the Things*), redes 5G, plataformas que procesan gran cantidad de información y toma de decisiones a través de inteligencia artificial, hoy es posible medir al instante la humedad del suelo, la

sequía del cultivo o el crecimiento de la planta, generar alertas automáticas y coordinar maquinaria autónoma (Smart Farming on the Rise, 2025).

Estas herramientas han impulsado el mercado de la agricultura de precisión a superar los 10,000 millones de dólares en 2024, con un crecimiento anual cercano al 13 % hasta el 2030 (Smart Farming on the Rise, 2025). Para manejar todo ese volumen de datos, se han desplegado gemelos digitales que recrean parcelas completas en 3D, integrando lecturas de sensores, imágenes satelitales y modelos de crecimiento de cultivos (Awais, M. Et al. 2025). Sin embargo, interactuar con la información en pantallas planas limita la percepción espacial y la rapidez de las decisiones. Según Bigonah, Jamshidi y Pant (2025), cerca del 34 % de los estudios sobre realidad extendida en agricultura ya emplea entornos de realidad virtual (RV) inmersiva para monitoreo y capacitación.

En este artículo veremos cómo la RV lleva la Agricultura 4.0 un paso más allá, convirtiendo la avalancha de datos en experiencias inmersivas que facilitan el entendimiento, cuidado, formación y toma de decisiones en el campo.

2. Fundamentos Teóricos: reglas y principios científicos importantes

La realidad virtual (RV) se ha convertido en una herramienta que puede utilizarse para visualizar una gran cantidad y variedad de objetos existentes o inexistentes, a través de la inmersión de los usuarios en entornos digitales tridimensionales por medio de dispositivos especializados como lo son visores o gafas de RV. Un punto clave para entender la realidad virtual es diferenciarla de un entorno virtual. La realidad virtual siempre usa visores o gafas para crear una experiencia totalmente inmersiva. En cambio, un entorno virtual es solo un espacio digital con el que se puede interactuar desde el celular o la computadora, sin necesidad de esa inmersión completa (Ordóñez, J. 2020). Dentro de los entornos virtuales podemos encontrar a los gemelos digitales, los cuales son representaciones virtuales de algún objeto real, el cual se comporta de la misma manera bajo las mismas condiciones (Chicaiza, W. D. et. al. 2024).

El uso de entornos virtuales en la agricultura es un paso importante para el mejoramiento de procesos y aprovechamiento de recursos. Algunos ejemplos de aplicación en específico de la RV en este ámbito son: Los procesos de enseñanza y aprendizaje para poder dar recorridos virtuales sin los riesgos que puede conllevar el ir al lugar en persona, para esto se

utilizan drones que toman los datos del campo que se desea virtualizar (Cuesta, E. 2022), el monitoreo en tiempo real, análisis predictivos de los cultivos y decisiones automatizadas sobre qué proceso se debe realizar para que el cultivo tenga una mejor respuesta, esto utilizando sensores, inteligencia artificial y análisis de datos (Awais, M. Et al. 2025), el desarrollo de simulaciones de cultivos y escenarios para observar el comportamiento que pueden tener los cultivos ante ciertas condiciones, esto desarrollado en el software de Unreal Engine (Lasseur, R. 2023).

3. Desarrollo del Trabajo: *aplicando las reglas y principios científicos*

Awais, M., Khan, M., & cols. en 2025 revisaron más de 160 proyectos, de los cuales estos estudios resultaron relevantes en el uso de la RV:

- Caso 1 “Ahorro de agua en tomate y trigo”: Técnicos y agricultores recrearon parcelas de tomate y trigo en un entorno virtual inmersivo, donde podían “caminar” entre las plantas y ajustar con total precisión los puntos de riego. Gracias a esa experiencia, descubrieron que podían reducir el consumo de agua en un 18 % sin afectar el crecimiento ni la salud de los cultivos, lo que se traduce en menos horas de bomba funcionando, facturas de agua más bajas y un uso más responsable de los recursos hídricos (Awais, Khan, & cols., 2025).
- Caso 2 “Mayor rentabilidad en granja de 400 hectáreas”: En una finca de 400 hectáreas en Nueva Zelanda, un simulador de realidad virtual permitió probar distintas especies de árboles y formas de organización de los cultivos sin salir de la oficina. Al comparar en vivo cuánta carbono capturaban los árboles y los ingresos que generaba cada opción, el agricultor eligió la más rentable y consiguió un 11 % más de ganancia frente a las prácticas tradicionales (Lasseur, et, al. 2023).
- Caso 3 “Reducción del 15 % en aplicaciones de fertilizantes”: En un estudio que combinó RV con inteligencia artificial e IoT, los agricultores ajustaron de forma virtual las dosis de fertilizante en su parcela digital antes de aplicarlas en el campo real. Al probar diferentes escenarios, mantuvieron los mismos rendimientos mientras redujeron el uso de fertilizante en un 15 %, lo que disminuyó costos y la carga química en suelo y agua (Integrating AI and IoT for Sustainable Precision Agriculture, 2024).

Estos ejemplos muestran que la RV no es un lujo, sino una herramienta práctica que ayuda a ahorrar recursos, aumentar ingresos y apoyar la sostenibilidad en la agricultura moderna. Además, la RV resulta muy útil en la formación de estudiantes de agronomía: en lugar de depender solo de clases teóricas o manuales, ofrece prácticas virtuales repetibles y sin consecuencias reales. Por ejemplo, Naudé, Smith y cols. (2024) invitaron a 30 alumnos de agronomía y productores a ponerse el visor y explorar una granja virtual. Allí pudieron caminar entre surcos simulados, detectar zonas con menor humedad y ajustar dosis de fertilizante con un par de clics. Gracias a esa experiencia inmersiva, su retención de conceptos mejoró en 30 puntos porcentuales frente a una clase tradicional. Así, para los estudiantes de agronomía la RV facilita comprender procesos complejos como el manejo de nutrientes y el riego de una forma práctica, reforzando sus habilidades y preparándolos mejor para tomar decisiones en el campo real.

4. Conclusiones: *lo que podemos aprender de este artículo*

En este artículo hemos visto que la Realidad Virtual va más allá de ser una curiosidad tecnológica o una demostración de un videojuego agrícola. Gracias al uso de visores y entornos virtuales, es posible:

- Optimizar el uso de recursos: Al ubicar con exactitud las necesidades hídricas o de nutrientes, la VR guía el riego y la fertilización de forma más responsable, evitando desperdicios y cuidando el medio ambiente.
- Mejorar la rentabilidad: Probar distintos esquemas de cultivo o rotación en el mundo virtual ayuda a escoger la opción más conveniente para el bolsillo del productor, sin poner en riesgo los cultivos reales.
- Fortalecer la formación: Aprender “haciendo” en una granja simulada resulta más dinámico y memorable que solo leer o ver videos, lo que aumenta la confianza y las habilidades prácticas de agricultores y estudiantes.
- Acelerar y afinar la toma de decisiones: La posibilidad de ensayar diferentes escenarios virtualmente reduce la incertidumbre y permite a los usuarios actuar con mayor rapidez y precisión en el campo.

En definitiva, la Realidad Virtual se perfila como una herramienta accesible y útil para hacer la agricultura más eficiente, rentable y sostenible.

5. Referencias: *por si quieres seguir conociendo más*

- Awais, M., Khan, M., & cols. (2025). Advancing Precision Agriculture Through Digital Twins and Smart Farming Technologies: A Review. *AgriEngineering*, 7(5), 137.
- Bigonah, M., Jamshidi, F., & Pant, A. (2025). A systematic review of extended reality (XR) technologies in agriculture and related sectors (2022–2024). *IEEE Access*, 13.
- Chicaiza, W. D., Gómez, J., Sánchez, A. J., & Escaño, J. M. (2024). El Gemelo Digital y su aplicación en la Automática. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, 21(2), 91-115.
- Cuesta, E. A. B. (2022). Uso de realidad virtual en el desarrollo de una agricultura sostenible. *Innovagro*, (1). <https://revistas.sena.edu.co/index.php/INNOVAGRO/article/view/5596/5646>
- Lasseur, R., Laurenson, S., Ali, M., Loh, I., & Mackay, M. (2023). Designing profitable and climate-smart farms using virtual reality. *PLoS One*, 18(6), e0286723.
- Ordóñez, J. L. (2020). Realidad virtual y realidad aumentada. *Revista digital de ACTA*, 6.
- Redmond, R., Sturm, B., Weltzien, C., Fulton, J., Khosla, R., Schirrmann, M., et al. (2024). Digitalization of agriculture for sustainable crop production: A use-case review. *Frontiers in Environmental Science*, 12.
- AgriTech Tomorrow. (2025). *Smart Farming on the Rise: Precision Agriculture Market to Soar with 12.8% CAGR Through 2030*. Recuperado el día 21 de abril de 2025 de <https://www.agritechtomorrow.com/news/2025/04/21/smart-farming-on-the-rise-precision-agriculture-market-to-soar-with-128-cagr-through-2030/16545/>

Propuesta de desarrollo de una aplicación digital para su uso como herramienta de apoyo para niños con TDA

Julio César Ramírez Torres *

*Tecnológico Nacional de México / IT de
Celaya,
Celaya, Guanajuato, México*

Raúl Antonio Muñoz Gutiérrez

*Tecnológico Nacional de México / IT de
Celaya,
Celaya, Guanajuato, México*

Hannia Isabella Graciano Infante

*Universidad Latina de México / Preparatoria,
Celaya, Guanajuato, México*

Norman Traconis Ruiz

*Universidad Latina de México / Preparatoria,
Celaya, Guanajuato, México*

* Autor de correspondencia: m2303044@itcelaya.edu.mx

Resumen: El presente artículo aborda las técnicas y estrategias utilizadas para el desarrollo de una herramienta digital en formato de mini videojuegos utilizando visión artificial para el manejo de las mecánicas dentro del juego, mediante el reconocimiento de movimientos corporales por parte del usuario; con el objetivo de servir como apoyo para reforzar la concentración en niños con TDA. El desarrollo técnico consiste en el planteamiento de las mecánicas, funcionamiento y programación de la aplicación basándose en las recomendaciones y sugerencias de expertos en el área de la psicología. Así mismo, se crearon los elementos visuales correspondientes para cada escenario. Finalmente, como trabajo futuro, se espera realizar pruebas experimentales con la finalidad de evaluar si el empleo de la herramienta digital tiene potencial para integrarse en el tratamiento de niños con TDA.

Palabras clave: *Herramienta digital, TDA, visión artificial.*

1. Introducción: *lo que debemos saber de inicio*

El Trastorno por Déficit de Atención con Hiperactividad (TDAH) es un trastorno del neurodesarrollo que se clasifica en tres tipos principales, Trastorno por Déficit de Atención (TDA) o TDAH predominantemente inatento, se caracteriza por dificultades persistentes para mantener la atención, seguir instrucciones y organizar actividades sin presentar hiperactividad significativa. Afecta tanto a niños como a adultos y puede interferir con el rendimiento académico, laboral y social (Dr. David J. Kupfer, el Dr. Darrel A. Regier, 2013). Por su parte, el Trastorno por Déficit con Hiperactividad (TDH) o TDAH predominantemente hiperactivo / impulsivo, presenta una excesiva actividad motora e impulsividad conductual y cognitiva. El tercer tipo es el TDAH combinado que presenta tanto inatención como hiperactividad. Este padecimiento, en sus tres categorías, afecta el desarrollo del niño que lo padece y al no iniciarse un tratamiento adecuado y oportuno, puede producir serias consecuencias que incluyen, riesgo a desarrollar psicopatología en edades posteriores (Flores, H. C., 2012). El presente trabajo se enfoca en el desarrollo de una herramienta digital para niños que presentan TDA.

En México los tratamientos convencionales enfocados a tratar esta condición consisten en impartir consultas psiquiátricas y la aplicación de medicamentos para tratar los síntomas como la hiperactividad, sin embargo, estos pueden llegar a generar dependencia. Por ello, el desarrollo y empleo de plataformas digitales como apoyo a tratamientos convencionales se abre como un área de oportunidad para la ingeniería.

Se puede mencionar trabajos realizados fuera de México que han demostrado ser eficaces en la evaluación, diagnóstico y tratamiento del TDAH en niños. Por ejemplo, Zheng Y. y colaboradores (2021) comentan que el empleo de videojuegos para diagnosticar permite un resultado más objetivo y una mayor participación por parte de los pacientes. En otros trabajos han investigado la obtención de datos mediante imágenes de resonancia magnética, señales fisiológicas, cuestionarios y juegos, esto con la finalidad de un diagnóstico oportuno mediante el uso de inteligencia artificial, aplicando la recolección de los anteriores datos (Aparicio-Juarez J. et al, 2022).

Por su parte se tiene el concepto de Serious Game, estos son videojuegos planeados y diseñados con la finalidad que el usuario adquiera un aprendizaje y no solo ser empleados por diversión, Gallardo Vergara y Monserrat Gallardo (2023) mencionan que su empleo facilita la concentración y la motivación además pueden ser efectivo para mejorar el

aprendizaje y la atención en niños con TDAH. Prueba de ello es el trabajo realizado por Yudha R. y colaboradores (2022) quienes aplicaron un Serious Game de plataformas y rompecabezas, examinando antes y después a los participantes seleccionados, el estudio confirma que la concentración de los niños aumenta después de la aplicación de la prueba. Finalmente, el uso de sistemas de captura de movimiento permite obtener medidas objetivas de la hiperactividad. Estas tecnologías ofrecen datos precisos sobre el comportamiento motor, complementando las evaluaciones clínicas tradicionales (Sempere Tortosa et al., 2018).

2. Fundamentos Teóricos: reglas y principios científicos importantes

Existen estudios que mencionan el uso de diferentes técnicas y herramientas en los tratamientos de personas con Trastorno de Déficit de Atención (TDA). La base fundamental del presente proyecto es la relación entre las teorías asociadas y la creación de herramientas digitales utilizando la motricidad principalmente para controlar los eventos dentro de la aplicación a través del uso de visión artificial.

La incursión de plataformas digitales y Serious Games en el área de la salud muestran que estos pueden ser vistos como una herramienta para la estructuración del lenguaje y el pensamiento, permite el aprendizaje mediante prueba y error minimizando el riesgo y permite el aumento de la creatividad (Marcano, 2008). Para el desarrollo de los minijuegos se presentan etapas fundamentales, la planeación, consiste en la conceptualización de los elementos e ideas principales; producción, es la creación y programación de las mecánicas, postproducción, presenta el seguimiento de la plataforma digital, así como los cambios o correcciones en caso de ser necesario.

Una revisión sistemática realizada por Cabas-Hoyos, Figueroa y González-Bracamonte (2021) identificó que programas que incorporan realidad virtual, realidad aumentada y Serious Games son efectivos en la rehabilitación de niños y adolescentes con TDA, mejorando su motivación y habilidades cognitivas y conductuales.

Por su parte la Teoría del Control Atencional, menciona que el TDAH y TDA se asocia con deficiencias en las funciones ejecutivas, como la inhibición de respuestas inapropiadas y el cambio de atención entre tareas. Las herramientas digitales pueden diseñarse para entrenar

estas funciones específicas, proporcionando retroalimentación inmediata y adaptativa que facilita el aprendizaje y la autorregulación (Amador & Krieger, 2013).

La psicomotricidad ha demostrado ser eficaz en el tratamiento del TDAH. Un estudio publicado en la Revista Nacional e Internacional de Educación Inclusiva (2019) concluyó que, tras una intervención psicomotriz, los niños con TDAH experimentaron mejoras en sus habilidades psicomotoras, relaciones afectivas y comunicativas, así como en el control de síntomas como hiperactividad e impulsividad. La implementación del control por movimientos corporales a través del uso de visión artificial en herramientas digitales se alinea con los resultados obtenidos en tratamientos con intervenciones psicomotrices.

3. Desarrollo del Trabajo: *aplicando las reglas y principios científicos*

El flujo de trabajo corresponde a la metodología mostrada en la Figura 1.



Figura 1 Metodología del proyecto. *Obtenida de: elaboración propia.*

Se propuso la creación de un videojuego cuyo control se realizó principalmente mediante visión artificial, tecnología que permite a las computadoras interpretar y procesar información del mundo real mediante imágenes y/o videos. Esto se implementó mediante una cámara que captura en tiempo real los movimientos corporales y gesticulaciones del usuario. El algoritmo para el desarrollo del videojuego se planteó en el lenguaje de programación Python debido a que, a diferencia de otros lenguajes, ofrece una amplia disponibilidad de librerías, tiene una comunidad muy activa que contribuye constantemente con nuevas herramientas, documentación y soluciones a problemas comunes. Se utilizaron principalmente tres librerías: Pygame, la cual es una biblioteca para el desarrollo de videojuegos en dos dimensiones con mecánicas y eventos poco complejos,

también se utilizó OpenCv que permite ejecutar funciones de visión artificial, utilizada para desarrollar aplicaciones de procesamiento de imágenes y videos, finalmente MediaPipe, librería que simplifica el desarrollo de aplicaciones de visión artificial debido a que proporciona un marco de trabajo para aplicar rápidamente técnicas de aprendizaje automático. Su empleo fue esencial para la detección movimientos corporales. Cabe mencionar que las tres librerías son gratuitas y de código abierto.

Definidas las herramientas de desarrollo, se propusieron 4 minijuegos; el primero de ellos se le asignó el nombre de “Conecta-puntos” el cual consiste en que el jugador, a través de la punta de su dedo índice, realice un seguimiento de contornos con puntos de figuras que se muestran en la pantalla logrando una mayor puntuación mientras mejor realice el seguimiento.

El segundo minijuego propuesto, llamado “Inserta-figuras” consiste en que se muestren diferentes figuras en la pantalla y el jugador disponga de las mismas figuras en físico, de esta manera el objetivo es relacionar el objeto físico con su contraparte en el monitor.

El tercer minijuego titulado “Capi-caídas” presenta elementos visuales en forma de capibaras descendiendo desde el borde superior de la pantalla mientras que el usuario a través de su mano controlará una canasta en el borde inferior de la pantalla recolectando la mayor cantidad de capibaras posible.

El cuarto minijuego llamado “Flechas mágicas” se basa en la aparición de flechas orientadas en diferentes direcciones cuyo objetivo es que el jugador realice movimientos con las manos correspondientes a la trayectoria mostrada, por ejemplo, si aparece una flecha morada a la izquierda indica que el jugador debe mover la mano izquierda en esa dirección, si por el contrario la flecha es amarilla la mano a mover tendrá que ser la derecha. Una vez definido el funcionamiento y mecánicas del videojuego, se comenzó con la creación de los elementos visuales correspondientes para cada minijuego.

El proyecto presenta pruebas de funcionalidad de los minijuegos, mostrando un desempeño adecuado y oportuno, como se puede apreciar en la figura 2, se muestra un ejemplo del control con movimientos corporales a través de una cámara en un videojuego simple desarrollado con Pygame.

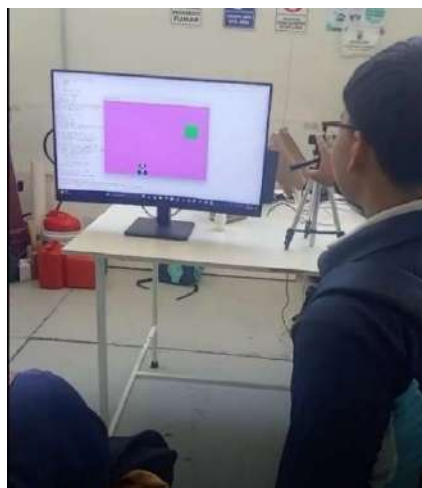


Figura 2. Control a través de movimientos corporales de un videojuego sobre esquivar obstáculos.

Obtenida de: elaboración propia.

Finalmente, se presentan la posibilidad de realizar trabajos futuros para evaluar el impacto que generaría su implementación en los tratamientos para TDA mediante el desarrollo de pruebas experimentales en un grupo de estudio y el potencial para desarrollar herramientas relacionadas para la contribución de alternativas en el tratamiento de esta condición.

4. Conclusiones: lo que podemos aprender de este artículo

El presente trabajo aborda las herramientas y metodología empleada para el desarrollo de una serie de minijuegos diseñados para niños que presentan TDA y tiene como objetivo su mejoramiento en la concentración y enfoque en la resolución de problemas simples. Los minijuegos fueron presentados con base en una serie de consultas hacia gente con conocimiento sobre este tipo de padecimiento. Por ejemplo, se solicitó, que los minijuegos no tuvieran muchos estímulos tanto visuales como auditivos, por tal motivo se decidió por un estilo simple y sencillo. Por otro lado, es necesario dar al “jugador” un solo objetivo claro y mostrar una retroalimentación positiva en dado caso que se equivoque. Por último, los minijuegos tienen que dar “una sensación” de progreso y avance, esto se logró implementando de 2 a 3 niveles por tipo de juego.

El empleo de minijuegos, en diagnóstico y tratamiento de TDA brinda a los usuarios motivación e interés al presentarse en formato digital, además por parte de los

desarrolladores permite la actualización de contenido con base a la situación requerido por los psicólogos.

Finalmente, el desarrollo de una herramienta digital presenta potencial para lograr incorporarse como apoyo para el tratamiento en niños con TDA. Cabe mencionar que no se busca una sustitución absoluta de métodos convencionales. La herramienta digital tiene como objetivo, dar paso a un trabajo conjunto con especialistas para lograr mejores resultados en el tratamiento de los pacientes con TDA. Para ello se espera como trabajo futuro la implementación de pruebas experimentales en grupos de intervención y de control, tomando como criterios de inclusión niños de 8 a 10 años que presenten TDA (con consentimiento previamente informado por parte de los padres), con el objetivo de analizar los datos resultantes y comprobar la efectividad del programa..

5. Referencias: *por si quieres seguir conociendo más*

- Aparicio-Juárez, J., Domínguez-Ramírez, O. A., & Escotto-Córdova, E. A. (2024). Tecnologías Emergentes en el Diagnóstico y Tratamiento del TDAH. *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, 12(23), 9-19.
- Cabas-Hoyos, K., Figueroa, P. A., & González-Bracamonte, Y. (2022). Programas de intervención basados en tecnologías para niños y adolescentes diagnosticados con TDAH: una revisión sistemática. *Tesis Psicológica*, 17(1), 188–205.
- Flores, H. C. (2012). Comparación de funciones ejecutivas en muestra de niños con y sin TDAH de la ciudad de México. *Revista Electrónica de Psicología Iztacala*.
- González Calleros, C. B., Guerrero García, J., & Navarro Rangel, Y. (2019). Uso de juegos serios como herramienta educativa para la enseñanza a niños con TDAH. *RD-ICUAP*, 5(13). <https://doi.org/10.32399/icuap.rdic.2448-5829.2019.13.329>
- Herguedas Esteban, M. C., Rubia Avi, M., García Zamora, E., Irurtia Muñoz, M. J., Gatón Gómez, J. M., & Geijo de la Fuente, N. (2019). Intervención psicomotriz en niños con trastorno por déficit de atención e hiperactividad (TDAH): Evaluación de los resultados mediante una metodología mixta. *Revista Nacional e Internacional de Educación Inclusiva*, 12(1), 267–290.
- Marcano, B. (2008). Juegos serios y entrenamiento en la sociedad digital. *Revista Electrónica Teoría de la Educación: Educación y Cultura en la Sociedad de la Información*, 9(3), 93-107.
- Sanjaya, R. B. Y. R., Kurniawan, R., Mulyati, S., Putra, K. E. N. C., & Rakhmawati, R. (2023). Serious Game to Training Focus for Children with Attention Deficit Hyperactivity Disorder: "Tanji Adventure to the Diamond Temple". *Khazanah Informatika: Jurnal Ilmu Komputer dan Informatika*, 9(1).

- Sánchez Encalada, L., & Damián Díaz, M. (2010). Detección e intervención a través del juego del trastorno por déficit de atención con hiperactividad (TDAH). *Revista Electrónica De Psicología Iztacala*, 12(4). Recuperado de <https://www.revistas.unam.mx/index.php/rep/article/view/15492>
- Sempere Tortosa, M. L., Fernández Carrasco, F., García-Fernández, J. M., & Cantó Díez, T. J. (2018). Herramientas tecnológicas para la medición y registro de movimiento objetivo de la hiperactividad. *Revista De Discapacidad, Clínica Y Neurociencias*, 5(1), 82-98. <https://doi.org/10.14198/DCN.2018.5.1.06>
- Zheng, Y., Li, R., Li, S., Zhang, Y., Yang, S., & Ning, H. (2021). *A review of serious games for ADHD*. arXiv preprint arXiv:2105.02970.

Neurocontrol: Diademas EEG y su Rol en la I4.0

Alonso Alejandro Jiménez Garibay *

*Tecnológico Nacional de México / IT de
Celaya,
Celaya, Guanajuato, México*

Tania Jareth Pérez Martínez

*Tecnológico Nacional de México / IT de
Celaya,
Celaya, Guanajuato, México*

José Guadalupe Uriel Palacios Campos

*Tecnológico Nacional de México / IT de
Celaya,
Celaya, Guanajuato, México*

* Autor de correspondencia: alonso.jimenez@itcelaya.edu.mx

Resumen: La Industria 4.0 está impulsando la integración de tecnologías avanzadas como la inteligencia artificial, el Internet de las Cosas (IoT por sus siglas en inglés) y la robótica. En este contexto, el neurocontrol, facilitado por dispositivos de monitoreo comerciales, está emergiendo como una innovación clave. Estos dispositivos captan señales cerebrales a través de electrodos de electroencefalografía (EEG por sus siglas en inglés), abriendo nuevas aplicaciones en sectores como la salud y la productividad.

Antes limitadas a investigaciones científicas, las diademas EEG ahora están al alcance de los consumidores, permitiendo la interacción directa entre la mente y dispositivos electrónicos mediante interfaces cerebro-computadora. Los avances en miniaturización y algoritmos de procesamiento de señales han permitido monitorizar el estado mental del usuario, detectar fatiga y estrés, y mejorar el bienestar mediante neurofeedback. En la Industria 4.0, las diademas EEG propician avances en la automatización industrial, optimizando procesos robóticos y mejorando la productividad y seguridad laboral mediante el monitoreo cognitivo.

Palabras clave: *Diademas EEG, industria 4.0, neurocontrol.*

1. Introducción: *lo que debemos saber de inicio*

La Industria 4.0 ha emergido como un símbolo de la transformación tecnológica que está redefiniendo los entornos productivos a nivel global. Esta cuarta revolución industrial no solo implica la digitalización de procesos, sino una reconfiguración completa del ecosistema industrial mediante la incorporación de tecnologías avanzadas como inteligencia artificial (IA), Internet de las Cosas (IoT), automatización inteligente, robótica colaborativa y análisis masivo de datos. A diferencia de sus predecesoras, esta revolución no se limita a aumentar la capacidad de producción, sino que establece una red interconectada de dispositivos, sistemas y humanos capaces de operar de forma inteligente, autónoma y adaptativa.

Uno de los elementos centrales de esta revolución es la comunicación en tiempo real entre máquinas, sensores, plataformas y usuarios, facilitada por tecnologías en la nube y algoritmos de análisis predictivo. Esta interconexión permite que los sistemas no solo respondan a estímulos del entorno, sino que también aprendan y se optimicen continuamente. En este marco, el concepto de neurocontrol se perfila como una innovación disruptiva con alto potencial, especialmente en la interacción entre operadores humanos y sistemas ciberfísicos.

El neurocontrol se basa en el uso de señales cerebrales, captadas mediante interfaces cerebro-computadora (BCI), para controlar dispositivos digitales sin necesidad de contacto físico. Una de las técnicas superficial más empleadas es la electroencefalografía (EEG), la cual permite registrar la actividad eléctrica del cerebro de manera no invasiva. Esta tecnología no solo ha dejado de ser exclusiva del ámbito médico o de investigación, sino que está comenzando a implementarse en entornos industriales, permitiendo una comunicación directa entre la mente del operador y los sistemas automatizados.

La integración de EEG en la automatización industrial ofrece múltiples beneficios. Por un lado, permite controlar dispositivos mediante comandos mentales, pero más allá de ello, posibilita monitorear en tiempo real el estado cognitivo de los trabajadores: su nivel de atención, estrés, carga mental o fatiga. Esta información puede utilizarse para ajustar dinámicamente las condiciones laborales, evitando errores por agotamiento y mejorando la seguridad operativa. Así, los sistemas pueden responder no solo a fallas técnicas, sino también a señales humanas, generando una verdadera simbiosis entre el operario y la máquina.

Sectores como la manufactura avanzada, el control de procesos críticos, la logística automatizada o la operación remota de maquinaria pesada son ya candidatos naturales para la aplicación de neurocontrol. Según el informe MarketsandMarkets (2023), se proyecta que el mercado de interfaces cerebro-computadora alcanzará los 3.85 mil millones de dólares en 2027, lo que indica una adopción creciente también fuera del sector clínico, destacando la industria como un nuevo campo de aplicación acelerada.

En Latinoamérica, donde muchas industrias atraviesan procesos de digitalización, el EEG puede convertirse en una herramienta estratégica. Su implementación no requiere infraestructuras prohibitivamente costosas y permite optimizar el recurso humano mediante el rediseño de interfaces hombre-máquina más intuitivas, la identificación de cuellos de botella cognitivos y la personalización de capacitaciones en seguridad.

Además, en un mundo laboral cada vez más remoto, la posibilidad de integrar EEG con plataformas de realidad aumentada y control virtual abre la puerta a nuevas modalidades de tele-operación industrial. Esto resulta particularmente útil en contextos donde el acceso físico al sitio de trabajo implica riesgos, ya sean sanitarios, geográficos o de seguridad.

Finalmente, el neurocontrol posibilita avanzar hacia entornos laborales verdaderamente adaptativos, donde la tecnología se ajusta a la condición mental del usuario en tiempo real. No obstante, su implementación debe hacerse con responsabilidad ética. El uso de datos cerebrales conlleva riesgos de invasión a la privacidad y vigilancia indebida. Por ello, es vital desarrollar marcos regulatorios que protejan la autonomía y dignidad de los trabajadores.

2. Fundamentos Teóricos: *reglas y principios científicos importantes*

La EEG es una técnica de diagnóstico fundamental en la neurología y la neurociencia que registra la actividad eléctrica del cerebro mediante electrodos colocados sobre el cuero cabelludo. Estos electrodos detectan las oscilaciones de las señales eléctricas producidas por las neuronas durante la transmisión de impulsos eléctricos. La actividad eléctrica cerebral se genera cuando las neuronas se comunican entre sí a través de potenciales de acción. La EEG mide la diferencia de potencial entre diferentes áreas del cerebro, y las señales registradas se amplifican para su visualización en un gráfico. Las fluctuaciones de las señales captadas son presentadas en forma de ondas, las cuales se agrupan en diferentes tipos según su frecuencia, tales como las ondas delta, theta, alfa, beta y gamma.

Las ondas cerebrales se clasifican en cinco categorías principales: las ondas delta, que son de mayor amplitud y frecuencia más baja, están asociadas con el sueño profundo; las ondas theta se vinculan con la relajación profunda o el inicio del sueño; las ondas alfa predominan en estados de relajación mientras la persona permanece alerta; las ondas beta se observan cuando una persona está concentrada y alerta; y las ondas gamma se encuentran en actividades cognitivas complejas como la resolución de problemas. Cada tipo de onda tiene una relación con diferentes estados mentales y actividades cerebrales.

La EEG tiene diversas aplicaciones en el diagnóstico y tratamiento de trastornos neurológicos. Es especialmente útil en el diagnóstico de epilepsia, donde permite identificar los focos epilépticos y diferenciar entre los tipos de crisis. También se utiliza para diagnosticar trastornos del sueño, como el insomnio o la apnea del sueño, y para monitorear el estado de los pacientes en coma o con daño cerebral.

Otra aplicación importante de la EEG es el neurofeedback, una técnica terapéutica que permite a los pacientes modificar su actividad cerebral mediante retroalimentación, lo que es útil para tratar trastornos como el estrés, la ansiedad y el Trastorno por Déficit de Atención e Hiperactividad (TDAH).

En el ámbito de la neurociencia cognitiva, la EEG es una herramienta valiosa para estudiar la cognición, la percepción y la atención. Su alta resolución temporal permite observar la actividad cerebral en milisegundos, lo que ayuda a comprender cómo el cerebro procesa la información en tareas cognitivas como la memoria y la toma de decisiones. A través de la EEG, los investigadores pueden obtener información crucial sobre los mecanismos cerebrales involucrados en estas funciones. Además, la tecnología EEG se está utilizando para el desarrollo de BCIs, que permiten a los usuarios interactuar con dispositivos electrónicos utilizando solo sus pensamientos. Esto abre nuevas posibilidades para personas con discapacidades severas, permitiéndoles controlar dispositivos como prótesis o sistemas de comunicación.

La EEG también tiene un gran potencial en el área de neurocontrol. En este campo, las señales eléctricas cerebrales se utilizan para controlar dispositivos tecnológicos, desde robots hasta prótesis, con el fin de asistir a personas con discapacidades motoras. Esta BCI se está utilizando para mejorar la calidad de vida de personas con parálisis o amputaciones, permitiéndoles controlar sus prótesis mediante su actividad cerebral. En la industria, el neurocontrol basado en la EEG podría utilizarse para mejorar la productividad y seguridad

laboral, monitorizando el estado cognitivo de los empleados y ajustando los procesos de trabajo para maximizar el rendimiento.

La EEG tiene muchas ventajas, como su no invasividad, lo que permite monitorear la actividad cerebral sin la necesidad de cirugía o procedimientos invasivos. También es una técnica de bajo costo y accesible, especialmente con los avances recientes en miniaturización de los dispositivos EEG. Sin embargo, existen ciertos desafíos, como la resolución espacial limitada, que dificulta la localización precisa de las fuentes de actividad cerebral en áreas profundas del cerebro. Además, los artefactos causados por el movimiento del cuerpo o los músculos faciales pueden interferir con la señal y dificultar la interpretación. A pesar de estos inconvenientes, los avances en la tecnología de procesamiento de señales y en la mejora de los dispositivos EEG están permitiendo superar estos obstáculos, haciendo que la técnica sea cada vez más precisa y accesible.

3. Desarrollo del Trabajo: *aplicando las reglas y principios científicos*

Al evaluar diademas EEG para aplicaciones en entornos de Industria 4.0, es esencial considerar aspectos como la cantidad de canales, tipo de electrodos, interfaz de datos, latencia, disponibilidad de APIs, aplicaciones sugeridas y precio. Estos factores determinan la precisión en la captura de señales cerebrales, la comodidad y facilidad de uso del dispositivo, la integración con sistemas industriales existentes, la capacidad de respuesta, el potencial de desarrollo personalizado y la viabilidad económica del proyecto. Una selección adecuada garantiza soluciones de neurocontrol eficientes y adaptadas a las necesidades específicas del entorno industrial.

Los canales EEG representan las rutas de adquisición de señales eléctricas cerebrales entre electrodos colocados en el cuero cabelludo, permitiendo captar la actividad neuronal en diferentes regiones del cerebro. En el contexto del neurocontrol, la cantidad de canales define la resolución espacial del registro, lo que se traduce en la capacidad para interpretar comandos mentales con mayor precisión. Dispositivos con pocos canales pueden detectar señales simples como niveles de atención o intención de movimiento, mientras que sistemas con múltiples canales permiten identificar patrones más complejos asociados a tareas específicas o estados cognitivos.

Tabla 1 Comparativa de Sistemas EEG por Número de Canales y Aplicaciones.

Número de Canales	Alcance	Ejemplo de Aplicaciones
1-2 canales	Básico	Neurofeedback, control ON/OFF, entrenamiento mental
4-8 canales	Medio	Control de cursores, monitoreo de estados mentales (atención, estrés)
14-32 canales	Avanzado	Interfaces cerebro-robot, mapeo cerebral funcional, IA cognitiva adaptativa

En aplicaciones de Industria 4.0, contar con mayor número de canales facilita el desarrollo de interfaces cerebro-máquina más robustas, adaptativas y seguras, al ofrecer un mapeo más detallado del estado neurofisiológico del usuario tal como se muestra en la Tabla 1. Sin embargo, debe considerarse de igual o mayor importancia la portabilidad y ergonomía, en donde el tipo de electrodo tiene un papel fundamental en caso de ser salinos semihúmedos, húmedos o secos.

La Figura 1 muestra diferentes tipos de diademas EEG comerciales utilizadas comúnmente en la literatura relacionada con neurocontrol, debido a su portabilidad, precio y ergonomía.



Figura 1. Diademas EEG Comerciales.

Obtenida de: emotiv.com, mwm2.neurosky.com, openbci.com y choosemuse.com.

4. Conclusiones: lo que podemos aprender de este artículo

El neurocontrol con EEG se posiciona como una herramienta clave en la Industria 4.0, permitiendo integrar el estado cognitivo humano en entornos productivos inteligentes.

Aunque aún existen desafíos en la precisión, seguridad y ética del manejo de señales cerebrales, los avances tecnológicos y la reducción de costos impulsan su adopción. Esta convergencia promete transformar las fábricas en espacios más adaptativos, seguros y centrados en el bienestar del trabajador.

Tabla 2 Especificaciones y Capacidades de Diademas EEG Comerciales.

Marca / Modelo	Canales EEG	Tipo de Electrodos	Interfaz de Datos	Latencia Promedio	SDK / API disponible	Aplicaciones Sugeridas en I4.0	Precio Aproximado
Emotiv EPOC X	14 canales	Salinos (semi-secos)	USB, Bluetooth	~15 ms	Sí (EmotivPRO SDK)	Control de robots, interfaces cerebro-computadora	\$850 USD
NeuroSky y MindWave	1 canal	Seco	Bluetooth	~100 ms	Sí (ThinkGear SDK)	Entrenamiento mental, control básico de dispositivos	\$100 USD
OpenBCI Ultracortex	8, 16 o 32	Secos / húmedos	USB, WiFi	~10 ms (WiFi)	Sí (Open Source)	Robótica, IoT cognitivo, IA adaptativa en manufactura	\$500–\$1200 USD
Muse S (Gen 2)	4 canales	Secos (frontal/temporal)	Bluetooth	~250 ms	Limitado (Muse SDK)	Fatiga mental, ergonomía cognitiva, biofeedback	\$400 USD

Obtenido de: elaboración propia.

5. Referencias: *por si quieres seguir conociendo más*

Emotiv. (2024). *EMOTIV EEG headsets: Brain sensing technology for research, wellness, and performance*. Obtenido de <https://www.emotiv.com/>

InteraXon. (2024). *Muse: The brain sensing headband*. Obtenido de <https://choosemuse.com/>

NeuroSky. (2024). *NeuroSky: EEG biosensors and brain-computer interface technology*. Obtenido de <https://store.neurosky.com/>

OpenBCI. (2024). *Ultracortex: Open-source 3D-printed EEG headset*. Obtenido de <https://shop.openbci.com/products/ultracortex>



Electromiografía en la Industria 4.0: Una herramienta auxiliar para la salud ocupacional

Ángel Gabriel Acosta Aguilar *

Tecnológico Nacional de México / IT de
Celaya,
Celaya, Guanajuato, México

Alonso Alejandro Jiménez Garibay

Tecnológico Nacional de México / IT de
Celaya,
Celaya, Guanajuato, México

* Autor de correspondencia: m2403092@itcelaya.edu.mx

Resumen: La electromiografía es una herramienta que ha tomado importancia en estos últimos años en el ámbito de la rehabilitación, medicina ocupacional y en el Internet de las cosas (IoT). Este artículo busca demostrar el papel que toma la EMG como un medio de monitorización integrándose en la industria 4.0 y en la predicción de riesgos de trabajo que afecten la salud de los trabajadores. Mediante el análisis, procesamiento e interpretación de la señal se propone una evaluación objetiva que detalla el comportamiento muscular aplicado por los trabajadores de la industria.

