

# Transición

## ENERGÉTICA

Agosto - Septiembre 2024 | Número 13

## Almacenamiento de energía

Enfrentando retos para la integración de fuentes de **energías renovables**



■ **Innovaciones del INEEL frente a los retos de integración de fuentes de energía renovable**

■ **Inteligencia Artificial Generativa para la Industria Eléctrica: Innovación, Oportunidades y Desafíos**

■ **Plataforma de simulación avanzada del INEEL para prueba de inversores fotovoltaicos**

**Revista**  
**Transición Energética**  
Septiembre 2024

**Comité Editorial**

Víctor Alejandro Salcido González

Editora

Elsa Orduña Mercado

Coeditor

Luis Domínguez Brito

Diseño y Sitio Web

Arturo Frago Malacara

M. Giovanni Uribe Figueroa

Johana L. Hernández Ortiz

Luis Domínguez Brito

Vicente Valera Aldana

**Transición Energética**, año 2024, número 13, agosto-septiembre; es una publicación bimestral editada por el Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias (INEEL), Reforma 113, colonia Palmira, C.P. 62490, Cuernavaca, Morelos, México. Tel. 52 (777) 362 3811.

Los artículos firmados son responsabilidad de sus autores.

[www.gob.mx/ineel](http://www.gob.mx/ineel)  
[www.transicionenergetica.ineel.mx](http://www.transicionenergetica.ineel.mx)  
[revistatransicione@ineel.mx](mailto:revistatransicione@ineel.mx)

# Carta editorial

## Estimadas lectoras y lectores:

En esta edición de la **Revista Transición Energética** del Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias (INEEL), se aborda el tema: Almacenamiento de energía. Enfrentando retos para la integración de fuentes de energías renovables.

En un momento clave, en el avance de la transición energética, la Mtra. Luz Elena González Escobar, titular de la Secretaría de Energía y el Dr. Víctor Alejandro Salcido González, Director General del INEEL, son dos figuras destacadas para alcanzar la transformación. Conoce, en este número, sus semblanzas.

En la sección **Ciencia al descubierto**, los autores presentan el artículo: Innovaciones del INEEL frente a los retos de integración de fuentes de energía renovable, en el cual se analizan diversas tecnologías de almacenamiento desarrolladas en el INEEL, tales como los sistemas de hidrógeno, las baterías de flujo de compuestos orgánicos y las baterías de electrodiálisis; se destaca su aportación en las estrategias de transición hacia un sistema eléctrico más limpio, estable y eficiente.

Asimismo, se presentan **Desarrollos tecnológicos** sobre Inteligencia Artificial Generativa para la Industria Eléctrica: innovación, oportunidades y desafíos, proyecto en el que el INEEL colabora con la Comisión Federal de Electricidad (CFE) en el desarrollo de aplicaciones de IA Generativa para optimizar sus procesos y gestionar la infraestructura eléctrica de manera confiable y eficiente. Se muestra un ejemplo de arquitectura de un asistente virtual utilizando el modelo GPT de OpenAI para generación de texto en lenguaje natural, a partir de documentación técnica existente.

En el apartado de **Desarrollos tecnológicos** se encuentra también la Plataforma de simulación avanzada del INEEL para prueba de inversores fotovoltaicos. El INEEL en colaboración con la SENER, implementó este desarrollo. De igual forma esta edición incluye una interesante **Infografía** que muestra las tecnologías de almacenamiento de energía.

Atentamente, el equipo editorial de la Revista Transición Energética.

# Contenido

## 02 Ciencia al descubierto

→ Innovaciones del INEEL frente a los retos de integración de fuentes de energía renovable...02

## 07 SENER e INEEL en transición

## 09 Desarrollo tecnológico

→ Inteligencia Artificial Generativa para la Industria...09

→ Plataforma de simulación avanzada del INEEL...13

## 21 La infografía





# **Innovaciones del INEEL** frente a los retos de **integración de fuentes** **de energía renovable**

## Resumen

El crecimiento de la demanda eléctrica en México proyectado por el Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (PRODESEN) 2024-2038 y la incorporación masiva de fuentes de energía renovable, como la solar y la eólica, presentan desafíos técnicos debido a su condición variable en el tiempo y el desfase entre las horas de máxima producción y las horas de mayor consumo de energía. Una solución a estos problemas está en la integración de sistemas de almacenamiento de energía a gran escala, que permitan sincronizar la generación con la demanda y optimizar el uso de la infraestructura eléctrica. Este artículo analiza diversas tecnologías de almacenamiento desarrolladas en el Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias (INEEL), tales como los sistemas de hidrógeno, las baterías de flujo de compuestos orgánicos y las baterías de electrodialisis, y destaca su importancia para aportar de manera muy importante en las estrategias de transición hacia un sistema eléctrico más limpio, estable y eficiente.

