

SISTEMAS ENERGÉTICOS INTEGRADOS PARA UNA INDUSTRIA SOSTENIBLE

Manuel Toledano Ayala ^a, Claudia Gutiérrez Antonio ^b, Sergio Iván Martínez Guido ^b, Oscar Daniel Lara Montaño ^{c*}

^a Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Av. Cerro de las Campanas s/n, Col. Las Campanas, Querétaro, Querétaro, 76010, México

^b Universidad Autónoma de Querétaro, Av. de las Ciencias esq Blvd. Villas del Mesón S/N, Juriquilla, Querétaro, 76230, México

^c Universidad Autónoma de Querétaro, Carretera Amealco Atemascalcingo Km 1, Centro, Amealco de Bonfil Querétaro. CP:76850, México. od.laramontano@gmail.com

Resumen

Este artículo analiza el potencial de los Sistemas Energéticos Integrados como eje de la transición energética en el sector industrial. Se presenta una revisión crítica de su concepto, componentes tecnológicos, generación renovable variable, cogeneración/trigeneración, almacenamiento multivectorial y sistemas avanzados de gestión de la energía, y de su evolución de costos entre 2010 y 2025. Con base en estudios de caso internacionales y nacionales, se cuantifican los beneficios técnicos y ambientales: incrementos de eficiencia global del 65-85 % y reducciones de emisiones directas de CO₂ de hasta 60 % frente a configuraciones convencionales. Asimismo, se examinan las sinergias entre los SEI y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS 7, 9, 12 y 13), así como las recientes reformas regulatorias en México que habilitan la generación distribuida, el almacenamiento y la venta de excedentes. Finalmente, se identifican los desafíos clave (financiamiento, vacíos normativos y ciberseguridad OT/IT) y se proponen líneas de investigación prioritarias, como el almacenamiento de larga duración y los algoritmos de optimización basados en inteligencia artificial. El trabajo concluye que los SEI ofrecen una vía técnicamente madura y económicamente competitiva para descarbonizar la industria y fortalecer la resiliencia energética, siempre que exista un marco regulatorio estable y acceso a mecanismos financieros innovadores.

Palabras clave: sistemas energéticos integrados; cogeneración; almacenamiento de energía; transición energética; industria.

INTEGRATED ENERGY SYSTEMS FOR A SUSTAINABLE INDUSTRY

Abstract

This paper investigates the potential of Integrated Energy Systems as a cornerstone of the industrial energy transition. It provides a critical review of the IES concept, its technological building blocks—variable renewable generation, combined heat-and-power or trigeneration units, multi-vector storage, and advanced energy-management systems—and cost trajectories from 2010 to 2025. Drawing on international and Mexican case studies, the analysis quantifies the technical and environmental gains: overall energy efficiencies of 65-85 % and direct CO₂ emission cuts of up to 60 % compared with traditional, stand-alone configurations. The study also maps IES contributions to UN Sustainable Development Goals 7, 9, 12, and 13, and discusses recent Mexican regulatory reforms that enable distributed generation, storage, and surplus-energy trading. Remaining barriers (financing, regulatory gaps, and OT/IT cybersecurity) are examined, and priority research avenues such as long-duration energy storage and AI-driven optimization algorithms are outlined. The findings indicate that IES constitute a technically mature and economically competitive pathway for industrial decarbonization and energy-system resilience, provided supportive policy frameworks and innovative financing instruments are in place.

Keywords: integrated energy systems; cogeneration; energy storage; energy transition; industry



1. Introducción

El consumo de energía en el mundo creció rápidamente a lo largo del siglo XX y en las primeras décadas del siglo XXI, motivado especialmente por la expansión industrial, el auge de la construcción y el incremento poblacional en las ciudades (Nations, 2024; United Nations, 2024). Particularmente, en sectores de alto consumo como la manufactura, la construcción y la minería, este crecimiento provocó un uso cada vez más intenso de combustibles fósiles y de grandes infraestructuras eléctricas.

A escala global, el sector industrial (que agrupa la manufactura, la minería y la construcción) es el mayor consumidor de energía, representando el 37% del consumo final total en 2022. La composición de esta demanda energética sigue dominada por los combustibles fósiles: a nivel mundial, el carbón aportó el 24%, el gas natural el 22% y el petróleo el 11% de la energía consumida por la industria ese año (International Energy Agency, 2024b). A esto se suma la huella de carbono de la electricidad consumida, que en gran parte del mundo todavía se genera a partir de fuentes fósiles. Por ejemplo, en una economía industrializada como la de Estados Unidos, la manufactura por sí sola acapara el 76% del consumo energético industrial (U.S.