Palabras clave: Bioseñal, EMG, ergonomía, IoT, procesamiento.

1. Introducción: lo que debemos saber de inicio

La electromiografía (EMG) es el estudio o registro de la actividad eléctrica que se genera a través de los músculos, es decir, que cuando se realiza un movimiento del cuerpo humano, esta acción tiene propiedades eléctricas que se pueden medir con instrumentos especializados y a través de sensores ya que es una señal muy pequeña. La razón de este comportamiento eléctrico parte del sistema nervioso (SN) cuya función es ser el sistema de comunicación del cuerpo y tener una red muy extensa de conexiones que permite recibir y enviar información a las diferentes partes y órganos de cuerpo. Esta información se envía en forma de señal eléctrica por lo que cuando se desea realizar un movimiento nuestro cerebro

genera esta señal y llega hasta los músculos donde finalmente, estos realizan su función que consta del acortamiento o también conocida como contracción muscular (Zhou et al., 2020). La EMG suele tener un método de medición invasivo, eso significa que sólo un profesional de la salud puede realizarlo ya que es una práctica que consta de la introducción de un electrodo, que es una pieza de metal muy delgada en forma de aguja en el músculo que se desea estudiar. Por otro lado, existe un método no invasivo o también conocido como superficial (se abrevia sEMG) que consta de la colocación de 3 parches que contienen un gel y una pieza de metal hecha de cloruro de plata (su nomenclatura química es AgCl). Dos de estos parches van colocados y alineados en el músculo; el tercero, va colocado comúnmente en el hueso más cercano y expuesto, por ejemplo, el codo (Bu et al. 2016).

El uso de la sEMG ha sido parte importante en el desarrollo de prótesis electromecánicas, órtesis, exoesqueletos y algunos sistemas que son activados por el movimiento generado por una persona. Empresas como Ottobock (de Alemania), Össur (de Islandia), Coapt (EUA), entre otras han sido parte en desarrollo de esta implementación. Otras tecnologías se han enfocado en aplicar este estudio en áreas como la rehabilitación, deporte y salud ocupacional como un medio para analizar detalladamente la actividad muscular de un usuario.

La electromiografía superficial (sEMG) puede entenderse como un indicador del estado muscular, de forma similar a cómo la temperatura corporal refleja nuestro estado de salud. En el ámbito industrial, se convierte en una herramienta valiosa para obtener información sobre la condición física de los trabajadores. Al integrarse con la Inteligencia Artificial (IA) y el Internet de las Cosas (IoT), permite evaluar factores como el esfuerzo asociado a las cargas de trabajo, la exigencia de tareas repetitivas y las condiciones del entorno laboral con el objetivo de prevenir lesiones y fomentar espacios de trabajo más seguros.

Además, el monitoreo continuo de la actividad muscular y del entorno del colaborador facilita la toma de decisiones objetivas, orientadas a mejorar la productividad, el bienestar y la eficiencia en el desempeño laboral.

2. Fundamentos Teóricos: *reglas y principios científicos importantes*

Una señal de EMG se caracteriza por una forma de onda ruidosa a través del tiempo y eso se debe porque se suman muchas señales eléctricas pequeñas que se envían de los nervios al

músculo que se activa. En el caso de la sEMG se añaden aspectos como movimiento de la persona, ruido o interferencias eléctricas de otros dispositivos cercanos (Merletti & Parker, 2004). La manera correcta de medir la señal es a través de un diferencial de potencial, este concepto significa que se hacen dos mediciones de voltaje a la vez restando uno con el otro y el resultado es la diferencia de ellos. Propiamente, al colocar los 3 electrodos, uno se coloca en la parte más abultada o vientre del músculo, el segundo se coloca en el tendón del músculo y el tercero se coloca comúnmente en un hueso ya que es una zona donde no hay contracción ni actividad muscular, además de que este punto es la referencia de ambas mediciones. La siguiente Ec. 1 representa la medición del voltaje final:

$$V_{EMG} = V_{Ventre} - V_{Tendon} \quad (1)$$

Esta medición aplica al método invasivo y no invasivo. Así, al decir que la señal de EMG es muy pequeña se refiere a que se encuentra en escala de microvoltios (μV) por lo que implica la necesidad de un medio que le permita transmitir la corriente generada del músculo sin mucha oposición, por lo que se hace uso de un medio húmedo que consta de un gel conductor para disminuir esta oposición. Para explicar esta oposición se podría tomar de ejemplo cuando se toma una batería de 9v con las manos, al ser la piel un medio seco y grueso no deja pasar fácilmente la electricidad. En cambio, cuando se coloca en la lengua, al ser ésta húmeda y delgada la electricidad pasa mucho más fácil y se puede sentir.

Una contracción se puede observar en el inciso *a* de la Fig. 1 donde, considerando que la línea media es 0 mV se observan tanto valores negativos y positivos amplios al momento de la activación del músculo, por lo que es necesario transforma la señal para obtener una mejor definición e interpretación. En el inciso *b*, todos los valores se volvieron positivos y finalmente en el inciso *c* se tomó únicamente la línea envolvente de la señal. En términos simples, la altura que se muestra en el inciso *c* en una perspectiva vertical indicaría el esfuerzo que realiza el usuario y la fuerza que le imprime en una contracción, así en una perspectiva horizontal, se puede determinar el tiempo de inicio y fin que le tomó hacer la contracción.

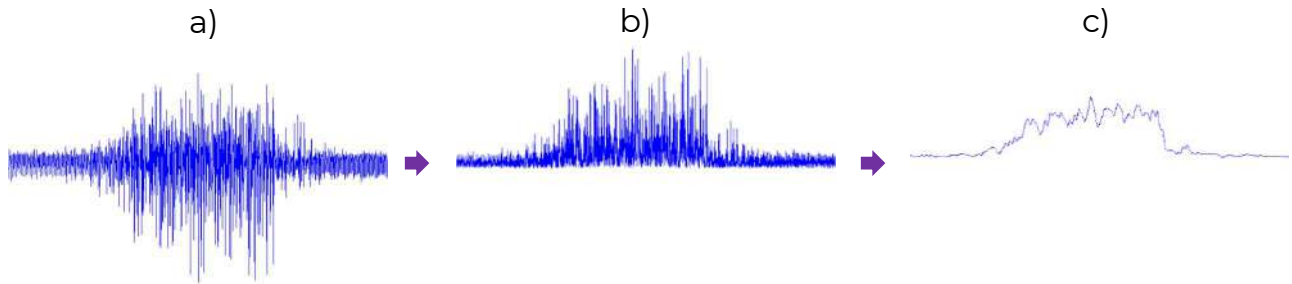


Figura 1. Procesamiento de bioseñal de sEMG.

Obtenida de: elaboración propia.

3. Desarrollo del Trabajo: *aplicando las reglas y principios científicos*

Para adquirir y procesar esta señal se requiere del desarrollo de un sensor adecuado a las condiciones de estudio, aunque existen equipos comerciales que permiten obtenerla como lo hace el sensor de la Fig. 2 desarrollado por la empresa SparkFun y que lleva por nombre MyoWare 2.0 Wireless Shields. Este dispositivo, además de integrar el circuito de adquisición, añade un microcontrolador ESP32, el cual está encargado de leer la señal analógica y convertirla a una señal digital para posteriormente transmitirla por Bluetooth hacia un receptor.



Figura 2. MyoWare 2.0 Wireless Shields.

Obtenida de: SparkFun Electronics. (2025).

La señal de sEMG no es el único parámetro que se puede medir, se pueden añadir sensores como el giroscopio que mide la rotación o cambios de orientación de cualquier objeto en donde se coloque, así poder entender mejor el movimiento de una persona junto con su actividad muscular (McDevitt et al., 2022).

Un ejemplo de este tipo de estudio es el realizado por Petrovic et al. (2022), en el que se analizaron a un grupo de trabajadores en un entorno industrial con el objetivo de evaluar cómo la ejecución de tareas como empujar y jalar carretillas se ve influenciada por el estado físico de los operadores, así como los riesgos asociados a enfermedades musculares, como el dolor en hombros, brazos y antebrazos, lumbar o la movilidad reducida de la columna. Se tomaron 2 grupos de estudios donde el primero incluyó a 2 hombres sin lesiones previas a los cuáles les hicieron pasar por un circuito de 30 metros empujando y jalando una carretilla de 100kg ejecutando 10 repeticiones. Se utilizaron sensores de sEMG en ambos brazos, en músculos del pecho, espalda y antebrazos. El segundo grupo constó de 3 participantes que ya tenían presencia de dolor en ciertos músculos y puntajes de estrés y ansiedad previamente valorados. El artículo concluyó que el segundo grupo, aunque hicieron el mismo trabajo, les costó casi el doble de esfuerzo físico que el grupo sano, incluso el músculo de la espalda izquierda se demostró que se usó cuatro veces más.

4. Conclusiones: lo que podemos aprender de este artículo

La señal de sEMG desde su adquisición hasta su transformación final ha demostrado que posee características versátiles ya que se puede aplicar a diversos tipos de áreas como la robótica, rehabilitación y en este caso, a la industria ya que es un parámetro que indica la intensidad de la contracción y movimiento realizado en una zona específica.

Existe evidencia, como se demostró en este caso de estudio, donde es posible obtener un parámetro medible del esfuerzo físico realizado, así como una comparativa que permite identificar riesgos potenciales para la salud de los trabajadores.

Con ayuda de técnicas de posprocesamiento avanzado de la señal y la integración de sensores IoT interconectados en una zona de trabajo forma parte de un conjunto de datos relevantes sobre la productividad y bienestar de los colaboradores, evitando riesgos y trabajando en espacios seguros.

5. Referencias: por si quieres seguir conociendo más

Bu, N., Tsuji, T., & Fukuda, O. (2016). EMG-Controlled Human-Robot Interfaces. *Elsevier eBooks* (pp. 75–109). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-803137-7.00004-5>

- Merletti, R., & Parker, P. A. (2004). Electromyography: Physiology, engineering, and noninvasive applications. *Wiley-IEEE Press*. <https://doi.org/10.1002/0471678384>
- McDevitt, S., Hernandez, H., Hicks, J., Lowell, R., Bentahaikt, H., Burch, R., Ball, J., Chander, H., Freeman, C., Taylor, C., & Anderson, B. (2022). Wearables for biomechanical performance optimization and risk assessment in industrial and sports applications. *Bioengineering*, 9(1), 33. <https://doi.org/10.3390/bioengineering9010033>
- Petrovic, M., Vukicevic, A. M., Djapan, M., Peulic, A., Jovicic, M., Mijailovic, N., Milovanovic, P., Grajic, M., Savkovic, M., Caiazzo, C., Isailovic, V., Macuzic, I., & Jovanovic, K. (2022). Experimental Analysis of Handcart Pushing and Pulling Safety in an Industrial Environment by Using IoT Force and EMG Sensors: Relationship with Operators' Psychological Status and Pain Syndromes. *Sensors*, 22(19), 7467. <https://doi.org/10.3390/s22197467>
- Zhou, P., Klein, C., Zhang, X., Li, X., & Li, S. (2020). Electromyography (EMG) examination on motor unit alterations after stroke. *Intelligent biomechatronics in neurorehabilitation* (pp. 51–64). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814942-3.00004-0>



La nueva cara de la salud impulsada por Six Sigma

Aaron Guerrero Campanur *

*Tecnológico Nacional de México / ITS de
Uruapan,
Uruapan, Michoacán, México*

Francisco Jesús Arévalo Carrasco

*Tecnológico Nacional de México / ITS de
Uruapan,
Uruapan, Michoacán, México*

Gilberto Chávez Esquivel

*Tecnológico Nacional de México / ITS de
Uruapan,
Uruapan, Michoacán, México*

* Autor de correspondencia: aaron.gc@uruapan.tecnm.mx

Resumen: Este artículo de divulgación explora el impacto de la metodología Six Sigma en el sector salud, una herramienta originalmente desarrollada para la industria manufacturera. A través de una revisión sistemática de más de 800 artículos científicos, se identifican autores destacados, revistas especializadas y tendencias emergentes en la aplicación de Six Sigma en hospitales y centros clínicos. Los resultados revelan una creciente adopción de esta metodología para mejorar la eficiencia operativa, reducir errores y optimizar la experiencia del paciente. Se destacan casos exitosos en reducción de tiempos de espera, control de calidad y adaptación a contextos como la pandemia por COVID-19. Esta investigación demuestra que Six Sigma se ha convertido en una estrategia clave para enfrentar los desafíos actuales en la atención médica.

Palabras clave: Atención centrada en el paciente, calidad en salud, calidad total, estudios bibliométricos, Six Sigma.

1. Introducción: *lo que debemos saber de inicio*

Six Sigma es una metodología de mejora continua, orientada a la reducción de la variabilidad y al incremento de la eficiencia mediante el uso de herramientas estadísticas y un enfoque estructurado, generalmente representado por el ciclo DMAIC (Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar) (Pyzdek & Keller, 2014). Desde su desarrollo en Motorola en la década de 1980, esta estrategia ha trascendido su aplicación inicial en la industria manufacturera para consolidarse como un referente en la gestión de calidad en múltiples sectores.

En el ámbito de la salud, Six Sigma se ha posicionado como una herramienta de gran valor para mejorar procesos clínicos, disminuir errores médicos y garantizar la seguridad del paciente. Estudios previos destacan su efectividad en áreas como el control estadístico de procesos, la reducción de infecciones hospitalarias y la optimización del flujo de pacientes en servicios de urgencias (Antony & Banuelas, 2002; Cesarelli et al., 2021). Asimismo, investigaciones recientes subrayan la importancia de su integración con enfoques como Lean, dando lugar a la filosofía Lean Six Sigma, que busca incrementar la eficiencia al eliminar desperdicios y mejorar la calidad del servicio (Improta et al., 2022; Ward et al., 2022). En los últimos años, la creciente presión sobre los sistemas de salud —acelerada por la pandemia de COVID-19— ha favorecido la adopción de Six Sigma en hospitales y centros clínicos. Su implementación ha demostrado ser efectiva para disminuir la variabilidad en los procesos médicos, mejorar la seguridad del paciente, optimizar el uso de recursos y fomentar una cultura organizacional enfocada en la mejora continua.

Este artículo presenta una visión general del potencial de Six Sigma como catalizador de transformación en el sector salud. Más allá de su rigor técnico, la metodología se revela como un agente de cambio cultural, capaz de integrar eficiencia operativa con atención centrada en las personas. A lo largo del texto, se analizarán sus principales aportes, aplicaciones emergentes y perspectivas futuras dentro del ámbito médico.

2. Fundamentos Teóricos: *reglas y principios científicos importantes*

Para llevar a cabo esta investigación, se realizó una revisión sistemática de la literatura con el objetivo de identificar, analizar y comprender el papel de la metodología Six Sigma en el ámbito de la atención médica. La búsqueda bibliográfica se centró en la base de datos

especializada PubMed, reconocida por su amplio acervo de publicaciones científicas en medicina y salud pública revisadas por pares.

La estrategia de búsqueda consideró el término “Six Sigma” aplicado a títulos, resúmenes y palabras clave, con el fin de asegurar una cobertura integral de documentos que abordaran explícitamente este enfoque. Esta etapa inicial permitió construir un panorama amplio y representativo del uso de Six Sigma en contextos clínicos, desde laboratorios hasta servicios hospitalarios.

Una vez recopilada la información, se llevó a cabo un proceso de filtrado riguroso que priorizó aquellas publicaciones en revistas científicas especializadas. Esta decisión respondió a la necesidad de garantizar la calidad y la relevancia de los trabajos incluidos, ya que dichas revistas concentran contribuciones significativas de investigadores especializados en mejora continua y gestión de calidad. De este modo, se construyó una base sólida para el análisis posterior.

La tercera etapa del estudio consistió en un análisis bibliométrico detallado utilizando herramientas como Biblioshiny de RStudio. Se identificaron estadísticas clave como la evolución temporal de las publicaciones, los autores más influyentes, y las redes de colaboración entre países e instituciones. Este enfoque permitió comprender no solo la cantidad, sino también la calidad y profundidad del conocimiento generado en torno a Six Sigma aplicado a la salud.

Finalmente, se identificaron temas emergentes vinculados a esta metodología, tales como la gestión de calidad total, control estadístico de procesos, atención centrada en el paciente y la adaptación de Six Sigma en contextos de alta presión como los provocados por la pandemia de COVID-19. Para enriquecer este análisis, se incorporó literatura complementaria reciente, integrando así una visión actualizada y crítica de los avances y retos en la implementación de Six Sigma en entornos médicos.

Este enfoque metodológico permitió no solo mapear el estado actual de la investigación en este campo, sino también detectar nuevas líneas de desarrollo, mostrando cómo la mejora continua puede fortalecer la eficiencia y calidad de los servicios de salud.

3. Desarrollo del Trabajo: aplicando las reglas y principios científicos

La búsqueda en la base de datos PubMed, utilizando el término “Six Sigma”, permitió identificar un total de 830 artículos científicos, provenientes de 411 fuentes distintas, con la participación de 3,473 autores. Esta amplia recopilación de trabajos evidencia el creciente interés de la comunidad científica en explorar el impacto de Six Sigma, especialmente en el ámbito de la salud.

Los resultados obtenidos reflejan tanto la diversidad temática como la profundidad metodológica de los estudios analizados. A medida que Six Sigma se ha ido consolidando en entornos clínicos y hospitalarios, también ha evolucionado la forma en que los investigadores abordan su aplicación: desde enfoques centrados en eficiencia operativa hasta estudios enfocados en calidad del servicio y seguridad del paciente.

Revistas especializadas: plataformas clave en la difusión del conocimiento

Uno de los hallazgos más significativos fue la identificación de las revistas científicas que han publicado el mayor número de artículos sobre Six Sigma en salud. Esta información no solo revela las plataformas más activas en la difusión del conocimiento, sino que también permite comprender las líneas editoriales que están impulsando la investigación en mejora continua dentro del sector sanitario.

A continuación, se presenta la Tabla 1, con las seis revistas especializadas que más han contribuido al tema:

Tabla 1. Lista de revistas especializadas con mayor número de artículos.

Fuentes	Artículos
<i>International Journal of Health Care Quality Assurance</i>	28
<i>Quality Management in Health Care</i>	22
<i>International Journal of Environmental Research and Public Health</i>	21
<i>Journal for Healthcare Quality: Official Publication of the National Association for Healthcare Quality</i>	18
<i>Joint Commission Journal on Quality and Patient Safety</i>	13
<i>BMJ Open Quality</i>	12

Obtenida de: elaboración propia.

Este resultado muestra la concentración del conocimiento en revistas que priorizan temas de calidad, seguridad y gestión en contextos médicos. Destaca, por ejemplo, la participación

del BMJ Open Quality, una revista enfocada en promover intervenciones prácticas para mejorar servicios de salud, y la relevancia del International Journal of Health Care Quality Assurance, que encabeza la lista.

Estos espacios editoriales han facilitado la consolidación de Six Sigma como una metodología confiable y adaptable a diferentes contextos hospitalarios, promoviendo el desarrollo de investigaciones rigurosas y con alto impacto en la práctica clínica.

Producción científica anual: una mirada al crecimiento del interés en Six Sigma

El análisis cronológico de la literatura científica indexada en la base de datos PubMed permitió identificar una evolución notable en la cantidad de publicaciones relacionadas con la metodología Six Sigma. Desde el primer artículo registrado en 1990, se ha mantenido una tendencia de crecimiento continuo en la producción científica, lo que refleja el interés sostenido por parte de la comunidad académica y médica en este enfoque de mejora continua.

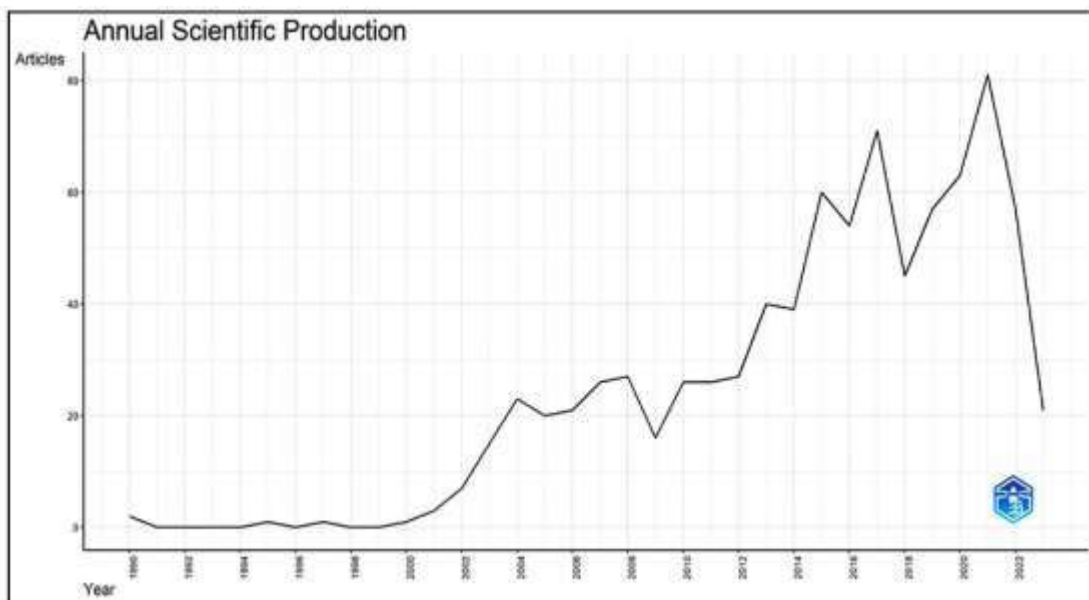


Figura 1. Distribución del número total de artículos por año.

Obtenida de: Biblioshiny (RStudio).

La Figura 1 del estudio original muestran cómo, año tras año, la presencia de Six Sigma en contextos clínicos y hospitalarios ha ganado relevancia. Especialmente destacables son los picos de publicaciones en los años 2017 y 2021, periodos en los que se produjo un aumento

significativo en el número de artículos. Estos incrementos podrían atribuirse al surgimiento de nuevas aplicaciones, innovaciones tecnológicas o al impacto de crisis sanitarias como la pandemia de COVID-19, que impulsaron la búsqueda de soluciones eficientes en los sistemas de salud.

Este comportamiento evidencia no solo un mayor reconocimiento de la utilidad de Six Sigma en el ámbito médico, sino también una expansión en la variedad de temas abordados, como control de calidad, atención centrada en el paciente, optimización de procesos clínicos y resultados en salud.

El análisis de la evolución temporal de la producción científica permite, por tanto, identificar momentos clave de transformación, así como anticipar nuevas áreas de oportunidad en las que esta metodología puede seguir aportando valor en los próximos años.

Autores más relevantes: quiénes lideran la investigación en Six Sigma en salud

El análisis de la literatura científica permitió identificar a los autores más citados en el campo de la aplicación de Six Sigma en la atención médica. Este enfoque ofrece una visión clara sobre las voces más influyentes y activas en una disciplina que se encuentra en constante evolución.

Para ello, se elaboró una lista con los 10 investigadores más citados, detallando tanto el número total de publicaciones como la cantidad de artículos fraccionados, es decir, aquellos en los que el autor tuvo una participación proporcional dentro de un equipo de colaboración. En la Tabla 2 se presentan los autores destacados. S. P. Teeling encabeza la lista con 16 publicaciones, lo que evidencia un compromiso constante con la mejora de procesos en salud mediante Six Sigma. Le siguen investigadores como G. Improta, M. Ward, M. McNamara y C. Ricciardi, todos ellos con una producción significativa y especializada.

Un caso interesante es el del autor S. Kumar, quien, aunque con un menor número de artículos totales (6), presenta una alta proporción de artículos fraccionados (3.33). Esto sugiere una participación relevante en investigaciones de contenido técnico detallado, posiblemente como experto en aspectos específicos del desarrollo metodológico o en aplicaciones clínicas complejas.

Este análisis permite no solo reconocer a quienes lideran la producción académica, sino también visibilizar las redes de colaboración que sustentan el avance del conocimiento en torno a Six Sigma aplicado al sector salud. La comprensión de estas dinámicas resulta clave

para identificar tendencias, consolidar alianzas estratégicas e impulsar nuevas líneas de investigación.

Tabla 2. Lista de los 10 autores más citados.

Autor	Artículos	Artículos fraccionados
Teeling, S. P.	16	3.39
Improta, G.	13	1.93
Ward, M.	11	1.57
McNamara, M.	10	2.13
Ricciardi, C.	8	1.05
Triassi, M.	8	1.31
Jaeger, C.	7	1.78
Wang, Z.	7	2.00
Westgard, S.	7	2.35
Kumar, S.	6	3.33

Obtenido de: Biblioshiny (RStudio).

4. Conclusiones: lo que podemos aprender de este artículo

La presente revisión sistemática evidencia que la metodología Six Sigma ha dejado de ser una herramienta exclusiva del entorno industrial para convertirse en un aliado estratégico en el sector salud. Su adopción creciente en hospitales y centros clínicos responde a la necesidad de ofrecer servicios más eficientes, seguros y centrados en el paciente.

A través del análisis de más de 800 publicaciones científicas, se identificaron las revistas especializadas más activas, los autores más influyentes y las tendencias temáticas emergentes. Estos hallazgos reflejan una comunidad científica comprometida con la mejora continua y con la adaptación de herramientas robustas como Six Sigma a los desafíos de la atención médica moderna.

Entre los aportes más destacados se encuentran la reducción de tiempos de espera, el control de calidad en procesos clínicos y la optimización de recursos en contextos de alta presión como la pandemia de COVID-19. Estos resultados muestran que Six Sigma no solo mejora indicadores operativos, sino que también contribuye a elevar los estándares de calidad en el cuidado de la salud.

En síntesis, este trabajo ofrece una visión clara y actualizada del potencial transformador de Six Sigma en medicina. Su integración en el ámbito sanitario permite avanzar hacia sistemas de salud más eficaces, resilientes y con una cultura organizacional orientada a la excelencia y al bienestar del paciente.

5. Referencias: *por si quieres seguir conociendo más*

- Antony, J., & Banuelas, R. (2002). Statistical process control and improvement methodology for achieving Six Sigma performance. *International Journal of Production Economics*, 80(2), 129–141.
- Cesarelli, G., Petrelli, R., Ricciardi, C., D'Addio, G., Monce, O., Ruccia, M., & Cesarelli, M. (2021). Reducing the healthcare-associated infections in a rehabilitation hospital under the guidance of Lean Six Sigma and DMAIC. *Healthcare*, 9(12), 1667. <https://doi.org/10.3390/healthcare9121667>
- Daly, A., Teeling, S. P., Ward, M., McNamara, M., & Robinson, C. (2021). The use of Lean Six Sigma for improving availability of and access to emergency department data to facilitate patient flow. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(21), 11030. <https://doi.org/10.3390/ijerph182111030>
- Improta, G., Borrelli, A., & Triassi, M. (2022). Machine learning and Lean Six Sigma to assess how COVID-19 has changed the patient management of the Complex Operative Unit of Neurology and Stroke Unit: A single center study. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(9), 5215. <https://doi.org/10.3390/ijerph19095215>
- Pyzdek, T., & Keller, P. A. (2014). *The Six Sigma handbook: A complete guide for green belts, black belts, and managers at all levels* (4th ed.). McGraw-Hill Education.
- Ward, M. E., Daly, A., McNamara, M., Garvey, S., & Teeling, S. P. (2022). A case study of a whole system approach to improvement in an acute hospital setting. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(3), 1246. <https://doi.org/10.3390/ijerph19031246>
- Ward, M. E., Daly, A., McNamara, M., Garvey, S., & Teeling, S. P. (2022). A case study of a whole system approach to improvement in an acute hospital setting. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(3), 1246. <https://doi.org/10.3390/ijerph19031246>
- Westgard, J. O., & Westgard, S. A. (2020). Six Sigma quality management system and patient safety. *Clinical Laboratory*, 66(3), 1–5. <https://doi.org/10.7754/Clin.Lab.2020.191248>



Matemáticas en la ingeniería para la Industria 5.0: del cálculo automatizado al pensamiento crítico y ético

Bertha Ivonne Sánchez Luján *

Tecnológico Nacional de México / IT de

Ciudad Jiménez,

Chihuahua, Chihuahua, México

María Teresa Martínez Acosta

Tecnológico Nacional de México / IT de

Ciudad Jiménez,

Chihuahua, Chihuahua, México

Javier Montoya Ponce

Tecnológico Nacional de México / IT de

Ciudad Jiménez,

Chihuahua, Chihuahua, México

María Guadalupe Amado Moreno

Tecnológico Nacional de México / IT de

Mexicali,

Mexicali, Baja California, México

* Autor de correspondencia: ivonnesanchez10@yahoo.com

Resumen: *Este artículo presenta una experiencia de aula en la que estudiantes de ingeniería modelaron un brote real de sarampión en Chihuahua mediante ecuaciones diferenciales, programación en Python y el uso de ChatGPT en Google Colab. Más allá del contenido técnico, se promovió el pensamiento crítico, la reflexión ética y el uso contextual de herramientas digitales. Desde un enfoque socioepistemológico y crítico, la experiencia mostró cómo las matemáticas pueden vincularse con problemáticas reales, y fortalecer competencias clave para la Industria 5.0, como la toma de decisiones, la colaboración interdisciplinaria y la responsabilidad social en la formación profesional.*

Palabras clave: *Ecuaciones diferenciales, educación matemática, Industria 5.0, modelación matemática, pensamiento crítico.*

1. Introducción: lo que debemos saber de inicio

El avance de la tecnología ha cambiado el “cómo” de la producción, el diseño o la interacción entre personas y máquinas; y también el “para qué”. Tras la consolidación de la Industria 4.0,

centrada en la digitalización, automatización e integración de sistemas ciberfísicos (Pangol Lascano, 2022) comienza a tomar forma una nueva visión: la Industria 5.0. Esta no se conforma con integrar máquinas inteligentes; va más allá. Pone al ser humano en el centro, con todo lo que eso implica: su creatividad, su bienestar y su capacidad de imaginar futuros más justos y sostenibles (Pérez Domínguez, 2024).

En este nuevo escenario, la formación de ingenieras e ingenieros se encuentra ante el desafío de adaptarse a un entorno cambiante, caracterizado por la interdisciplina, el uso ético de la inteligencia artificial y compromisos reales con la sostenibilidad. ¿Y qué papel juega aquí la enseñanza de las matemáticas? Históricamente ligada a fórmulas y algoritmos, deberá incorporar el desarrollo de otras habilidades en los estudiantes: fomentar el pensamiento crítico, ayudar a leer el mundo a través de datos, modelar fenómenos reales con sentido y, sobre todo, proponer soluciones que no ignoren su dimensión social y ética. Diversos enfoques educativos coinciden en que el aprendizaje matemático significativo se fortalece cuando se vincula con situaciones auténticas, tecnologías emergentes y entornos colaborativos (Cantoral, 2016; Freire, 1970). Desde esta perspectiva, la enseñanza de las matemáticas en carreras de ingeniería no puede reducirse a manejar técnicas de resolución, además debe integrar componentes cognitivos, tecnológicos y humanistas que preparen a los estudiantes para participar activa y éticamente en la transformación de la sociedad desde el campo de la ingeniería.

Este artículo busca compartir una experiencia concreta y significativa: una actividad de aula desarrollada en la asignatura de Ecuaciones Diferenciales, en la que se modeló el brote de sarampión registrado en el estado de Chihuahua. Se trató de una oportunidad para resignificar el aprendizaje matemático desde un enfoque ético, crítico y situado. Una propuesta que, creemos, puede contribuir a imaginar una nueva ingeniería para una nueva sociedad.

2. Fundamentos Teóricos: reglas y principios científicos importantes

La transformación que plantea la Industria 5.0 es digital y al mismo tiempo humana. Invita a repensar desde la raíz cómo se forman los futuros profesionales de la ingeniería. Ya no basta con dominar tecnologías sofisticadas o entender sistemas automatizados (Haro Esquivel & Ayala Hernández, 2024). Lo que este nuevo paradigma exige es una industria que sea

sostenible, resiliente y, sobre todo, centrada en las personas: sus valores, sus decisiones y su capacidad de actuar con responsabilidad.

Formar ingenieros en este contexto implica algo más que transmitir conocimientos técnicos. Se trata de cultivar habilidades críticas, actitudes éticas y una disposición genuina al trabajo colaborativo. Y aquí es donde la educación matemática se vuelve clave. Más allá de ser un conjunto de herramientas para resolver ecuaciones, la matemática se convierte en un lenguaje para comprender la complejidad del mundo: permite modelar fenómenos, analizar datos con profundidad, optimizar procesos de manera consciente y tomar decisiones bien fundamentadas, especialmente en escenarios donde no hay respuestas simples. En otras palabras, formar personas que piensen con rigor... pero también con empatía. Con esto en mente, nuestra propuesta tiene tres ejes:

En primer lugar, la socioepistemología plantea que el conocimiento matemático no es algo eterno ni universal, sino que surge de las prácticas sociales. Aprendemos matemáticas porque las necesitamos para actuar en el mundo: para construir, para comunicar, para resolver. Enseñar desde esta mirada nos permite vincular los contenidos matemáticos con los contextos reales que viven nuestros estudiantes (Cantoral, 2016). En segundo lugar, el modelo TPACK (Technological Pedagogical Content Knowledge) que reúne tres dimensiones de enseñanza: el conocimiento tecnológico, el pedagógico y el del contenido. Aplicado a las matemáticas, esto implica que no basta con saber derivar o modelar. También es necesario saber cómo enseñar esos contenidos y cuales herramientas digitales pueden potenciar su comprensión (Salas-Rueda, 2019). Esta integración favorece ambientes de aprendizaje dinámicos, colaborativos y contextualizados. En tercer lugar, la pedagogía crítica, impulsada por Paulo Freire, invita a formar sujetos conscientes de su realidad, capaces de interrogarla, transformarla y tomar decisiones con responsabilidad ética (Freire, 1970). Desde esta óptica, el aprendizaje de las matemáticas debe involucrar también una reflexión sobre el impacto social y ambiental del uso de modelos matemáticos y herramientas tecnológicas.

Estas tres perspectivas nos ayudan a proponer experiencias de aprendizaje donde las y los estudiantes además de realizar cálculos, deben comprender, discutir y proponer. Porque en la era de la Industria 5.0, formar ingenieras e ingenieros implica formar ciudadanos comprometidos, capaces de leer el mundo con sensibilidad y precisión matemática.

3. Desarrollo del Trabajo: *aplicando las reglas y principios científicos*

Como parte de la asignatura de Ecuaciones Diferenciales, se desarrolló una experiencia de aula con un doble propósito: 1) consolidar el aprendizaje de sistemas dinámicos no lineales, y 2) mostrar cómo las matemáticas pueden ayudar a comprender fenómenos reales de gran impacto social. La actividad se centró en la modelación de un brote de sarampión reportado por la Secretaría de Salud en febrero de 2025 en el estado de Chihuahua (González, 2025). Se utilizó como base el modelo epidemiológico SIR (Susceptibles-Infectados-Recuperados), basado en un sistema de 3 ecuaciones diferenciales ordinarias no lineales (García Clúa et al., 2022, p.25).

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dS}{dt} = -\beta SI \\ \frac{dI}{dt} = \beta SI - \gamma I \\ \frac{dR}{dt} = \gamma I \end{array} \right. \quad (1)$$

Donde S , I , R representan la proporción de población susceptible, infectada y recuperada, respectivamente, y los parámetros β y γ corresponden a las tasas de transmisión y recuperación.

La implementación técnica de este modelo se llevó a cabo utilizando *Google Colab*, un entorno de programación en la nube que permite ejecutar código *Python* sin necesidad de instalación local. Esta herramienta fue elegida por su accesibilidad, su integración con bibliotecas científicas como *SciPy* y *Matplotlib*, y su potencial para el trabajo colaborativo en tiempo real. Dado que no todos los estudiantes contaban con conocimientos previos en *Python*, se promovió el uso del asistente conversacional *ChatGPT* como apoyo en la generación y explicación del código. Cada equipo solicitó indicaciones específicas al modelo, adaptó el código propuesto, lo ejecutó en *Colab* y depuró errores. Este proceso, fue un reto inicial —por cuestiones como la instalación de librerías, el ajuste de parámetros o la interpretación de errores— se convirtió en una experiencia de aprendizaje significativa. No siempre funcionó a la primera, y eso mismo lo hizo valioso: permitió aprender haciendo, equivocándose, iterando.

La Figura 1 muestra una de las simulaciones generadas por los equipos, correspondiente a un escenario con el 30 % de población vacunada. El análisis del comportamiento de las curvas permitió explorar fenómenos como el pico epidemiológico, el punto de equilibrio y los efectos de distintas tasas de intervención. Más allá del análisis técnico, se promovió una reflexión crítica sobre el uso de modelos matemáticos en la toma de decisiones en salud pública. Se discutieron preguntas como: ¿Qué tan confiables son estos modelos frente a la variabilidad de los datos? ¿Qué responsabilidades éticas tiene un ingeniero al diseñar soluciones basadas en simulaciones? ¿Cómo puede la ingeniería aportar a la prevención y mitigación de epidemias?, ¿Cómo podría una herramienta digital contribuir —o perjudicar— la gestión de una crisis sanitaria?

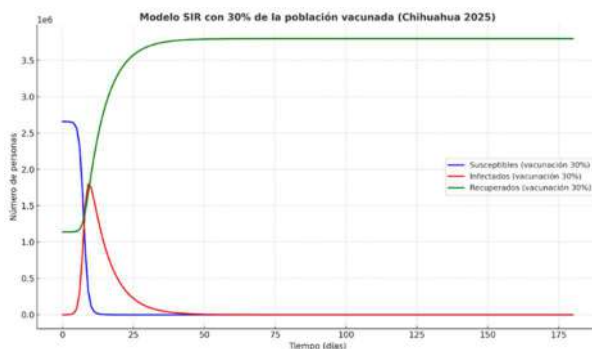


Figura 5. Simulación del modelo SIR en Google Colab con apoyo de ChatGPT.

Obtenida de: elaboración propia.

Los productos entregables incluyeron un informe técnico con gráficas y análisis, bitácoras del proceso de codificación, y reflexiones escritas sobre la dimensión ética y profesional del trabajo realizado. Esta experiencia promovió el desarrollo de competencias clave para la Industria 5.0: a) Modelación matemática con sentido social, b) Uso crítico de herramientas digitales, c) Análisis de datos reales con enfoque interdisciplinario (matemáticas, ingeniería, salud) y d) Formación ética y compromiso con lo humano.