## Principales retos

De acuerdo con el PRODESEN 2024-2038 de la Secretaría de Energía (SENER), la demanda de energía eléctrica en México crecerá a un ritmo de 2.6% anual a lo largo de los próximos 14 años, se proyecta que para el 2038 el 35% de la capacidad instalada estará conformada por sistemas fotovoltaicos y eólicos. La integración de fuentes de energía renovable, como la solar y la eólica, plantea el reto de que el recurso primario (radiación solar o viento), no está disponible de manera constante durante todo el día, es decir, que son fuentes variables en el tiempo o incluso intermitentes. Los sistemas fotovoltaicos sólo pueden producir energía durante el día y la presencia de nubes disminuye la cantidad de energía generada. Por otro lado, los sistemas eólicos sólo generan electricidad mientras la velocidad del viento se encuentre dentro del rango operativo de las turbinas; vientos por debajo del límite de las turbinas no podrán generar energía, mientras que vientos demasiado fuertes obligan a detenerlas para evitar daños.



La intermitencia de las fuentes de energía eólica y fotovoltaica hace necesario contar con sistemas de respaldo basados en tecnologías convencionales para los momentos en los que, por razones climatológicas, estas fuentes no logren producir la energía requerida por los consumidores. Un reto adicional asociado a los sistemas fotovoltaicos es el desfaseamiento entre el pico de producción, que en general ocurre alrededor de las 13:00 horas, y el pico de demanda de energía eléctrica, que se presenta entre las 17:00 y las 22:00 horas; es decir, que el recurso solar está disponible cuando no se utiliza tanto la energía eléctrica (muy cerca del mediodía) y ya no está disponible cuando los consumidores requieren la energía (primeras horas de la noche). Este desajuste impone dificultades para generar energía eléctrica a partir de fuentes renovables en las horas de mayor demanda, lo que complica la integración eficiente de estas tecnologías a la red eléctrica. Finalmente, uno de los obstáculos para la implementación de energías renovables a gran escala es el congestionamiento de

las líneas eléctricas; conforme aumente la capacidad instalada de fuentes de energía intermitentes, el riesgo de congestión hace necesario detener la producción; esto no sólo representa un desperdicio de recursos, sino que también pone en evidencia la necesidad de soluciones más flexibles y ajustables para la gestión de la energía.

## Alternativas de solución

Una forma de enfrentar los retos mencionados es mediante la implementación de sistemas de almacenamiento de energía a gran escala. Almacenar energía durante los picos de producción permitirá inyectarla a la red en horarios de alta demanda, evitará problemas de congestión de las redes y permitirá sincronizar la generación de energía limpia con los picos de demanda; incluso, los sistemas de almacenamiento permitirán contar con energía limpia las 24 horas del día, aún en horas en las que no brille el sol y no sople el viento.



Además de ayudar a la integración de fuentes de energía renovable intermitentes, los sistemas de almacenamiento de energía también pueden ayudar a mitigar los efectos de las interrupciones y las variaciones de voltaje y frecuencia del suministro eléctrico, ya que cuentan con energía de reserva que puede ser inyectada al sistema eléctrico de manera muy efectiva, también pueden reducir la factura eléctrica de grandes consumidores a través de estrategias de administración de la energía como el rasurado de picos (*peak shaving*), la nivelación de carga (*load leveling*) y el desperdicio (*curtailment*) por falta de infraestructura de transmisión.

Algunos ejemplos de sistemas de almacenamiento de energía son los sistemas de rebombeo de agua, de aire comprimido, volantes de inercia, sistemas de almacenamiento térmico, baterías de iones de litio, baterías de flujo y sistemas de hidrógeno. Cada uno de estos sistemas presenta ventajas y desventajas que varían según factores como la escala, la ubicación y las necesidades específicas del sistema eléctrico.

En el INEEL se desarrollan tecnologías de almacenamiento de energía a gran escala: sistemas de producción de hidrógeno mediante electrólisis, celdas de combustible de hidrógeno, baterías de flujo de compuestos orgánicos y baterías de flujo de electrodiálisis.

## Sistemas de hidrógeno

De las cuatro tecnologías de almacenamiento desarrolladas en el INEEL, los sistemas de hidrógeno son los más compactos, con una densidad de potencia de entre 5 y 10 kW/litro. Suelen operar a eficiencia de ciclo completo del 40 al 50%. Estos sistemas producen hidrógeno a partir del agua mediante electrolizadores, lo almacenan en tanques y después lo utilizan en celdas de combustible, las cuales transforman la energía química del hidrógeno en electricidad de manera silenciosa y eficiente. Estos sistemas permiten almacenar grandes cantidades de



energía consumiendo únicamente energía de fuentes renovables y agua. Cuando se requieren más de 24 horas de operación en modo de descarga, los sistemas de hidrógeno son de los más competitivos.

## Baterías de flujo

Las baterías de flujo de compuestos orgánicos permiten almacenar energía en soluciones acuosas de compuestos orgánicos, capaces de recibir y donar electrones a través de reacciones de oxidación-reducción (REDOX). Estas baterías tienen la ventaja de requerir tanques de almacenamiento de bajo costo, ya que no son tanques a presión, como en el caso del hidrógeno. Para ambientes urbanos donde el espacio es limitado y en zonas donde no se considere viable usar hidrógeno, las baterías de flujo de compuestos orgánicos son una solución de bajo costo para almacenar energía por muchas horas, incluso varios días.