Energy Information Administration, 2023), lo que evidencia la magnitud del desafío en estos sectores. Con el paso del tiempo, los impactos ambientales de este modelo se hicieron evidentes, entre ellos el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero y la presión sobre los hábitats naturales. Este impacto se refleja directamente en las cifras de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). A nivel mundial, el sector industrial fue responsable de la emisión directa de 9 gigatoneladas (Gt) de CO₂ en 2022, lo que equivale a aproximadamente una cuarta parte de las emisiones totales del sistema energético global (International Energy Agency, 2024b). En países como Estados Unidos, la industria es la tercera mayor fuente de emisiones directas de GEI, y su contribución es aún mayor si se consideran las emisiones indirectas derivadas de su consumo de electricidad (U.S. Environmental Protection Agency, 2024). Aunque en algunas regiones las emisiones de la manufactura habían disminuido gracias a mejoras en eficiencia, proyecciones recientes indican que esta tendencia podría revertirse debido al crecimiento esperado en industrias de altas emisiones, subrayando la urgencia del problema (Congressional Budget Office, 2024).

Por otro lado, las cifras confirman que, pese a los intentos de promover las energías renovables, la proporción de combustibles fósiles en la matriz energética sigue siendo muy elevada. A nivel mundial, en 2023, los combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas) todavía representaron el 82% del suministro total de energía primaria (Energy Institute, 2024). Esta dependencia es similar en el contexto nacional; en México, cerca del 90% del suministro total de energía provino de combustibles fósiles en 2023, con el petróleo y el gas natural como las principales fuentes (International Energy Agency, 2024c). La aparición de problemas inesperados, como la crisis derivada de la COVID-19 o tensiones geopolíticas que afectan el suministro de hidrocarburos, ha frenado el ritmo con el que se reduce el uso de carbón, petróleo y gas natural.

Esta realidad no solo dificulta el cumplimiento de los acuerdos climáticos, sino que también obstaculiza el avance en varios Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas. En concreto, la alta dependencia de los combustibles fósiles compromete directamente el ODS 7 (Energía asequible y no contaminante), ya que la volatilidad de precios de los hidrocarburos y sus externalidades

ambientales y de salud van en contra de la sostenibilidad a largo plazo. Del mismo modo, frena el ODS 9 (Industria, innovación e infraestructura), que promueve la construcción de infraestructuras resilientes y una industrialización sostenible, un objetivo difícil de alcanzar en sistemas energéticos centralizados y vulnerables. Finalmente, la falta de una transición energética acelerada es el principal impedimento para el ODS 13 (Acción por el clima). En este contexto, los Sistemas Energéticos Integrados (SEI) emergen como una solución tangible, pues su enfoque en la eficiencia y la integración de renovables contribuye de manera simultánea a estos tres objetivos (International Renewable Energy Agency, 2018).

La preocupación por la eficiencia energética tampoco ha sido menor. Numerosas centrales eléctricas que operan con carbón, gas natural o petróleo mantienen eficiencias promedio entre 35 y 45%, lo que indica que parte importante de la energía que se consume en forma de combustible se pierde como calor no aprovechado (Ghoniem, 2011; Graus y col., 2007).

Como contrapunto al modelo basado en combustibles fósiles, la transición energética global está siendo impulsada por un conjunto de energías alternativas. La energía solar

fotovoltaica y la eólica han liderado esta carga, experimentando una drástica reducción de costos en la última década que las ha convertido en las fuentes de nueva generación más económicas en muchas regiones del mundo (Lazard, 2024).

Sin embargo, su principal desafío es la intermitencia y la variabilidad, que comprometen la estabilidad de la red eléctrica. Por otro lado, la energía hidroeléctrica ofrece una fuente de energía renovable, gestionable y de bajo costo, pero su expansión está fuertemente limitada por factores geográficos y por impactos ambientales y sociales significativos. Finalmente, la biomasa ofrece una vía para valorizar residuos orgánicos y proporcionar energía de base, aunque su viabilidad a gran escala plantea debates sobre la sostenibilidad de la cadena de suministro y la competencia por el uso del suelo. Por tanto, si bien estas tecnologías son la piedra angular de la descarbonización, su integración efectiva y armónica en el sistema energético industrial plantea desafíos técnicos y sistémicos considerables.