4. Conclusiones: lo que podemos aprender de este artículo

La experiencia desarrollada en el aula de Ecuaciones Diferenciales no fue únicamente una actividad académica con fines instrumentales. Fue una oportunidad para resignificar la enseñanza de las matemáticas desde una perspectiva crítica, humana y contextualizada. En

un escenario como el que plantea la Industria 5.0, donde la tecnología debe convivir con los valores éticos, la creatividad y la responsabilidad social, el aula se transforma en un espacio para pensar el presente... y construir el futuro.

Esta vinculación con lo real —con lo que duele, preocupa o moviliza a una comunidad— permite que las matemáticas dejen de sentirse ajenas o abstractas, y empiecen a vivirse como herramientas de comprensión y acción. Al responder las preguntas los estudiantes concluyeron que *la variabilidad de los datos exige modelos abiertos, flexibles, no verdades absolutas, además de mostrar su compromiso ético cuando las y los estudiantes discutieron la responsabilidad de quienes deciden en salud pública con base en simulaciones.*

El uso de herramientas como Google Colab y ChatGPT no fue una moda. Fue parte de la formación digital crítica que requiere un ingeniero o ingeniera del siglo XXI. Acompañar a los estudiantes en la apropiación de estos recursos, enfrentar los errores de compilación, aprender a interpretar una curva epidemiológica o justificar la elección de un parámetro, son procesos que vinculan lo técnico con lo pedagógico, y lo disciplinar con lo humano. Esta experiencia ayudó a comprender un sistema de ecuaciones; y permitió imaginar cómo, desde el aula, se puede contribuir a una cultura de prevención y justicia social.

5. Referencias: *por si quieres seguir conociendo más*

- Cantoral, R. (2016). Educación alternativa: matemáticas y práctica social. *Revista Perfiles Educativos*, 38(SPE), 7-18. <https://www.scielo.org.mx/pdf/peredu/v38nspe/0185-2698-peredu-38-spe-00007.pdf>
- García Clúa, J.G., Vampa, V., Calandra, M.V., & Costa, V.A. (2022). Ajustes del modelo SIR a los datos iniciales de la pandemia del COVID-19 en Argentina. *Ciencia y Tecnología*, 22, 21-36 <https://doi.org/10.18682/cyt.vi22.5377>
- González, V. (2025). Ante brote de sarampión en Texas, llama Secretaría de Salud de Chihuahua a vacunar a menores. *El Herald de Chihuahua | Noticias Locales, Policiacas, de México, Chihuahua y el Mundo*. <https://oem.com.mx/elheraldodechihuahua/local/ante-brote-de-sarampion-en-texas-llama-secretaria-de-salud-de-chihuahua-a-vacunar-a-menores-21826407>
- Freire, P. (1970). *Pedagogía del oprimido* (25ª ed.). Siglo XXI Editores.

- Haro Esquivel, G., & Ayala Hernández, P. (2024). Reto del Ingeniero a ser Docente de Ingeniería en la Industria 5.0. *Estudios Y Perspectivas Revista Científica Y Académica*, 4(2), 1830–1848. <https://doi.org/10.61384/r.c.a.v4i2.329>
- Pangol Lascano, A.M. (2022). Industria 4.0, implicaciones, certezas y dudas en el mundo laboral. *Revista Universidad y Sociedad*, 14(4), 453-465. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2218-36202022000400453&lng=es&tlng=en
- Pérez-Domínguez, L. A. (2024). Las principales tecnologías de la era de la industria 5.0. *Revista Ingenio*, 21(1), 60–70. <https://doi.org/10.22463/2011642X.4352>
- Salas-Rueda, R. A. (2019). Modelo TPACK: ¿Medio para innovar el proceso educativo considerando la ciencia de datos y el aprendizaje automático? *Entreciencias: Diálogos En La Sociedad Del Conocimiento*, 7(19). <https://doi.org/10.22201/enesl.20078064e.2018.19.67511>



Aplicación de la geometría analítica en la planeación de rutas

Mario Alberto Sandoval Hernández

*Centro de Bachillerato Tecnológico industrial
y de servicios No. 190,
Boca del Río, Veracruz, México*

Fernando Iván Molina Herrera

*Tecnológico Nacional de México / IT de
Celaya,
Celaya, Guanajuato, México*

Hugo Jiménez Islas *

*Tecnológico Nacional de México / IT de
Celaya,
Celaya, Guanajuato, México*

Luis Isaí Quemada Villagómez

*Tecnológico Nacional de México / IT de
Celaya,
Celaya, Guanajuato, México*

* Autor de correspondencia: hugo.jimenez@itcelaya.edu.mx

Resumen: *En este artículo de divulgación educativa se presenta una aplicación de la geometría analítica. Los autores que publican artículos relacionados con la planeación de trayectorias no suelen explicarlo de manera didáctica, pues suponen que el público lector posee un amplio bagaje en el tema. El propósito de este trabajo es mostrar a estudiantes no expertos que los conceptos de la geometría analítica siguen vigentes, con aplicaciones novedosas dentro de la ingeniería.*

Palabras clave: *Análisis numérico, ecuaciones, homotopía con seguimiento hipersférico, matemática educativa, trazado de rutas.*

1. Introducción: lo que debemos saber de inicio

Para estudiar la geometría analítica es necesario tener conocimientos de geometría plana y del espacio, así como de álgebra. La Geometría analítica es la relación entre el álgebra y la geometría (Garza-Olvera, 1991). En su estudio se estudia el punto en el plano (o en el espacio hablamos de la geometría analítica en el espacio), posteriormente se estudia la línea recta y sus características como la pendiente y las intersecciones con los ejes coordenados. Después

se estudian las cónicas, es decir, la circunferencia, parábola y la elipse, sus ecuaciones, focos, asíntotas (la circunferencia no tiene focos ni asíntotas).

Asimismo, se estudia la traslación y rotación de ejes, entre otros temas que se abordan ahí. El estudio de la geometría analítica es fundamental para el estudio del cálculo, ecuaciones diferenciales y otras disciplinas del área de matemáticas porque se requiere conocer el comportamiento de funciones en dos y en tres dimensiones. La geometría analítica tiene amplias aplicaciones las cuales se encuentran en nuestro entorno inmediato. Por ejemplo, el diseño de las antenas parabólicas tiene su fundamento en la parábola. El receptor de esta antena se encuentra en el foco y es el lugar donde convergen todos los rayos de las señales que llegan, tal como lo describe la definición de esta cónica (Garza-Olvera, 1991). En el área de la electrónica también se encuentran aplicaciones como en el manejo de las pantallas graficas de cuarzo liquido de los distintos dispositivos como calculadoras graficadoras científicas. En general, la geometría analítica cuenta con muchas aplicaciones que los estudiantes ven en su entorno pero que ignoran los fundamentos matemáticos y geométricos. En este trabajo se expone una aplicación de la geometría analítica que en los últimos años está cobrando mucha importancia dentro de la planeación de trayectorias dentro de la robótica (Díaz-Arango et al, 2017). Esta metodología no debe confundirse con la implementación de trayectorias por medio del trazado de una línea en color utilizando pintura o pegando alguna cinta sobre el piso, el cual debe seguir un carrito con sensores ópticos para seguir el patrón. Tampoco debe confundirse con la implementación de sensores ultrasónicos para medir el espacio en el movimiento de algunos robots móviles que tienen el propósito barrer la basura y el polvo en los hogares y en las oficinas y que pueden encontrarse de venta en tiendas de conveniencia y centros comerciales.

2. Fundamentos Teóricos: *reglas y principios científicos importantes*

Se plantea el desplazamiento de un móvil en un espacio plano, donde cada objeto es representado por una función cerrada, la cual puede ser una circunferencia o forma elíptica, en diferente lugar con distintas dimensiones como un radio más amplio. Se parte de un punto de inicio, el cual es el origen (punto A) y se llega a un punto objetivo (punto B), el cual es el cruce de dos líneas rectas (Díaz-Arango et al 2017). Se trata entonces de generar una trayectoria que comienza en el origen la cual debe ir librando los obstáculos hasta llegar al

objetivo. De esta manera se tiene que un obstáculo en forma de circunferencia está regido por la ecuación de la circunferencia, centro en (x_i, y_i) y radio r_i .

$$C_i(x, y) = (x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 - r_i^2 = 0 \quad (1)$$

Para obstáculos que tiene una forma rectangular, esta se puede aproximar a una elipse entonces esta puede modelarse por

$$R_i(x, y) = \left(\frac{(x - x_i) \cos(\varphi_i)}{\alpha} \right)^{2\eta} + \left(\frac{(y - y_i) \sin(\varphi_i)}{\beta} \right)^{2\eta} - 1 = 0 \quad (2)$$

Donde η define la forma de las esquinas, (x_i, y_i) representa el centro del objeto, con anchura 2α y altura 2β y φ_i es el ángulo de rotación (Diaz-Arango et al, 2017). Nótese que la ecuación (2) describe una circunferencia si $\cos(\varphi) = \eta = \alpha = \beta = 1$. De esta manera, para describir todos los obstáculos en el plano cartesiano, se deben sumar las ecuaciones que rigen a cada uno de los obstáculos. La fórmula para todos los obstáculos es

$$W(x, y) = \sum_{i=1}^k \frac{p_i}{O_i(x, y)} \quad (3)$$

donde k es el número de obstáculos en el plano cartesiano, p_i es el parámetro de repulsión del i -ésimo obstáculo, $O_i(x, y)$ es el obstáculo descrito por las ecuaciones (1) o (2). El punto B se encuentra dado por el cruce de un sistema de ecuaciones lineales dado por

$$\begin{aligned} L_1(x, y) &= -y - m_1x + (b - m_1a) = 0 \\ L_2(x, y) &= -y - m_2x + (b - m_2a) = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

donde m_1 y m_2 son las pendientes de las rectas (a, b) representa el punto de intersección entre las líneas rectas. Este método de planeación de rutas utiliza el efecto de atracción hacia el punto de intersección en B y un efecto de repulsión por los obstáculos. La figura 1 muestra el plano cartesiano con 5 circunferencias que modelan los obstáculos. Esta metodología incorpora los obstáculos $W(x, y)$ como singularidades al sistema de ecuaciones formado por las rectas. Por lo tanto, se obtiene

$$\begin{aligned} f_1(x, y) &= L_1(x, y) = 0 \\ f_2(x, y) &= L_2(x, y) = W(x, y) - W(a, b) = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

Note en la ecuación (5) que $W(a, b)$ anula los efectos de las singularidades en el punto B. De las formulaciones de las ecuaciones (1) y (5) es notoria la intervención de las ecuaciones de la recta y la circunferencia visto en geometría analítica (Garza-Olvera, 1991) para el planteamiento de la metodología de planeación de rutas.

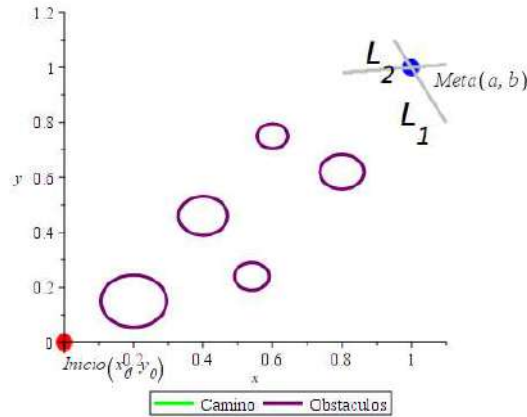


Figura 1. El plano cartesiano en la planeación de rutas.

Obtenida de: elaboración propia.

Para resolver este sistema de ecuaciones, se formula la homotopía de Newton.

$$\begin{aligned} H_1(f_1(x, y), \tau) &= f_1(x, y) - (1 - \tau)f_1(x_0, y_0) = 0 \\ H_2(f_2(x, y), \tau) &= f_2(x, y) - (1 - \tau)f_2(x_0, y_0) = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

La formulación un sistema homotópico tiene n ecuaciones y $n + 1$ variables, es decir las n variables más el parámetro de homotopía τ . En este caso, tenemos las variables x, y y el parámetro τ . Después de la formulación homotópica, el problema se convierte en un problema en tres dimensiones. Para realizar el seguimiento debe incorporarse una tercera ecuación, la cual es una esfera, o hiperesfera en n dimensiones, esto es

$$S_i(x, y) = (x - c_x)^2 + (y - c_y)^2 + (\tau - c_\tau)^2 - r^2 = 0 \quad (7)$$

Donde c_x, c_y, c_τ es el centro y r es el radio de la esfera. Incorporando la ecuación (7) con (6) se obtiene el sistema de ecuaciones dado por

$$H_s = \begin{cases} H_1(x, y, \tau) = 0 \\ H_2(x, y, \tau) = 0 \\ S_i(x, y, \tau) = 0 \end{cases} \quad (8)$$

3. Desarrollo del Trabajo: *aplicando las reglas y principios científicos*

El sistema homotópico (8) debe ser resuelto de manera iterativa para obtener el trazado de la ruta desde el punto A, hasta el punto B. En (Jiménez-Islas, 1996; Díaz-Arango, 2017) se presenta la homotopía de continuación con seguimiento hiperesférico, la cual consiste esencialmente de los siguientes puntos.

1. Formular la homotopía del sistema de ecuaciones. En este caso el sistema (5) es perturbado agregando el parámetro homotópico obteniéndose (6).
2. Se agrega la ecuación de la esfera al sistema (6) para obtener el sistema (8) el cual será resuelto con la continuación numérica. De esta manera el seguimiento con hiperesferas es llevado a cabo.
3. El trazado del camino homotópico es la ruta que el móvil debe seguir. Para ello el camino homotópico consta de dos procedimientos. El primero es la fase de predicción y esto se lleva a cabo con el predictor de Euler (Faires y Burden, 2017). Posteriormente la corrección es llevada a cabo utilizando Newton-Raphson. El proceso se repite de manera iterativa.
4. Conforme se repiten las iteraciones, el parámetro τ va incrementándose. Cuando el parámetro cumple el criterio $t_j < 1$ y $\tau_{j+1} > 1$, entonces debe interpolarse para encontrar la solución $\tau = 1$ obteniéndose el punto B.

La Figura 2 muestra el trazo de la ruta, donde se aprecia cómo se han ido soslayando los obstáculos.

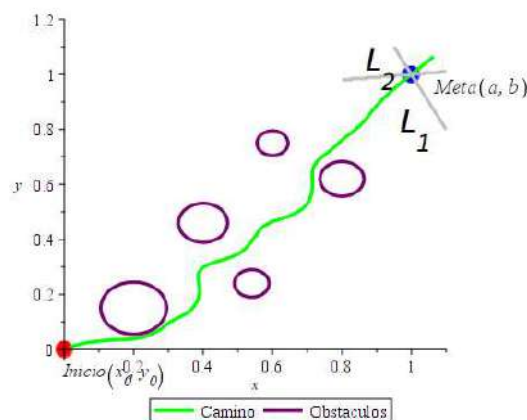


Figura 2. Planeación de rutas.

Obtenida de: elaboración propia.

La planeación de rutas fue implementada en Maple. Para el desarrollo del trazado de rutas se utilizó una computadora con procesador Intel Core i5-7200U con tarjeta gráfica 620 (KBL GT2) y sistema operativo Linux Ubuntu 20.04.06 LTS.

4. Conclusiones: *lo que podemos aprender de este artículo*

En este trabajo se abordó la planeación de rutas enfatizando la importancia educativa que tiene la geometría analítica en este contexto. Los resultados presentados en este trabajo muestran que el trazo obtenido en la figura 1 se ha obtenido resolviendo un sistema de ecuaciones de manera iterativa, aunque de manera numérica. Este hecho mantiene el fundamento que, para encontrar una coordenada en el plano cartesiano, debe resolverse un sistema de ecuaciones. Este algoritmo, al implementarse en un robot móvil, el robot seguirá una ruta librando obstáculos resolviendo un sistema de ecuaciones de manera iterativa hasta llegar al punto final. En esta metodología el móvil se desplazará hacia el punto final buscando el mejor camino que evade obstáculos, siempre en un sentido. Este comportamiento se hace más evidente si el número de obstáculos aumenta cambiando su configuración en el plano, y no debe confundirse con la implementación de sensores en un móvil ya que el móvil si evitara colisionar con obstáculos, pero su trayectoria será errática lo que no garantiza que en un instante determinado logre llegar al punto final.

Se espera que, en un futuro cercano, los estudiantes en etapas tempranas dispongan de más información educativa y tecnológica que les permita contar con una visión más grande de la aplicación de las matemáticas propiciando que se interesen en el estudio de la ciencia y sus aplicaciones.

5. Referencias: *por si quieres seguir conociendo más*

- Díaz-Arango, G., Vázquez-Leal, H., Hernández-Martínez, L., Sanz-Pascual, M. T. y Sandoval-Hernández, M. (2017). Homotopy path planning for terrestrial robots using spherical algorithm. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 15(2). <https://doi.org/10.1109/TASE.2016.2638208>Publis
- Faires, J. D. y Burden R. L. (2017). *Numerical methods* (9na. Edición). Cengage Learning.
- Garza-Olvera, B. (1991). *Matemáticas III Geometría Analítica*, Colección DGETI.

- Jiménez-Islas, H. (1996). SEHPE: programa para la solución de sistemas de ecuaciones no lineales mediante método homotópico con seguimiento hiperesférico. *Avances en Ingeniería Química*, 6(2).
- Sandoval-Hernández, M., Vázquez-Leal, H., Huerta-Chua, J., Castro-González, F. J., y Filobello-Nino, U. A. (2022). Didáctica del graficado de funciones: el caso de las funciones piecewise. *RIDE. Revista Iberoamericana para la Investigación y el Desarrollo Educativo*, 12(24).
- Sandoval-Hernandez, M. A., Jimenez-Islas, H., Vazquez-Leal, H., Quemada-Villagómez, M. L., y Lopez-Gonzalez, M. D. L. L. (2025). Exploring homotopy with hyperspherical tracking to find complex roots with application to electrical circuits. *Open Mathematics*, 23(1), 20240115.



¿Qué es la regresión lineal? Una forma sencilla de entender los mínimos cuadrados

Jesús Villegas Saucillo *

*Tecnológico Nacional de México / IT de
Celaya,
Celaya, Guanajuato, México*

Mario Alberto Sandoval Hernández

*Centro de Bachillerato Tecnológico industrial
y de servicios No. 190,
Boca del Río, Veracruz, México*

Fernando Iván Molina Herrera

*Tecnológico Nacional de México / IT de
Celaya,
Celaya, Guanajuato, México*

Javier Díaz Carmona

*Tecnológico Nacional de México / IT de
Celaya,
Celaya, Guanajuato, México*

* Autor de correspondencia: jesus.villegas@itcelaya.edu.mx

Resumen: Este artículo tiene como propósito explicar de manera sencilla el método de mínimos cuadrados, una herramienta que permite encontrar una línea que se ajusta lo mejor posible a un conjunto de datos. Se presenta la deducción paso a paso de las fórmulas de regresión lineal, lo que permite entender su origen y utilidad. Además, se incluye un ejemplo práctico que ilustra cómo aplicar el método de una manera sencilla. Todo el contenido está orientado a estudiantes y lectores interesados en comprender cómo se aplica esta técnica de la estadística empleada para analizar tendencias y relaciones entre variables, sin necesidad de conocimientos avanzados.

Palabras clave: Ajuste de datos, matemática educativa, mínimos cuadrados, modelación matemática, regresión lineal.

1. Introducción: lo que debemos saber de inicio

El método de mínimos cuadrados (MMC) ha sido atribuido a matemáticos como Legendre, Gauss y Boscovich (Garzón, 2003). En 1801, tras la observación parcial del planeta Ceres por

el astrónomo G. Piazzi, Carl Gauss utilizó este método para predecir con gran precisión su órbita. A diferencia de otros cálculos, su predicción fue confirmada al redescubrirse el planeta justo en la posición anticipada (Garzón, 2003).

Actualmente, el MMC es una herramienta fundamental tanto en estadística como en análisis numérico. Se emplea en la estimación de parámetros para generar modelos que predicen fenómenos como epidemias o comportamientos físicos complejos (Englezos y Kalogerakis, 2000; Bates y Watts, 1988).

El método de mínimos cuadrados también juega un papel importante en el aprendizaje automático, también conocido como *machine learning*, un área que permite a las computadoras aprender por sí mismas a partir de datos, sin necesidad de ser programadas para cada tarea específica. En vez de seguir instrucciones fijas, estas máquinas encuentran patrones y los usan para hacer predicciones. En el estudio de Kim, Bae y Jang (2022), los investigadores usaron técnicas de aprendizaje automático, como la regresión lineal, para predecir cuánta agua se evapora del suelo y las plantas, lo que se conoce como evapotranspiración. Lo interesante es que no necesitaron todos los datos que normalmente se requieren, como la velocidad del viento o la presión del aire. En su lugar, trabajaron con información sencilla de obtener, como la temperatura, la humedad y la cantidad de sol.

En electrónica, el método MMC tiene aplicaciones importantes en el procesamiento digital de señales, una técnica que permite analizar, modificar o extraer información de señales como audio, video o datos de sensores mediante algoritmos computacionales (Kay, 1993). Además, el MMC se ha empleado para aproximar funciones especiales, que son funciones matemáticas no elementales pero comunes en física e ingeniería y que provienen de la solución de ecuaciones diferenciales, como las funciones, Gamma, error, Bessel, o las funciones elípticas. En particular, Sandoval-Hernández et al. (2018) utilizaron funciones trascendentes como seno, coseno y exponencial para aproximar de manera algebraica las integrales de Fresnel, las cuales aparecen al estudiar fenómenos de difracción, como la dispersión de la luz al pasar por una rendija, una doble rendija o por el borde de un obstáculo. Estos modelos permiten predecir patrones de interferencia luminosa. De manera más reciente, Vázquez-Leal et al. (2025) utilizaron el MMC para ampliar el dominio de validez de métodos asintóticos, los cuales permiten obtener aproximaciones de funciones cuando una variable tiende a valores extremos, es decir, valores muy grandes o valores muy pequeños. Estos métodos son muy útiles cuando no se puede encontrar una solución exacta, pero se

requiere una expresión cercana que describa el comportamiento de una función en ciertas regiones. En su trabajo, los autores aplicaron esta técnica para mejorar la precisión de funciones especiales como la función Gamma y la función elíptica de primera clase.

2. Fundamentos Teóricos: *reglas y principios científicos importantes*

El método de mínimos cuadrados (MMC) se usa para encontrar una función que se acerque lo mejor posible a un conjunto de datos. Lo que busca este método es que la diferencia entre los datos reales y los que predice la función sea lo más pequeña posible. Para lograrlo, se toman esas diferencias, se elevan al cuadrado y luego se suman. Al hacer esto, se da más importancia a los errores grandes y se obtiene una mejor aproximación.

Imaginemos que tenemos varios puntos con coordenadas $(x_0, y_0), (x_1, y_1), \dots, (x_i, y_i)$, y queremos encontrar una curva que pase cerca de todos ellos. Esa curva se puede escribir como una función $y = f(x_i, a_0, a_1, a_2, \dots, a_j)$, donde los $a_j, (j = 0, 1, 2, \dots, n)$ son números que necesitamos calcular. La idea es ajustar esa función para que los valores que nos da estén lo más cerca posible de los valores reales de y_i . Lo que se hace es sumar las diferencias al cuadrado entre lo que dice el modelo y lo que realmente se midió, y luego encontrar los valores de $a_0, a_1, a_2, \dots, a_j$ de la función S que hacen que esa suma sea la más pequeña posible.

$$S(a_0, a_1, a_2, \dots, a_j) = \sum_{i=1}^n \left((y_i) - f(x_i, a_0, a_1, a_2, \dots, a_j) \right)^2 \quad (1)$$

Esto representa una forma cuadrática que, cuando el modelo es lineal respecto a sus parámetros, garantiza que el error tendrá una única solución mínima. En este tipo de modelo, los parámetros aparecen de manera sencilla, sin multiplicarse entre sí ni elevarse a potencias, lo cual facilita la resolución del sistema. Sin embargo, también existen modelos no lineales, en los que los parámetros intervienen de manera más compleja algebraicamente, por ejemplo, dentro de funciones exponenciales, logarítmicas o como parte de productos entre ellos. Aun en estos casos, el objetivo sigue siendo el mismo: encontrar los valores de los parámetros que hagan que el error sea lo más pequeño posible. Para lograrlo, se utiliza una técnica matemática que consiste en calcular derivadas parciales con respecto a cada parámetro y luego igualarlas a cero. Esto genera un sistema de ecuaciones que permite encontrar los puntos donde el error no cambia, conocidos como

puntos críticos. Estos puntos pueden ser mínimos, máximos o puntos de silla. Un punto de silla es un tipo especial de punto donde la función cambia de dirección: en una dirección puede aumentar y en otra disminuir, como si uno estuviera sentado en una silla de montar, hundido en un sentido y elevado en otro. Sin embargo, en el método de mínimos cuadrados nos interesan principalmente aquellos puntos que representan el menor error posible, es decir, los mínimos.

$$\begin{aligned} \frac{\partial S}{\partial a_0} &= \frac{\partial}{\partial a_0} \left(\sum_{i=1}^n \left((y_i) - f(x_i, a_0, a_1, a_2, \dots, a_j) \right)^2 \right) = 0 \\ &\vdots \\ \frac{\partial S}{\partial a_n} &= \frac{\partial}{\partial a_n} \left(\sum_{i=1}^n \left((y_i) - f(x_i, a_0, a_1, a_2, \dots, a_j) \right)^2 \right) = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

Sin embargo, como la expresión S está construida como una suma de cuadrados, esto garantiza que los puntos que se obtienen al resolver el sistema correspondan a mínimos globales en el caso de modelos lineales, o a mínimos locales en el caso de modelos no lineales, siempre que se cumplan ciertas condiciones de regularidad. El objetivo del método de mínimos cuadrados es, precisamente, encontrar el mejor ajuste posible reduciendo el error; por lo tanto, maximizar S iría en contra de este propósito (Bates y Watts, 1988). Cuando se trabaja con modelos lineales, S es una función estrictamente convexa, lo que asegura la existencia de un único mínimo. En modelos no lineales, aunque esta convexidad no está garantizada, el método sigue enfocado en buscar mínimos utilizando un proceso iterativo que ajusta los parámetros paso a paso. Las condiciones de segundo orden pueden confirmar si se ha encontrado un mínimo, pero en la práctica se utilizan principalmente las condiciones de primer orden, ya que son más eficientes desde el punto de vista computacional (Bates y Watts, 1988). Al resolver el sistema de ecuaciones (2) se obtienen los valores de las constantes de ajuste (a_j), lo cual permite construir una función que minimice el error entre los datos observados y el modelo. Este proceso ayuda a encontrar una curva continua que se ajuste lo mejor posible a los datos. En este enfoque, se pueden probar distintos modelos y elegir aquel que proporcione el mejor ajuste. La Figura 1 ilustra esta metodología: a partir del conjunto de datos (x_i, y_i) , donde $i = 1, 2, 3, \dots$, se determina la función que mejor representa la tendencia de los datos.

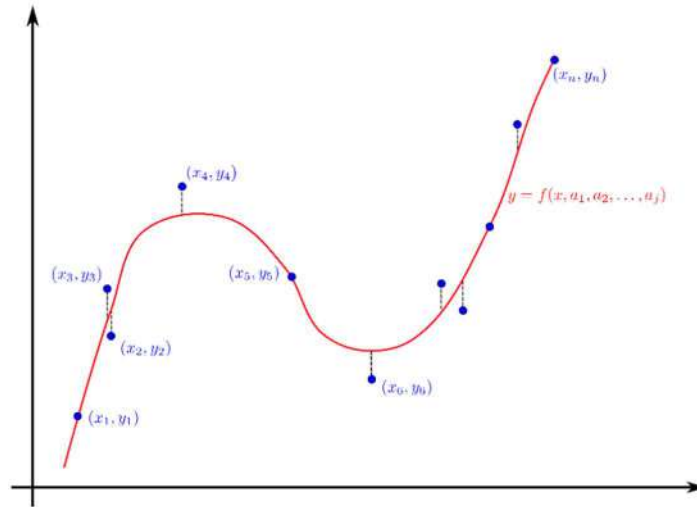


Figura 1 El método de mínimos cuadrados.

Obtenida de: elaboración propia.

3. Desarrollo del Trabajo: *aplicando las reglas y principios científicos*

Para deducir las fórmulas de regresión lineal, se considera el modelo dado por la recta $y = mx + b$. Al sustituir este modelo en la expresión (1) del error cuadrático y derivar con respecto a los parámetros $a_0, a_1, a_2, \dots, a_j$, se obtiene el sistema de ecuaciones necesario para calcular los valores óptimos de estos coeficientes.

$$\begin{aligned} \frac{\partial S(m, b)}{\partial b} &= -2 \left(\sum_{i=1}^n ((y_i) - mx - b) \right) = 0 \\ \frac{\partial S(m, b)}{\partial m} &= -2 \left(\sum_{i=1}^n ((y_i) - mx - b) x \right) = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

El sistema de ecuaciones (3) contiene tres términos en cada una de sus ecuaciones. Al aplicar las propiedades de las sumatorias, es posible simplificar el sistema, lo que facilita el cálculo de los coeficientes de la recta de regresión.

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n y_i - m \sum_{i=1}^n x_i - bn &= 0 \\ \sum_{i=1}^n y_i x_i - m \sum_{i=1}^n x_i^2 - b \sum_{i=1}^n x_i &= 0 \end{aligned} \quad (4)$$

Nótese que se han incluido los subíndices en x e y debido a la presencia de sumatorias, ya que en este paso se sustituirán los datos correspondientes. Al reescribir el sistema (4), se obtiene un sistema de ecuaciones en el que deben determinarse los valores de m y b , que corresponden a la pendiente y al punto de intersección con el eje y , respectivamente.

$$\begin{aligned} m \sum_{i=1}^n x_i + bn &= \sum_{i=1}^n y_i \\ m \sum_{i=1}^n x_i^2 + b \sum_{i=1}^n x_i &= \sum_{i=1}^n x_i y_i \end{aligned} \quad (5)$$

Resolviendo el sistema (5) se obtiene

$$\begin{aligned} m &= \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \\ b &= \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 \sum_{i=1}^n y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n x_i y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i - m \sum_{i=1}^n x_i}{n} \end{aligned} \quad (6)$$

Es posible demostrar que la correlación entre dos variables está dada por la fórmula:

$$r = \frac{s_{xy}}{s_x s_y} \quad (7)$$

donde s_{xy} representa la covarianza, que indica cómo varían conjuntamente dos variables: si tienden a aumentar o disminuir al mismo tiempo, la covarianza será positiva, y si una aumenta mientras la otra disminuye, será negativa. Por su parte, s_x y s_y son las desviaciones estándar de x y y respectivamente, las cuales miden cuánto se alejan los datos respecto a su promedio; en otras palabras, indican qué tan dispersos están los valores de cada variable. A continuación, presentamos un caso de aplicación.

En la tabla 1 se tiene el registro de la temperatura y de la longitud de una varilla la cual se sabe que tiene un coeficiente de dilatación que es aproximadamente lineal. Obténgase la longitud de la varilla a una temperatura de 12.5 °C. Determine la temperatura si la longitud es 18.5mm.

La Tabla 1 incluye todas las sumatorias necesarias para realizar los cálculos. Por ejemplo, para obtener la suma de los cuadrados de x (i.e. x^2), se ha elevado al cuadrado cada uno de los valores de x , y el resultado se ha registrado en una columna adicional. Luego, estas sumas se utilizan para sustituir en las fórmulas correspondientes. Al insertar los valores de las

sumatorias obtenidas en la Tabla 1 en la ecuación (5), se procede a resolver el sistema y determinar los parámetros del modelo lineal.

$$m = \frac{5(1855) - 100(87)}{5(2250) - 10000} = 0.46$$

$$b = \frac{87 - 0.46(100)}{5} = 8.2$$
(8)

Tabla 1. Dilatación de una varilla y sumatorias para regresión lineal.

T [°C]	L [mm]	Datos n = 5	Sumatorias			
x	y		$\sum x$	$\sum y$	$\sum x^2$	$\sum xy$
10	13		10	13	100	130
15	15		15	15	225	225
20	17		20	17	400	340
25	20		25	20	625	500
30	22		30	22	900	660
Totales			100	87	2250	1855
		$(\sum x)^2 =$	10000			

Obtenido de: Elaboración propia.

Sustituyendo los valores obtenidos para m y b en el modelo, se tiene la ecuación $\hat{y} = 0.46x + 8.2$, donde el acento circunflejo sobre la variable y indica que se trata de una estimación. Para calcular la longitud de la varilla a una temperatura de 12.5 °C, basta con sustituir este valor en la fórmula, obteniendo así $L = 13.95\text{mm}$. Si en cambio se desea conocer la temperatura correspondiente a una longitud determinada, se debe despejar x de la ecuación, resultando en $\hat{x} = \frac{y-8.2}{0.46}$. Al sustituir el valor de la longitud, se obtiene la temperatura correspondiente en grados Celsius. La Figura 2 muestra el modelo de regresión lineal junto con los datos originales y los valores estimados.

Como era de esperarse, los valores pronosticados se encuentran sobre la línea recta, mientras que los datos reales se sitúan cerca de la recta de regresión. Cuando se dispone de un mayor número de datos, es posible que algunos de ellos coincidan exactamente con la recta, lo cual indica un ajuste preciso del modelo.

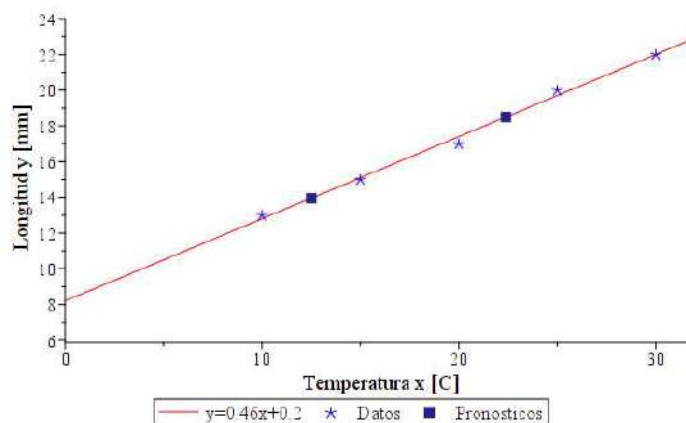


Figura 2. Recta de regresión lineal, datos y valores pronosticados.

Obtenida de: autoría propia

4. Conclusiones: *lo que podemos aprender de este artículo*

En este trabajo se ha resaltado la importancia de MMC como una herramienta fundamental en diversas áreas de la ciencia y la ingeniería. Aunque en la actualidad existen numerosos programas informáticos que permiten calcular fácilmente la regresión lineal, resulta valioso comprender el procedimiento que hay detrás de estos cálculos. Conocer la deducción de las fórmulas permite a los estudiantes desarrollar un pensamiento analítico y fortalecer su comprensión matemática. En este artículo, se presentó de manera clara y accesible la deducción de las expresiones para el caso lineal, así como un ejemplo práctico con cinco datos experimentales. Este enfoque busca facilitar la comprensión del método y destacar su utilidad como puente entre las matemáticas y su aplicación en fenómenos reales.

5. Referencias: *por si quieres seguir conociendo más*

- Bates, D. M. y Watts, D. G. (1988). *Nonlinear regression: iterative estimation and linear approximations*. Wiley.
- Englezos, P., y Kalogerakis, N. (2000). *Applied parameter estimation for chemical engineers*. CRC Press.
- Garzón, G. R. (2003). Los orígenes del método de mínimos cuadrados. *Suma: Revista sobre Enseñanza y Aprendizaje de las Matemáticas*, (43), 31–38.
- Kay, S. M. (1993). *Fundamentals of statistical signal processing: Estimation theory*. Prentice-Hall, Inc.

- Kim, S.-J., Bae, S.-J., & Jang, M.-W. (2022). Linear regression machine learning algorithms for estimating reference evapotranspiration using limited climate data. *Sustainability*, 14(18), 11674. <https://doi.org/10.3390/su141811674>
- Sandoval-Hernández, M., Vázquez-Leal, H., Hernández-Martínez, L., Filobello-Niño, U. A., Jiménez-Fernández, V. M., Herrera-May, A. L., Castañeda-Sheissa, R., Ambrosio-Lázaro, R. C., & Díaz-Arango, G. (2018). Approximation of Fresnel integrals with applications to diffraction problems. *Mathematical Problems in Engineering*, 2018(1). <https://doi.org/10.1155/2018/4031793>
- Vázquez-Leal, H., Sandoval-Hernández, M. A., Filobello-Niño, U. A., Huerta-Chua, J., Aguilar-Velázquez, R., & Domínguez-Chávez, J. A. (2025). Introducing the Leal method for the approximation of integrals with asymptotic behaviour: Special functions. *AppliedMath*, 5(1), 28. <https://doi.org/10.3390/appliedmath5010028>



Solución de ecuaciones diferenciales ordinarias por colocación ortogonal en microcontrolador PIC

Mario Alberto Sandoval Hernández

*Centro de Bachillerato Tecnológico industrial
y de servicios No. 190,
Boca del Río, Veracruz, México*

Fernando Iván Molina Herrera

*Tecnológico Nacional de México / IT de
Celaya,
Celaya, Guanajuato, México*

Hugo Jiménez Islas *

*Tecnológico Nacional de México / IT de
Celaya,
Celaya, Guanajuato, México*

Luis Isaí Quemada Villagómez

*Tecnológico Nacional de México / IT de
Celaya,
Celaya, Guanajuato, México*

* Autor de correspondencia: hugo.jimenez@itcelaya.edu.mx

Resumen: En este artículo se presenta una experiencia educativa que combina matemáticas, programación y electrónica. Se resolvió una ecuación diferencial con condiciones en la frontera utilizando el método de colocación ortogonal, implementado en un microcontrolador PIC18F4620 con lenguaje C. Los resultados se visualizaron en una pantalla gráfica de 128×64 píxeles y se compararon con la solución exacta. El proyecto incluye la creación de matrices matemáticas esenciales A, B, C, D, Q^{-1} , y utiliza las raíces de los polinomios de Legendre, que fueron organizadas en una tabla para facilitar su acceso durante los cálculos. El sistema puede generar las matrices necesarias para distintos casos, apoyándose en los polinomios $P_1(x)$ - $P_8(x)$. Esta propuesta busca acercar herramientas avanzadas a estudiantes, mostrando cómo resolver problemas complejos con tecnología accesible.

Palabras clave: Análisis numérico, colocación ortogonal, ecuaciones diferenciales ordinarias, lenguaje de programación C, Microcontrolador PIC.

1. Introducción: lo que debemos saber de inicio

Las ecuaciones diferenciales con condiciones en la frontera son importantes porque describen el comportamiento de fenómenos físicos, así como el comportamiento de sistemas. Por ejemplo, se puede modelar el comportamiento de una cuerda (Burden y Faires, 2011), entre otros. Asimismo, la ecuación de onda y la ecuación de calor requieren el uso de condiciones a la frontera para modelar y describir su comportamiento. Las condiciones de frontera conocidas son las de Dirichlet, Neumann, Cauchy y Robin.