La tercera tecnología desarrollada en el INEEL para almacenar energía a gran escala y por muchas horas es la de baterías de flujo de electrodiálisis, las cuales también almacenan energía en tanques con electrolitos líquidos. En este caso los electrolitos que se requieren son principalmente tres: una solución salina, como el cloruro de sodio (NaCl) al 6 % en peso, una solución de un ácido diluido como el ácido clorhídrico (HCl) al 4% en peso y una solución de una sustancia alcalina como el hidróxido de sodio (NaOH) al 4 % en peso; se trata de electrolitos de bajo costo, no contaminantes y no peligrosos. Para almacenar energía en sitios remotos con microrredes conectadas a sistemas fotovoltaicos o eólicos, las baterías de electrodiálisis son una opción de bajo costo.

Las cuatro tecnologías de almacenamiento están listas para su escalamiento en potencia y para su transferencia tecnológica hacia la producción en serie. Para ello, el INEEL está trabajando en la creación de alianzas con los sectores público y privado, con el objetivo de desplegar estas tecnologías en México.

## Conclusiones

La integración masiva de fuentes de energía renovable en México requiere superar los retos asociados a su intermitencia y a la infraestructura eléctrica actual. Los sistemas de almacenamiento de energía electroquímicos emergen como una solución clave para garantizar un suministro continuo y eficiente de energía limpia, incluso en momentos en los que no hay sol ni viento. Tecnologías desarrolladas en el INEEL, como los sistemas de hidrógeno y las baterías de flujo de compuestos orgánicos y las de electrodiálisis, ofrecen soluciones innovadoras y adaptadas a diferentes contextos. Estas tecnologías no sólo permitirán una mayor penetración de fuentes de energía renovable, sino que también fortalecerán la estabilidad de la red eléctrica y promoverán un futuro energético más sustentable para el país.

---

**Autores:** Tatiana Romero Castañón, [tromero@ineel.mx](mailto:tromero@ineel.mx)  
 Leonardo De Silva Muñoz, [leonardo.desilva@ineel.mx](mailto:leonardo.desilva@ineel.mx)  
 Norma A. Beltrán Zarza, [nbeltran@ineel.mx](mailto:nbeltran@ineel.mx)  
 J. Roberto Flores Hernández, [jrflores@ineel.mx](mailto:jrflores@ineel.mx)  
 Mario Díaz Guillén, [mario.diaz@ineel.mx](mailto:mario.diaz@ineel.mx)

# SENER en transición

**Mtra. Luz Elena González Escobar**  
**Secretaría de Energía**



A partir del 1 de octubre de 2024, la maestra **Luz Elena González Escobar es la encargada del manejo, formulación y ejecución de políticas** que promuevan la sostenibilidad, eficiencia y **seguridad energética** del país.

A continuación, te presentamos una semblanza de su trayectoria:

Es **economista** por la Universidad Nacional Autónoma de México, **Maestra en Derecho** por la Universidad Tecnológica, con especialización en Derecho Fiscal, **Maestra en Urbanismo** por la Universidad de Cataluña y egresada del programa de **estudios avanzados “Leadership for Environment and Development”** del Colegio de México. Cuenta con un **diplomado en desarrollo sustentable** por la Universidad Iberoamericana y diversos estudios de **especialización en urbanismo y finanzas**.

En el sector público, tiene **más de 20 años de experiencia en dirección y operación de proyectos** de planeación económica, urbana y estrategias financieras.

Ha sido **Secretaría de Administración y Finanzas de la Ciudad de México**, Directora General de la Red de Transporte de Pasajeros; Coordinadora General de Desarrollo Educativo y Pedagógico de la Secretaría de Educación de la Ciudad de México; Directora General del Fideicomiso de Recuperación Crediticia; Subtesorera de Catastro y Padrón Territorial del Distrito Federal; Directora Ejecutiva en la Secretaría del Medio Ambiente y Asesora del Instituto Nacional de Ecología.

Al salir de la conferencia donde fue anunciada para el cargo, la Secretaria de Energía puntualizó: “La labor será **garantizar la seguridad energética**, pero también la **equidad energética**. Los **recursos energéticos del país** son **fundamentales** para el **desarrollo** y el **futuro** de México”.

# INEEL en transición

**Dr. Víctor Alejandro Salcido González**  
**Director General**

Es **Doctor en Ciencias (Física)** por la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), donde también realizó sus estudios de **Licenciatura y Maestría**.

Hasta 1991, formó parte de la planta académica de la **Facultad de Ciencias** de la UNAM, donde desarrolló labores de docencia e investigación en las áreas de **Mecánica de Fluidos, Termodinámica, Electrodinámica y Física Estadística**.

En ese mismo año, se incorporó a la **División de Energías Alternas** del **Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias (INEEL)**, anteriormente conocido como **Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE)**. Desde entonces, ha liderado **proyectos de investigación e innovación**, tanto de infraestructura como por contrato, colaborando con instituciones como PEMEX, CFE, Cementos Moctezuma, CCA-UNAM y CONACYT. Sus aportes en **micrometeorología y dispersión atmosférica de contaminantes** han sido **reconocidos y premiados, en particular por PEMEX, durante las Jornadas Ambientales** que organiza esta institución en el marco del Día Mundial del Medio Ambiente.