Frente a este panorama, han surgido iniciativas que plantean un cambio en la manera de concebir la generación y distribución de la energía. Una de estas

propuestas se centra en los llamados SEI (o *Integrated Energy Systems (IES)* en inglés), que buscan planificar, controlar y aprovechar diferentes tipos de energía en un mismo espacio (J. Wu y col., 2016; Q. Wu y col., 2022).

En este trabajo se explica qué son los SEI, su importancia para el sector industrial y su capacidad para contribuir a la sostenibilidad y la competitividad. Se abordarán sus fundamentos tecnológicos, los beneficios que aportan y los principales retos que enfrentan. Se ofrece, además, un recuento de cómo los SEI se encajan en los marcos regulatorios vigentes y de cómo se alinean con los ODS de Naciones Unidas.

2. Concepto y Principios Fundamentales de los Sistemas Energéticos Integrados

Un SEI es un enfoque holístico que diseña y opera múltiples infraestructuras energéticas de manera coordinada, aprovechando las sinergias entre diversos vectores, como la electricidad, el calor y el frío, y combustibles como el hidrógeno. A diferencia de los esquemas convencionales que gestionan cada sistema de forma aislada, un SEI optimiza el conjunto para maximizar la eficiencia,

minimizar los costos y reducir el impacto ambiental (Mancarella, 2014).

La Figura 1 ilustra los componentes clave que interactúan dentro de un SEI industrial típico.

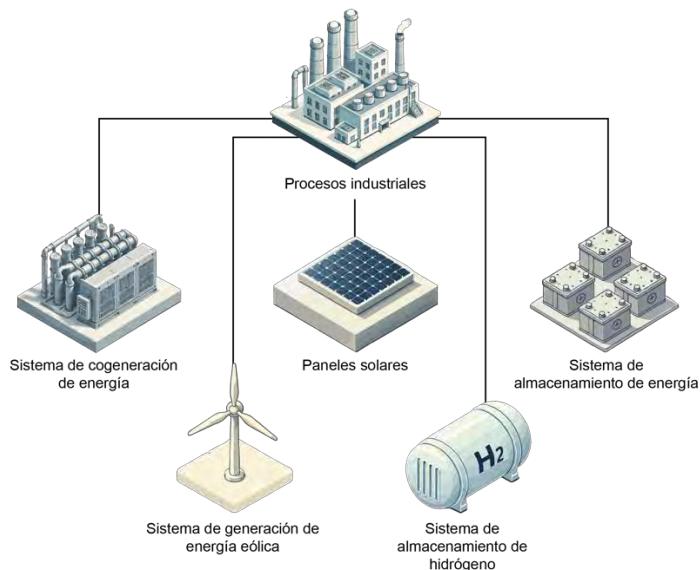


Figura 1. Elementos que consideran los sistemas energéticos integrados.

La fortaleza de un SEI radica en la integración inteligente de diversos activos tecnológicos, como los que se muestran en la figura (Song y col., 2022):

- Generación Renovable Variable: Incluye fuentes como los paneles solares fotovoltaicos y las turbinas eólicas. Son la base para la producción de energía limpia, pero

su naturaleza intermitente requiere sistemas de respaldo y de gestión.

- Generación Gestionable y de Alta Eficiencia: A menudo representada por plantas de cogeneración (CHP) o trigeneración. Estas unidades producen electricidad de manera fiable y, a la vez, aprovechan el calor residual para procesos industriales o calefacción, alcanzando eficiencias energéticas globales muy superiores a

las de las centrales eléctricas convencionales.

- Almacenamiento de Energía: Es el pilar de la flexibilidad. Un SEI combina múltiples formas de almacenamiento:
 - Almacenamiento Eléctrico: Las baterías permiten almacenar la electricidad de forma directa para su uso en diferido, respondiendo en milisegundos para estabilizar la red interna.
 - Almacenamiento Químico: El excedente de energía renovable puede usarse para producir hidrógeno verde mediante electrólisis. Este hidrógeno puede almacenarse a largo plazo y usarse posteriormente como combustible libre de carbono.
- Demanda Energética: El centro del sistema es el consumidor, en este caso, la planta industrial, con sus complejas y variables demandas de electricidad y calor.

El principio fundamental de un SEI no es solo tener estos componentes, sino orquestarlos a través de un "cerebro digital" conocido como

Sistema de Gestión de la Energía (EMS). Este sistema, basado en medidores inteligentes, sensores (IoT) y algoritmos de inteligencia artificial, opera en tiempo real para tomar decisiones óptimas.