El método de colocación ortogonal es un método numérico que tiene el fin de resolver ecuaciones diferenciales ordinarias y parciales con valores a la frontera y es un método conocido en la literatura de ingeniería Química (Jiménez-Islas, y López-Isunza, F. 1994; Finlayson, 1981; Villadsen y Stewart, 1967; Villadsen y Michelsen, 1978). El método se basa en utilizar las raíces de los polinomios de Legendre y de la generación de las matrices A, B, C, D, Q^{-1} , donde las matrices A, B implementan la primera y segunda derivada respectivamente, mientras que la matriz C contiene los valores de los polinomios de base de Legendre evaluados en los puntos de colocación. La matriz D se utiliza para evaluar derivadas de la función aproximada en los extremos del dominio, es decir, en los puntos de frontera donde se imponen condiciones adicionales. La matriz Q^{-1} es la inversa de una matriz de pesos utilizada en el método. Esta matriz aparece cuando se aplican integraciones o productos internos dentro del método de colocación. Al invertirla, se facilita la resolución del sistema de ecuaciones resultante.

Una vez que se discretizan las ecuaciones diferenciales, éstas se transforman en ecuaciones algebraicas que pueden ser lineales o no lineales, según de las características de las ecuaciones diferenciales, y para resolverlas es necesario un algoritmo numérico como sobre-relajación o Newton-Raphson (Burden y Faires, 2011). Existen distintos programas para implementar estos algoritmos numéricos, entre los que destacan Fortran, C, Python, Excel, R, entre otros.

El lenguaje C puede considerarse como un lenguaje de programación universal porque entendiendo su estructura facilita el aprendizaje de otros lenguajes de programación como C++, Java, Delphi, etc. Asimismo, este lenguaje permite gestionar algoritmos con diferentes propósitos en distintos sistemas operativos como MS-DOS, Linux y Windows. En ese sentido, los dispositivos embebidos que contienen microcontroladores con distinta arquitectura, como PIC (*Programmable Integrated Circuit*), ARM (*Advanced RISC Machine*), e Intel 8051,

los cuales pueden programarse utilizando C. Aunque los microcontroladores tienen amplias aplicaciones en la electrónica (Clavijo, 2011), en este trabajo se presenta la solución de una ecuación diferencial ordinaria lineal resuelta con Colocación ortogonal con el microcontrolador PIC18f4620 (Microchip, 2008) como hardware. Este trabajo tiene el propósito de resignificar el discurso matemático escolar (Sandoval-Hernández et al, 2021) motivando a los estudiantes a explorar otras alternativas de implementación, generando un acceso universal al conocimiento con otras perspectivas.

2. Fundamentos Teóricos: reglas y principios científicos importantes

El método de colocación ortogonal consiste en aproximar una función y sus derivadas usando puntos de colocación que provienen de las raíces de los polinomios de Legendre. A partir de estas raíces se construyen matrices que permiten calcular derivadas de manera numérica. Las expresiones para aproximar la primera y segunda derivada mediante la colocación ortogonal están dadas por las sumatorias

$$\frac{dT}{dx} = \sum_{k=1}^{NX+2} AX_k T_k \quad (1)$$

$$\frac{d^2T}{dx^2} = \sum_{k=1}^{NX+2} BX_k T_k \quad (2)$$

Donde las matrices A y B son las matrices de colocación y NX+2 son los puntos de colocación utilizados, dados por las raíces de los polinomios de Legendre, más las fronteras. Para obtener estas matrices se tiene

$$A = CQ^{-1} \quad (3)$$

$$B = DQ^{-1} \quad (4)$$

Las matrices $ABCDQ^{-1}$ se encuentran en función de las raíces de los polinomios de Legendre, los cuales pueden generarse a partir de la fórmula de Rodrigues, dada por la fórmula

$$P_n(x) = \frac{1}{2^n n!} \frac{d^n}{dx^n} (x^2 - 1)^n \quad (5)$$

En (Finlayson, 1981; Villadsen y Michelsen, 1978) se presentan los detalles numéricos para generar las matrices utilizadas en colocación ortogonal.

3. Desarrollo del Trabajo: *aplicando las reglas y principios científicos*

El caso de estudio propuesto es una ecuación diferencial ordinaria dada por

$$\frac{d^2}{dx^2}y(x) - 2\frac{d}{dx}y(x) + 1 = 0$$
$$y(0) = 0, y'(1) = 1$$
(6)

Con solución analítica exacta

$$y(x) = \frac{e^{2x} - 1}{4e^2} + \frac{x}{2}$$
(7)

La metodología fue llevada a la práctica utilizando una tarjeta de desarrollo EasyPIC V7 Connectivity, junto con el programa MikroC, que permite escribir y cargar instrucciones al microcontrolador. En este caso se utilizó el modelo PIC18F4620, un pequeño chip que funciona como el "cerebro" del sistema y que cuenta con 64 kilobytes de memoria para guardar instrucciones, 5 puertos de entrada y salida, 4 temporizadores y otros elementos que lo hacen muy versátil. Para mostrar los resultados, se conectó una pantalla gráfica de 128x64 píxeles, controlada por un chip llamado KS0108, que permite visualizar texto e imágenes sencillas. La Figura 1 muestra la tarjeta utilizada.



Figura 1 Tarjeta de desarrollo utilizada.

Obtenida de: elaboración propia.

Para poner en marcha el método de colocación ortogonal, se almacenaron previamente las raíces de los primeros ocho polinomios de Legendre, $P_1(x), \dots, P_8(x)$, en una matriz de tamaño 8×10 . Estas raíces son valores especiales que se usan como puntos de referencia para construir la solución aproximada. Cuando se necesita generar las matrices del método, el programa toma de esa tabla las raíces correspondientes al orden deseado. En el caso de estudio presentado, se usaron tres puntos de colocación, es decir, se eligieron las raíces del polinomio de Legendre de tercer orden. Además, al incluir las condiciones de frontera, se formó un sistema de cinco ecuaciones con cinco incógnitas. Para resolver este sistema se utilizó el método de Newton-Raphson, una técnica numérica que ajusta los valores paso a paso hasta encontrar la solución. En el proceso también se aplicó una descomposición LU, el cual es un método para factorizar una matriz cuadrada en dos matrices triangulares: una triangular inferior (L) y una triangular superior (U), con el fin de facilitar el cálculo de la inversa de la matriz Jacobiana, una parte clave del cálculo. Además, se utilizó un criterio de tolerancia $\Delta x = 1 \times 10^6$ tanto para las derivadas como para decidir cuándo detener el cálculo, asegurando así que el resultado fuera suficientemente preciso. La Figura 2 muestra, en la pantalla gráfica, la comparación entre la solución exacta y los tres puntos de colocación obtenidos por el método.

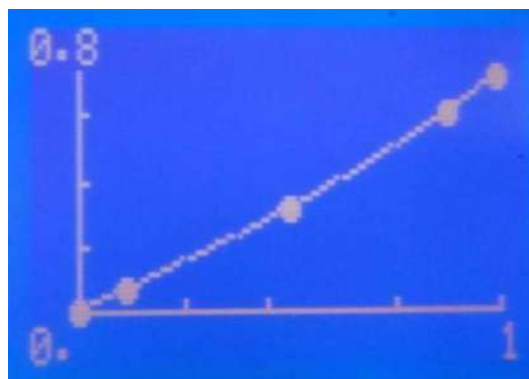


Figura 2 Demostración de la librería creada en Maple 2021.

Obtenida de: elaboración propia.

La Tabla 1 muestra una comparación de los valores de los puntos de colocación obtenidos con el sistema basado en microcontrolador contra la solución implementada en Maple 2021 y la solución exacta de la ecuación diferencial.

De la Tabla 1 puede notarse que la solución obtenida con el microcontrolador PIC es la misma que la que se obtuvo con Maple 2021. Véase en este caso de estudio, el error absoluto disminuye conforme nos alejamos del primer punto de colocación.

Tabla1. Comparación de los puntos de colocación.

Valores de x	Valores de y PIC	Valores de y Maple	Valor exacto de y	Error absoluto PIC vs exacto
0	0.000000	0.000000	0	0
0.112702	0.065006	0.065006	0.064905	8.99×10^{-4}
0.500000	0.308277	0.308277	0.308136	1.41×10^{-4}
0.887298	0.609318	0.609318	0.609364	4.7×10^{-5}
1	0.716216	0.716216	0.716166	5.0×10^{-5}

Obtenida de: elaboración propia.

4. Conclusiones: *lo que podemos aprender de este artículo*

Los resultados presentados en este trabajo muestran que es posible utilizar un microcontrolador PIC para resolver problemas matemáticos, como las ecuaciones diferenciales, aunque no tenga un coprocesador especializado para cálculos numéricos. Esto se logra porque el propio software se encarga de simular las operaciones de punto flotante, que son esenciales en este tipo de cálculos. A pesar de que estos dispositivos tienen recursos limitados, como poca memoria para guardar instrucciones y datos, se demostró que pueden ejecutar algoritmos numéricos con eficacia, siempre que no se excedan sus capacidades internas. Esta experiencia educativa abre la puerta a nuevas formas de enseñanza y aprendizaje, donde los estudiantes pueden ver cómo las matemáticas se conectan con la electrónica y la programación. Además, muestra que es posible trabajar con herramientas de bajo costo para resolver problemas complejos, haciendo más accesible la ciencia y la tecnología.

5. Referencias: *por si quieres seguir conociendo más*

- Clavijo, J. R. (2011). *Diseño y simulación de sistemas microcontrolados en lenguaje C*. Colombia: MikroElektronika.
- Finlayson, B. A. (1981). *Nonlinear Analysis in Chemical Engineering*. McGraw-Hill.

- Jiménez-Islas, H., y López-Isunza, F. (1994). ELI-COL Programa para resolver sistemas de ecuaciones diferenciales parciales elípticas, por doble colocación ortogonal. *Avances en Ingeniería Química*, 2, 82-86.
- L. Burden. J. D. Faires, (2011). *Numerical analysis*. Brooks/Cole Cengage Learning.
- Microchip Technology Inc. (2008). *Microchip PIC18F2525/2620/4525/4620 data sheet: 28/40/44-pin enhanced flash microcontrollers with 10-bit A/D and nanoWatt technology*.
<https://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/39626e.pdf>
- MikroElektronika. (2009). *MikroC PRO for PIC user manual*. MikroE Software and Hardware Solutions for Embedded World.
<https://download.mikroe.com/documents/compilers/mikroc/pic/mikroc-pic-manual-v101.pdf>
- Sandoval-Hernández, M., Hernández-Méndez, S., Torreblanca-Bouchan, S. E. y Díaz-Arango, G. U. (2021). Actualización de contenidos en el campo disciplinar de matemáticas del componente propedéutico del bachillerato tecnológico: el caso de las funciones especiales. *RIDE. Revista Iberoamericana para la Investigación y el Desarrollo Educativo*, 12(23).
- Villadsen, J. V. and Stewart, W.E. (1967). Solution of boundary-value problems by orthogonal collocation. *Chemical Engineering Science*, 22, 1483-1501.
- Villadsen J. V. and Michelsen, M. L, (1978). *Solution of differential equation models by polynomial approximation*. Prentice-Hall International Series.



Creación de una librería en Maple para las matrices de Colocación Ortogonal

Mario Alberto Sandoval Hernández

*Centro de Bachillerato Tecnológico industrial
y de servicios No. 190,
Boca del Río, Veracruz, México*

Fernando Iván Molina Herrera

*Tecnológico Nacional de México / IT de
Celaya,
Celaya, Guanajuato, México*

Hugo Jiménez Islas *

*Tecnológico Nacional de México / IT de
Celaya,
Celaya, Guanajuato, México*

Luis Isaí Quemada Villagómez

*Tecnológico Nacional de México / IT de
Celaya,
Celaya, Guanajuato, México*

* Autor de correspondencia: hugo.jimenez@itcelaya.edu.mx

Resumen: Este artículo presenta una guía para crear librerías tipo (.mla) en Maple, dentro de un entorno Linux. La librería desarrollada incluye dos comandos principales: uno que calcula las raíces de los polinomios de Legendre, y otro que genera las matrices utilizadas en el método de colocación ortogonal (A, B, C, D y Q). Este método se emplea para resolver ecuaciones diferenciales con condiciones en la frontera. Además, se incluye un caso de estudio que muestra cómo funciona la librería implementada. Cabe destacar que esta herramienta puede generar matrices y raíces para cualquier grado n , siempre que la memoria del sistema lo permita.

Palabras clave: análisis numérico, colocación ortogonal, librerías, software Maple.

1. Introducción: lo que debemos saber de inicio

El programa Maple es una herramienta de software diseñada principalmente para hacer cálculos simbólicos, es decir, manipular expresiones matemáticas de forma exacta, como

derivadas, integrales o ecuaciones. Sin embargo, también permite realizar cálculos numéricos y generar gráficas para visualizar datos o funciones de manera clara y atractiva. Desde hace varios años, Maple cuenta con una interfaz gráfica intuitiva, lo que facilita su uso, incluso para quienes están comenzando en el manejo de software matemático (Fox, 2011; Fox y Bauldry, 2019; Maplesoft, 2023). Esta interfaz incluye una serie de paletas organizadas por temas. Por ejemplo, si se selecciona la paleta de Cálculo, el usuario podrá acceder fácilmente a operaciones como límites, integrales o derivadas parciales, entre muchas otras. También existen paletas específicas para trabajar con matrices y otros objetos matemáticos. En Maple, los comandos pueden introducirse de forma muy sencilla haciendo clic en los elementos disponibles en las paletas. Esto permite escribir operaciones matemáticas que se ven de manera visual y natural, como si se estuvieran haciendo en una libreta. Por ejemplo, al calcular una derivada, el símbolo aparecerá con la notación usual que se enseña en clase, lo que resulta muy útil en entornos educativos. Esta forma gráfica de usar Maple está pensada especialmente para apoyar la enseñanza y el aprendizaje de las matemáticas. Sin embargo, también es posible escribir los comandos de forma más técnica, usando sintaxis, como en los lenguajes de programación C (Joyanes, 2020) o Fortran 90 (Adams et al., 1992). Maple permite convertir fácilmente entre ambos modos de entrada: desde la vista visual (llamada *entrada matemática 2-D*) a texto plano (conocida como *entrada matemática 1-D*) y viceversa (Fox, 2011; Fox y Bauldry, 2019; Maplesoft, 2023).

Cuando se escribe código en Maple utilizando texto, la notación que se emplea es similar a la que se usa en lenguajes de programación como C o Python (Diaz et al., 2024). Esta forma de trabajo resulta muy útil cuando se desea crear y ejecutar algoritmos de manera más rápida, ya que no requiere del uso de la interfaz gráfica basada en Java, que es la que se utiliza en la entrada matemática en formato 2-D. En Maple, muchas funciones están organizadas en paquetes o librerías, los cuales agrupan comandos por temas específicos. Para poder utilizar esas funciones, es necesario activar el paquete correspondiente usando el comando `with()`. Por ejemplo, si se desea generar una gráfica en tres dimensiones, hay que utilizar el comando `plot3d`, pero antes se debe activar el paquete `plots` escribiendo `with(plots)`; Maple ofrece una amplia colección de paquetes, cada uno diseñado para resolver distintos tipos de problemas, lo que amplía notablemente las posibilidades del software (Maplesoft, 2023).

En Maple es posible crear paquetes personalizados que agrupan diferentes algoritmos diseñados para cumplir funciones específicas. Una de sus ventajas es que pueden ser llamados fácilmente usando el comando `with`, lo que permite simplificar el código y trabajar con scripts más ordenados y compactos. Además, esta opción es útil cuando se desea mantener privado el contenido de ciertos algoritmos, ya que el código se guarda en archivos con extensión `.mla`, que no muestran su contenido directamente. Este artículo presenta la creación de una librería en Maple que incluye las matrices utilizadas en el método de colocación ortogonal, una técnica numérica que permite encontrar soluciones aproximadas a ecuaciones diferenciales con condiciones en los extremos. El método se basa en evaluar la ecuación en ciertos puntos especiales, llamados puntos de colocación, que corresponden a las raíces de polinomios ortogonales, como los polinomios de Legendre. A partir de esos puntos se construyen matrices que permiten calcular derivadas de forma numérica, lo que transforma el problema original en un sistema de ecuaciones algebraicas que puede resolverse por computadora. La librería también incluye una rutina para determinar las raíces de estos polinomios, basada en métodos desarrollados por Finlayson (1981), Villadsen y Stewart (1967) y Villadsen y Michelensen (1978).

2. Fundamentos Teóricos: reglas y principios científicos importantes

Los archivos internos que utiliza Maple para almacenar sus funciones suelen ocupar muy poco espacio. Sin embargo, si se guardaran por separado, uno por uno, se desperdiciaría memoria en el disco, ya que cada archivo necesita una cantidad mínima de espacio asignado. Para evitar esto, Maple organiza sus funciones en archivos tipo biblioteca, con extensión `.mla`, que agrupan muchos elementos en un solo archivo. El archivo principal que contiene las funciones básicas del sistema se llama `maple.mla`. Cuando se desea crear una biblioteca propia en Maple, es necesario utilizar el paquete `LibraryTools`, que incluye herramientas para crear, editar y manejar estas bibliotecas personalizadas. En general, para generar un archivo `.mla`, se deben seguir algunos pasos dentro del entorno de trabajo de Maple, que serán explicados más adelante.

1. Establecer el nombre del archivo con extensión (`.mla`) que nos interesa generar, por ejemplo, `LibLocation:=cat(currentdir(),"/A_Numericos_V1_0.mla")`. Este comando proporciona el directorio actual o carpeta donde el archivo (`.mla`) será creado.

Posteriormente dentro del script que se está escribiendo debe utilizarse el comando `march()`. El administrador de archivos de Maple, `march`, se utiliza para gestionar archivos y variables archivados en una biblioteca de Maple. En este caso se utiliza el argumento `create` para crear un archivo, por ejemplo, la instrucción `march('create', LibLocation)` crea el archivo `A_Numericos_V1_0.mla` en el directorio actual de trabajo. Este varía dependiendo de factores como la instalación del programa y el sistema operativo los cuales pueden ser Linux, MacOS y Windows.

2. En este paso es importante conocer la dirección contenida en la variable `libname`. Al configurar `libname` se puede especificar ubicaciones en las que se buscan rutinas creadas de forma secuencial. Se tienen dos opciones, la primera es garantizar que el archivo (.mla) que se va a generar se encontrara en ese lugar; la segunda, es decirle a Maple que busque ese archivo en la dirección actual de trabajo.
3. Los procedimientos (o funciones con las respectivas tareas) deben estar contenidos en un módulo, declarado por el comando `module()`. Un módulo es una expresión de Maple de primera clase que se crea al evaluar una "definición de módulo". Dentro del módulo deben emplearse los comandos `export`, y `option`. El comando `export` permite que los procedimientos sean accesibles fuera de la definición del módulo. El comando `option` con el atributo `package` permite dar atributos al módulo, en este caso se trata de generar un paquete de Maple. Las exportaciones de paquetes se protegen automáticamente y pueden enlazarse de forma persistente en una sesión interactiva mediante el comando `with`.
4. En el último paso se guarda el nombre del módulo con el comando `savelib('MisRutinas_COL')`.

3. Desarrollo del Trabajo: *aplicando las reglas y principios científicos*

Para ilustrar cómo se crea una librería personalizada en Maple (archivo con extensión .mla), se desarrolló un ejemplo que incluye tanto las matrices como las raíces de los polinomios de Legendre utilizadas en el método de colocación ortogonal. En este ejemplo se implementaron dos procedimientos: `M_Col_OR`, encargado de generar las matrices de colocación ortogonal, y `P_Legendre`, que calcula las raíces de los polinomios de Legendre. Ambos procedimientos fueron agrupados en un archivo de biblioteca llamado

A_Numericos_V1_0.mla, el cual contiene un paquete denominado MisRutinas_COL. Este paquete puede activarse fácilmente en cualquier sesión de Maple usando el comando `with(MisRutinas_COL);` lo que permite acceder de inmediato a todas las funciones implementadas.

#Código 1 para Generar librerías utilizando maple 2021

```
restart;
with/LibraryTools; with(ArrayTools):
with(ListTools):
with(linalg):
LibLocation := cat(currentdir(), "/A_Numericos_V1_0.mla");
march('create', LibLocation);
libname :=libname, LibLocation;

MisRutinas_COL:=module()
description "Algoritmos numéricos";
export M_Col_OR, P_Legendre;
option package;

# Determina las matrices de colocación ortogonal
M_Col_OR:=proc(xj, N::integer)
local jj, ii,i,j,sol, operandos :
description "Col. O. Calcula las Matrices C, D, Q, A, B, W, F";
#La Q(-1) se calcula afuera para usarla

#Declaración del espacio para las matrices
local A := Matrix(N+2, N+2, []):
local B := Matrix(N+2, N+2, []):
local Q := Matrix(N+2, N+2, []):
local C := Matrix(N+2, N+2, []):
local DD := Matrix(N+2, N+2, []):
local dd := Matrix(N+2, N+2, []):
local Q_Inv,W,F,Qinv :

#Matriz C
for jj from 1 by 1 to N+2 do:
  for ii from 1 by 1 to N+2 do:
    if ii>1 then
      C[jj,ii]:=(ii-1)*(xj[jj])^(ii-2):
    else
      C[jj,ii]:=(ii-1):
    end if;
  end do:
end do:

#Matriz D
for jj from 1 by 1 to N + 2 do:
  for ii from 1 by 1 to N + 2 do:
    if ii>2 then
      DD[jj, ii] := (ii - 1)*(ii-2)*xj[jj]^(ii - 3):
    else
      DD[jj, ii] := (ii - 1)*(ii-2):
    end if;
  end do:
end do:

#Matriz Q(-1)
for jj from 1 by 1 to N + 2 do :
  for ii from 1 by 1 to N + 2 do :
    Q[jj, ii] := xj[jj]^(ii - 1):
  end do:
end do:
Q_Inv:=inverse(Q):

#Matriz A
A := C . Q_Inv:

#Matriz B
B := DD . Q_Inv:

#Obtener Matriz W
for i from 1 by 1 to N+2 do:
  f || i := add(w[j]*xj[j]^(i-1), j = 1 .. N + 2) = 1/i:
end do:

sol:=solve({seq(f|| i, i = 1 .. N+2)}, {seq(w[i], i = 1 .. N+2)}):
```

```

operandos:=seq(rhs(sol[i]), i = 1 .. N+2):
W := Matrix(1, N + 2, [operandos]):

#Obtener matriz F
F := W . Q:
return [C, DD, Q, A, B, W,F] ;
end proc:

P_Legendre:=proc(n::integer)
local jj, ii,i,j,sol, operandos,xj,N,legendre_roots :
description "Calcula las raíces del polinomio de Legendre Pn";
P || n :=expand( 1/(2^n*n!) * diff((X^2-X)^n,[X $n])) ;
legendre_roots:=fsolve(P||n):
xj:=[0,legendre_roots, 1];
N:=numelems(xj)-2;
return xj:
end proc:
end module;
savelib('MisRutinas_COL');

#Código 2 para mostrar el uso de la librería MisRutinas_COL
restart:
with(MisRutinas_COL);
with(linalg):
describe(P_Legendre);
n := 2; xj:=P_Legendre(n);

Mat_C := M_Col_OR(xj, n)[1]; Mat_D := M_Col_OR(xj, n)[2]; Mat_Qinv := inverse(M_Col_OR(xj, n)[3]);
Mat_A := M_Col_OR(xj, n)[4]; Mat_B := M_Col_OR(xj, n)[5]; Mat_W := M_Col_OR(xj, n)[6]; Mat_F := M_Col_OR(xj, n)[7];

```

La Figura 1 se ha obtenido al ejecutar el código 2 para mostrar la generación de las matrices y las raíces del Polinomio de Legendre para $n=2$ en la metodología de colocación ortogonal utilizando la librería `MisRutinas_COL`. Nótese que el código 2 ha resultado ser compacto. En este código se ha propuesto encontrar las raíces cuando $n:=2$. Al hacer `xj:=P_Legendre(n)` obtenemos las raíces del polinomio de Legendre. Véase que el procedimiento tiene dos argumentos, el grado del polinomio y las raíces. Este procedimiento devuelve 7 matrices. Por ejemplo, para obtener la matriz F se tiene `Mat_F:=M_Col_OR(xj,n)[7]`; la Figura 1 detalla cómo se han obtenido cada una de las matrices.

4. Conclusiones: *lo que podemos aprender de este artículo*

En este artículo se presentó la metodología para crear librerías personalizadas de una forma sencilla y práctica en Maple 2021. A partir de esta metodología, se desarrollaron algoritmos que permiten generar las matrices y los polinomios de Legendre necesarios para aplicar el método de colocación ortogonal, tanto en su forma clásica como en su versión adaptada a elementos finitos. Estas herramientas están pensadas para resolver ecuaciones diferenciales con condiciones en la frontera de manera eficiente.

Durante el trabajo se realizaron diversas pruebas para validar la funcionalidad de la librería, comprobando que puede generar matrices de colocación ortogonal de orden elevado,

siempre que haya suficiente memoria RAM disponible en la computadora. Entre las pruebas realizadas, se incluyó exitosamente el caso de $n=100$, lo cual demuestra la capacidad y versatilidad de la librería propuesta.

```

X := [0, 0.2113248654, 0.7886751346, 1]

Mat_C := 
[ 0 1 0 0
  0 1.0 0.4226497308 0.1339745962
  0 1.0 1.577350269 1.866025404
  0 1 2 3 ]

Mat_D := 
[ 0 0 2 0
  0 0 2.0 1.267949192
  0 0 2.0 4.732050808
  0 0 2 6 ]

Mat_Inv := 
[ 1.000000000 -0. 0 -0
 -7.000000005 8.196152428 -2.196152425 1.000000001
 12.000000001 -18.58845729 12.58845728 -6.000000007
 -6.000000009 10.39230486 -10.39230486 6.000000009 ]

Mat_A := 
[ -7.00000000500000 8.19615242800000 -2.19615242500000 1.00000000100000
 -2.73205080957927 1.73205080560000 1.73205080837350 -0.732050808352777
 0.732050797979278 -1.73205080380385 -1.73205082296965 2.73205081675277
 -1.00000001200000 2.19615242799999 -8.19615244500000 7.00000001400000 ]

Mat_B := 
[ 24.0000000200000 -37.1769145800000 25.1769145600000 -12.0000000140000
 16.3923048565885 -24.0000000297453 12.0000000097453 -4.39230485058846
 -4.39230487058846 12.0000000297453 -24.0000000497453 16.3923048765885
 -12.0000000340000 25.1769145800000 -37.1769146000000 24.0000000400000 ]

Mat_W := [ 2.710000002 × 10-10 0.4999999996 0.5000000004 -1.910000002 × 10-10 ]
Mat_F := [ 1.0000000008000 0.500000000039940 0.333333333359940 0.250000000019950 ]

```

Figura 1. Demostración de la librería creada en Maple 2021.

Obtenida de: elaboración propia.

5. Referencias: *por si quieres seguir conociendo más*

- Adams, J. C., Brainerd, W. S., Martin, J. T., Smith, B. T. and Wagener, J. L. (1992). *Fortran 90 handbook*. McGraw-Hill.
- Díaz, L. M. C., Díaz, N. A. C. y Álvarez, J. C. (2024). *Iniciando a programar con Python: Guía básica de programación* (Vol. 87). Editorial de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia-UPTC.
- Finlayson, B. A. (1981). *Nonlinear analysis in chemical engineering*. McGraw-Hill.
- Fox, W. P. (2011). *Mathematical modeling with Maple*. Cengage Learning.
- Fox, W. P., and Bauldry, W. C. (2019). *Advanced problem solving with Maple: a first course*. Chapman and Hall/CRC.
- Joyanes Aguilar, L. (2020). *Fundamentos de programación* (5.ª ed.). McGraw-Hill.
- Maplesoft. (2023). *Maple online help*. <https://www.maplesoft.com/support/help/>

- Villadsen, J. V. and Stewart, W. E. (1967). Solution of boundary-value problems by orthogonal collocation. *Chemical Engineering Science*, 22, 1483–1501.
- Villadsen J. V. and Michelsen, M. L, (1978). *Solution of differential equation models by polynomial approximation*. Prentice-Hall International Series.



Programación de un Robot Bípedo de propósito para caminata recta de 150 cm

Luis Enrique Salvador Cano *

*Tecnológico Nacional de México / IT de
Ciudad Guzmán,
Ciudad Guzmán, Jalisco, México*

Leonardo Azael Márquez Urdiales

*Tecnológico Nacional de México / IT de
Ciudad Guzmán,
Ciudad Guzmán, Jalisco, México*

Mabel Magaña Verduzco

*Tecnológico Nacional de México / IT de
Ciudad Guzmán,
Ciudad Guzmán, Jalisco, México*

Carlos Enrique Maciel García

*Tecnológico Nacional de México / IT de
Ciudad Guzmán,
Ciudad Guzmán, Jalisco, México*

* Autor de correspondencia: luis.sc@cdguzman.tecnm.mx

Resumen: *Los robots humanoides son bastante interesantes debido al avance tecnológico que se va generando e implican todo un reto en su fabricación por las múltiples variables que se deben a tomar en cuenta. La realización del prototipo se genera para el propósito de desplazarse 150 cm, en línea recta, al cual se le desarrolló un programa en un ESP32, donde se controlan un total de 16 servomotores, realizando una cadena de movimientos dependiendo de la acción requerida con la ayuda de un multiplexor, y así generar su tránsito libre en línea recta.*

Palabras clave: *ESP32, multiplexor, programación, robot bípedo, servomotores.*

6. Introducción: lo que debemos saber de inicio

A lo largo de la historia, el hombre se ha sentido fascinado por máquinas y dispositivos capaces de imitar las funciones y los movimientos de los seres vivos, los griegos tenían una palabra específica para denominar a estas máquinas: autómatas. De esta palabra deriva el actual autómata: máquina que imita la figura y los movimientos de un ser animado. Los

mecanismos animados de Heron de Alejandría (85 d. C) se movía a través de dispositivos hidráulicos, poleas, palancas y tenía fines lúdicos. (Antonio., 2007).

El lenguaje C no es un lenguaje fuertemente tipificado, sino que, al evolucionar, su verificación de tipos ha sido reforzada, la definición original de C desaprobó pero permitió, el intercambio de apuntadores y enteros; esta se ha eliminado y el estándar ahora requiere la adecuada declaración y la conversión explícita que ha sido obligada por los buenos compiladores, la nueva declaración de funciones es otro paso en esta dirección, los compiladores advertirán de la mayoría de los errores de tipo, y no hay conversión automática de tipos de datos incompatibles. Sin embargo, C mantiene la filosofía básica de que los programadores saben lo que están haciendo; solo requiere que establezcan sus intenciones en forma explícita. (Brian, 1991).

El ESP32 es un microcontrolador de bajo costo y bajo consumo de energía con Wi-Fi y Bluetooth integrados, fabricado por Espressif Systems. Es un "System on a Chip" (SoC) que combina un microcontrolador con funcionalidades inalámbricas en un solo chip. El ESP32 es conocido por su versatilidad y su facilidad de uso, lo que lo convierte en una opción popular para una amplia gama de aplicaciones, incluyendo dispositivos IoT, automatización industrial y más. (Programar Facil, 2025).

La metodología del proyecto se estructura en varias etapas secuenciales que incluyen el diseño conceptual, la construcción del prototipo, el desarrollo de circuitos, la programación de control y las pruebas de campo. Cada fase del desarrollo busca optimizar las capacidades del robot humanoide para una locomoción estable y adaptativa en diversos entornos.

7. Fundamentos Teóricos: *reglas y principios científicos importantes*

En esta fase inicial, se realizaron bocetos y esquemas para definir la movilidad y la estructura general del robot humanoide, considerando aspectos biomecánicos y el diseño de articulaciones para simular una locomoción natural. Este proceso permitió visualizar y anticipar posibles desafíos estructurales y de movilidad, y sirvió como base para la selección de componentes y materiales. Los bocetos se enfocaron en el análisis de las articulaciones, el equilibrio y los puntos de soporte, finalizando los bocetos se procedió a diseñarlos en un software CAD llamado "Solidworks" para posteriormente imprimir las piezas diseñadas en una impresora 3D.

En el apartado del circuito electrónico, se realizaron pruebas en un protoboard, utilizando una placa ESP32, un multiplexor PCA9685, servomotores y reguladores de voltaje, en estas pruebas se verificó la capacidad del circuito para identificar la potencia que requerían los servomotores y el procesamiento de datos en tiempo real. Esta fase incluyó la configuración de circuitos de prueba que ayudaron a identificar limitaciones y necesidades adicionales antes del diseño definitivo.



Figura 1. Estructura y circuito del robot bípedo. Obtenida de: elaboración propia.

Con base en los resultados de las pruebas en protoboard, se diseñó una PCB personalizada en fusión 360 para optimizar la integración de los componentes y mejorar la robustez del sistema eléctrico del robot. La fabricación de esta PCB se llevó a cabo utilizando una máquina láser, lo que permitió un control preciso en la distribución de las conexiones y un diseño compacto y funcional que reduce el peso y facilita la integración en la estructura del robot.

La programación de los algoritmos de locomoción y control del robot se realizó en el IDE de Arduino, empleando la ESP32 como la unidad de procesamiento central. Se implementaron algoritmos de equilibrio y adaptación a través de control PID y técnicas de optimización de movimientos, permitiendo que el robot ajuste sus movimientos en función de la información de los sensores. El sistema se programó para gestionar múltiples servomotores de manera sincronizada y para adaptarse a distintas condiciones de movimiento.

8. Desarrollo del Trabajo: *aplicando las reglas y principios científicos*

Con el prototipo ensamblado y programado, se llevaron a cabo pruebas en entornos controlados para evaluar la estabilidad, la adaptabilidad a diferentes superficies y la velocidad de desplazamiento. En esta fase, se verificó la capacidad del robot para moverse en terrenos variables y mantener el equilibrio. Las pruebas permitieron realizar ajustes adicionales en los algoritmos de control y en la disposición de los sensores, asegurando un desempeño óptimo en condiciones controladas antes de las pruebas en entornos reales.

A través de un esfuerzo conjunto de trabajo en equipo y tras una serie de pruebas, análisis, diseño y programación, se logró el desarrollo exitoso del robot humanoide MAKAM. Este prototipo incorpora partes móviles y cuenta con una apariencia humanoide, alcanzando los siguientes resultados destacados:

- *Capacidad de movilidad:* MAKAM es capaz de caminar y recorrer distancias en el menor tiempo posible, demostrando una notable eficiencia en desplazamiento y estabilidad.
- *Funciones de interacción básica:* El robot puede realizar acciones simples de interacción, como saludar, lo cual lo hace apto para entornos donde la comunicación básica con humanos sea relevante.
- *Capacidad de autonomía:* MAKAM tiene la habilidad de ponerse de pie por sí solo después de una caída, lo que representa un avance importante en su autonomía y capacidad de recuperación ante incidentes comunes.

Este logro representa un paso significativo en el desarrollo de robots humanoides con funcionalidades aplicables a diferentes contextos. Este trabajo fue desarrollado en el Tecnológico Nacional de México para el concurso de “Innobótica”, en su primera versión en el mes de octubre del año 2024, desarrollado en el Instituto Tecnológico de Colima.

9. Conclusiones: *lo que podemos aprender de este artículo*

Como se pudo observar, la realización de un robot humanoide tiene su cierto grado de complejidad debido a todos los elementos a tomar en cuenta, fomentando en los jóvenes en la investigación, trabajo en equipo y trabajar sus conocimientos. El trabajo realizado es un prototipo, por ende, aún se puede seguir mejorando para lograr obtener un mejor resultado,

por ejemplo, haciendo más fluido los movimientos, un mejor equilibrio, realización de más movimientos, etc.

10. Referencias: *por si quieres seguir conociendo más*

- Breazeal, C. (2002). *Designing sociable robots*. The MIT Press.
- Craig, J. J. (2004). *Introduction to robotics: Mechanics and control* (3.a ed.). Prentice Hall.
- IEEE Xplore. (s. f.a). Advancements in humanoid robot research. *Robotics and Autonomous Systems Journal*. Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos. <https://ieeexplore.ieee.org/>
- IEEE Xplore. (s. f.b). From perception to action in humanoid robots. *IEEE Robotics & Automation Magazine*. Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos. <https://ieeexplore.ieee.org/>
- Joseph, L. (2017). *Robot Operating System (ROS) for absolute beginners: Robotics programming made easy*. Apress.
- Kim, Y., & Cho, J. (2022). Applications and challenges in humanoid robotics: Towards optimized motion and autonomous adaptation. *Journal of Advanced Robotics*, 45(3), 172-183.
- Kim, J., Lee, H., & Park, J. (2022). Advances in humanoid robotics: A review of design and applications. *Robotics and Autonomous Systems*, 135, 103923.
- Kumagai, T., & Tamura, T. (2021). Bipedal locomotion control for humanoid robots: Balancing, walking, and dynamic adaptation. *IEEE Transactions on Robotics*, 37(4), 1127-1142.
- Lee, M., & Park, D. (2020). Advances in humanoid robot locomotion: Speed, stability, and control optimization. *IEEE Transactions on Robotics*, 36(8), 3247-3258.
- MIT Media Lab. (s. f.). *Personal Robots Group*. <https://www.media.mit.edu/groups/personal-robots/overview/>
- Park, D., & Kim, H. (2020). Challenges in bipedal locomotion for humanoid robots: Balance control, adaptability, and robustness. *International Journal of Humanoid Robotics*, 17(5), 2050012.
- Shin, J., & Lee, S. (2021). Adaptive control mechanisms for humanoid robots on uneven terrains. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 6(4), 7423-7430.
- Tanaka, K., & Suzuki, R. (2021). Biomechanics-inspired control strategies for humanoid robots: Towards human-like adaptability and stability in walking. *Robotics and Autonomous Systems*, 139, 103566.
- Vadakkepat, P., & Raja, A. V. (2017). *Humanoid robotics: A reference*. Springer.



Vehículos eléctricos: consumidores de corriente o una opción para salvar el ambiente

Edgar López Molina *

Tecnológico Nacional de México / IT de

Celaya,

Celaya, Guanajuato, México

Juan José Martínez Nolasco

Tecnológico Nacional de México / IT de

Celaya,

Celaya, Guanajuato, México

Víctor Manuel Sámano Ortega

Tecnológico Nacional de México / IT de

Celaya,

Celaya, Guanajuato, México

Alejandro Israel Barranco Gutiérrez

Tecnológico Nacional de México / IT de

Celaya,

Celaya, Guanajuato, México

* Autor de correspondencia: m2303003@itcelaya.edu.mx

Resumen: La electromovilidad consiste en el uso de vehículos eléctricos y representa una solución clave para reducir la contaminación ambiental. La mayoría funciona con baterías, aunque algunos modelos aun incorporan motores de combustión interna y por ende utilizan gasolina en menor medida. Existen diferentes formas o métodos de carga, cada uno con sus ventajas y desventajas. A pesar de los avances, persisten desafíos como la autonomía limitada de las baterías y la falta de estandarización en los cargadores. No obstante, normativas y tecnología emergentes están optimizando su utilidad, estos vehículos sean cada vez más útiles, seguros y accesibles.

Palabras clave: autonomía de la batería, contaminación ambiental, métodos de carga, vehículos eléctricos.

1. Introducción: lo que debemos saber de inicio

El calentamiento global es causado principalmente por los gases contaminantes que son emitidos al ambiente, estos contaminantes provienen de distintos procesos. La forma más

simple de explicar esto es cuando generamos fuego, por ejemplo, al encender un cerillo debido a los procesos químicos que conlleva la combustión, se generan residuos como el dióxido de carbono CO₂, este tipo de residuos son generados por los autos y demás vehículos durante su funcionamiento.