Fundó y dirigió el **Programa de Sustentabilidad Ambiental** del INEEL, donde se impulsó la formación de recursos humanos y se desarrolló infraestructura destinada a la aplicación de enfoques científicos y prácticos para atender la complejidad del nexo Agua-Suelo-Clima bajo condiciones de cambio climático, y orientados a la intervención ambiental estratégica y a la evaluación del impacto de emisiones, para incrementar y consolidar la sustentabilidad ambiental en los ámbitos de la generación y el consumo de energía en todos los sectores de la sociedad.



Ha publicado más de **100 artículos de investigación** en revistas de circulación internacional, memorias de congresos y capítulos en libros sobre los temas de su competencia. Ha sido **autor y/o editor de seis libros**, a nivel internacional. Cuenta con **cinco derechos de autor** sobre aplicaciones *software*.

En su carrera docente, ha impartido clases en instituciones como la UNAM, la Universidad Autónoma Metropolitana, la Universidad Autónoma del Estado de Morelos, la Universidad Iberoamericana, y el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET). Ha dirigido cinco tesis de licenciatura, tres de maestría y dos de doctorado.

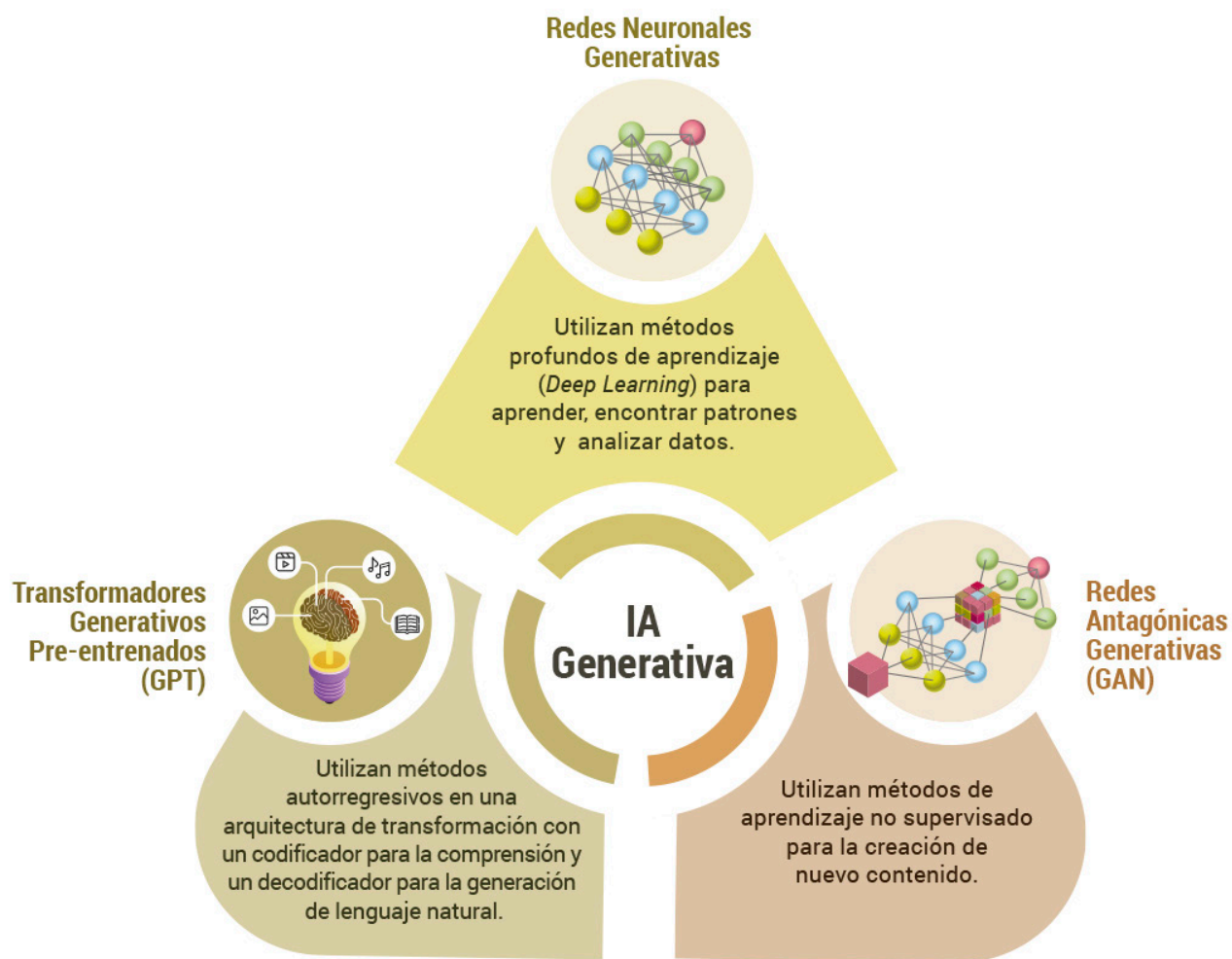
Ha participado en comités y grupos de trabajo del CONAHCyT. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores (SNI) desde 1993, con nombramiento vigente hasta diciembre de 2034.



## **Inteligencia Artificial Generativa para la Industria Eléctrica: Innovación, Oportunidades y Desafíos**

La Inteligencia Artificial Generativa (IA Generativa) está transformando la vida de la sociedad y de la industria; es una rama de la Inteligencia Artificial que se enfoca en crear nuevo contenido a partir de datos existentes, mediante la aplicación de modelos avanzados de aprendizaje automático, puede generar texto, imágenes y video, incluso música. Uno de los modelos más conocidos de IA Generativa es el *Generative Pre-trained Transformer* (GPT), el cual ha demostrado ser capaz de generar imágenes, videos, textos coherentes y contenido multimodal, ampliando la capacidad de generar nuevo contenido en un entorno seleccionado.

IA Generativa se basa en un proceso de aprendizaje de grandes volúmenes de información en un entorno determinado, utilizando métodos de aprendizaje automático profundo, como *Deep Learning*. Se clasifica en tres tipos: redes antagónicas generativas (GAN), transformadores generativos pre-entrenados (GPT) y redes neuronales generativas. La Figura 1 muestra los diferentes tipos.



**Figura 1.** Tipos de IA Generativa.

La IA Generativa está impulsando la transformación en diferentes ámbitos: en la industria farmacéutica reduciendo los tiempos de desarrollo de nuevos fármacos; en la industria automotriz creando pruebas de nuevos materiales; en el diseño de nuevos chips optimizando el desarrollo de sus componentes; y en la industria eléctrica, ofreciendo innovaciones que van desde la optimización de redes hasta el mantenimiento predictivo y la gestión energética avanzada.

## Oportunidades para la Industria Eléctrica Moderna

### Optimización de redes eléctricas

La IA Generativa apoya la optimización de redes eléctricas, permitiendo a las empresas eléctricas mejorar significativamente su eficiencia. Al utilizar modelos GAN, es posible simular y prever el comportamiento de las redes bajo diversas condiciones, lo que facilita una mejor planificación y reducción de las pérdidas de energía. Los modelos generativos permiten explorar nuevas configuraciones de redes eléctricas y probar soluciones innovadoras sin el riesgo y el costo de la implementación física.

### Predicción de fallos y mantenimiento predictivo

La IA Generativa apoya la predicción de fallos en los procesos y equipos de la industria eléctrica. Modelos comerciales tienen la capacidad de analizar grandes volúmenes de datos históricos para predecir con precisión cuándo y dónde pueden ocurrir fallos en la infraestructura eléctrica. Estas soluciones permiten detectar y mitigar fallos antes de que ocurran, mejorando la confiabilidad y eficiencia de los sistemas eléctricos.

### Gestión de la energía

En este campo, la IA Generativa puede apoyar al optimizar la generación y comercialización de la electricidad. Modelos específicos pueden ayudar a la realización de pronósticos

para optimizar la generación de un conjunto de centrales, encontrando el punto de equilibrio entre costos operativos y rentabilidad de la central.

## Desafíos de la IA Generativa en la Industria Eléctrica

### Desafíos técnicos

Aunque la IA Generativa ofrece numerosas ventajas, también enfrenta desafíos técnicos importantes. La integración de estos modelos de IA con los sistemas eléctricos puede ser compleja y costosa. Además, la calidad y la estabilidad de las predicciones generadas son críticas en un entorno donde un fallo puede tener consecuencias graves. Por ejemplo, los modelos necesitan ser entrenados con grandes volúmenes de datos de alta calidad para producir resultados confiables, lo que requiere una inversión significativa en infraestructura y recursos.