Si consideramos la cantidad de vehículos que existen, actualmente los podemos encontrar en prácticamente todas partes (transporte terrestre, marítimo y aéreo), podemos hacernos una idea de la cantidad de contaminantes producidos.

Es por esto por lo que los medios de transporte están pasando por una etapa de evolución, iniciativas para descarbonización del ambiente como el acuerdo de Paris están impulsando la electromovilidad o *e-mobility*, este concepto establece que los vehículos utilicen un sistema de tracción impulsado por energía eléctrica en lugar de quemar combustibles fósiles para impulsarse, es decir, en lugar de que funcionen con motores de gasolina, hacerlos funcionar con motores eléctricos.

Esto implica agregar una serie de componentes electrónicos específicos para hacer funcionar el motor eléctrico utilizando baterías o alguna otra fuente de energía eléctrica.

Existen diferentes tipos de vehículos eléctricos, su clasificación depende de los componentes que utilizan para almacenar energía y poder funcionar.

Encontraremos vehículos híbridos e híbridos enchufables, este tipo de vehículos además de motores eléctricos continúan utilizando motores a gasolina; sin embargo, son motores más pequeños y se utilizan en menor medida por lo que la cantidad de emisiones que generan se reduce bastante (BBVA, n.d.; Camarillo, n.d.).

Por otro lado, tenemos vehículos eléctricos de celda de combustible, en este tipo de vehículos se utilizan celdas de combustible que son un tipo de contenedor en donde se introduce hidrogeno y mediante un proceso inverso a la electrolisis se puede generar energía eléctrica, esto hace que funcione como una pila que utiliza hidrogeno como combustible, este tipo de vehículos no generan emisiones directas de contaminantes al ambiente al igual que los vehículos de baterías.

La principal característica de los vehículos eléctricos de baterías es que su fuente de energía principal son baterías que pueden ser de distintos tipos y deben de ser cargados como cualquier dispositivo electrónico.

2. Fundamentos Teóricos: *reglas y principios científicos importantes*

Actualmente, los vehículos eléctricos más comunes son los híbridos debido a que continúan utilizando combustible, pues es más rápido recargar gasolina en comparación con las posibles alternativas para la carga de baterías:

- Carga estacionaria: Es el método más comúnmente empleado y consiste en utilizar cargadores o puertos especiales para conectar el vehículo a la energía de la red eléctrica. Dependiendo de las necesidades de voltaje y corriente de la batería, se pueden utilizar cargadores a bordo que en inglés se denominan “*on-board*” en donde el proceso de adaptación de la energía eléctrica proveniente de la red se realiza completamente dentro el vehículo; Es como en la mayoría de los componentes electrónicos, se enchufan e internamente realizan un cierto proceso de regulación según los niveles de voltaje que necesitan (I3 Ingeniería, n.d.; Rachid et al., 2023).

Otro tipo de cargadores son los cargadores para instalar en lugares específicos como casa, trabajo o estacionamientos, también llamados “*off-board*” en inglés, en donde todo el proceso de regulación de voltaje se realiza fuera del vehículo, debido a que las potencias que se manejan en este método son bastante elevadas e integrar los componentes necesarios al vehículo aumentaría su tamaño y peso, lo que no es deseable (Brown et al., 2024; Chakravarthy et al., 2024).

El proceso de carga también se puede realizar de forma inalámbrica, como se hace por ejemplo en los teléfonos celulares y algunos relojes inteligentes, sin embargo, los circuitos electrónicos necesarios para este proceso son bastante caros, además de que la potencia que se puede transmitir utilizando estos métodos está limitada en comparación a los cargadores “*off-board*”.

- Carga dinámica: Este método se basa en la carga inalámbrica, con la característica de que el proceso de carga se realiza con el vehículo en movimiento y tiene dos subdivisiones:

En entornos urbanos, donde las velocidades son bajas y se realizan paradas continuas se puede realizar un proceso de carga semi-dinámica.

Si el vehículo se encuentra en movimiento a altas velocidades, se denomina carga dinámica.

Es un proceso muy complicado debido a que se requiere que exista una sincronización entre los circuitos o cargadores inalámbricos que interactúan durante el movimiento del vehículo.

- Intercambio de baterías: Este método consiste en reemplazar la batería del vehículo eléctrico una vez que su estado de carga no es suficiente o es relativamente bajo en lugares especializados parecidos a las gasolineras, en donde se cuenta con una gran cantidad de baterías compatibles, el proceso de cambio se realiza de forma automática por brazos robóticos, la compañía Tesla implementó este tipo de tecnología en los años 2005, sin embargo, suspendió el servicio debido a que no existía la suficiente demanda.

Entre los distintos métodos que se utilizan existen diversos inconvenientes, pues las baterías son seleccionadas por los fabricantes de acuerdo con sus necesidades y no existe una regulación nacional o internacional que defina las características de estos dispositivos. Sin embargo, si existen regulaciones para los conectores/puertos de carga, así como para las estaciones de carga de este tipo de medios de transporte (ANCE, n.d.; Hyundai, n.d.), el método de carga estacionaria es la más común. La gran desventaja de los vehículos eléctricos al compararse con los vehículos convencionales es su rango de autonomía, esto quiere decir, que tanta distancia pueden cubrir utilizando la energía eléctrica.

3. Desarrollo del Trabajo: *aplicando las reglas y principios científicos*

Los estándares para cargadores los clasifican de acuerdo con la potencia de carga (mientras más energía puede pasar por el cable, más potencia se puede transmitir) así como el tipo de conectores utilizados. Dependiendo del organismo regulador de cada país (Medina & Amador, 2023), algunos de los estándares más comunes son los establecidos por la comisión internacional de electrónica “IEC” por sus siglas en inglés y la sociedad de ingenieros de automoción “SAE” por sus siglas en inglés, que dividen los cargadores en niveles de carga, mientras más alto sea el nivel, el cargador puede entregar una mayor potencia y por lo tanto completar la carga en un menor tiempo.

El estándar IEC utiliza 4 niveles de carga, los niveles 1-3 son cargadores de corriente alterna “CA” (la energía que utiliza la mayoría de los aparatos electrónicos), el nivel 4 está reservado

para cargadores de corriente directa “CD” (esta forma de energía eléctrica puede entregar una mayor potencia), de forma similar, el estándar SAE utiliza un total de 6 niveles, 3 niveles para carga de CA y 3 niveles para carga de CD.

En la Figura 1, se pueden observar algunos de los conectores más comunes para vehículos eléctricos. En México la ANCE desarrolla normas para vehículos eléctricos y su carga, entre las normas desarrolladas se encuentran la seguridad durante su operación y carga, requerimientos para compatibilidad con diversos tipos de carga y soporte necesario de la red eléctrica (ANCE, n.d.).



Figura 1. Conectores de diversos estándares.

Obtenido de: adaptada de (Medina & Amador, 2023).

4. Conclusiones: lo que podemos aprender de este artículo

La inclusión de los vehículos eléctricos apenas comienza, son un medio por el cual podemos contribuir a disminuir la contaminación, aunque su aceptación es cada vez mayor, comenzando a competir con los autos de gasolina, aún tienen un largo camino por recorrer. Pues si bien existe una diversidad de formas de cargarlos, aun no contamos con la

infraestructura (como estaciones de carga o electrolineras) necesaria para soportar un cambio total de vehículos de gasolina a vehículos eléctricos.

Para contrarrestar este problema, se están estableciendo reglas claras para conseguir un proceso de carga soportado por energías limpias, si bien, este tipo de vehículos genera emisiones debido a su funcionamiento, la generación de energía eléctrica si que genera, es por esto que es importante además de adoptar este medio de transporte novedoso, prestar atención a sus necesidades energéticas, es por esto que actualmente se está impulsando el desarrollo de cargadores que aprovechen la energía proveniente de fuentes renovables. Si quieres conocer algunos puntos en donde puedes encontrar cargadores para vehículos eléctricos puedes consultar: (Electromaps, n.d.). Comprender como funcionan nos permite entender el gran impacto que pueden tener en el ambiente y por consecuencia en nuestra vida en general.

5. Referencias: *por si quieres seguir conociendo más*

- ANCE. (n.d.). *Vehículos eléctricos*. Recuperado el 11 de mayo de 2025 de <https://www.ance.org.mx/Normalizacion/Pages/Informacion/data/Sectores%20tecnol%C3%B3gicos/VEHI%C3%8DCULOS%20EL%C3%89CTRICOS.pdf>
- BBVA. (n.d.). *¿Qué es el automóvil eléctrico?* Recuperado el 26 de junio de 2023 de <https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/que-es-el-automovil-electrico/>
- Brown, A., Cappellucci, J., Heinrich, A., Gaus, M., & Cost, E. (2024). *Electric Vehicle Charging Infrastructure Trends from the Alternative Fueling Station Locator: First Quarter 2024*. www.nrel.gov/publications.
- Camarillo, D. (n.d.). *Vehículo Híbrido*. CONUEE. Recuperado el 11 de mayo de 2025 de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/187220/vehiculohibrido_1_260117.pdf
- Chakravarthy, B. K., Lakshmi, G. S., & Prasad Bhupathi, H. (2024). Review on Charging Methods and Charging Solutions for Electric Vehicles. *E3S Web of Conferences*, 547. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202454703001>
- Electromaps. (n.d.). *Puntos de carga en Guanajuato*. Recuperado el 11 de mayo de 2025 de <https://www.electromaps.com/es/puntos-carga/mexico/guanajuato>
- Hyundai. (n.d.). *Tipos de Cargadores para Coches Eléctricos*. Recuperado el 11 de mayo de 2025 de <https://www.hyundai.com/canarias/es/blog/tipos-cargadores-coches-electricos/>
- I3 Ingeniería. (n.d.). *¿Cómo funciona un Cargador de coche eléctrico?* Recuperado el 11 de mayo de 2025 de <https://i3ingenieria.es/como-funciona-un-cargador-de-coche-electrico/>

- Medina, W., & Amador, E. (2023). *TIPOS DE CARGADORES PARA VEHÍCULOS ELÉCTRICOS*. Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/821438/Cargadores_El_ctricos.pdf
- Rachid, A., El Fadil, H., Gaouzi, K., Rachid, K., Lassioui, A., El Idrissi, Z., & Koundi, M. (2023). Electric Vehicle Charging Systems: Comprehensive Review. *Energies*, 16(1). MDPI. <https://doi.org/10.3390/en16010255>



LISN en CD para mediciones EMI conducido en convertidores de potencia de una micro red de CD

Elías José Juan Rodríguez Segura *

Tecnológico Nacional de México / IT de

Celaya,

Celaya, Guanajuato, México

Cecilia del Socorro Gordillo Tapia

Tecnológico Nacional de México / IT de

Celaya,

Celaya, Guanajuato, México

Luis Felipe Martínez Soto

Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial,

Querétaro, Querétaro, México

Fernando Fonseca Navarro

Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial,

Querétaro, Querétaro, México

* Autor de correspondencia: elias.rodriguez@itcelaya.edu.mx

Resumen: Se presenta una breve descripción de un esquema básico para la medición de interferencia electromagnética conducida de convertidores de potencia, específicamente se hace hincapié en un equipo indispensable para la medición y que puede ser diseñado e implementado en el laboratorio para realizar pruebas de pre-conformidad a bajo costo en la etapa de diseño de los convertidores de potencia. Se puede obtener resultados satisfactorios con un analizador de espectros o con un osciloscopio con la función de Transformada Rápida de Fourier (FFT por sus siglas en inglés).

Palabras clave: Convertidor CD-CD, EMI conducido, LISN, micro redes de CD.

1. Introducción: lo que debemos saber de inicio

A nivel global los temas de cambio climático, energías renovables, sistemas distribuidos de energía, baterías y electromovilidad, por mencionar algunos, han estado revolucionando nuestro entorno al uso de la energía eléctrica, desde su generación, transmisión, conversión y distribución. Un ejemplo sencillo sería un sistema fotovoltaico autónomo, la energía

eléctrica se genera en el sitio por medio de paneles solares, no hay transmisión, se almacena la energía eléctrica de corriente directa en un sistema de baterías mediante un convertidor CD-CD, posteriormente se convierte la energía eléctrica de corriente directa en corriente alterna a través de un convertidor CD-CA o inversor y se distribuye a través de la red eléctrica del hogar.

Con el incremento de cargas electrónicas conectadas a la red eléctrica en los hogares, en los edificios, en la industria y recientemente los vehículos eléctricos, la demanda de energía eléctrica ha crecido considerablemente, por lo que el uso de fuentes de energía alternativa ha alcanzado un grado de maduración que comienza a ser cada día más tangible. Los esfuerzos para incorporar estas fuentes de energía alternativa han generado investigaciones y desarrollos tecnológicos a nivel mundial en sistemas distribuidos tales como micro redes de CA y micro redes de CD, específicamente las micro redes de CD buscan evitar procesos de conversión innecesarios de CD a CA y posteriormente de CA a CD, un ejemplo sería nuevamente un sistema fotovoltaico autónomo, el panel fotovoltaico genera corriente directa y luego se emplea un proceso de conversión de CD a CA para las cargas electrónicas; que cada vez es mayor su número en el hogar, no obstante, las cargas electrónicas operan en corriente directa, por lo que es necesario un proceso de conversión de CA a CD en su interior para alimentar los circuitos electrónicos, es por esta razón, que las micro redes de CD son más eficientes dado que reducen en función de la aplicación los procesos de conversión de CD a CA y de CA a CD.

Con el desarrollo de micro redes de CD se ha incrementado el uso de convertidores CD-CD y con ello la probabilidad de interferencia electromagnética conducida debido al número de convertidores en el bus de CD. Si bien es cierto que, un buen diseño del convertidor CD-CD debe considerar un filtro EMI (por sus siglas en inglés *Electromagnetic Interference*) en su etapa de entrada para evitar contaminar el bus de CD, la etapa de diseño del filtro EMI es un punto importante por considerar para satisfacer los estándares internacionales, dado que el incremento de cargas electrónicas crece exponencialmente por la globalización. Específicamente en Rabbani (2023) menciona que las redes IoT (por sus siglas en inglés *Internet of Things*) son vulnerables a la interferencia electromagnética, la cual puede causar pérdida de comunicación, corrupción de datos y un bajo rendimiento del sistema.

Para el diseño del filtro EMI; considerando previamente un buen diseño de layout, es necesario realizar una medición del EMI conducida, conforme al estándar vigente que permita determinar la inserción de pérdidas correspondiente. Es importante mencionar que también es necesario realizar pruebas de EMI radiada, pero para propósitos de este artículo solo se considera el caso de EMI conducida. Para la medición de la EMI conducida de una fuente, equipo o carga DUT (por sus siglas en inglés *Device Under Test*) es necesario una LISN (por sus siglas en inglés *Line Impedance Stabilization Network*) que nos permita la adquisición de información conforme al estándar. La LISN se puede conectar a un analizador de espectros, un equipo de medición de EMI especializado o un osciloscopio con la función FFT. En la Figura 1 se muestra el esquema de medición de EMI conducido.

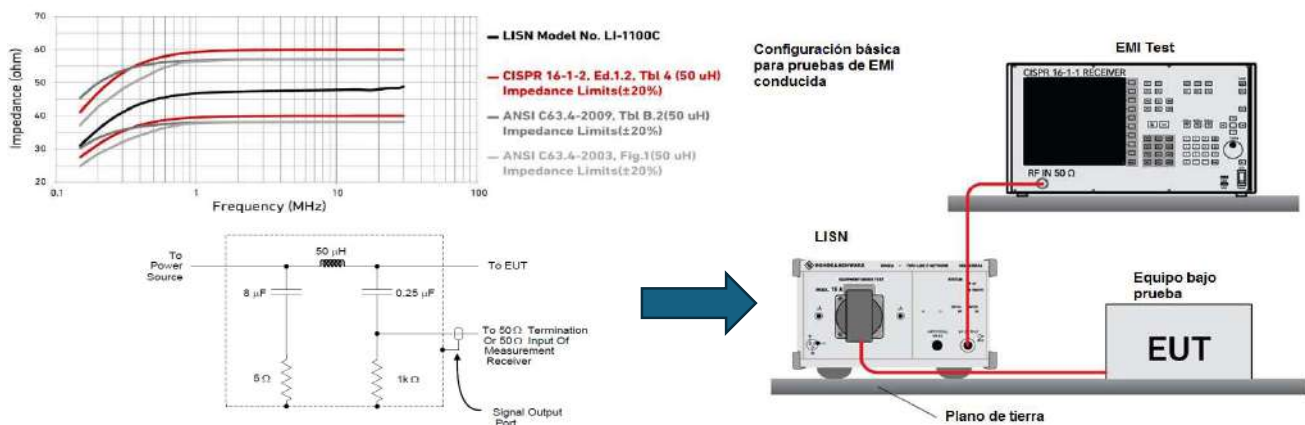


Figura 6. Esquema básico de medición de EMI conducido.

Obtenida de: (Transient Specialists, 2025).

2. Fundamentos Teóricos: reglas y principios científicos importantes

Una LISN es básicamente un filtro pasa bajos para medir líneas de alimentación de CD o CA acorde a los estándares internacionales FCC, CISPR, ANSI y MIL-STD, asegura la repetitividad de las mediciones y no modifica la señal de potencia, específicamente realiza las siguientes funciones:

1. Estabilizar la impedancia vista por el equipo a través del cable de alimentación, es decir, proporcionar una impedancia estable sobre la red eléctrica (50 Ω).
2. Bloquear señales de RF existentes en la red eléctrica para que no lleguen al equipo bajo prueba.

3. Proporcionar un puerto para la medición a través de un analizador de espectros o EMI Test.

En la literatura se reportan tres tipos de LISN: V-, T- y Delta-LISN. La V-LISN mide disturbios de voltaje con pérdida de simetría (*unsymmetric*) entre las dos líneas L1 y tierra o L2 y tierra respectivamente. Las V-LISN también son llamadas en la literatura como V-ANM (Red de línea artificial). Existen dos tipos de V-LISN con diferentes valores de inductancia, las V-LISN con una inductancia de 5 μ H, acorde a los estándares CISPR-16-1-2, CISPR25, ISO7673 y DO160, se emplean en aplicaciones en vehículos, barcos y aviones sobre una alimentación principal de corriente directa o 400 Hz. Las V-LISN con inductancia de 50 μ H son ampliamente usadas en aplicaciones de Red Eléctrica (50 o 60 Hz) acorde a los estándares CISPR 16-1-2, MIL-STD-461 y ANSI C63.4. En la figura 1 se muestra el diagrama eléctrico de una LISN reportada en el estándar MIL-STD y la gráfica de impedancia comparada con otros estándares como ANSI y CISPR.

3. Desarrollo del Trabajo: *aplicando las reglas y principios científicos*

La motivación de diseñar una LISN en CD tuvo por objetivo determinar los niveles de EMI conducida de los convertidores CD-CD, diseñados en el Laboratorio de Energías Renovables del TecNM en Celaya para la micro red de CD, implementada en el edificio del Departamento de Ingeniería Electrónica. Si bien es cierto que las pruebas de EMI conducida se pueden realizar en laboratorios certificados, el servicio de certificación de cumplimiento del estándar vigente es costoso y si se desea realizar pruebas en el laboratorio se requiere acondicionar y comprar equipo especializado, como la LISN y el receptor EMI, los cuales son equipos con un elevado costo. El laboratorio de Energías Renovables del TecNM en Celaya cuenta con un osciloscopio con canal de RF que funciona como analizador de espectros (MDO3024, Tektronix), pero sin el detector Cuasi-pico que lo integra el Receptor EMI. Entonces el diseñar una LISN para realizar las pruebas de EMI conducido nos permiten realizar pruebas en el laboratorio de energías renovables de pre-conformidad del estándar vigente a un bajo costo. Para el diseño de la LISN, primero se debe identificar la aplicación para así determinar el estándar qué debe satisfacer. En nuestro caso se seleccionó el estándar CISPR16 para el diseño de la LISN y el banco de pruebas requerido para realizar la medición de EMI

conducido. Posteriormente, se identifican los componentes de la LISN, los cuales deben satisfacer un rango de operación de frecuencia entre 9 kHz y 30 MHz, si bien es cierto que todos los componentes son pasivos, se debe considerar en su adquisición y en su implementación, específicamente el caso de los inductores, su frecuencia de auto-resonancia, es decir, por ejemplo en el caso de un capacitor, la frecuencia de auto-resonancia determina el límite donde el dispositivo deja de comportarse como un capacitor y comienza a comportarse como un inductor. Dado que la LISN va a medir entre un intervalo de 9 kHz a 30 MHz, es necesario que el circuito este protegido de EMI radiada o frecuencias que pudieran alterar la medición en el intervalo de operación, para lo anterior se selecciona un gabinete metálico y solo se consideran las terminales para la fuente de alimentación, las terminales para el DUT o EUT y la terminal BNC. En la figura 2 se muestra la LISN implementada, la cual está sobre un plano de tierra y acoplada con cinta de cobre, se muestra la conexión al osciloscopio con canal RF a través del cable BNC a TNC, se ha colocado un atenuador/limitador de transitorios para evitar dañar el canal RF del osciloscopio, lo anterior se debe considerar en la inserción de pérdidas.

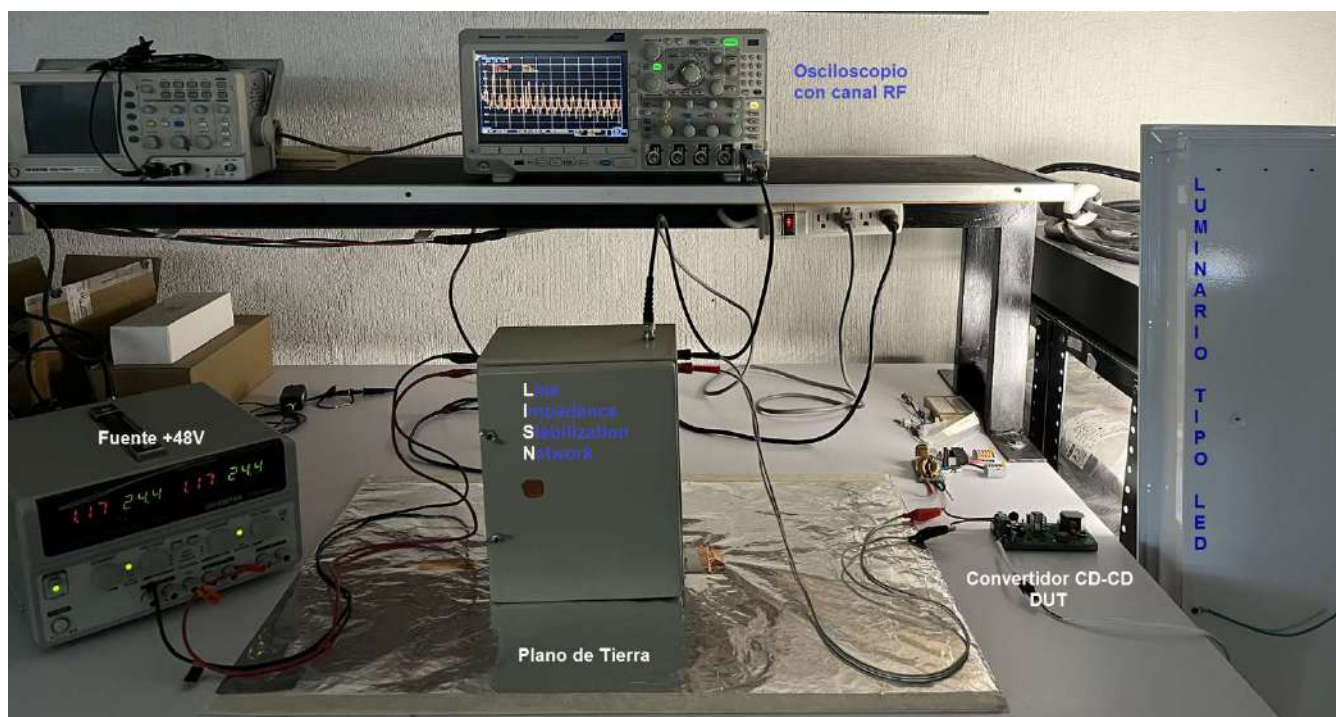


Figura 2. Esquema básico de medición de EMI conducido.

Obtenida de: elaboración propia.

Impacto del proyecto

Existen diversos impactos prácticos o sociales en el desarrollo de una LISN. El primero es del tipo económico, ya que los equipos necesarios para realizar pruebas de emisiones conducidas en laboratorios de certificación pueden costar entre 14 mil USD (*Review*, n.d.), cuando son equipos todo en uno (analizador de espectros integrado con una LISN) y hasta 90 mil USD (*On Sale EMC EMI Test Receiver Models Price New Used*, n.d.), cuando se utilizan receptores EMI sofisticados y una LISN por separado. Adicionalmente, el costo por realizar cada una de estas pruebas puede ser de hasta 500 USD, las cuales deberán repetirse hasta lograr que la luminaria pase la prueba. Por otra parte, si se opta por realizar pruebas durante el proceso de desarrollo del prototipo, o de pre-conformidad, utilizando una LISN de bajo costo, como en este trabajo, en conjunto con un osciloscopio con modo de medición en RF (radiofrecuencia), el costo de inversión se reduce aproximadamente a sólo 7 mil 500 USD, donde prácticamente el 95 % corresponde sólo al costo osciloscopio. De esta forma, se abate en gran medida el costo de inversión para realizar las pruebas, y sólo sería necesario contratar los servicios de un laboratorio de certificación una vez que se han obtenido resultados satisfactorios en las pruebas de pre-conformidad. Inclusive, se pueden evitar si el enfoque del desarrollo es del tipo académico o didáctico.

Otro impacto social de este trabajo es permitir a estudiantes que trabajan en el desarrollo de este tipo de dispositivos, entender la relevancia de aspectos relacionados con el ciclo de desarrollo del producto, necesarios para llevar un dispositivo a su despliegue comercial, como lo son las pruebas de compatibilidad electromagnética.

4. Conclusiones: lo que podemos aprender de este artículo

La interferencia electromagnética conducida y radiada es un problema que nos afecta a todos en todas las áreas de nuestra vida, dado que la mayoría de las cargas que utilizamos son electrónicas y estas están conectadas a diferentes fuentes de energía. La EMI, puede provocar fallas en la operación en los equipos electrónicos industriales, de servicios y domésticos, además en aplicaciones como la electromovilidad y el internet de las cosas, un mal diseño en el filtro EMI de una fuente de alimentación podría llevar a comprometer significativamente el funcionamiento. Para el diseño del filtro EMI es necesario realizar

pruebas de EMI conducido en el convertidor de potencia para identificar la frecuencia o intervalo de frecuencias que no cumplen con los límites del estándar correspondiente.

Este artículo presenta de forma breve el diseño de una LISN para convertidores CD-CD de una micro red de CD conforme al estándar de aplicación CISPR 16 en el rango de frecuencias de 9kHz a 30MHz. La LISN cumple con la curva característica de impedancia.

Para la caracterización de la LISN se empleó un medidor LCR GWInstek 8110G, el cual nos presenta la gráfica de impedancia hasta 10 MHz. Se realizaron pruebas con la LISN a un convertidor CD-CD alimentado de +48 V para una aplicación en luminaria tipo LED. La LISN tiene la capacidad de realizar la medición de EMI conducido para equipos bajo prueba (DUT o EUT) hasta un voltaje de alimentación de +380 V con una corriente máxima de 10 A.

5. Referencias: *por si quieres seguir conociendo más*

Amjadifard, R., Tavakoli-Bina, M., Khaloozadeh, H. and Bagheroskouei, F. (2021). Proposing an Improved DC LISN for Measuring Conducted EMI Noise, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 63 (3), 752-761, doi: 10.1109/TEM.2020.3025459.

Khilnani, A., Wan, L., Sumner, M., Thomas, D., Hamid, A. and Grassi, F. (14-16 July 2021). Conducted Emissions Measurements in DC Grids: Issues in Applying Existing LISN Topologies and Possible Solutions. *IEEE 15th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering*, Florence, Italy.

Lu, X., HU, B., and Su, D. (19-26 August 2023). Design of a Low-Cost High-Current LISN for EMC Test. *URSIGASS*, Sapporo, Japan.

On Sale EMC EMI Test Receiver Models Price New Used. (n.d.). Recuperado el 5 de junio de 2025 de <https://www.aaatesters.com/Electrical/EMC/emi-receivers.html>

Rabbani, Raza. (09 de diciembre de 2023). The Impact of EMI on Internet of Things (IoT) Networks: Evaluating Solutions with EMI Test Receivers. [https://www.lisungroup.com/news/technology-news/the-impact-of-emi-on-internet-of-things-iot-networks-evaluating-solutions-with-emi-test-receivers.html#:~:text=Interference%20from%20electromagnetic%20fields%20\(EMI\)%20is%20a%20major%20hindrance%20to,results%20of%20EMI%20test%20receivers](https://www.lisungroup.com/news/technology-news/the-impact-of-emi-on-internet-of-things-iot-networks-evaluating-solutions-with-emi-test-receivers.html#:~:text=Interference%20from%20electromagnetic%20fields%20(EMI)%20is%20a%20major%20hindrance%20to,results%20of%20EMI%20test%20receivers).

Review: EMZER's EMScope Analyzes Conducted and Modal (DM/CM) Emissions | Signal Integrity Journal. (n.d.). Recuperado el 5 de junio de 2025 de <https://www.signalintegrityjournal.com/blogs/17-practical-emc/post/3096-review-emzers-emscope-analyzes-conducted-and-modal-dm-cm-emissions>

Transient Specialists. (17 de febrero de 2025). What are Line Impedance Stabilization Networks (LISNs)?.<https://transientspecialists.com/blogs/blog/line-impedance-stabilization-networks-lisns-what-are-they>



Generador de señales senoidales multinivel basado en amplificadores operacionales: una herramienta didáctica para electrónica de potencia

Ricardo Eliu Lozoya Ponce *

Tecnológico Nacional de México / IT de
Chihuahua,
Chihuahua, Chihuahua, México

Roberto Carlos Martínez Montejano

Universidad Autónoma de San Luis Potosí,
Rioverde, San Luis Potosí, México

Luis Javier Ontañón García

Universidad Autónoma de San Luis Potosí,
Salinas de Hidalgo, San Luis Potosí, México

Rogelio Enrique Baray Arana

Tecnológico Nacional de México / IT de
Chihuahua,
Chihuahua, Chihuahua, México

* Autor de correspondencia: ricardo.lp@chihuahua.tecnm.mx

Resumen: Este artículo presenta un generador de señales senoidales multinivel económico, construido con componentes analógicos accesibles, como amplificadores operacionales. Su diseño modular y didáctico permite a estudiantes y docentes explorar conceptos clave de electrónica de potencia mediante la generación práctica de señales tipo PWM con varios niveles de voltaje. A través de pruebas experimentales, se evalúa la calidad de las señales generadas, midiendo la distorsión armónica total (THD), lo que ayuda a comprender cómo influye el diseño en la eficiencia y pureza de las señales eléctricas. El generador propuesto constituye una alternativa atractiva para la enseñanza y aprendizaje práctico de electrónica, permitiendo experimentar de manera sencilla con diferentes escenarios de modulación.

Palabras clave: Amplificadores operacionales, distorsión total armónica, generador de señal senoidal.

1. Introducción: lo que debemos saber de inicio

En los últimos años, los convertidores multinivel se han consolidado como una tecnología clave dentro de la electrónica de potencia, especialmente en aplicaciones industriales de media y alta tensión. Estos dispositivos permiten generar señales de salida más suaves y con menor distorsión armónica, lo que resulta ideal para alimentar motores eléctricos, mejorar la calidad de la energía en redes, y aprovechar fuentes renovables como paneles solares o bancos de baterías (Malinowski, Gopakumar, Rodriguez, & Pérez, 2010; Rodríguez, Lai, & Peng, 2002; Beser, Arifoglu, Camur, & Beser, 2009; Gupta & Jain, 2012).

A pesar de sus ventajas, implementar estos convertidores puede ser complejo y costoso, especialmente cuando se utilizan plataformas como DSPs o FPGAs para su control (Rodríguez, Lai, & Peng, 2002; Kouro et al., 2010). Esta barrera tecnológica puede dificultar su enseñanza en entornos educativos, donde se busca un equilibrio entre funcionalidad, accesibilidad y comprensión del fenómeno físico.

Este trabajo propone una alternativa didáctica para explorar el funcionamiento de un convertidor multinivel de cinco niveles, utilizando exclusivamente componentes analógicos como amplificadores operacionales. A través de este enfoque, es posible comprender los principios de la modulación por ancho de pulso (PWM) y evaluar la calidad de las señales generadas mediante el análisis de la calidad de la señal, Distorsión armónica total (THD), es una medida que indica cuánto se desvía una señal eléctrica de la forma ideal, típicamente una onda senoidal pura como la que se encuentra en la red eléctrica. Cuanto menor es el valor del THD, más limpia y eficiente es la señal generada, lo cual mejora el rendimiento y protección de equipos eléctricos sensibles. Este parámetro cuantifica qué tanto difiere una señal respecto a una onda senoidal ideal —como la de la red eléctrica de 60 Hz—, y es un indicador ampliamente utilizado para medir la eficiencia y la pureza espectral en sistemas de conversión de energía.

Además de su utilidad académica, esta implementación abre la puerta a explorar distintas configuraciones de señales portadoras (triangulares, cuadradas o sinusoidales), permitiendo al estudiante experimentar con diversos escenarios y observar cómo estas decisiones afectan la forma de onda resultante y su contenido armónico (Gupta & Jain, 2012; Kouro et al., 2010; Lozoya-Ponce, Campos-Cantón, & Lozoya-Ponce, 2013).

El objetivo de este artículo es presentar una solución accesible y replicable, que sirva como puente entre los conceptos teóricos de la electrónica de potencia y su aplicación práctica en el aula o laboratorio.

2. Fundamentos Teóricos: reglas y principios científicos importantes

¿Qué es un convertidor multinivel?

En la electrónica de potencia, un convertidor multinivel es un dispositivo que transforma una señal de corriente directa (DC) en una señal de corriente alterna (AC) con múltiples niveles de voltaje escalonados. A diferencia de los inversores tradicionales que solo generan dos niveles (positivo y negativo), los convertidores multinivel pueden generar tres, cinco o incluso más niveles, lo que permite crear formas de onda más suaves y cercanas a una señal sinusoidal pura.

Esta característica tiene un beneficio directo: reduce la distorsión armónica, es decir, el “ruido” eléctrico que puede afectar el rendimiento de motores, equipos sensibles o redes eléctricas. Además, al distribuir el voltaje entre varios niveles, estos convertidores permiten manejar mayores tensiones sin forzar los componentes individuales (Malinowski, Gopakumar, Rodriguez, & Pérez, 2010; Rodríguez, Lai, & Peng, 2002).

Existen varias topologías de convertidores multinivel, pero una de las más populares y didácticas es la estructura en cascada con puentes H (conocida como Cascaded H-Bridge, o CHB). En esta configuración, cada celda o “puente” aporta una parte del voltaje total. Cuando se suman correctamente, producen una señal escalonada que se puede usar directamente o filtrar para obtener una forma de onda suave (Beser, Arifoglu, Camur, & Beser, 2009; Govindaraju & Baskaran, 2009).

Estos convertidores son ampliamente utilizados en:

- Energía renovable, como en sistemas fotovoltaicos o híbridos con baterías (Nema, Nema, & Agnihotri, 2011; Rahim & Mekhilef, 2002).
- Accionamientos industriales, para controlar motores de alta potencia.
- Mejoras en calidad de energía, actuando como filtros activos o compensadores de potencia reactiva.

Sin embargo, una de sus principales dificultades es el control de los niveles de salida. Normalmente, se requiere un sistema de modulación preciso, como la Modulación por Ancho de Pulso (PWM), para decidir cuándo y cuánto tiempo cada celda debe activarse. Esto lleva a muchos diseños a depender de procesadores digitales o microcontroladores avanzados, lo cual incrementa el costo y la complejidad (Gupta & Jain, 2012; Rodríguez, Lai, & Peng, 2002).

En este trabajo, se presenta una alternativa basada en componentes analógicos —principalmente amplificadores operacionales— para generar señales PWM útiles para un convertidor multinivel de cinco niveles. Este enfoque permite que estudiantes y docentes experimenten de forma directa con los principios de modulación y análisis de señales, sin requerir sistemas digitales complejos.

¿Qué es un PWM y cómo se genera con amplificadores?

La Modulación por Ancho de Pulso (o PWM, por sus siglas en inglés) es una técnica utilizada para controlar la cantidad de energía que se entrega a una carga eléctrica. En lugar de variar el voltaje de forma continua, como ocurre en una señal analógica, el PWM trabaja a través de pulsos digitales que se encienden y apagan rápidamente. Lo que varía es el “ancho” de estos pulsos, es decir, el tiempo que duran encendidos frente al tiempo total del ciclo.

En términos simples: cuanto más tiempo esté “encendido” un pulso dentro de un ciclo, mayor será la energía entregada. Esta relación se conoce como ciclo de trabajo (*duty cycle*), es decir el porcentaje de tiempo que permanece activo, y puede ir del 0% (siempre apagado) al 100% (siempre encendido).

En convertidores multinivel, esta técnica permite decidir en qué momento cada nivel de voltaje se activa, generando una forma de onda escalonada que se acerca a una señal sinusoidal. Entre las variantes de PWM, una de las más conocidas es la modulación sinusoidal por ancho de pulso (SPWM), donde una señal senoidal de referencia se compara con una señal portadora (típicamente triangular) para generar los pulsos de conmutación.

Una de las ventajas de este proyecto es que no se necesita un microcontrolador (μC) o una FPGA para generar la modulación. Todo se puede realizar usando componentes analógicos, especialmente amplificadores operacionales, simplificando el concepto y la teoría fundamental de operación de los convertidores y de la SPWM al no requerir tiempo para

aprender a usar el hardware (ADC, DAC, interrupciones, etc.), escribir, depurar y optimizar código en el μ C o FPGA.

La implementación del sistema SPWM se puede dividir en tres bloques principales:

1. Generación de señales portadoras: Se crean varias versiones de una señal triangular (o cuadrada o sinusoidal), cada una desplazada verticalmente respecto a la otra. Este desplazamiento se logra con sumadores de voltaje (offset adders) contruidos con amplificadores operacionales en configuración no inversora. Estas señales actúan como los “niveles” de comparación para la modulación.
2. Comparación con la señal moduladora: Una señal senoidal (60 Hz) sirve como referencia. Se compara con cada una de las señales portadoras usando comparadores —circuitos también hechos con amplificadores operacionales o con el LM311 configurado como comparador—. El resultado son señales digitales que indican en qué momentos la señal senoidal supera a cada portadora.
3. Suma de señales de conmutación: Las salidas de los comparadores se combinan en un circuito sumador, generando la clásica forma de onda escalonada que caracteriza a un convertidor multinivel. Esta señal se puede observar en un osciloscopio, o incluso analizar su calidad con herramientas como un analizador de espectro.

Esta implementación no solo es económica, sino también altamente didáctica. Los estudiantes pueden ver físicamente cómo se generan los pulsos, modificar valores en tiempo real (como frecuencia de la portadora o amplitud de la señal), y observar cómo estos cambios afectan la señal de salida y su contenido armónico.

3. Desarrollo del Trabajo: *aplicando las reglas y principios científicos*

Prototipo experimental

El sistema desarrollado tiene como objetivo demostrar, de forma práctica y accesible, cómo funciona la modulación por ancho de pulso (PWM) para controlar un convertidor multinivel. Para lograrlo, se diseñó un circuito que utiliza componentes comunes y de bajo costo, como amplificadores operacionales TL081 y comparadores LM311.

Este prototipo está basado en una topología de convertidor en cascada de cinco niveles, una configuración ampliamente usada por su sencillez y su capacidad de generar formas de

onda escalonadas con bajo contenido armónico (Malinowski, Gopakumar, Rodriguez, & Pérez, 2010; Rodríguez, Lai, & Peng, 2002). Cabe destacar que todo el sistema puede construirse sin necesidad de microcontroladores, FPGAs ni programación, lo que lo hace ideal para estudiantes o laboratorios con recursos limitados.

El diseño se organiza en tres bloques funcionales:

1. Generación de señales portadoras desplazadas: Se utilizan sumadores con amplificadores operacionales para crear varias versiones de una señal portadora (por ejemplo, triangular), cada una desplazada verticalmente respecto a la otra. Esto permite simular los diferentes niveles de voltaje requeridos en el convertidor. El sistema consta de tres bloques principales: generación de portadoras, comparación con la señal de referencia y suma de señales de salida. En la sección de generación de portadoras, cada portadora se obtiene al sumar un voltaje fijo a una señal base, generando múltiples niveles de comparación. En la sección de comparación de portadoras, cada comparador evalúa si la señal senoidal (moduladora) supera a una de las portadoras. Cuando eso ocurre, se genera un pulso de conmutación.



Figura 7 Estructura general de un generador SPWM con amplificadores operacionales.

Obtenida de: elaboración propia.

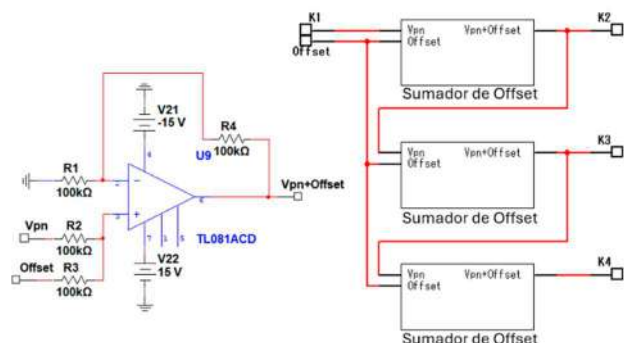


Figura 2 Generación de señales portadoras mediante sumadores con desplazamiento (offset).

Obtenida de: elaboración propia.

2. Comparadores: Se implementaron circuitos de comparación analógicos que comparan la señal senoidal de referencia (60 Hz) con cada portadora. Cuando la señal de referencia supera a la portadora, se activa una señal de conmutación que representa uno de los niveles del convertidor.

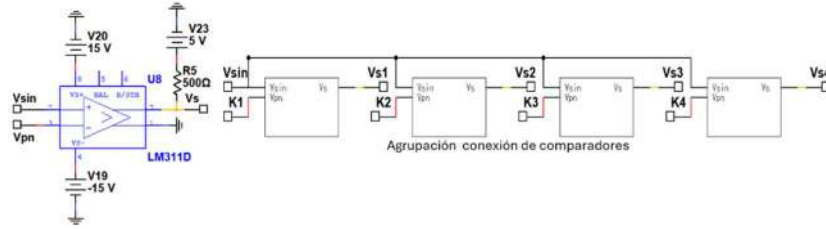


Figura 3 Diagrama del bloque de comparadores.

Obtenida de: elaboración propia.

3. Suma de señales de conmutación: Las salidas de los comparadores se combinan mediante un circuito sumador con resistencias, también basado en amplificadores operacionales. El resultado es una señal escalonada compuesta por los diferentes niveles de salida, lista para ser analizada o aplicada a una carga.

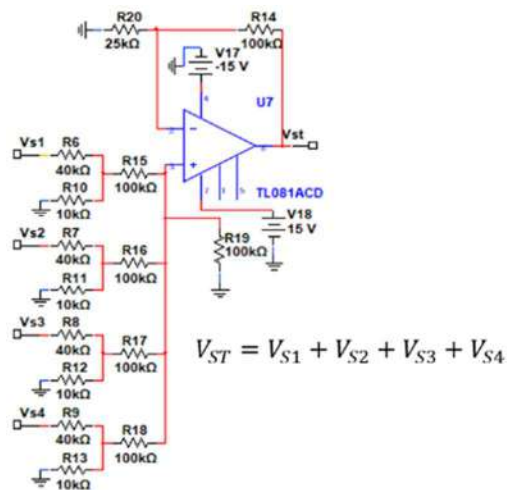


Figura 4 Implementación analógica de un sumador de voltaje usando amplificador operacional. El bloque suma las señales de conmutación para producir una forma de onda escalonada.

Obtenida de: elaboración propia.

Este tipo de prototipo no solo permite observar físicamente cómo se genera una forma de onda PWM, sino también modificar los parámetros en tiempo real (frecuencia, amplitud, forma de portadora), promoviendo una comprensión profunda de los principios que rigen la electrónica de potencia.

Además, su diseño modular permite experimentar con diferentes formas de portadora (triangular o senoidal) y evaluar su efecto en la calidad de la señal, lo cual veremos en la siguiente sección.

Simulaciones y resultados experimentales

Para validar el funcionamiento del sistema propuesto, se realizaron simulaciones en dos plataformas complementarias: Multisim, para verificar el diseño del circuito analógico, y MATLAB, para visualizar el comportamiento del sistema y analizar la calidad de la señal generada.

El objetivo principal fue observar cómo varía la forma de onda escalonada de salida al modificar tres elementos clave:

- La forma de la señal portadora (triangular o senoidal).
- La frecuencia de la portadora (1.1 kHz y 5.5 kHz).
- La separación entre niveles de comparación (usando offset de 1V entre portadoras).

En la simulación, se empleó una señal senoidal de referencia de 60 Hz y señales portadoras con diferentes formas. Para un convertidor de cinco niveles, se generaron cuatro portadoras desplazadas.

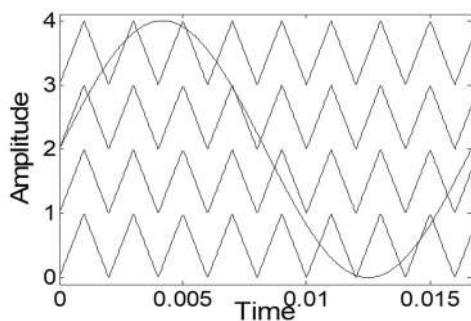


Figura 5 Señales portadoras triangulares (VP1 a VP4) junto a la señal senoidal de referencia (VSin).

Obtenida de: elaboración propia.

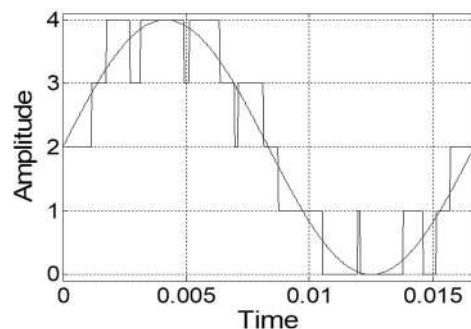


Figura 6 Resultados de las comparaciones: señales de conmutación VSI a VS4 y Señal escalonada obtenida (VST) superpuesta a la señal de referencia.

Obtenida de: elaboración propia.

Estas simulaciones muestran claramente cómo se forma la señal escalonada a partir de las comparaciones individuales. Al cambiar la forma o frecuencia de la portadora, el

comportamiento de la señal de salida también se modifica. El circuito fue construido físicamente utilizando amplificadores LM311 y TL084, alimentados con una fuente de $\pm 15V$. Las señales fueron generadas con un generador de funciones, y la salida fue capturada con un osciloscopio y un analizador de espectro para medir la distorsión armónica total (THD). Se compararon dos tipos de portadora (triangular y senoidal) a dos frecuencias (1.1 kHz y 5.5 kHz), obteniendo seis casos en total.

Los resultados experimentales confirman que, al aumentar la frecuencia de la portadora, el valor del THD disminuye, lo cual concuerda con la teoría: a mayor frecuencia de conmutación, mayor resolución en la reconstrucción de la señal. Entre todas las configuraciones, el mejor resultado de THD se obtuvo con la portadora senoidal a 5.5 kHz. Sin embargo, como se discutirá en la sección de conclusiones, la generación de una portadora perfectamente senoidal puede ser más complicada en la práctica que una triangular, por lo que debe evaluarse en función de los recursos disponibles.

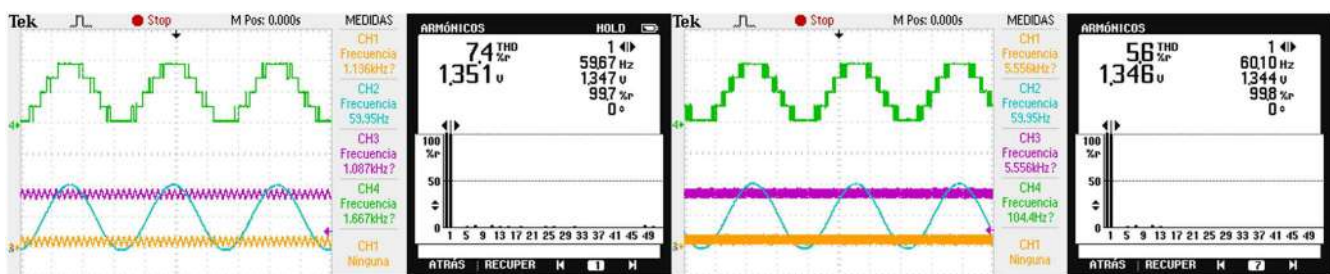


Figura 7 Resultados experimentales con portadora triangular. Para una frecuencia de 1.1 kHz se observa un THD de 7.4, mientras que para una frecuencia de 5.5 kHz se tiene un valor THD de 5.6.

Obtenida de: elaboración propia.

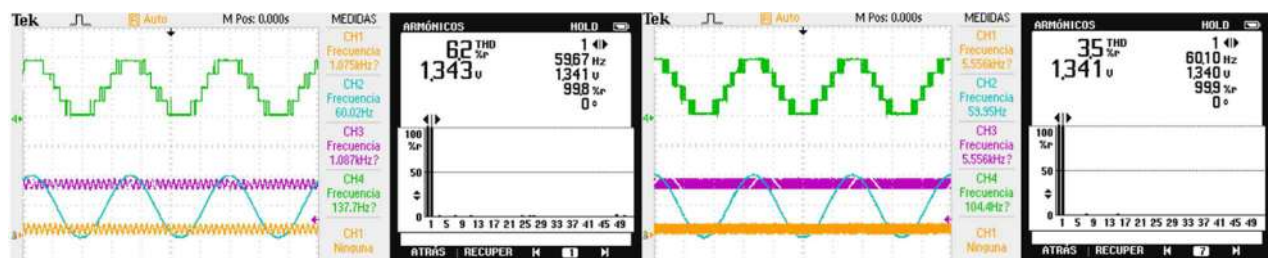


Figura 8 Resultados experimentales con portadora senoidal. Para una frecuencia de 1.1 kHz se observa un THD de 6.2, mientras que para una frecuencia de 5.5 kHz se tiene un valor THD de 3.5.

Obtenida de: elaboración propia.

4. Conclusiones: *lo que podemos aprender de este artículo*

Más allá de los resultados técnicos, este proyecto constituye una valiosa herramienta educativa. Su diseño permite que los estudiantes comprendan conceptos complejos de forma tangible, manipulando señales reales, observando sus efectos en tiempo real y relacionando teoría con práctica. A continuación, se destacan algunas de las principales enseñanzas que este prototipo ofrece:

- a) Comprensión de la modulación por ancho de pulso (PWM).
- b) Desarrollo de habilidades prácticas en electrónica analógica.
- c) Evaluación de la calidad de energía.
- d) Flexibilidad para adaptarse a múltiples escenarios.
- e) Aplicaciones en energías renovables y sistemas reales.

Este tipo de actividades permiten que la enseñanza de la electrónica de potencia no se limite a simulaciones o esquemas en papel, sino que involucre el razonamiento crítico, la experimentación y la validación de hipótesis. En resumen, este proyecto es una puerta de entrada accesible y poderosa al mundo de los convertidores avanzados y la modulación.

Este trabajo presentó una propuesta experimental y accesible para implementar un convertidor multinivel de cinco niveles, utilizando exclusivamente componentes analógicos como amplificadores operacionales y comparadores. A través de esta solución, fue posible demostrar que técnicas avanzadas de modulación, como la modulación por ancho de pulso (PWM), pueden comprenderse y replicarse sin necesidad de plataformas digitales complejas como FPGAs o DSPs.

Los resultados obtenidos, tanto en simulación como en laboratorio, confirmaron que el sistema es funcional y que la forma y frecuencia de la señal portadora influyen directamente en la calidad de la señal de salida. En particular, el uso de una portadora senoidal a 5.5 kHz arrojó los mejores resultados en términos de distorsión armónica total (THD), validando la teoría de que una mayor frecuencia de conmutación mejora la reconstrucción de la señal modulada. Sin embargo, también se observó que generar una portadora senoidal con alta fidelidad puede representar un desafío práctico, lo que posiciona a la portadora triangular como una opción más simple y efectiva en contextos educativos.

Más allá de los resultados técnicos, este proyecto destaca por su valor pedagógico. Permite que estudiantes y docentes exploren conceptos clave de electrónica de potencia, análisis de

señales y modulación, mediante un enfoque práctico y tangible. Además, su diseño modular abre la posibilidad de extender su funcionalidad, incluyendo otras formas de portadora, más niveles de conversión o nuevas técnicas de modulación.

En síntesis, se trata de una herramienta formativa de bajo costo, alto impacto educativo y amplio potencial para ser integrada en cursos de electrónica analógica, electrónica de potencia y energías renovables. Su implementación no solo facilita el aprendizaje activo, sino que también inspira la curiosidad y la experimentación, pilares fundamentales en la formación de ingenieros.

5. Referencias: *por si quieres seguir conociendo más*

- Belkheiri, A., Aoughellane, S., Belkheiri, M., & Rabhi, A. (2015). FPGA based control of a PWM inverter by the third harmonic injection technique for maximizing DC bus utilization. *International Conference on Control, Engineering & Information Technology (CEIT)*.
- Beser, E., Arifoglu, B., Camur, S., & Beser, E. K. (2009). Multilevel inverter with reduced number of switches. *International Review of Electrical Engineering*, 4(4), 532–538.
- Deshmukh, V. M., & Patil, A. J. (2015). Development of Matlab/Simulink model for three-phase PWM inverter and hardware implementation using DSP with nonlinear load. *International Journal of Control Science and Engineering*, 5(1), 1–9.
- Govindaraju, C., & Baskaran, K. (2009). Optimized hybrid phase disposition PWM control method for multilevel inverter. *International Journal of Recent Trends in Engineering*, 1(3), 129–134.
- Gupta, K. K., & Jain, S. (2012). Theoretical analysis and experimental validation of a novel multilevel inverter topology for renewable energy interfacing applications. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 4(1).
- Kouro, S., Malinowski, M., Gopakumar, K., Pou, J., Franquelo, L. G., Wu, B., et al. (2010). Recent advances and industrial applications of multilevel converters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 57(8), 2553–2580.
- Lozoya-Ponce, R. E., Campos-Cantón, I., & Lozoya-Ponce, R. O. (2013). Estructura reconfigurable: comparador/multiplexor/demultiplexor. *Revista Mexicana de Física*, 59, 107–116.
- Malinowski, M., Gopakumar, K., Rodríguez, J., & Pérez, M. A. (2010). A survey on cascaded multilevel inverters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 57(7), 2197–2206.
- Nema, S., Nema, R. K., & Agnihotri, G. (2011). Inverter topologies and control structure in photovoltaic applications: A review. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 3(1).

- Rahim, N. A., & Mekhilef, S. (2002). Implementation of three-phase grid connected inverter for photovoltaic solar power generation system. *Proceedings of the International Conference on Power System Technology*.
- Rodríguez, J., Lai, J.-S., & Peng, F. Z. (2002). Multilevel inverters: A survey of topologies, controls, and applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 49(4), 724–738.
- Selvaraj, J., & Rahim, N. A. (2009). A novel pulse width modulation for grid-connected multilevel inverter. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 1(5).



Análisis de simetría térmica en motores

Roxana De León Lomelí *

Tecnológico Nacional de México / IT de San

Luis Potosí,

San Luis Potosí, San Luis Potosí, México

Juan Manuel Fortuna Cervantes

Tecnológico Nacional de México / IT de San

Luis Potosí,

San Luis Potosí, San Luis Potosí, México

Arturo Acuña Mancilla

Tecnológico Nacional de México / IT de San

Luis Potosí,

San Luis Potosí, San Luis Potosí, México

Efrén Flores García

Tecnológico Nacional de México / IT de San

Luis Potosí,

San Luis Potosí, San Luis Potosí, México

* Autor de correspondencia: luz.dl@slp.tecnm.mx

Resumen: *El análisis de imágenes es un área de la ciencia que permite hacer diagnósticos aplicando técnicas matemáticas y computacionales. Existen diversos tipos de imágenes, de cámara fotográfica, infrarrojas, rayos x, entre otras. En el caso de las imágenes térmicas, que reflejan el calor de los objetos, proporcionan información importante y que ha sido ampliamente utilizada en el sector salud. En el presente artículo se aborda el análisis de estas imágenes para detección de fallas en motores, caracterizando la huella de calor de este durante el ciclo de trabajo. Detectar estos signos tempranos mediante el análisis visual de imágenes térmicas es clave para implementar acciones correctivas oportunas que prolonguen la vida útil del sistema y eviten costosos tiempos de inactividad.*

Palabras clave: *análisis de imágenes, fricción, motores, termografía.*

1. Introducción: lo que debemos saber de inicio

¿Puede una imagen térmica ayudar a identificar si un motor está a punto de fallar? La termografía infrarroja, es una técnica que permite analizar gráficamente la temperatura superficial de los objetos, y se ha convertido en una herramienta importante para el

mantenimiento predictivo de motores eléctricos y mecánicos (Maldague, 2001; Ibarra-Castanedo, 2013).

Una imagen termográfica es la representación visual del calor de los objetos, en donde los sensores infrarrojos detectan la radiación emitida por la superficie de un objeto y la traducen en una escala de colores. Los tonos más cálidos representan zonas más calientes y los tonos más fríos zonas de menor temperatura (Ibarra-Castanedo, 2013). Esta herramienta se ha usado con éxito para detectar fugas térmicas, cortocircuitos, puntos calientes, fricción anormal y otros signos tempranos de falla en equipos industriales (Yang & Kim, 2006).

En el área médica se aplica para localizar puntos de posible enfermedad, como lo es el análisis de simetría térmica para detección de cáncer de mama. En el análisis se comparan los patrones térmicos para identificar anomalías (Prabha et al., 2017).

En el caso del análisis de imágenes térmicas de motores, si existe un correcto funcionamiento, se encuentra una distribución térmica simétrica entre sus componentes equivalentes, como bobinas, rodamientos, ejes o carcasa. Esta simetría indica que las partes del motor trabajan de forma balanceada, disipando calor de manera similar (ISO, 2008). Caso contrario, al aparecer asimetrías térmicas, es posible intuir problemas como:

- Sobrecarga en uno de los componentes
- Desgaste mecánico desigual
- Fallas en el aislamiento eléctrico
- Fricción excesiva por falta de lubricación
- Conexiones eléctricas defectuosas

Existen diversos estudios donde se hace análisis de imágenes térmicas para detección de fallas en motores. En (Alvarado-Hernández, 2022) se describe el desarrollo de un sensor inteligente basado en la termografía para apoyo en el diagnóstico de fallas en rodamientos y engranajes en motores de inducción. En (Mendoza & López, 2024) proponen un método que combina técnicas de aprendizaje automático y de análisis de imágenes térmicas para el diagnóstico de fallas en motores de inducción. Finalmente, (Al-Masri & Al-Ali, 2025) propone un método de diagnóstico de fallas en motores de inducción monofásicos utilizando termografía infrarroja y técnicas de inteligencia artificial.

En este artículo exploramos cómo el análisis de simetría en estas imágenes puede ayudarnos a identificar fallas estructurales de forma no invasiva.

2. Fundamentos Teóricos: reglas y principios científicos importantes

El análisis de simetría en imágenes infrarrojas (IR) se basa en las propiedades simétricas inherentes en los componentes del motor para la segmentación de las imágenes, la detección de fallas y la interpretación de datos. Con esta técnica es posible mejorar la precisión y eficiencia del diagnóstico del motor.

¿Cómo se analiza la simetría en imágenes térmicas?

Existen diferentes formas de hacerlo. Una primera inspección puede hacerse mediante un análisis cualitativo visual, que se basa en la apreciación del observador, suele ser subjetivo y poco preciso. La forma más adecuada es mediante un análisis cuantitativo computacional, para ello existen diversas técnicas, que aplican algoritmos para dividir la imagen en dos mitades (izquierda y derecha, o superior e inferior) y calcular las diferencias píxel a píxel o por regiones. Una métrica sencilla y útil es el índice de simetría térmica (SI) se describe en la Ec. (1):

$$SI = \frac{1}{N} \sum |I_L(x, y) - I_R(x, y)| \quad (1)$$

Donde I_L e I_R representan la intensidad térmica de los píxeles en lados simétricos, y N es el número total de píxeles comparados. Un valor de SI cercano a cero indica poca diferencia y por tanto alta simetría. Este tipo de análisis permite detectar anomalías sutiles que podrían pasar desapercibidas a simple vista (Ibarra-Castanedo, 2013).

En la literatura se han reportado algunas metodologías de análisis de asimetría en imágenes térmicas un poco más complejas. Por ejemplo, el uso de algoritmos basados en comportamientos de la naturaleza (fractales, por ejemplo) combinados con filtros de difusión anisotrópica (un material o fenómeno anisotrópico es aquel que no es igual en diferentes direcciones) tienen una alta precisión y se han aplicado en la segmentación de tejidos mamarios. Este método permite distinguir de forma efectiva entre tejidos normales y anormales (Prabha et al., 2017).

3. Desarrollo del Trabajo: *aplicando las reglas y principios científicos*

El análisis de simetría térmica, para detección de fallas en el funcionamiento de motores, es especialmente útil en mantenimiento predictivo, pues permite detectar fallas antes de que se presente un daño crítico, reducir el tiempo de inactividad de equipos, optimizar el uso de recursos de mantenimiento, prolongar la vida útil de motores y maquinaria (ISO, 2008). Además, al tratarse de una técnica no invasiva, puede realizarse el análisis con el motor en funcionamiento, sin interrumpir el proceso productivo.

En la Figura 1 se muestra un comparativo de dos sistemas de motores acoplados. En la primera de ellas se aprecia la distribución equilibrada del trabajo, y por consiguiente de la energía. Mientras que en la segunda existe un desacoplo que genera el desbalance, ocasionando asimetría térmica en el funcionamiento del sistema.

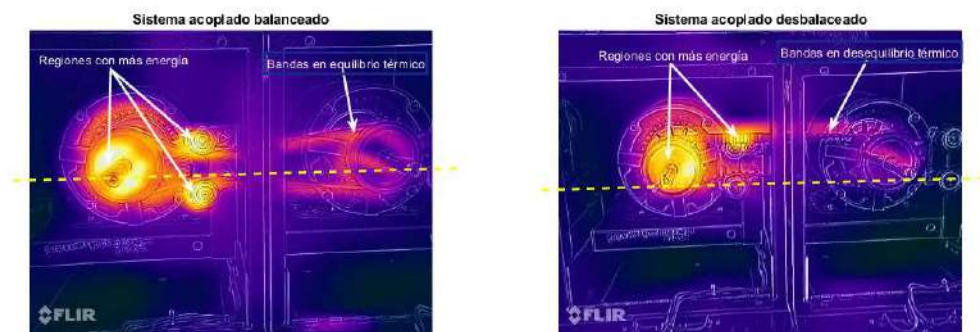


Figura 1 Comparativos de sistemas de motores acoplados balanceados y desbalanceados.

Obtenida de: elaboración propia.

Para leer estas imágenes inicialmente se deberá poner atención a las zonas más brillantes, que indican *zonas calientes* o dónde se tiene un nivel de energía mayor. Mientras que zonas más oscuras significan temperaturas menores o *zonas frías*. Por simple inspección visual las imágenes evidencian zonas de incremento térmico, atribuibles a procesos de fricción, genera concentraciones de desgaste y fenómenos de fatiga en baleros. Este aumento de temperatura induce una degradación progresiva en las superficies internas de rodado. Como consecuencia la lubricación de fábrica en baleros-grasa de fábrica- tiende a perder sus propiedades o a desplazarse fuera de la zona crítica, incrementando la fricción y

causando una exposición de los elementos de rodado a mayores niveles térmicos, acelerando su deterioro.

De igual manera esta elevación de temperatura se concentrará en el campo del estator (parte del motor que se mantiene sin movimiento), lo que produce desgaste en el aislamiento (cristalización del barniz aislante). Este mal funcionamiento puede derivar, a largo plazo, en cortos magnéticos e incremento térmico, causando un aumento en la corriente nominal, y por ende mayor consumo de energía proporcionada por la compañía suministradora.

Sin pasar por alto el esfuerzo mecánico al que se está sometiendo la banda de transmisión, que eventualmente terminará fatigándose, sobrecalentándose y finalmente rompiéndose. Esto provocará la detención de la actividad para que desempeñe durante el tiempo que tome su reemplazo.

El análisis de simetría puede dar un análisis macro del sistema, pero también puede dar un enfoque micro. Por ejemplo, se puede observar que en el caso del sistema desbalanceado el balero inferior no tiene movimiento, debido al daño por el desbalance. Por lo tanto, no tiene movimiento, fricción y calor. Como se muestra en la Figura 2, donde se hace un comparativo de distribución térmica a 30 segundos del arranque.

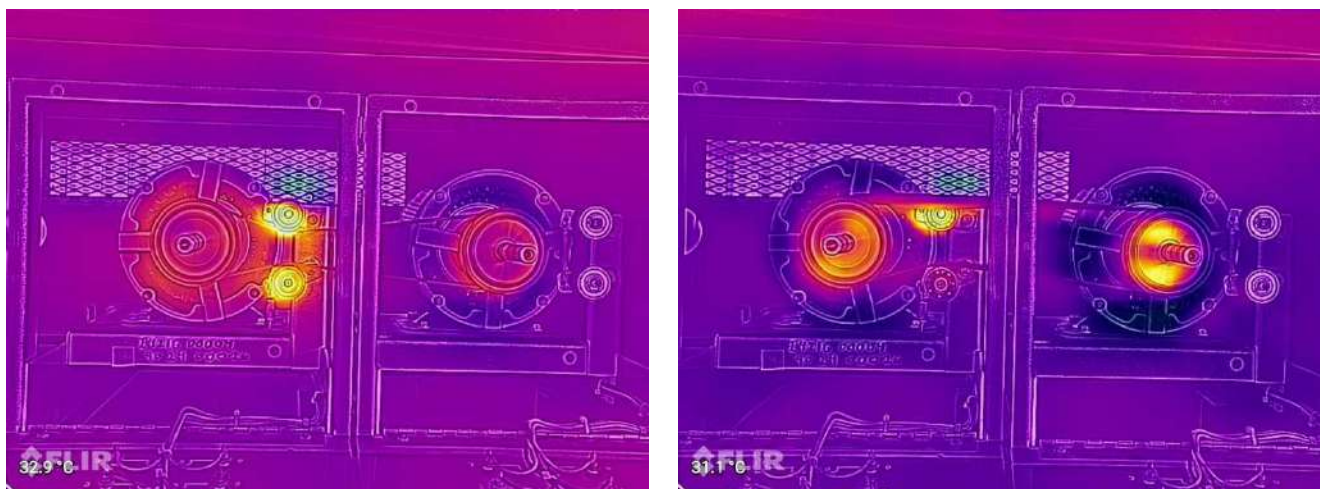


Figura 2 Comparativos de distribución térmica a 30 segundos del arranque. En la imagen de la izquierda el sistema es alineado y por lo tanto la carga está balanceada, con un balance térmico adecuado. En la imagen de la derecha el sistema tiene un desbalance y esto genera una asimetría térmica en el sistema.

Obtenida de: elaboración propia.

4. Conclusiones: lo que podemos aprender de este artículo

Si bien el análisis de simetría en imágenes térmicas es una poderosa herramienta, pues permite identificar patrones de calentamiento anormal en componentes críticos del motor, como baleros, campo del estator y bandas de transmisión. Estas elevaciones térmicas no solo indican procesos de fricción y desgaste mecánico, sino que también anticipan fallas eléctricas, pérdida de eficiencia energética y paros operativos. Detectar estos signos tempranos mediante el análisis visual de imágenes térmicas es clave para implementar acciones correctivas oportunas que prolonguen la vida útil del sistema y eviten costosos tiempos de inactividad.

Entre las áreas de oportunidad que se tienen es que las fallas tienen un tiempo de incubación que, por desgaste y calentamiento, que pudieran prevenirse con un análisis inicial termográfico y compararlo con análisis térmicos periódicos. Algunas partes del motor, como los baleros, por ejemplo, tienden a presentar cambios en sus comportamientos físicos, provocando ruidos que pueden llegar a ser molestos, avisando al personal para su cambio.

5. Referencias: por si quieres seguir conociendo más

- Al-Masri, A., & Al-Ali, A. (2025). AI-Driven Thermography-Based Fault Diagnosis in Single-Phase Induction Motors. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 143(2), 1234–1245. <https://doi.org/10.1016/j.jtac.2025.01.045>
- Alvarado-Hernández, A. I., Zamudio-Ramírez, I., Jaen-Cuéllar, A. Y., Osornio-Ríos, R. A., Donderis-Quiles, V., & Antonino-Daviu, J. A. (2022). Infrared Thermography Smart Sensor for the Condition Monitoring of Gearbox and Bearings Faults in Induction Motors. *Sensors*, 22(16), 6075. <https://doi.org/10.3390/s22166075>
- Ibarra-Castanedo, C. (2013). *Infrared thermography for nondestructive testing*. CRC Press.
- International Organization for Standardization. (2008). *ISO 18434-1: Condition monitoring and diagnostics of machines — Thermography — Part 1: General procedures*. <https://www.iso.org/standard/37081.html>
- International Organization for Standardization. (2009). *ISO 10816-3: Mechanical vibration — Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts — Part 3: Industrial machines with nominal power above 15 kW and nominal speeds between 120 r/min and 15 000 r/min when measured in situ*. <https://www.iso.org/standard/41170.html>
- Maldague, X. P. V. (2001). *Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing*. Wiley-Interscience.

- Mendoza, R., & López, J. (2024). Fault Diagnosis in Induction Motors through Infrared Thermal Imaging and Machine Learning Techniques. *Machines*, 12(8), 497. <https://doi.org/10.3390/machines12080497>
- Prabha, S., Suganthi, S. S., & Sujatha, C. M. (2017). *Analysis of Breast Thermal Images Using Anisotropic Diffusion Filter Based Modified Level Sets and Efficient Fractal Algorithm* (pp. 10–17). Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-9059-2_2



Metodología para la obtención de la curva esfuerzo-deformación usando el método de elemento finito inverso IFEM con pruebas Small Punch

Elías Daniel Valadez González

*Tecnológico Nacional de México / IT de
Celaya,
Celaya, Guanajuato, México*

Luis Alejandro Alcaraz Caracheo *

*Tecnológico Nacional de México / IT de
Celaya,
Celaya, Guanajuato, México*

Israel Aguilera Navarrete

*Centro de Innovación Aplicada en
Tecnologías Competitivas,
León de los Aldama, Guanajuato, México*

Juan Manuel Prado Lázaro

*Universidad Michoacana de San Nicolás de
Hidalgo,
Morelia, Michoacán, México*

* Autor de correspondencia: alejandro.alcaraz@itcelaya.edu.mx

Resumen: *En este trabajo se presenta una metodología para modelar la curva esfuerzo-deformación a partir de los datos obtenidos mediante la prueba de Small Punch Test (SPT). La estrategia consiste en establecer una correlación entre la curva carga-desplazamiento característica de la SPT y los parámetros de la ecuación constitutiva de Johnson-Cook, ampliamente utilizada para modelar la curva esfuerzo-deformación. Esta correlación se construye empleando el método de Elemento Finito Inverso (Inverse Finite Element Method, IFEM), lo que permite estimar parámetros que no pueden ser determinados directamente a través de la prueba SPT. A través de esta metodología es posible identificar propiedades mecánicas fundamentales del material, tales como el efecto de endurecimiento por deformación, la sensibilidad a la velocidad de deformación y los efectos térmicos, factores que influyen significativamente en su respuesta estructural y que no pueden ser determinados de manera directa con la SPT convencional.*

Palabras clave: Ecuación constitutiva, ecuación de Johnson-Cook, endurecimiento por deformación, IFEM, Small Punch Test.

1. Introducción: lo que debemos saber de inicio

Cuando el volumen de material disponible es limitado o su manipulación resulta compleja para la realización de ensayos mecánicos convencionales, se recurre a técnicas de ensayo en muestras pequeñas (*Small Specimen Test Techniques*, SSTT). Dentro de estas técnicas, la *Small Punch Test* (SPT) ha sido ampliamente utilizada para la caracterización de materiales delgados (Nabgan et al. 2023, Torres & Gordon, 2021), irradiados (Gatto & Montrasio, 2023), soldados (Aljohani et al., 2021), de baja resistencia (Yang et al., 2020), sometidos a fatiga mecánica (Zhang, 2022), así como en la técnica de las tres bolas (B3B) (Yamanaka et al., 2020), simulaciones mediante el método de elementos finitos (FEM) (Said, 2023) y, más recientemente, en combinación con redes neuronales artificiales (ANNs) (Morsy et al., 2022). La técnica de Small Punch permite, a partir de la curva carga-desplazamiento, obtener correlaciones con propiedades mecánicas fundamentales como el esfuerzo de fluencia (punto en que el material deja de comportarse elásticamente) y el esfuerzo último a la tensión (punto en que el material inicia su fractura bajo carga). Sin embargo, presenta limitaciones en el modelado completo de la curva esfuerzo-deformación característica de un ensayo de tensión convencional. Ante esta limitación, en el presente trabajo se propone una metodología para modelar la curva esfuerzo-deformación a partir de la curva carga-desplazamiento obtenida en pruebas SPT. Este objetivo se alcanza mediante el cálculo del esfuerzo y la deformación equivalentes, aplicando la teoría de membranas de Chakrabarty (una simplificación matemática que describe cómo se distribuyen las tensiones en materiales delgados bajo cargas, como si fueran una membrana flexible) (Ragab et al., 2022), cuyos resultados se comparan con aquellos obtenidos a través del método inverso de elementos finitos (IFEM). El método IFEM consiste en obtener los parámetros del material “al revés”, es decir, en vez de calcular qué pasa con un material cuando se le aplican cargas conocidas (como en un análisis directo), aquí se parte del resultado (la deformación) para descubrir las propiedades del material, es como deducir la receta de un platillo solo con probarlo.

La metodología incluye el uso del algoritmo iterativo de Levenberg-Marquardt (LM, una técnica numérica que permite ajustar curvas cuando la relación entre variables no es lineal, comúnmente usada para resolver problemas de optimización en ingeniería) (Aljohani et al., 2021) y la implementación de la ecuación constitutiva de Johnson-Cook, ampliamente utilizada en los modelos de simulación para describir el comportamiento esfuerzo-deformación. La correlación obtenida permitirá identificar parámetros fundamentales como el endurecimiento por deformación, los efectos de la velocidad de deformación y la influencia de la temperatura, fenómenos relevantes que no se pueden determinar durante la ejecución de la prueba SPT.

2. Fundamentos Teóricos: reglas y principios científicos importantes

La prueba de *Small Punch Test* (SPT) consiste en fijar entre dos matrices, la periferia de la probeta de dimensiones de 8 mm de diámetro por 0.5 mm de espesor, con el fin de deformar la probeta hasta su ruptura, utilizando el punzón con cabeza semiesférica como se muestra en la Figura 1.

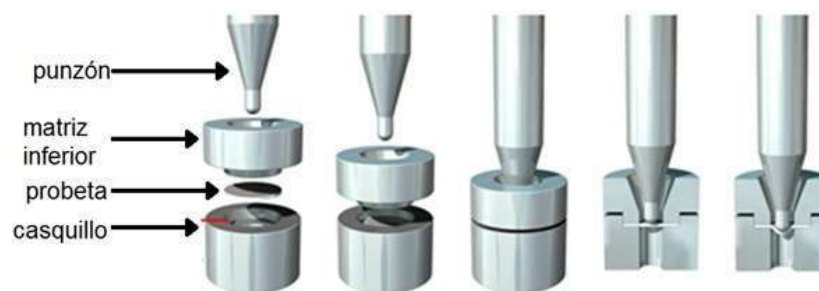


Figura 1. Prueba de Small Punch.

Obtenida de: (Lancaster et al., 2022).

Durante el proceso de deformación de la probeta en la prueba de Small Punch, se registran los valores de fuerza aplicada y desplazamiento. Con estos se genera la gráfica representada en la Figura 2. Esta gráfica proporciona información crucial sobre las diferentes zonas de deformación del material, permitiendo analizar su comportamiento y características mecánicas.

El modelo de Johnson-Cook (JC) es un modelo empírico ampliamente utilizado para predecir la respuesta de los materiales bajo altas tasas de deformación. Este modelo

incorpora varios términos para capturar la respuesta del material ante la deformación, tales como el endurecimiento por deformación, la dependencia de la tasa de deformación y los efectos de la temperatura. Estos elementos están representados en la ecuación 1 (Kuliiev et al., 2024).

$$\sigma_{eq}(\epsilon_p, \dot{\epsilon}_p, T) = [A + B(\epsilon_p)^n] \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}_p}{\dot{\epsilon}_{p0}} \right) \right] [1 - T^m] \quad (1)$$

Donde:

$[A + B(\epsilon_p)^n]$ endurecimiento por deformación.

$\left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}_p}{\dot{\epsilon}_{p0}} \right) \right]$ Dependencia de la tasa de deformación.

$[1 - T^m]$ Efectos de temperatura.

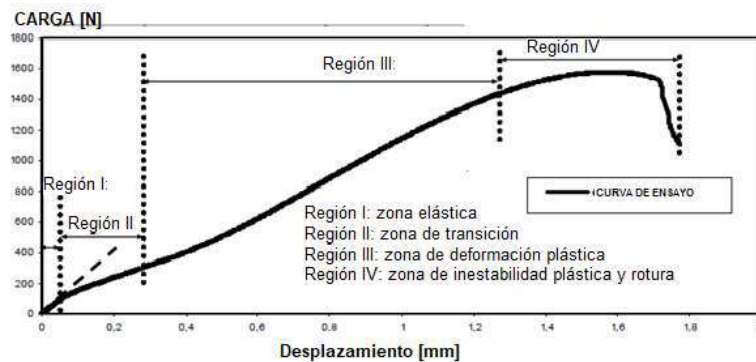


Figura 2. Gráfica de SPT, carga-desplazamiento.