### Desafíos éticos y regulatorios

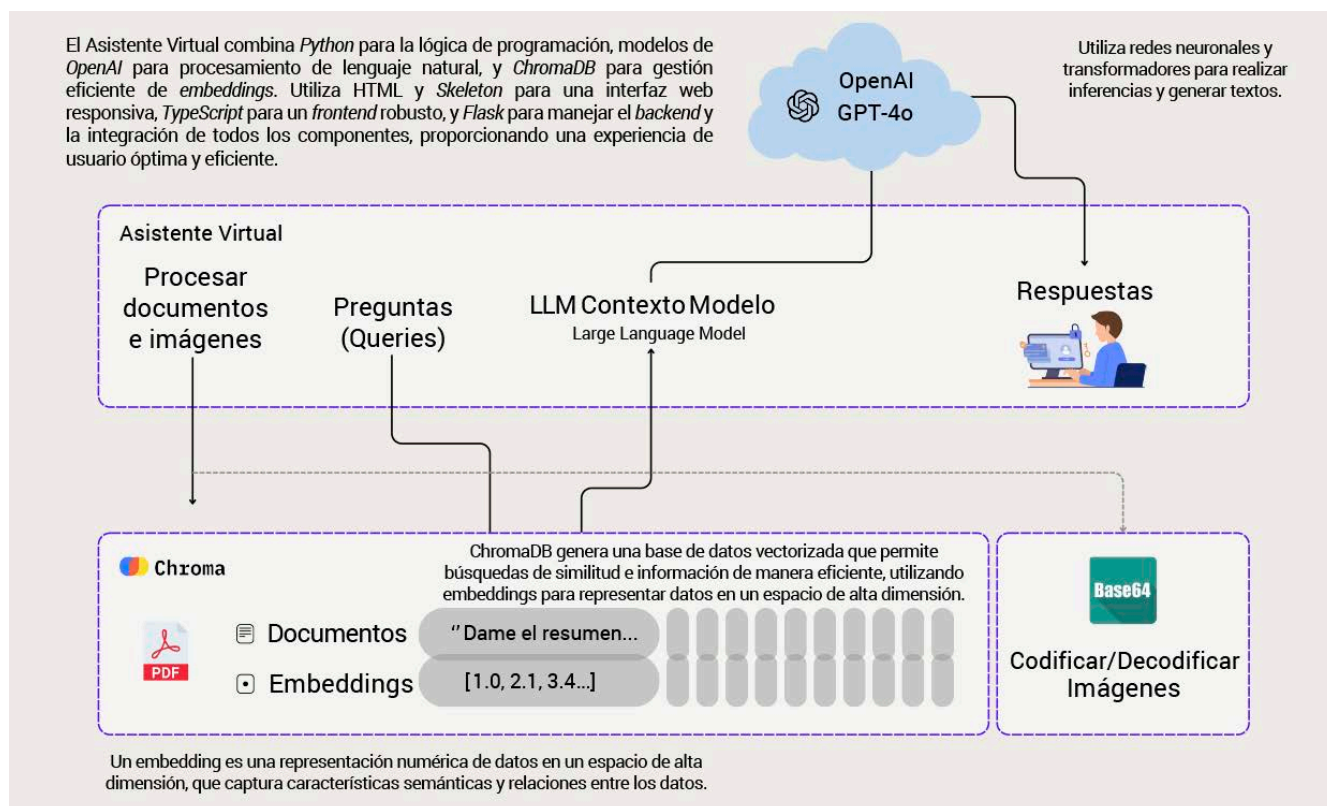
El uso de IA Generativa en la industria eléctrica también plantea estos desafíos. Una pregunta esencial sería ¿hasta qué punto la IA Generativa debería ser autónoma y tener el control de la operación de una infraestructura eléctrica que es crítica para actividades del ser humano? Es esencial garantizar que las decisiones generadas por estos modelos sean transparentes y responsables. Por ejemplo, se debe asegurar que los modelos generativos que predicen fallos eléctricos puedan ser auditados y comprendidos por los operadores humanos. Además, las regulaciones actuales pueden no estar completamente adaptadas para abordar las implicaciones de la IA Generativa, lo que requiere una evolución en los marcos legales y normativos.

Aunque la implementación de estas tecnologías presenta desafíos importantes, las oportunidades que ofrece son vastas e innovadoras. A medida que la industria eléctrica continúa evolucionando, la capacidad de aprovechar el poder de la IA Generativa será crucial para mantener la

competitividad y avanzar hacia un futuro más eficiente y sostenible.

El Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias (INEEL) colabora con la Comisión Federal de Electricidad (CFE) en el desarrollo de aplicaciones de IA Generativa para optimizar sus procesos y gestionar la infraestructura eléctrica de manera confiable y eficiente. La Figura 2 muestra un

ejemplo de arquitectura de un asistente virtual utilizando el modelo GPT de OpenAI para generación de texto en lenguaje natural a partir de documentación técnica existente.



**Figura 2.** Arquitectura de IA Generativa del INEEL.

**Autor:** Guillermo F. Escobedo Briones, [gescobedo@ineel.mx](mailto:gescobedo@ineel.mx)  
Isaac Alberto Parra Ramírez, [iaparra@ineel.mx](mailto:iaparra@ineel.mx)  
Gustavo Arroyo Figueroa, [garroyo@ineel.mx](mailto:garroyo@ineel.mx)



# Desarrollo tecnológico

## Plataforma de simulación avanzada del INEEL para prueba de inversores fotovoltaicos

## Introducción

La proliferación en el mundo de sistemas de Generación Distribuida (GD) o Recursos de Energía Distribuida (DER, por sus siglas en inglés), presenta una tendencia incremental en el mundo. Sus ventajas e implicaciones, tanto técnicas como no técnicas son más evidentes en campo y la mayor parte de ellas recae en el elemento de interconexión que constituye la interfaz entre la red eléctrica convencional y la fuente de generación eléctrica local, basada en energía limpia (normalmente energía eléctrica disponible en forma de corriente directa, CD; como la solar fotovoltaica, hidrógeno verde, etc.). Este elemento de interconexión se denomina Convertidor Electrónico de Potencia (CEP); hoy en día complementa su función original de conversión con funciones inteligentes que dan soporte activo a la red eléctrica. Por lo tanto, la normatividad internacional gira alrededor del CEP. El funcionamiento correcto de un CEP no debe impactar negativamente ningún parámetro de la calidad de la potencia y tampoco debe representar ningún tipo de riesgo eléctrico; ni para los usuarios finales (la mayoría personal no técnico, pues son instalaciones residenciales, comerciales, académicas, etc.), ni para el personal operativo de la compañía eléctrica.