Obtenida de: elaboración propia

Jang et al. (2023) realizaron una investigación utilizando la barra de Hopkinson, encontrando los parámetros de la ecuación de Johnson-Cook (A , B , C , n y m) mediante el método de Elemento Finito Inverso (IFEM). Comprobaron, mediante pruebas experimentales con el ensayo Charpy, la correlación entre estos parámetros. Por su parte, Li et al. (2018) identificó la correlación entre los parámetros de la ecuación constitutiva de Hollomon y la prueba de SPT mediante la técnica de IFEM, construyendo la curva esfuerzo-deformación con dichos parámetros. Se ha trabajado con estos datos explorando la simulación mediante el método de elemento finito inverso (IFEM). Este método consiste en determinar los valores de entrada a partir de los valores de respuesta de la simulación. Tantideeravit y Kamaya (2020) desarrollaron la metodología de elemento finito inverso, incorporando un proceso iterativo

de bisección y el modelo constitutivo de Ludwik para encontrar el trabajo de endurecimiento de aceros al carbono mediante SPT. La metodología de este trabajo se ilustra en la Figura 3, iniciando con la prueba de SPT después aplicando la teoría de membranas para obtener la curva esfuerzo-deformación equivalente. En el siguiente paso se comienza con la iteración de los datos de Johnson-Cook utilizando el método de Levenberg-Marquardt (LM) (Aljohani et al., 2021) conocido por su ajuste de curvas cuando la función no es perfectamente lineal respecto a los parámetros. El método LM ajusta automáticamente entre un enfoque más conservador (gradiente descendente) y uno más rápido (Gauss-Newton), lo que lo hace ideal para este tipo de problemas. Obteniendo los datos de JC se ingresan a la simulación para generar la curva esfuerzo-deformación y así encontrar la curva que corresponde a estos valores.

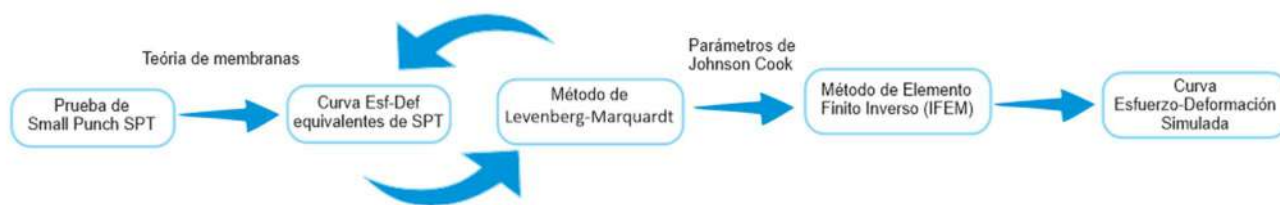


Figura 3. Metodología.

Obtenida de: elaboración propia.

3. Desarrollo del Trabajo: *aplicando las reglas y principios científicos*

Para nuestro estudio inicialmente, se utilizaron valores de los parámetros de la ecuación de Johnson-Cook reportados en la literatura (Tekkaya et al., 2020; Murugesan & Jung, 2019; Sasso et al., 2008; Buchely et al., 2019) para el material AISI 1045 normalizado y sin tratamiento térmico. De esta manera, se inician las iteraciones para encontrar los valores coincidentes con los resultados obtenidos en las pruebas de SPT realizadas al material. Sin embargo, para establecer esta relación, es necesario determinar la gráfica equivalente esfuerzo-deformación ($\sigma_{eq} - \epsilon_{eq}$) a partir de la gráfica carga-desplazamiento de la prueba Small Punch.

Para la conversión de datos de carga-desplazamiento a esfuerzo-deformación en pruebas Small Punch a temperatura ambiente, se emplea un enfoque basado en el área efectiva de contacto (A_{eff}). Este enfoque se fundamenta en la teoría de membranas, que describe la

distribución de tensiones en materiales delgados sometidos a carga centrada (Ragab et al., 2022). Además, estudios empíricos previos han demostrado la efectividad de esta aproximación en pruebas Small Punch convencionales (Kim et al., 2025; Lancaster et al., 2019; Holmström et al., 2019; Kim et al., 2024), donde el esfuerzo equivalente se calcula mediante la relación $\sigma_{eq} = F/A_{eff}$, siendo $A_{eff} = \pi d^2/4$ el área de contacto inicial. Este método ha sido validado en condiciones de temperatura ambiente y proporciona una estimación aproximada del comportamiento de los materiales en el SPT.

La Tabla 1, muestra los valores obtenidos de la literatura y los generados en las iteraciones para el material AISI 1045 normalizado (etiqueta 1045 N) y sin tratamiento térmico (etiqueta 1045 ST).

Tabla 1. Valores de Johnson Cook AISI 1045.

Parámetros	Valores de la literatura	Valores Iterados 1045 N	Valores Iterados 1045 ST
A [MPa]	50.103	10	2.95
B [MPa]	176.091	31.5	52.34
C	0.1056	0.02	0.046
n	0.5176	0.7	0.632
m	0.5655	0.75	1.75

Obtenida de: elaboración propia.

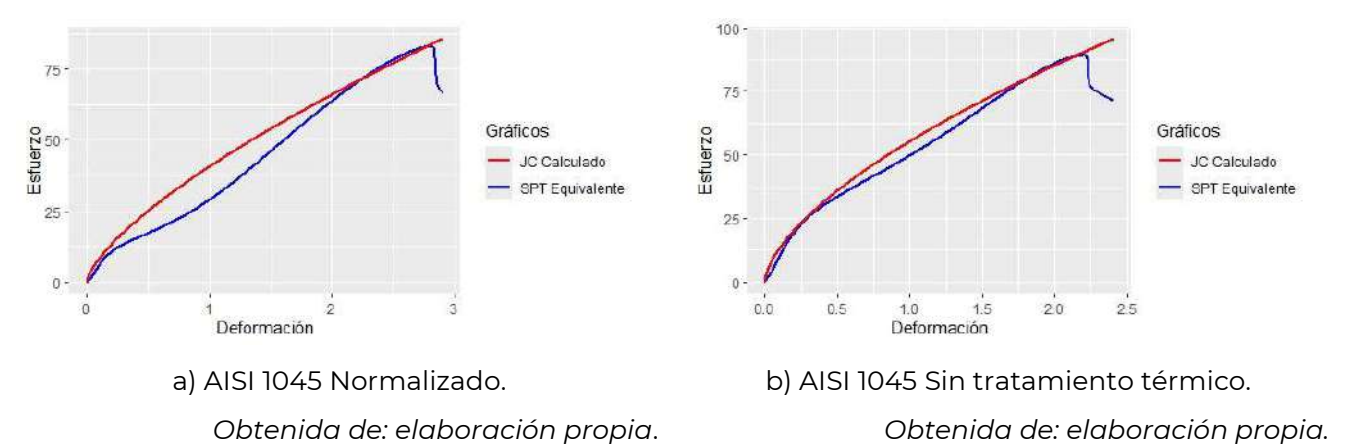
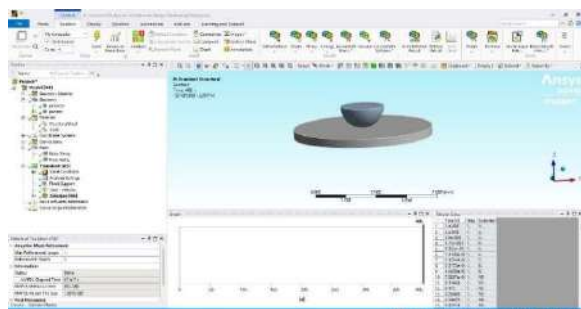


Figura 4. Ensayo de SPT para el acero AISI 1045, a) Normalizado, b) Sin tratamiento térmico.

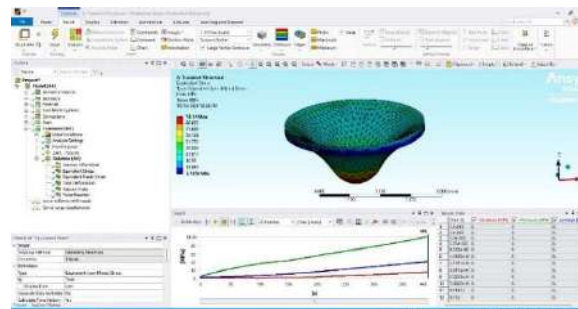
Luego del proceso iterativo, se obtiene la gráfica ($\sigma_{iter} - \epsilon_{iter}$) mediante la ecuación de Johnson-Cook (JC), la cual se compara con la gráfica esfuerzo-deformación equivalente ($\sigma_{eq} - \epsilon_{eq}$) obtenida de la prueba SPT. Esto se muestra en la Figura 4, donde la curva azul representa los resultados de la prueba SPT equivalentes y la curva roja muestra la aproximación obtenida a través del proceso iterativo.

Para el IFEM, se utilizó el módulo *Explicit Dynamics* de *Ansys Workbench*, donde se incorporaron los datos generados de la ecuación JC. Se efectúa la simulación de la prueba de SPT, obteniendo la curva esfuerzo- deformación, como se ilustra en la Figura 5.



a) Ingreso de los parámetros.

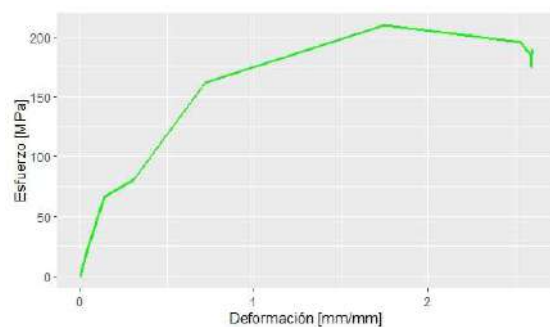
Obtenida de: elaboración propia.



b) Simulación.

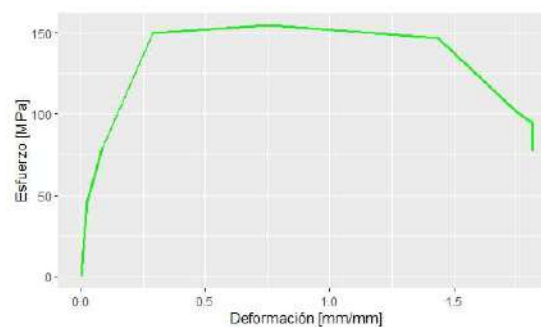
Obtenida de: elaboración propia.

Figura 5. Simulación de la prueba de Small Punch.



a) Simulación AISI 1045 N.

Obtenida de: elaboración propia.



b) Simulación AISI 1045 ST.

Obtenida de: elaboración propia.

Figura 6. Gráficas de la simulación del acero AISI 1045.

Los resultados obtenidos de la simulación son comparados con las pruebas reales de SPT, al generar curvas carga-desplazamiento semejantes, se prosigue con el modelado de la curva

esfuerzo-deformación, estableciendo de esta manera la correlación entre las dos curvas mediante los valores de JC. La Figura 6 muestra la gráfica esfuerzo-deformación obtenida para el acero 1045 a) normalizado y b) sin tratamiento térmico generada por medio de la simulación.

4. Conclusiones: *lo que podemos aprender de este artículo*

El presente trabajo se muestra la metodología para modelar la curva esfuerzo-deformación a partir de los resultados de la prueba Small Punch Test (SPT) para el material AISI 1045, sin embargo, este método no está limitado a este material, mediante el uso combinado de la teoría de membranas, la ecuación constitutiva de Johnson-Cook y el método de Elemento Finito Inverso (IFEM). Esta metodología permite complementar la prueba SPT convencional, al posibilitar la estimación de parámetros mecánicos críticos como el endurecimiento por deformación, la sensibilidad a la tasa de deformación y los efectos térmicos, que no pueden ser determinados de manera directa por esta técnica. Los resultados obtenidos para el acero AISI 1045, tanto en condición normalizada como sin tratamiento térmico, muestran una buena correlación entre la curva esfuerzo-deformación equivalente derivada experimentalmente y la obtenida mediante simulación en Ansys Explicit Dynamics, con parámetros iterados mediante el algoritmo de Levenberg-Marquardt. Esta validación respalda la robustez del enfoque adoptado y su aplicabilidad en la caracterización de materiales con geometrías y volúmenes reducidos. En general, la metodología propuesta representa una herramienta útil y precisa para la caracterización mecánica avanzada de materiales, especialmente en contextos donde el material disponible es limitado o se requiere evitar ensayos destructivos convencionales.

La metodología propuesta tiene implicaciones prácticas significativas en contextos industriales y de investigación donde el volumen de material es limitado o los ensayos destructivos son inviables. Ejemplos concretos incluyen:

- La evaluación de componentes estructurales envejecidos en sectores como el nuclear y el aeroespacial.
- El control de calidad en piezas soldadas, recubiertas o tratadas térmicamente.
- La caracterización de biomateriales donde la muestra disponible es mínima.

Al permitir la estimación indirecta de propiedades mecánicas a partir de pruebas simples y con mínimas muestras, esta metodología representa una herramienta útil para decisiones de mantenimiento predictivo, diseño de componentes y evaluación de integridad estructural.

5. Referencias: *por si quieres seguir conociendo más*

- Aljohani, J. L., Alaidarous, E. S., Zahoor Raja, M. A., Alhothuali, M. S., & Shoaib, M. (2021). Backpropagation of Levenberg Marquardt artificial neural networks for wire coating analysis in the bath of Sisko fluid. *Ain Shams Engineering Journal*, 12(4), 4133–4143. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.03.007>
- Gatto, M. P. A., & Montrasio, L. (2023). Artificial neural network model to predict the dynamic properties of sand-polyurethane composite materials for GSI applications. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 172, 108032. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2023.108032>
- Morsy, A. M., Elmoaty, A. E. M. A., & Harraz, A. B. (2022). Predicting mechanical properties of engineering cementitious composite reinforced with PVA using artificial neural network. *Case Studies in Construction Materials*, 16, e00998. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00998>
- Nabgan, W., Ikram, M., Alhassan, M., et al. (2023). Bibliometric analysis and an overview of the application of the non-precious materials for pyrolysis reaction of plastic waste. *Arabian Journal of Chemistry*, 16(6), 104717. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2023.104717>
- R. Kuliiev, S. Keller y N. Kashaev. (2024). Identification of Johnson-Cook material model parameters for laser shock peening process simulation for AA2024, Ti-6Al-4V and Inconel 718. *Journal of Materials Research and Technology*, 28, 1975-1989. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.11.168>
- R. Lancaster, S. Jeffs, B. Haigh y N. Barnard. (2022). Derivation of material properties using small punch and shear punch test methods. *Materials & Design*, 215, 110473. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110473>.
- R. Ragab, T. Liu, M. Li y W. Sun. (2022). Membrane stretching based creep damage analytical solutions for thin disc small punch problem. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 165, 104928. <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2022.104928>
- Said, B. E. (2023). Predicting the non-linear response of composite materials using deep recurrent convolutional neural networks. *International Journal of Solids and Structures*. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2023.112334>
- T. J. Jang, J. W. Yoon y J.-B. Kim. (2023). Determination of Johnson-Cook constitutive model coefficients considering initial gap between contact faces in SHPB test. *Journal of Materials Research and Technology*, 24, 7242-7257. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.05.001>

- Torres, J., & Gordon, A. P. (2021). Mechanics of the small punch test: A review and qualification of additive manufacturing materials. *Journal of Materials Science*, 56(18), 10707–10744. <https://doi.org/10.1007/s10853-021-05929-8>
- Yamanaka, A., Kamijyo, R., Koenuma, K., Watanabe, I., & Kuwabara, T. (2020). Deep neural network approach to estimate biaxial stress-strain curves of sheet metals. *Materials & Design*, 195, 108970. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108970>
- Yang, C., Kim, Y., Ryu, S., & Gu, G. X. (2020). Prediction of composite microstructure stress-strain curves using convolutional neural networks. *Materials & Design*, 189, 108509. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108509>
- Zhang, Z. (2022). Predicting stress–strain curves using transfer learning: Knowledge transfer across polymer composites. *Materials & Design*. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110700>

Estudio de la producción de frijol (*phaseolus vulgaris* L.) en la región del Bajío: un análisis estadístico multivariado

María Janet Calvillo García *

Tecnológico Nacional de México / IT de
Celaya,
Celaya, Guanajuato, México

José Alfredo Jiménez García

Tecnológico Nacional de México / IT de
Celaya,
Celaya, Guanajuato, México

David Israel Contreras Medina

Tecnológico Nacional de México / IT de
Celaya,
Celaya, Guanajuato, México

* Autor de correspondencia: m2403098@itcelaya.edu.mx

Resumen: Este estudio analizó la producción de frijol de los años 2013 al 2023 mediante estadística multivariada. Se identificaron correlaciones significativas: superficie-producción -0.541 a 0.986 y superficie-rendimiento negativas en Irapuato y Celaya. Los modelos de regresión mostraron R^2 alto 0.98 en Irapuato y bajo 0.10 en San Luis de La Paz. El análisis de componentes principales reveló que 70%-95% vinculó capacidad agrícola, y un 30% vinculó áreas siniestradas. Destacando desigualdades extremas San Felipe: 10,134 ton vs. Tierra Blanca: 42 ton.

Palabras clave: Adopción, estadística multivariada, frijol (*Phaseolus vulgaris* L.), tecnología sostenible.

1. Introducción: lo que debemos saber de inicio

En la actualidad, la adopción de la tecnología, impulsada por tecnologías como IoT, Big Data, drones y automatización, es clave para lograr una agricultura sostenible en pequeños productores, incluidos los de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.). Organizaciones como la

Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (*Food and Agriculture Organization of the United Nations*, FAO) y el Foro Económico Mundial destacan su potencial en regiones con escasos recursos, ejemplificando proyectos como *Climate-Smart Agriculture*, que integra IoT para mejorar la resiliencia climática. Sin embargo, factores socioeconómicos limitan su adopción en sectores vulnerables. A nivel global, estudios analizan variedades de frijol, técnicas de cocción (Wiesinger et al., 2021) y compostaje orgánico para maximizar rendimiento (Rodríguez Espinoza et al., 2024). En México, la producción enfrenta una crisis: con una caída anual del 3.2% y dependencia de importaciones, se amenaza la seguridad alimentaria. Investigaciones como la de Servín-Palestina et al. (2022) describen este declive, pero emplean métodos univariados, sin profundizar en análisis multivariados. Contreras-medina et al. (2025) abordan la desconexión entre innovación tecnológica y conocimiento tradicional, con enfoque estadístico es limitado. Kadege et al. (2024) aplican ANOVA para estudiar resistencia a enfermedades, sin llegar a realizar un análisis con estadística multivariada. La integración exitosa de la tecnología requiere equilibrar participación comunitaria y marcos analíticos robustos que incorporen variables económicas, sociales y ambientales. Solo así se garantizará una agricultura sostenible ante el crecimiento poblacional mundial, especialmente en cultivos estratégicos como el frijol.

2. Fundamentos Teóricos: reglas y principios científicos importantes

El frijol, esencial para la seguridad alimentaria en México y Latinoamérica, requiere estudios que analicen su producción mediante estadística multivariada. Esta metodología permite evaluar interacciones complejas entre variables agrícolas (clima, suelo, tecnología, prácticas) que influyen en su productividad y sostenibilidad. Técnicas como correlaciones y regresión lineal múltiple (Pardo, 2020), optimizan el uso de recursos (agua, fertilizantes) e identifican oportunidades para implementar soluciones tecnológicas, mitigando riesgos de escasez y dependencia de importaciones. En Guanajuato, región clave del Bajío, el frijol es prioritario: 836,105 hectáreas están sembradas, con municipios como Ocampo (80% de superficie agrícola) y San Felipe (50%) dedicados mayoritariamente a este cultivo (Gallegos Acosta et al., 2018).

La revisión bibliográfica indica vacíos en estudios recientes sobre producción de frijol en México que apliquen estadística multivariada. Por ejemplo, Ping et al. (2024) analizan habas con estas técnicas, mientras Zamukulu et al. (2023) estudian al frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) usando ANOVA y pruebas de diferencia mínima significativa, sin explorar relaciones multivariadas. Esto resalta la necesidad de enfoques integrales que superen análisis univariados o bivariados. Esta investigación aplicará estadística multivariada a datos de producción de frijol en el Bajío, evaluando cómo variables como tecnología, siembra, cosecha, rendimiento y condiciones ambientales interactúan. El objetivo es determinar si la adopción tecnológica influye significativamente en la productividad, proponiendo estrategias basadas en evidencia para fortalecer la sostenibilidad agrícola y reducir vulnerabilidades en un contexto de crecimiento poblacional y cambio climático.

3. Desarrollo del Trabajo: aplicando las reglas y principios científicos

Se estudiaron 43 de 46 municipios guanajuatenses con datos completos de producción de frijol (2013-2023), analizando superficie sembrada (ha), producción (ton) y rendimiento (ton/ha).

Las estadísticas descriptivas revelaron una disparidad extrema: Los 5 principales productores son San Felipe (10,134.18 ton), Ocampo (5,339.05 ton), San Luis de La Paz (3,724.70 ton), Dolores Hidalgo Cuna de la Independencia Nacional (3,360.04 ton) y Salvatierra (2,720.06 ton), mientras los menores fueron Tierra Blanca (42.61 ton), Atarjea (68.67 ton), Santa Catarina (81.28 ton), Purísima del Rincón (97.66 ton) y Cuerámara (121.49).

Coeficiente de correlación de Pearson:

Se utilizó el coeficiente de correlación de Pearson para medir la correlación entre dos conjuntos de datos.

- **Superficie vs Producción:** Con un resultado positivo en Irapuato (0.986), Huanímaro (0.970), Pénjamo (0.975), y Villagrán (0.976), indicando que más superficie aumenta la producción. Con excepciones como Guanajuato (-0.452), Victoria (-0.541), Atarjea (-0.082) y San José Iturbide (-0.288) indicando que aumentar la superficie no garantiza mayor producción.

- **Superficie vs Rendimiento:** Predominan correlaciones negativas en Irapuato (-0.745), Celaya (-0.614), Comonfort (-0.734), y Jerécuaro (-0.697), sugiriendo ineficiencia al expandir cultivos. Salamanca (0.313), Moroleón (0.200), y Villagrán (0.648) son excepciones donde más superficie se vincula a mayor rendimiento, lo que podría indicar prácticas agrícolas eficientes o cultivos altamente productivos.
- **Producción vs Rendimiento:** Resultados mixtos con correlaciones positivas en San Miguel de Allende (0.979), Ocampo (0.969), Dolores Hidalgo (0.364), y Xichú (0.793) mostrando que un aumento en la producción está ligado a un mayor rendimiento, mientras Irapuato (-0.644), Silao (-0.394), y Comonfort (-0.196), reflejan sobreproducción en tierras poco aptas o prácticas que degradan la productividad por hectárea.

Tabla 1. Resultados de Abasolo.

Abasolo			
Análisis de los valores de la matriz de correlación			
Valor propio	2.8668	0.1332	0.0000
Proporción	0.956	0.044	0.000
Acumulada	0.956	1.000	1.000
Variable	PC1	PC2	PC3
Siembra	0.584	0.398	-0.707
Cosecha	0.584	0.398	0.707
Producción	0.563	-0.826	0.000

Obtenida de: elaboración propia.

Tabla 2. Resultados de Cortázar

Cortázar			
Análisis de los valores de la matriz de correlación			
Valor propio	2.7715	0.2285	0.0000
Proporción	0.924	0.076	0.000
Acumulada	0.924	1.000	1.000
Variable	PC1	PC2	PC3
Siembra	0.590	0.389	-0.707
Cosecha	0.590	0.389	0.707
Producción	0.551	-0.835	0.000

Obtenida de: elaboración propia.

Tabla 3. Resultados de San Francisco del Rincón

San Francisco del Rincón			
Análisis de los valores de la matriz de correlación			
Valor propio	2.9412	0.0588	0.0000
Proporción	0.980	0.020	0.000
Acumulada	0.980	1.000	1.000
Variable	PC1	PC2	PC3
Siembra	0.580	0.404	-0.707
Cosecha	0.580	0.404	0.707
Producción	0.571	-0.821	0.000

Obtenida de: elaboración propia.

Modelo de regresión lineal múltiple:

Se evaluó un modelo de regresión lineal múltiple. Los municipios con R^2 alto como Irapuato (0.98), Pénjamo (0.96), Valle de Santiago (0.96), Villagrán (0.95), y Huanímaro (0.94) confirmaron que la superficie sembrada explica casi toda la variabilidad en la producción. Los municipios con R^2 bajo (≤ 0.2) son San Luis de La Paz (0.10), Santa Catarina (0.13), y Guanajuato (0.20) la superficie sembrada casi no explica la producción, lo que sugiere que otros factores dominan la productividad.

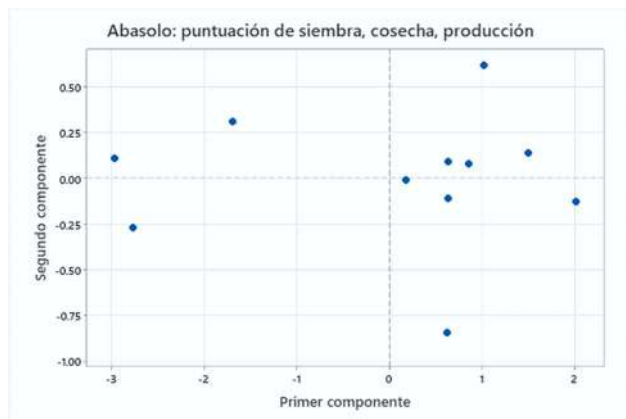


Figura 8. Gráfica de Abasolo.

Obtenida de: elaboración propia.

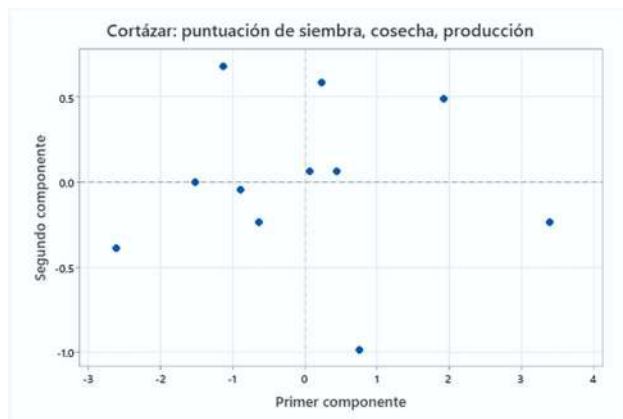


Figura 9. Gráfica de Cortázar.

Obtenida de: elaboración propia.

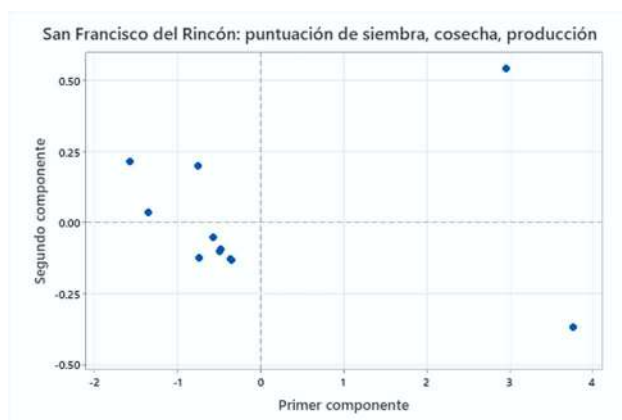


Figura 10. Gráfica de San Francisco del Rincón.

Obtenida de: elaboración propia.

Análisis de Componentes Principales (PCA):

Se realizó un Análisis de Componentes Principales (PCA) obteniendo como resultados PC1 y PC2, que se explican a continuación. El componente principal 1 (PC1) explica la mayor

variabilidad observada (70%-95% en la mayoría de los municipios), asociado positivamente a: Área sembrada (Sembrada), Área cosechada (Cosechada) y Producción (toneladas). Indicando que la variabilidad en los datos se debe principalmente a la capacidad agrícola (siembra, cosecha y producción). La Tabla 1 muestra los resultados de Abasolo. La Tabla 2 muestra los resultados de Cortázar. La Tabla 3 muestra los resultados de San Francisco del Rincón. La Figura 8 muestra la gráfica PCA de Abasolo. La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** muestra la gráfica PCA de Cortázar. La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** muestra la gráfica PCA de San Francisco del Rincón.

Tabla 4. Resultados de Apaseo el Grande.

Apaseo el Grande				
Análisis de los valores de la matriz de correlación				
Valor propio	2.7428	1.0929	0.1644	0.0000
Proporción	0.686	0.273	0.041	0.000
Acumulada	0.686	0.959	1.000	1.000
Variable	PC1	PC2	PC3	PC4
Siembra	0.526	-0.459	0.266	0.665
Cosecha	0.592	-0.110	0.386	-0.699
Siniestro	-0.244	-0.865	-0.351	-0.265
Producción	0.560	0.171	-0.811	0.000

Obtenida de: elaboración propia.

Tabla 5. Resultados de Acámbaro.

Acámbaro				
Análisis de los valores de la matriz de correlación				
Valor propio	3.0112	0.8675	0.1213	-0.0000
Proporción	0.753	0.217	0.030	-0.000
Acumulada	0.753	0.970	1.000	1.000
Variable	PC1	PC2	PC3	PC4
Siembra	0.562	-0.151	0.403	0.699
Cosecha	0.568	-0.112	0.395	-0.714
Siniestro	-0.250	-0.967	-0.002	-0.048
Producción	0.547	-0.140	-0.825	0.000

Obtenida de: elaboración propia.

Tabla 6. Resultados de León.

León				
Análisis de los valores de la matriz de correlación				
Valor propio	2.1165	1.7166	0.1669	-0.0000
Proporción	0.529	0.429	0.042	-0.000
Acumulada	0.529	0.958	1.000	1.000
Variable	PC1	PC2	PC3	PC4
Siembra	-0.002	0.762	-0.148	-0.631
Cosecha	0.625	0.262	-0.582	0.450
Siniestro	-0.447	0.574	0.267	0.632
Producción	0.640	0.148	0.754	0.000

Obtenida de: elaboración propia.

El componente principal 2 (PC2) explica entre 4% y 30% de la variabilidad observada, dominado por: Área siniestrada (Siniestrada) con cargas positivas altas. Refleja las pérdidas por daños (plagas, falta de tecnología, etc.) son un factor secundario pero relevante en la variabilidad. La Tabla 4 muestra los resultados de Apaseo el Grande. La

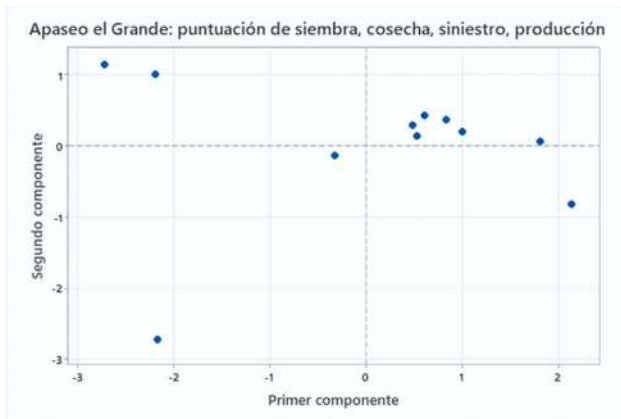


Figura 11. Gráfica de Apaseo el Grande.

Obtenida de: elaboración propia.

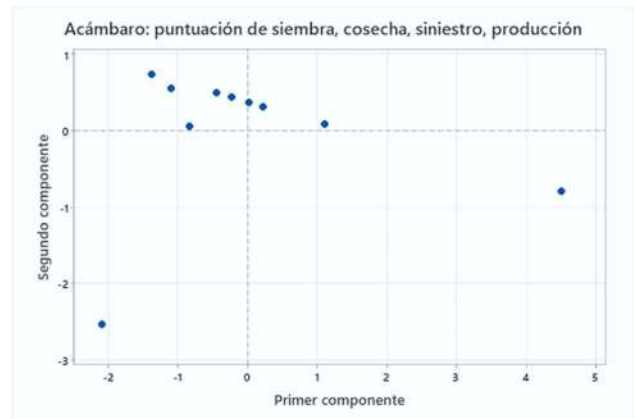


Figura 12. Acámbaro.

Obtenida de: elaboración propia.

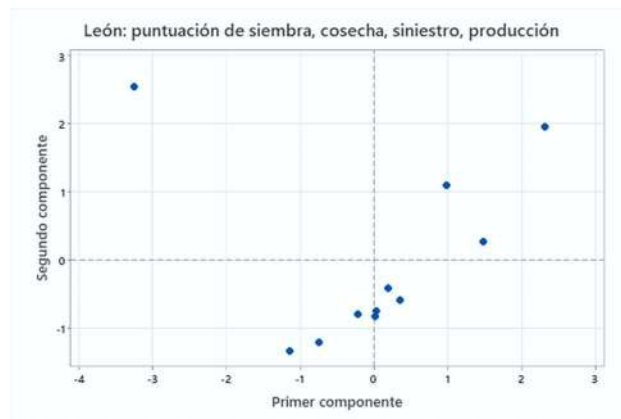


Figura 13. León.

Obtenida de: elaboración propia.

muestra los resultados de Acámbaro. La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** muestra los resultados de León. La Figura 11 muestra la grafica PCA de Apaseo el Grande. La Figura 12 muestra la grafica PCA de Acámbaro. La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** muestra la grafica PCA de León. El Siniestro tiene carga negativa en PC1, lo que sugiere que, a mayor producción, menor área dañada, o viceversa.

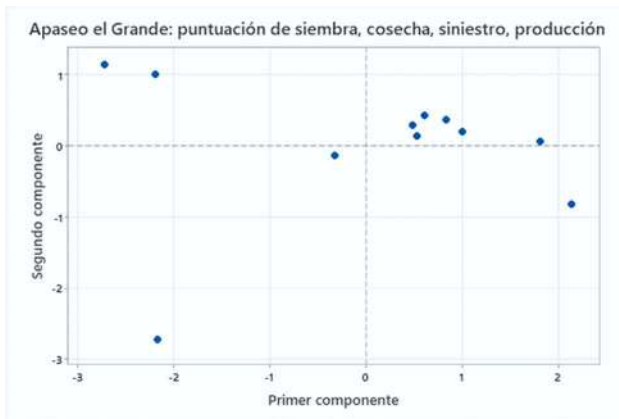


Figura 11. Gráfica de Apaseo el Grande.

Obtenida de: elaboración propia.

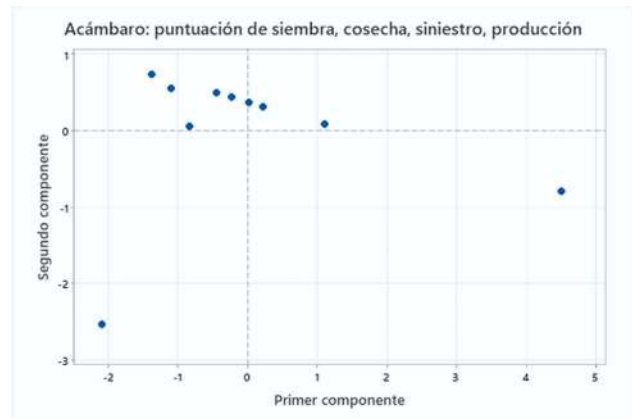


Figura 12. Acámbaro.

Obtenida de: elaboración propia.

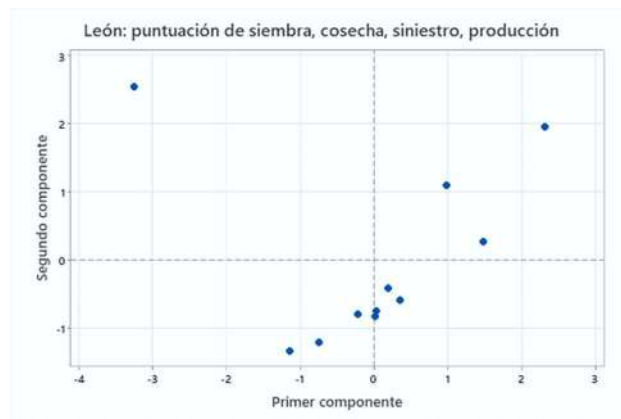


Figura 13. León.

Obtenida de: elaboración propia.

4. Conclusiones: lo que podemos aprender de este artículo

El análisis multivariado aplicado a la producción de frijol reveló patrones críticos. La correlación superficie-producción mostró relaciones fuertemente positivas en municipios como Irapuato (0.986) y Villagrán (0.976), donde expandir el área cultivada impulsa la producción. En municipios como Victoria (-0.541) y Guanajuato (-0.452), esta relación fue negativa, sugiriendo limitaciones tecnológicas o degradación del suelo. La correlación superficie-rendimiento destacó ineficiencias: en Irapuato (-0.745) y Celaya (-0.614), mayor superficie redujo el rendimiento, probablemente por sobreexplotación o falta de tecnología. Los modelos de regresión confirmaron estas tendencias, con R^2 alto en Irapuato (0.98) y bajo

en San Luis de La Paz (0.10), evidenciando que factores externos influyen donde la superficie no explica la producción. El PCA identificó que el 70-95% de la variabilidad obtenida (PC1) corresponde a variables agrícolas básicas (siembra, cosecha, producción), mientras que PC2 hasta 30% vinculó áreas siniestradas, resaltando el impacto de plagas y riesgos climáticos. La extrema desigualdad entre municipios como San Felipe vs Tierra Blanca refleja disparidades en acceso a tecnología o recursos. Estos hallazgos subrayan la urgencia de implementar tecnologías y automatización en las etapas del proceso agrícola para obtener un mayor rendimiento en producción. Además, se requiere capacitación en prácticas sostenibles, inversión en suelos marginales y políticas integradas que combatan las brechas socioeconómicas, asegurando así la seguridad alimentaria y sostenibilidad en la región.