Con base en lo anterior, la certificación obligatoria de los CEPs es importante en la crítica hacia una transición energética exitosa. Al respecto, el pasado 9 de septiembre de 2024, la CRE anunció la primera revisión del Anteproyecto de Norma Oficial Mexicana para instalaciones FV, cuyo objetivo es establecer los requisitos de seguridad y desempeño, los métodos de prueba para los módulos fotovoltaicos, inversores y estructuras de montaje, para prevenir riesgos y establecer un grado mínimo de seguridad y desempeño de los sistemas fotovoltaicos, para que los parámetros técnicos del Sistema Eléctrico Nacional se mantengan dentro de los límites establecidos.

Por otro lado, la tendencia normativa internacional –con el claro enfoque hacia las Redes Eléctricas Inteligentes y su particular infraestructura–, ha evolucionado hacia

camas de prueba bajo ambientes virtuales en Simulación Avanzada en Tiempo Real (SATR). Por ello, el INEEL en colaboración con la SENER, implementó una plataforma de simulación avanzada para la prueba de inversores fotovoltaicos: seguidores y avanzados, de hasta 20 kW de potencia nominal.

## Plataforma de Simulación Avanzada del INEEL

### a. Descripción

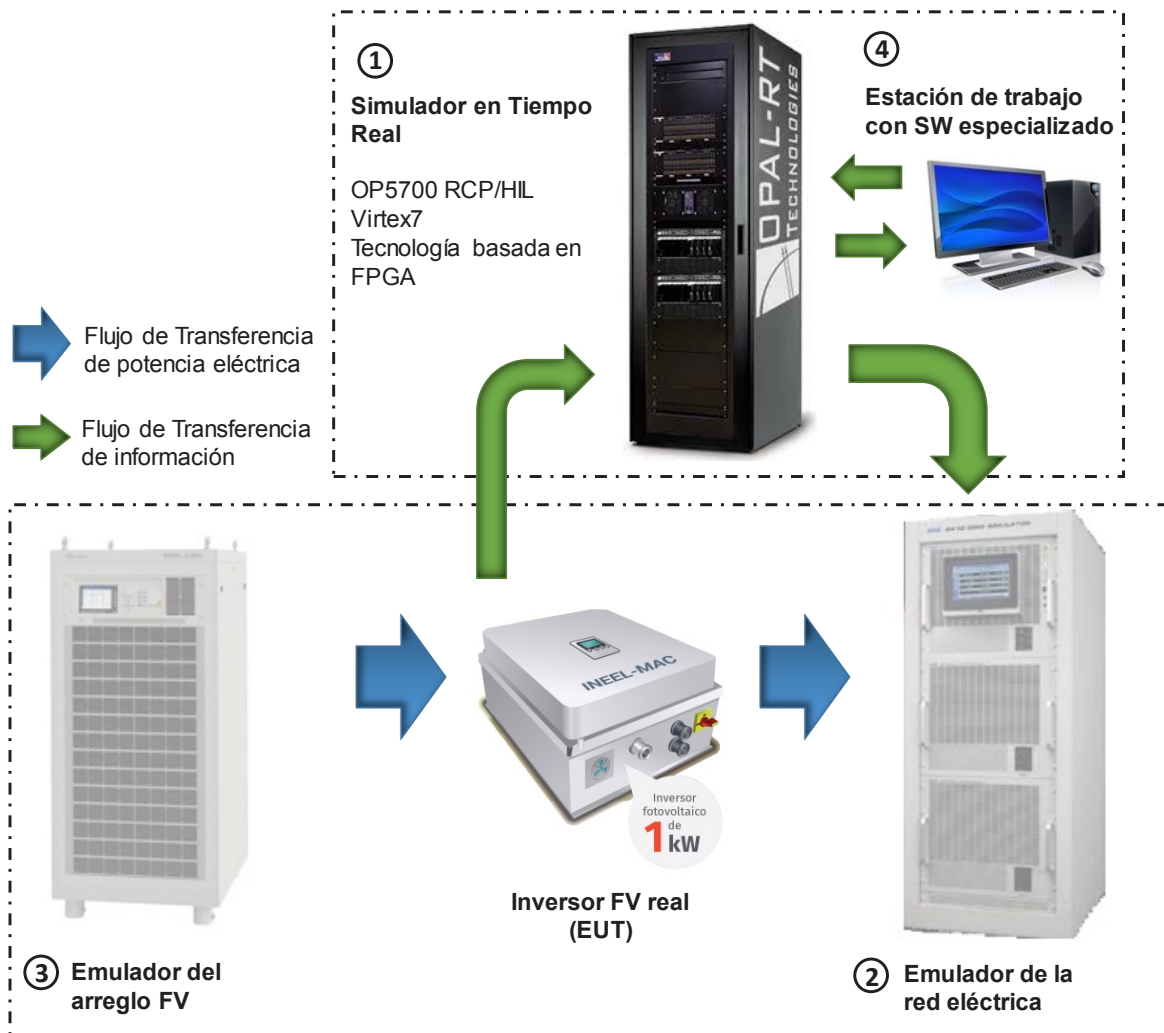
En la Figura 1 se tiene la configuración de la plataforma de simulación avanzada del INEEL para prueba de inversores fotovoltaicos: seguidores y avanzados; su capacidad de potencia es de hasta 20 kW. Los equipos especializados son: 1. El simulador en Tiempo Real (TR), conformado por el simulador OP5700, de OPAL Technologies [3]; 2. Simulador regenerativo de red eléctrica de 30 kW; 3. Simulador de arreglos fotovoltaicos de 30 kW, y 4. La estación de trabajo convencional. Esta última incluye las licencias del software: Todas las requeridas por OPAL-RT®, y la de Matlab® y sus herramientas, dependiendo de la aplicación.

### b. Funcionamiento

Uno de los objetivos iniciales de esta plataforma es aplicar el procedimiento de la norma IEEE 1547.1 a CEPs seguidores y avanzados. Ello, cargando previamente mediante scripts en el simulador de TR, o bien, en una plataforma como la de SVP desarrollada por Sun-Spect [4], pero en un ambiente virtual de simulación en TR. Se puede decir que el CEP real como EUT (Equipo Bajo Prueba; de sus siglas en inglés) estará sumergido en un ambiente de Realidad Virtual (RV) para él, ya que este operará tal cual lo haría en campo, pero interactuando con un arreglo FV (a la entrada) y una red eléctrica convencional (a la salida), ambos emulados. En la plataforma el simulador regenerativo (2) emula a la red eléctrica y el simulador (3) emula al arreglo FV, logrando que el EUT opere de manera normal para poder ser evaluado y bajo el set de pruebas de interés. Dicho

escenario permite aplicarle pruebas al EUT en cualquier horario (sin depender del recurso solar), salvando costos elevados de infraestructura de generación (en este caso un arreglo FV de 30 kWp) y bajo distintos niveles y patrones de irradiación solar emulada. Asimismo, se pueden generar distintos patrones de perturbaciones en la red eléctrica, para evaluar los diferentes parámetros de calidad de la energía que la normatividad de interés exija en la salida del EUT; lo cual no sería técnica ni económicamente factible hacerlo en campo o con elementos pasivos.

Otro escenario que puede surgir, es que una vez puesta en marcha la simulación en TR del EUT, los resultados pueden ser registrados simultáneamente (con un Sistema de Adquisición de Datos adicional, o bien, con el propio simulador OP-5700), lo que permite poder generar un modelo de simulación para posteriormente ser replicado en varios EUTs en el ambiente de simulación en TR,



**Figura 1. Configuración de la plataforma del INEEL.**

modelando un clúster de inversores FV. De esta manera, al contar con modelos de RGD de interés para la CFE se podría ejecutar una simulación en TR, para analizar el impacto que se tendría por parte del funcionamiento simultáneo del clúster de inversores FV en la red eléctrica, a partir de un solo EUT físico.

En resumen, la plataforma de simulación avanzada del INEEL (ver Figura 2) para prueba de inversores fotovoltaicos de hasta 20 kW (seguidores y avanzados), permite a nuestros clientes potenciales realizar en México –de manera

rentable-, trenes de pruebas para pre-certificación de CEPs en corto tiempo, aplicando protocolos de la normatividad (nacional o internacional) de interés meta.



**Figura 2.** Plataforma de simulación avanzada del INEEL para prueba de inversores fotovoltaicos.

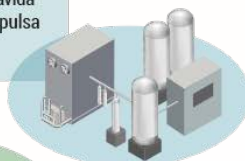
**Autor:** Humberto Raúl Jiménez Grajales, [hjimenez@ineel.mx](mailto:hjimenez@ineel.mx)

# La infografía

## Tecnologías de almacenamiento de energía

### Aire comprimido

Almacena energía comprimiendo aire en cavidades subterráneas; al liberarse, el aire impulsa una turbina para generar electricidad.



### Ruedas de Inercia

Almacenan energía cinética haciendo girar un rotor a gran velocidad. La energía se recupera desacelerando la rueda y transformando su movimiento en electricidad.



### Bobinas superconductoras

Utilizan materiales superconductores para almacenar energía en un campo magnético sin pérdidas, lo que permite una descarga rápida y eficiente.



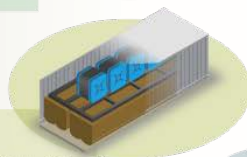
### Rebombeo de agua

Almacena energía bombeando agua a un embalse elevado; cuando se necesita electricidad, se libera el agua para generar energía hidroeléctrica.



### Baterías

Dispositivos electroquímicos que almacenan energía y la liberan en forma de electricidad, ampliamente utilizados por su flexibilidad y portabilidad.



### Hidrógeno

Se produce mediante electrólisis del agua y se almacena para generar electricidad a través de celdas de combustible o combustión directa.



### Baterías de flujo

Almacenan energía en líquidos que circulan a través de celdas electroquímicas, permitiendo una vida útil prolongada y una escalabilidad flexible, ya que la capacidad de almacenamiento puede incrementarse fácilmente ampliando los tanques de electrolitos.



### Sistemas de almacenamiento térmico

Almacenan energía en forma de calor, que luego se convierte en electricidad o se utiliza directamente en procesos industriales.