5. Referencias: *por si quieres seguir conociendo más*

- Contreras-Medina, D. I., Contreras-Medina, L. M., Cerroblanco-Vázquez, V., Gallardo-Aguilar, M. C., González-Farías, J. P., Medina-Cuellar, S. E., Acosta-Montenegro, A., Lemus-Martínez, L. Y., Moreno-Ojeda, B., & Negrete-López, A. D. (2025). Reorienting Innovations for Sustainable Agriculture: A Study Based on Bean' s Traditional Knowledge Management. *Agriculture*, 15(560), 1–21. <https://doi.org/10.3390/agriculture15050560>
- Gallegos Acosta, J. A., Hernández C, Y., Jiménez, López Anaya, L. J., Montero, Victor, T. M., Brenda, C., & Guerrero Aguilar, Z. (2018). *Variedades De Frijol Y Producción De Semilla En Guanajuato*.
- Kadege, E. L., B Venkataramana, P., Assefa, T., Ndunguru, J. C., Rubyogo, J. C., & Mbega, E. R. (2024). Characterization of phenotypic traits associated with anthracnose resistance in selected common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) breeding material. *Heliyon*, 10(5). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26917>
- Pardo, C. E. (2020). *Estadística descriptiva multivariada* (A. M. Olaya Murillo, Ed.; Primera ed). Universidad Nacional de Colombia.
- Ping, C., Deng, X., Guo, Z., Luo, W., Li, X., & Xin, S. (2024). Characterizing the flavor profiles of Linjiangsi broad bean (*Vicia faba* L.) paste using bionic sensory and multivariate statistics analyses based on ripening time and fermentation environment. *Food Chemistry: X*, 23(July). <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101677>
- Rodriguez Espinoza, R. F., Ipanaqué Roña, J. M., Cruz Nieto, D. D., Abarca Rodriguez, J. J., Eguilas Caushi, Y. M., Gomero Mancesidor, J. M., Castro Bartolomé, H. J., Jamanca-Gonzales, N. C., & Silva-Paz, R. J. (2024). Influence of organic compost treatment on biometric patterns and sensory

- attributes of fresh green beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 9(August 2023). <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100630>
- Servín-Palestina, M., Salazar-Moreno, R., López-Cruz, I., Medina-García, G., & Cid-Ríos, J. Á. (2022). Predicción de la producción y rendimiento de frijol, con modelos de redes neuronales artificiales y datos climáticos. *Biotecnia*, 24(2), 104–111. <https://doi.org/10.18633/biotecnia.v24i2.1664>
- Wiesinger, J. A., Osorno, J. M., McClean, P. E., Hart, J. J., & Glahn, R. P. (2021). Faster cooking times and improved iron bioavailability are associated with the down regulation of procyanidin synthesis in slow-darkening pinto beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *Journal of Functional Foods*, 82(April), 104444. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2021.104444>
- Zamukulu, P. M., Bagula, E. M., Mondo, J. M., Chuma, G. B., Safina, F. B., Cishesa, T. H., Kavange, A. B., Masumbuko, D. R., Kazadi, J. W., Mushagalusa, G. N., & Lubobo, A. K. (2023). Optimization of plant density and fertilizer application to improve biofortified common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) yield on Nitisols of South-Kivu, Eastern D.R. Congo. *Heliyon*, 9(6). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17293>



Fenotipado de plantas de frijol (*Phaseolus Vulgaris*) usando técnicas de visión por computadora

María José Herrera Hernández

Tecnológico Nacional de México / ITS de
Irapuato,
Irapuato, Guanajuato, México

Gilberto Muñoz Moreno

Tecnológico Nacional de México / ITS de
Irapuato,
Irapuato, Guanajuato, México

Adolfo Rafael López Núñez

Tecnológico Nacional de México / ITS de
Irapuato,
Irapuato, Guanajuato, México

Marcos Jesús Villaseñor Aguilar *

Tecnológico Nacional de México / ITS de
Irapuato,
Irapuato, Guanajuato, México

* Autor de correspondencia: marcos.vac@irapuato.tecnm.mx

Resumen: El uso de los sistemas de visión computacional (SVC) en la agricultura es un área de investigación que ha crecido en los últimos años. Se destaca la importancia del desarrollo de herramientas tecnológicas para aumentar la confiabilidad y reducir los costos en la producción agrícola. En este trabajo se describe un método para predecir los días de crecimiento de la planta de frijol empleando el área foliar. Este método relaciona el área foliar de la imagen capturada y predice la fecha con un error absoluto medio de 3.323 Días y una correlación estadística de 0.7720. Para su implementación se utilizó el software Matlab y una cámara comercial de bajo costo.

Palabras clave: agricultura, imágenes, producción, visión computacional.

1. Introducción: lo que debemos saber de inicio

El frijol (*Phaseolus Vulgaris*) es una leguminosa originaria de México, perteneciente al género *Phaseolus* de la familia *Fabaceae* (Flores, 2023). Es un alimento fundamental en la dieta diaria de la población mexicana debido a su alto valor nutricional. Aporta proteínas,

fibra, vitaminas, minerales y antioxidantes, lo que contribuye a una alimentación equilibrada y saludable. En este sentido, diversos estudios han demostrado que el consumo regular de frijoles puede ayudar a prevenir enfermedades cardiovasculares, diabetes tipo 2, cáncer de colon y obesidad, gracias a su bajo índice glucémico y su riqueza en fibra y fitoquímicos (Fernández y Sánchez, 2017).

En términos de producción, México se encuentra entre los principales productores de frijol a nivel mundial. Según datos de la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER), en 2023 se cultivaron aproximadamente 723,642 toneladas en el país. Conviene señalar que los principales estados productores a nivel nacional son Zacatecas, Sinaloa, Durango, Chihuahua y Nayarit. Sin embargo, en 2023, la producción nacional de esta leguminosa cayó a 724 mil toneladas, una disminución del 25% respecto al año anterior, debido principalmente a condiciones climatológicas adversas como la sequía (Morales, R, 2024).

Actualmente, los productores utilizan como criterio los rasgos visibles de las plantas como son la forma de las hojas, las dimensiones de la planta, la resistencia a enfermedades y la capacidad de adaptación al medio ambiente, esta técnica es subjetiva y no considera las diferentes variables como las condiciones ambientales y la reproducibilidad (Bautista-Lozada et al., 2012). Con el estudio de estas características se ayuda a establecer estrategias que incrementen la producción. Por ejemplo, se han incorporado los Sistemas de Visión por Computadora (SVC) debido a que facilitan automatizar procesos de producción agrícola. Estos sistemas ofrecen ventajas como son bajo costo, exactitud, incremento de precisión y buena repetibilidad (Villaseñor-Aguilar et al., 2019). Este proyecto consta de seis etapas. La primera fue la siembra y cultivo de la semilla. La segunda consistió en acondicionar el sistema de captura de imágenes. En la tercera se capturo la imagen de la planta. En la cuarta y quinta se emplea el algoritmo que segmenta la plántula y se identifican las diferentes regiones de interés. En la última etapa se elimina el ruido y se determinan las características del cultivo mediante el uso de una regresión lineal simple.

En el presente trabajo se tiene como pregunta de investigación, ¿Cómo se relaciona la cantidad de píxeles correspondientes a la planta de frijol en imágenes capturadas con su tiempo de crecimiento mediante el uso de una regresión lineal simple? Así mismo, con la metodología propuesta se busca estimar los días de crecimiento de la planta considerando su área foliar mediante técnicas de procesamiento digital de imágenes en consecuencia este trabajo contribuirá a reducir los errores agronómicos y pérdidas económicas.

2. Fundamentos Teóricos: reglas y principios científicos importantes

Una imagen digital está formada por una matriz de píxeles (elementos de imagen), dependiendo la posición del píxel le corresponde un valor numérico el cual corresponde a la intensidad o color en una posición específica. Así, mediante el uso de algoritmos computacionales las imágenes digitales pueden ser modificadas. Esta representación permite que las imágenes sean procesadas y analizadas mediante algoritmos computacionales. La segmentación por umbrales de color RGB, según Rafael C. González (2018), es una técnica utilizada en el procesamiento de imágenes para identificar y separar regiones de interés basadas en los valores de los canales Rojo (R), Verde (G) y Azul (B). Este método se basa en establecer umbrales para cada componente de color, permitiendo clasificar los píxeles según su intensidad y generar una imagen segmentada (Correa et al., 2019).

Para este proceso se siguieron estos pasos:

- Binarización de la imagen a su representación en el espacio RGB mostrado en la Figura 1.
- Determinación de los valores de umbral correcto por medio del análisis de histogramas.
- Utilización de umbrales a los canales de color por separado para generar una máscara binaria como se observa en la Figura 2.
- Obtención de una segmentación final por medio de la mezcla de máscaras.

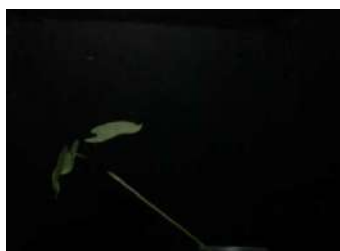


Figura 1. Binarización de la imagen en escala RGB.

Obtenida de: elaboración propia.

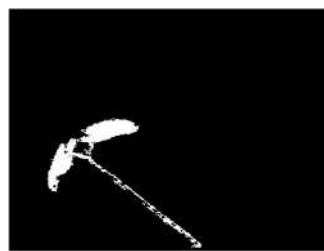


Figura 2. Intersección del umbral de los canales RGB.

Obtenida de: elaboración propia.

Este enfoque es útil en aplicaciones como la detección de objetos en imágenes digitales y la clasificación de regiones con colores específicos. El algoritmo de etiquetado de componentes conectados (*Connected Component Labeling*, CCL) fue fundamental en el procesamiento de las imágenes, ya que permitió identificar las regiones contiguas de píxeles que comparten ciertas características, como lo son la intensidad o el color, tal como se observa en la Figura 3. Este proceso fue esencial para segmentar los objetos y realizar el análisis de las estructuras dentro de una imagen binaria, como se aprecia en la Figura 4. El algoritmo de etiquetado se constituye de dos fases principales. La primera realiza un recorrido en la imagen de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo, para cada píxel de interés (por ejemplo, con valor de 1 en una imagen binaria), se examinan sus vecinos ya procesados y si no hay vecinos etiquetados, se asigna una nueva etiqueta al píxel, si no hay vecinos etiquetados, se asigna una etiqueta más baja entre ellos, por último, en esta fase si los vecinos tienen etiquetas distintas, se registra una equivalencia entre estas etiquetas. La segunda fase es la resolución de equivalencias, se crea una tabla de equivalencias para unificar etiquetas que representan la misma región y se realiza un segundo recorrido de la imagen digital, se remplazan las etiquetas temporales por las etiquetas unificadas correspondientes. Para este método se puede usar conectividad 4 (utilizando los vecinos de arriba, abajo, izquierda a derecha) o conectividad 8 (incluyendo las diagonales), lo que varía la segmentación (Gonzalez y Woods, 2018).



Figura 3. Identificación de las regiones de interés.

Obtenida de: elaboración propia.

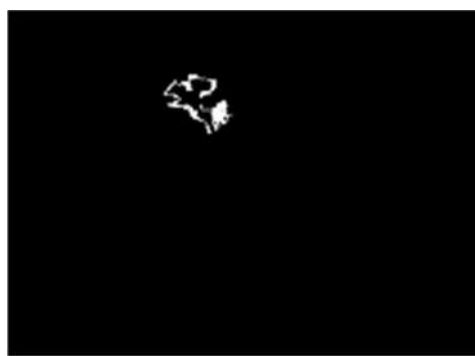


Figura 4. Imagen sin ruido.

Obtenida de: elaboración propia.

Se utilizó la función *regionprops* en MATLAB, la cual es una herramienta fundamental en el procesamiento de imágenes, especialmente útil para analizar imágenes binarias que

permite extraer diversas características geométricas y espaciales de las regiones conectadas dentro de una imagen como son, el área en una región de píxeles, el centroide que son las coordenadas del centro de masa de la región (MathWorks, 2024).

3. Desarrollo del Trabajo: *aplicando las reglas y principios científicos*

La metodología propuesta para el fenotipado fue integrada por seis fases como se muestra en la Figura 5.

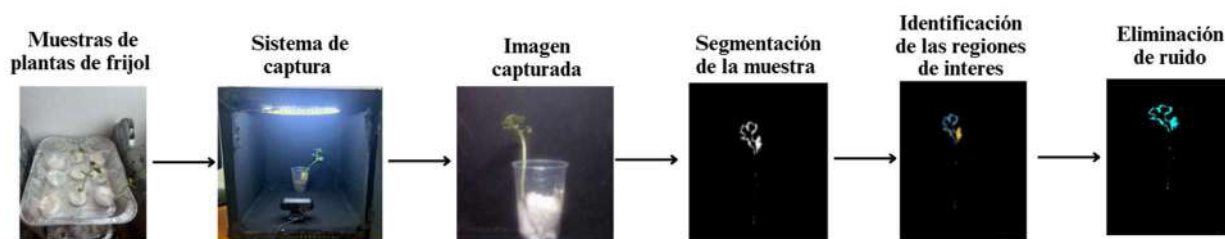


Figura 5. Esquema general del fenotipado de la planta de frijol.

Obtenida de: elaboración propia.

La primera fue el cultivo de las cuarenta muestras de frijol con la finalidad de explorar el impacto de variables como la temperatura, humedad y nutrientes en la germinación y crecimiento de las muestras, con el fin de estandarizar condiciones óptimas. En la segunda se desarrolló el sistema de adquisición de imágenes aislado representado en la Figura 6 con las medidas 37cm de ancho, 35 cm de alto y 37cm de profundidad, se aplicó iluminación multispectral para mejorar la calidad de las imágenes, permitiendo la detección precisa de características clave. La tercera fase consistió en capturar imágenes una cámara digital, utilizando el modelo Logitech C920 HD Pro Webcam (Full HD 1080p a 30 fps), de las muestras desde su germinación hasta los catorce días de crecimiento. Para asegurar la consistencia de los datos y reducir el margen de error humano, se obtuvieron imágenes con una calidad de 480×640 píxeles. La cuarta fase fue la segmentación de las muestras, separándolas y reduciendo la interferencia de elementos no deseados. Para la segmentación de las muestras se utilizó una conversión del espacio de color RGB a HSV. Los umbrales utilizados fueron Hue ($0.053 \leq H \leq 0.524$), Saturación ($0 \leq S \leq 0.399$) y Valor ($0 \leq V \leq 1$). La quinta fue la identificación de las regiones de interés y la sexta fue la eliminación del ruido de fondo

para extraer características específicas de las muestras, facilitando la comparación entre diferentes condiciones de cultivo.

$$\text{Días pronosticados} = 0.01041 \frac{\text{Días}}{\text{Área}} \times \text{Área} + 24.26 \text{ Días} \quad (1)$$

En la Tabla 1 se presentan los resultados obtenidos tras la segmentación e identificación de las regiones de interés en ocho muestras de plantas. La primera columna muestra el área foliar de cada muestra, mientras que las columnas dos y tres reflejan los valores de los ejes mayor y menor, los cuales están relacionados con la forma y tamaño de las hojas. La cuarta columna indica los días reales de crecimiento, y la quinta muestra los valores estimados por el modelo de regresión lineal descrito en la Ecuación (1). En la sexta columna se reporta el error entre los días estimados y los días reales. Por otro lado, en la Figura 7 se observa la comparación entre el área foliar y los días de crecimiento. De acuerdo con los resultados, el modelo alcanzó una correlación estadística de 0.7720 y un error absoluto medio de 3.323 días, lo que indica una buena predicción en la estimación del crecimiento a partir del área.

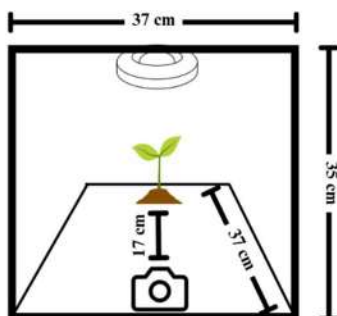


Figura 6. Sistema de captura del fenotipado de la planta de frijol.

Obtenida de: elaboración propia.

4. Conclusiones: lo que podemos aprender de este artículo

El presente estudio destaca la aplicación de sistemas de visión computacional en la agricultura, específicamente en el fenotipado de plantas de frijol. De acuerdo con los resultados obtenidos se logró encontrar un modelo matemático de regresión lineal que cuenta con un factor de sensibilidad de 0.01041(días/área). Además, se observó que el modelo presentó el mayor error en el cambio del eje mayor en el rango 58.085 a 100.417. Este método puede ser utilizado en aplicaciones de campo con la finalidad de reducir el impacto

ambiental en el manejo de fertilizantes y el uso de recursos. Como trabajo a futuro se tiene contemplado incrementar el número de muestras y realizar pruebas de campo.

Tabla 1. Datos experimentales y evaluación del modelo matemático.

Área	Longitud eje mayor	Longitud eje menor	Días de crecimiento	Días pronosticados	Error de días
518	44.801	22.196	28	29.6524	1.6524
552	155.821	9.231	28	30.0063	2.0063
609	58.031	23.067	28	30.5997	2.5997
688	58.085	26.890	28	31.4221	3.4221
867	100.417	19.778	40	33.2855	-6.7145
966	127.335	13.344	40	34.3161	-5.6839
1857	237.333	72.624	40	43.5914	3.5914
1424	102.477	60355	40	39.0838	-0.9162

Obtenida de: elaboración propia.

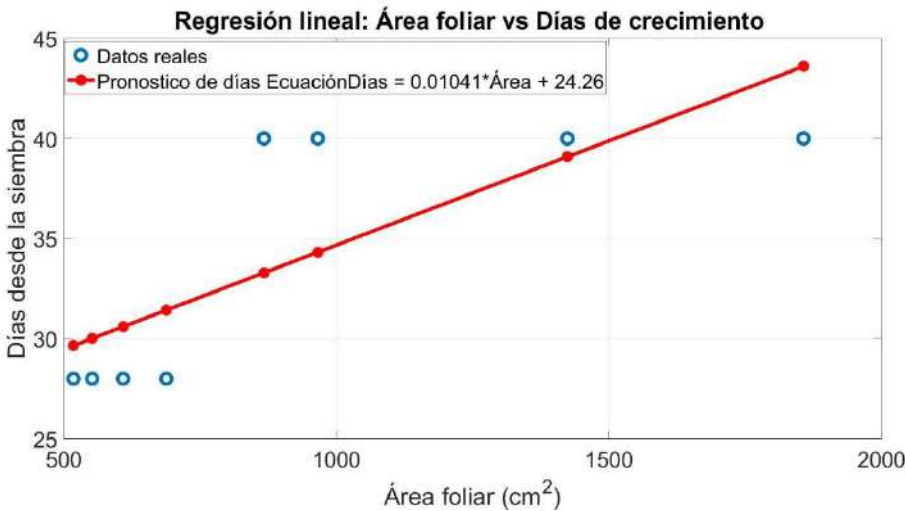


Figura 7. Respuesta del modelo propuesto. Obtenida de: elaboración propia.

5. Referencias: *por si quieres seguir conociendo más*

- Bautista-Lozada, A., Parra, R. F., & Espinosa-García, F. J. (2012). Efectos de la domesticación de plantas en la diversidad fitoquímica. *Temas Selectos de Ecología Química de los Insectos*. México: Colegio de la Frontera Sur, 253-264.
- Correa, P., Bautista, P., López, M., Villaseñor, M., García, C., Rostro-González, H., & Pérez-Pinal, F. J. (2019). An approach of beans plant development classification using fuzzy logic. *Journal of Sensors*, 2019(1), 4232536.
- Flores, J. D. L. C. (2023). *Respuesta de dos variedades de frijol a la aplicación de diferentes fuentes nutrimentales* (Disertación Doctoral, Universidad Nacional Autónoma De México).
- Fernández Valenciano, A. F., & Sánchez Chávez, E. (2017). Estudio de las propiedades fisicoquímicas y calidad nutricional en distintas variedades de frijol consumidas en México. *Nova scientia*, 9(18), 133-148.
- Gonzalez, R. C., & Woods, R. E. (2018). *Digital image processing* (4ta. Edición). Pearson.
- MATLAB. (s.f.) *Conncomp: Connected graph components*.
<https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/graph.conncomp.html>
- Morales, R. (2024, 30 agosto). Sequía disparó 156% importaciones mexicanas de frijol en enero-junio. *El Economista*. <https://www.eleconomista.com.mx/empresas/Sequia-disparo-156-importaciones-mexicanas-de-frijol-en-enero-junio-20240829-0140.html>
- Villaseñor-Aguilar, M. J., Botello-Álvarez, J. E., Pérez-Pinal, F. J., Cano-Lara, M., León-Galván, M. F., Bravo-Sánchez, M. G., & Barranco-Gutiérrez, A. I. (2019). Fuzzy classification of the maturity of the tomato using a vision system. *Journal of Sensors*, 2019(1), 3175848.

Ceiba Pentandra aplicada a la recuperación de derrame de petróleo

José Carlos Gómez Quevedo *

Tecnológico Nacional de México / IT de
Cosamaloapan,
Cosamaloapan, Veracruz, México

Lucila Guadalupe Tobón Galicia

Tecnológico Nacional de México / IT de Tierra
Blanca,
Tierra Blanca, Veracruz, México

José Isidro Beltrán

Tecnológico Nacional de México / IT de
Cosamaloapan,
Cosamaloapan, Veracruz, México

* Autor de correspondencia: jose.gq@cosamaloapan.tecnm.mx

Resumen: Esta investigación trata sobre el uso de fibras que se pueden encontrar en la naturaleza y que tienen propiedades adsorbentes las cuales pueden ser utilizados para la recolección de hidrocarburos derramados por las operaciones de perforación y reparación de pozo., En trabajos previos se ha utilizado el bagazo de caña como material adsorbente, sin embargo, en la búsqueda de materiales que se puedan encontrar en la naturaleza y que puedan ser una opción para obtener un producto viablemente comercial, se utiliza la fibra del fruto del árbol conocido como Ceiba Pentandra, con el objetivo de evaluarla mediante la norma ASTM F726-17 Método de prueba estándar para el rendimiento de los adsorbentes para su uso en petróleo crudo y derrames relacionados, las prueba conforme a la norma, se elaboraron en el laboratorio químico del Instituto Tecnológico Superior de Cosamaloapan durante el semestre agosto-diciembre 2024.

Palabras clave: Ceiba Pentandra, Derrame, Material, Prueba.

1. Introducción: lo que debemos saber de inicio

Los derrames de hidrocarburos se encuentran presentes en las diversas etapas de perforación de pozos petroleros, este evento no deseado se denomina brote en muchos casos el brote es generado por un manejo deficiente en el uso de los fluidos de perforación, el cual genera una presión hidrostática en el fondo del pozo, cuando esta presión hidrostática es menor que la presión del yacimiento se genera en superficie el aporte de fluidos de la formación hacia la superficie, en ese momento es cuando se presentan los fluidos que aporta el pozo, históricamente los derrames ocurridos costa fuera generan un daño a la flora y a la fauna, de igual forma la afectación de los derrames de hidrocarburos en suelos tienen impactos directos y en ocasiones se requiere de biorremediación de suelos, en ambos escenarios se debe tener presente. Según la NOM-014-ASEA-2022, en su introducción establece que “en la construcción y Mantenimiento de Pozos son consideradas operaciones de alto riesgo debido a su naturaleza y a los materiales utilizados en los procesos, por lo que, de no existir la regulación necesaria en esta materia, se podrían producir impactos negativos al medio ambiente y a los recursos naturales, deteriorando la diversidad biológica y reduciendo con ello los servicios ambientales”

Una vez ocurrido el derrame se debe proceder a la recuperación de hidrocarburos por lo que es necesario utilizar los elementos que delimiten el derrame y posteriormente elegir el método de recolección y separación pertinente. En ese sentido Petróleos Mexicanos en el informe anual (2023). Pag.71 menciona los riesgos críticos ambientales como derrames de hidrocarburos y menciona algunos derrames como el ocurrido en la Terminal de Almacenamiento y Despacho (TAD). Salina Cruz en el sector de ductos Salina Cruz, Derrame de hidrocarburos en el oleoducto de 24” de diámetro, perteneciente al sistema Nuevo Teapa-Madero – Cadereyta, derrame de hidrocarburos en el poliducto de 12” de diámetro y 10” del sistema Madero – Cadereyta, por mencionar algunos, en ese sentido en 2023 en total Pemex presento 1,211 eventos entre fugas y derrames.

Por otra parte, en la página de Greenpeace México (2024). Menciona en su publicación del día 3 de octubre que la comunidad totonaca de Ojital Viejo, ubicada en el municipio de Papantla, Veracruz, lleva 42 días expuesta a un derrame de hidrocarburos causando la muerte de especies nativas y animales domésticos, y la contaminación de pozos artesianos, parcelas de cultivo, y puesto en riesgo la salud e integridad de poblaciones vecinas de los municipios de Papantla y Coatzintla, en el estado de Veracruz, por donde corre el arroyo

contaminado por este derrame, el cual es afluente del Río Cazones que desemboca en el Golfo de México.

Desde la exploración, perforación, extracción, transporte y procesamiento de los derivados del petróleo se tienen riesgos y cada riesgo debe contar con su debido control, en ese sentido se realiza continuamente la búsqueda de materiales que tengan la propiedad de adsorber hidrocarburos, para ello se requiere el uso de la Norma ASTM-F726-17 Método de prueba estándar para el rendimiento de los adsorbentes para su uso en petróleo crudo y derrames relacionados, con ello se evalúa el comportamiento del material en referencia a la capacidad de adsorción de hidrocarburos y generar una propuesta de barrera que tenga la capacidad de recolectar hidrocarburos derramados al mar, cabe mencionar que en el mercado existen barreras absorbentes con costos elevados, con las pruebas realizadas al fruto del árbol Ceiba Pentandra se han obtenido resultados que superan por mucho a los trabajos previos elaborados con bagazo de caña (*Saccharum Officinarum*).

2. Fundamentos Teóricos: reglas y principios científicos importantes

El proceso mediante el cual ciertos sólidos porosos fijan un gran número de moléculas a sus superficies se conoce como adsorción, como un proceso de separación, la adsorción se utiliza a menudo para la remoción de baja concentración de impurezas y contaminantes de las corrientes fluidas (Smith et al., 2007). “En los procesos comerciales de adsorción, el adsorbente generalmente tiene forma de partículas pequeñas en un lecho fijo, el fluido se hace pasar por el lecho y las partículas sólidas adsorben la sustancia que se desea separar, denominada adsorbato” Rincones, F. (2015).

En cuanto a la recuperación de hidrocarburos con materiales adsorbentes existen trabajos que hacen referencia al uso de bagazo de caña de forma particular se encuentra una patente cubana que muestra un procedimiento de un material absorbente, biodegradable para el tratamiento a residuos y derrames de petróleo y el producto obtenido. De acuerdo con Diaz et al. (2009). En la patente CU23392 generaron procedimientos químicos que derivan en la deslignificación superficial del bagazo de caña aumentando la adsorción por la formación adicional de poros o cavernas tanto en el interior y la superficie de la fibra.

Para Diaz et al. (2018). Existen absorbentes de carácter oleofílicos que se comercializan internacionalmente Productos como. ECOSORB, el material ABSORB LIPOFILICO y un

absorbente industrial base zeolita, que son utilizados para los derrames de hidrocarburos en agua y derrames terrestres.

Para la evaluación de las fibras orgánicas como material adsorbente se utilizó la norma ASTM F726-17 “Método de prueba estándar para el rendimiento sorbente de adsorbentes para petróleo crudo y derrames relacionados” para ello nos referimos a la norma, la metodología inicia como muestra la Figura 1.

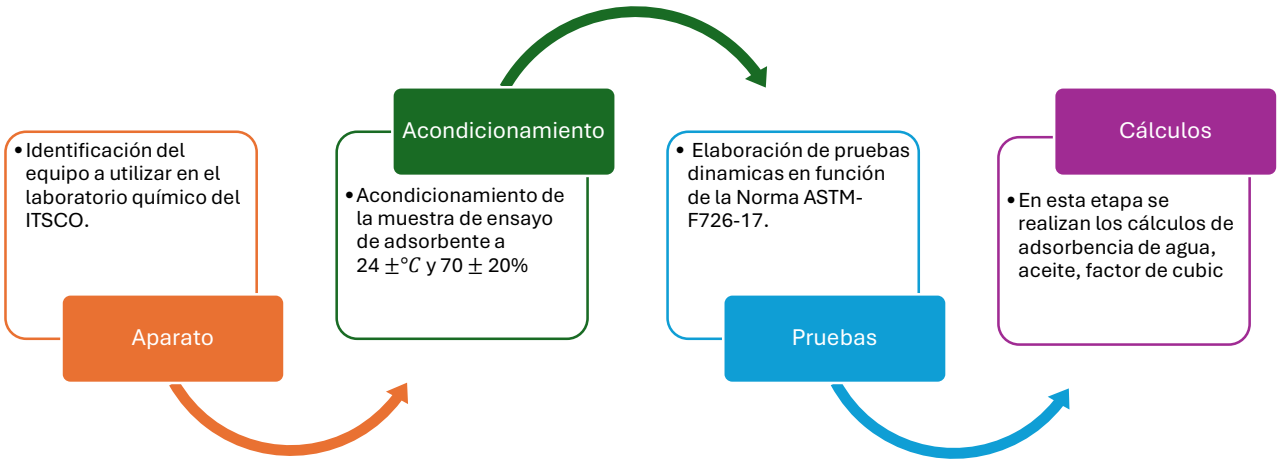


Figura 14. Metodología para evaluar materiales orgánicos.

Obtenido de: elaboración propia.

3. Desarrollo del Trabajo: aplicando las reglas y principios científicos

Las pruebas se realizaron en el laboratorio Químico del Tecnológico Nacional de México, campus Cosamaloapan tal como lo indica la metodología se identificó el equipo a utilizar Tabla 1.

Tabla 1. Materiales de laboratorio a utilizar conforme a la Norma ASTM F726-17.

Equipo de laboratorio a utilizar
Báscula granataria.
Vaso de precipitado 1000 ml.
Mesa giratoria marca Velaquin.
Canasta de malla.

Obtenido de: Elaboración propia.

La muestra utilizada fue recolectada en el periodo marzo-abril 2025, se acondicionaron acorde a la metodología, posteriormente se realizaron las pruebas acordes a la norma ASTM F726-17, se utilizó hidrocarburo de 28.2° API, donado por Petróleos Mexicanos en abril de 2024.

Se pesaron 5g de la fibra de kapok (Ceiba Pentandra), posterior a ello, se vertió en cada vaso de precipitado 500ml de agua y se depositó en la mesa giratoria durante 15 minutos a una velocidad de 150 revoluciones por minuto, para después ser decantada y realizar los cálculos correspondientes. En la Figura 2 se observan las muestras previas al proceso de agitación. El proceso se repitió agregando 3 mililitros de aceite y se realizaron los cálculos correspondientes.



Figura 15. Muestra vasos de precipitado en la mesa giratoria previamente añadido 3 ml. de hidrocarburo. Para ser agitados durante 15 min a 150 rpm.

Obtenido de: Elaboración propia.

Para elaborar los cálculos se programó una hoja de cálculo en el software Excel misma que se muestra en, la Tabla 2.

Tabla 7. Resultados de los cálculos obtenidos acorde a la Norma ASTM F726-17 para determinar agua neta adsorbida, adsorción de agua, peso neto del aceite y adsorción del aceite en gramos.

Prueba	Peso inicial	Peso final	Agua neta adsorbida	Adsorción de agua	Peso neto del aceite	Adsorción de aceite	Aceite
1	5	7.34	0.32	0.06	14.27	1.94	
2	5	7.52	0.34	0.07	16.14	2.15	
3	5	7.99	0.37	0.07	10.8	1.35	
4	5	5.34	0.06	0.01	14	2.62	
5	5	5.51	0.09	0.02	13.52	2.45	
6	5	8.5	0.41	0.08	16.79	1.98	
7	5	6.54	0.24	0.05	13.4	2.05	
8	5	5.77	0.13	0.03	13.47	2.33	
9	5	6.16	0.19	0.04	15.54	2.52	
10	5	6.22	0.20	0.04	15.24	2.45	
11	5	8	0.38	0.08	14	1.75	
12	5	9	0.44	0.09	16	1.78	
13	5	8.24	0.39	0.08	15.82	1.92	
14	5	7.2	0.31	0.06	16.92	2.35	
15	5	5.75	0.13	0.03	14.81	2.58	
16	5	7.68	0.35	0.07	16.76	2.18	
17	5	6.29	0.21	0.04	12.87	2.05	
18	5	6.41	0.22	0.04	15.3	2.39	
19	5	6.33	0.21	0.04	12.62	1.99	
20	5	6.82	0.27	0.05	20.64	3.03	

Medio 28.2°API

Obtenido de: elaboración propia.

La Figura 3, muestra un comparativo de pesos derivado de las 20 pruebas realizadas a la fibra kapok, la linea azul denota el peso inicial de la muestra 5 gramos, la linea naranja representa el peso de la muestra despues de haber terminado la primer prueba solo con agua, la linea negra, muestra el peso de la muestra de las pruebas realizadas añadiendo 3ml. De aceite con una densidad de 28° API. En tanto que en la Figura 4 se muestra una gráfica comparativa entre la adsorcion de agua y la adsorcion del aceite.

4. Conclusiones: lo que podemos aprender de este artículo

Conforme a las pruebas obtenidas se observa que el material utilizando (kapok) tiene propiedades útiles para la recuperación de hidrocarburos este material adsorbe agua en bajas proporciones respecto a la adsorción de aceite, por otra parte, la facilidad de encontrar kapok en la zona, junto a las propiedades hidrofóbicas que tiene, la hace un material que puede utilizarse en barreras adsorbentes de hidrocarburo.

La metodología y desarrollo de este están apegados a la Norma ASTM F726-17 la cual nos ayuda a evaluar la capacidad de absorbencia con un producto que se puede adquirir de manera fácil y es abundante en la región de la Cuenca del Papaloapan, esta fibra se da por temporada el uso que actualmente se le da es el de relleno de almohadas. Como trabajo a futuro se plantea la elaboración de un análisis de la varianza de tres tipos de materiales adsorbentes bagazo de caña, fibra de coco y fibra kapok.

Se agradece al Consejo Veracruzano de Investigación Científica y Desarrollo Tecnológico por el financiamiento otorgado bajo el proyecto de investigación CP-1111-2057.

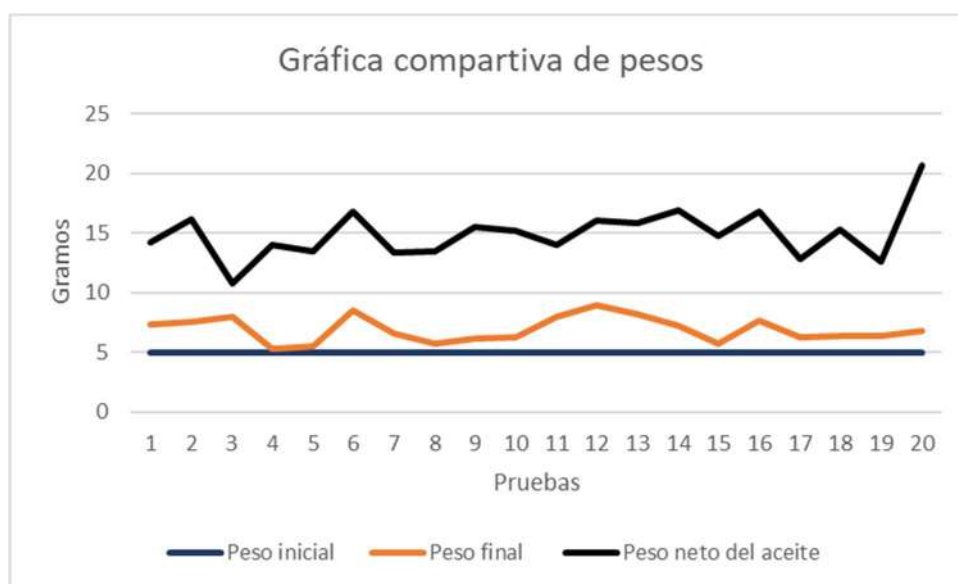


Figura 3. Muestra una comparativa de pesos entre las pruebas con agua y aceite.

Obtenida de: elaboración propia.

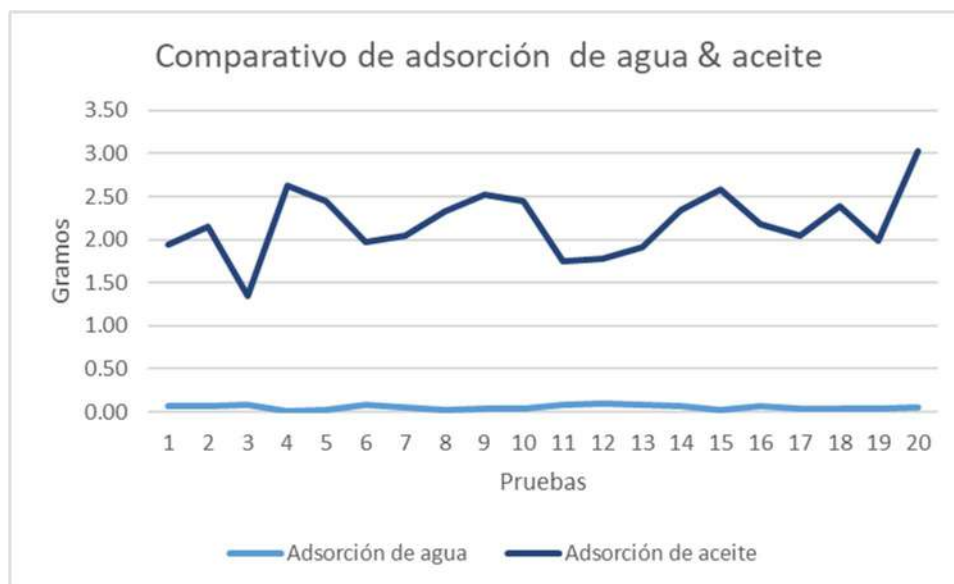


Figura 4. Comparativo de adsorción de agua y aceite.

Obtenido de: elaboración propia.

5. Referencias: *por si quieres seguir conociendo más*

- Agencia de Energía Seguridad y Medio Ambiente. (2022). *NOM-014-ASEA-2022: Especificaciones de protección al medio ambiente para la construcción y mantenimiento de pozos para la exploración y extracción de hidrocarburos en zonas agrícolas, ganaderas y eriales, fuera de áreas naturales protegidas o terrenos forestales*.
- Díaz-Díaz, Miguel Ángel, Rivas-Trasancos, Lester, León-Barrios, Maydeibys, & Acosta-Sánchez, Jessell. (2018). Material absorbente para recogida de hidrocarburos en derrames en aguas y suelos. *Revista Cubana de Química*, 30(2), 289-298.
- G. Rodríguez Magda, "Remoción de hidrocarburos totales en suelos contaminados con petróleo mediante residuos de Cachaza y Bagazo de caña de azúcar", *UCV-SCIENTIA*, vol. 9, n.º 1, p. 59–66, mayo de 2017
- Jiménez Moreno, Marcos Andrés, Hernández Barajas, José Roberto, Jiménez Hernández, José del Carmen, & Plazas Quiroga, Juan Gabriel. (2022). Software académico de control de pozos petroleros MAROGA. *Acta Universitaria*, 32, e3407. Epub 24 de octubre de 2022.<https://doi.org/10.15174/au.2022.3407>
- López, R. (de octubre de 2024). *Pemex, una vez más, responsable de derrame de hidrocarburos que afecta desde hace 42 días a comunidades indígenas de Papantla, tres veces nombrado patrimonio de la humanidad por la UNESCO*.

- Pemex. (2023). *Informe Anual*.
https://www.pemex.com/acerca/informes_publicaciones/Documents/Informe-Anual/INFORME_ANUAL_2023.pdf
- Rincones Poyer, F., Marfrfisi Valladares, S., Danglad Flores, J. Á., & Salazar Palencia, V. (2015). Adsorción de hidrocarburos de petróleo en agua mediante una columna empacada con bagazo de caña de azúcar. *SABER. Revista Multidisciplinaria del Consejo de Investigación de la Universidad de Oriente*, 27(3), 441-453.
- Smith, J. M., Van Ness, H. C., & Abbott, M. M. (1997). *Introducción a la termodinámica en ingeniería química*.
- Standard Test Method for Sorbent Performance of Adsorbents for use on Crude Oil and Related Spills. 1.2021,04.30.