Para ilustrarlo con el ejemplo de la fábrica: al mediodía, con alta producción solar y demanda industrial media, el EMS no sigue una regla fija. En su lugar, evalúa en tiempo real:

- ¿Cuál es el precio de la electricidad en la red externa?
- ¿Cuál es el estado de carga de las baterías?
- ¿Cuál es la previsión de demanda de calor para la próxima hora?
- ¿Cuál es el costo de oportunidad de producir y almacenar hidrógeno?

Con base en estos datos, decide si la mejor acción es vender el excedente a la red, cargar las baterías para el turno de noche, o producir hidrógeno para un uso futuro. Este enfoque dinámico transforma a la fábrica de un simple consumidor a un prosumidor activo y flexible, capaz de adaptarse a las condiciones del mercado y de su propia operación para minimizar costos (Zafar y col., 2018).



La implementación de un SEI se traduce en tres beneficios fundamentales (Mancarella, 2014):

1. Sostenibilidad Ambiental: Maximiza el uso de energías renovables y reduce drásticamente las emisiones de gases de efecto invernadero al mejorar la eficiencia global y desplazar el consumo de combustibles fósiles.
2. Eficiencia y Rentabilidad Económica: Reduce los costos energéticos al minimizar las pérdidas y optimizar la compra y venta de energía. Además, puede generar nuevos flujos de ingresos a través de la venta de servicios a la red eléctrica (p. ej., regulación de frecuencia).
3. Resiliencia y Seguridad Energética: Al diversificar las fuentes y contar con almacenamiento propio, un SEI aumenta la autonomía y la fiabilidad del suministro. Puede operar en "modo isla" durante apagones de la red externa, garantizando la continuidad de las operaciones críticas.

3. Estado Actual de la Tecnología y Aplicaciones en la Industria

La viabilidad de los SEI se ha acelerado gracias a la convergencia de avances tecnológicos y la drástica reducción de costos en sus componentes clave. La base de la generación distribuida, la energía solar fotovoltaica y la eólica, continúan su tendencia a la baja en costos, consolidándose como las opciones más económicas para nueva capacidad eléctrica en gran parte del mundo (Lazard, 2024). Paralelamente, la CHP y la trigeneración siguen siendo pilares de la eficiencia industrial, con sistemas modulares y flexibles que se adaptan a diversas escalas de demanda de calor y electricidad.

El avance más significativo reside en el almacenamiento de energía y las tecnologías de acoplamiento de sectores. Las baterías de iones de litio, cuyo costo ha disminuido un 89% en la última década según análisis recientes, son ya una solución comercialmente viable y estándar para la gestión de energía a corto plazo (horas), con precios promedio de celda que ya alcanzan niveles competitivos para su integración masiva (BloombergNEF, 2024). Sin embargo, para la resiliencia industrial y la

gestión de la intermitencia a largo plazo (días o semanas), las tecnologías de almacenamiento de larga duración (LDES) están ganando terreno. Entre ellas destacan las baterías de flujo redox, que ofrecen una mayor vida útil y escalabilidad para duraciones extendidas, y el almacenamiento térmico avanzado (por ejemplo, con sales fundidas o materiales de cambio de fase), que permite guardar calor para procesos industriales de manera costo-efectiva (National Renewable Energy Laboratory, 2023; Pacific Northwest National Laboratory, 2022).

De manera crucial, el hidrógeno verde, producido mediante electrólisis alimentada por renovables, se perfila como el vector energético clave para descarbonizar procesos industriales de alta temperatura y como forma de almacenamiento estacional. Aunque su costo aún es un desafío, la viabilidad de su aplicación a gran escala se está demostrando en proyectos emblemáticos, como los "valles de hidrógeno" que se desarrollan en clústeres industriales y en puertos europeos como los de Amberes y Róterdam. En estos proyectos, múltiples industrias colaboran para compartir infraestructura de producción, almacenamiento y uso de hidrógeno, creando economías de escala que aceleran su

rentabilidad (International Energy Agency, 2024a; Port of Antwerp-Bruges, 2024).

Asimismo, la descarbonización de sectores específicos de difícil abatimiento, como la industria cementera, la siderúrgica y la química, adopta los SEI como una vía fundamental, integrando la electrificación de procesos, el uso de biomasa y tecnologías de captura de carbono (International Energy Agency, 2022). A nivel corporativo, otra tendencia creciente son los Contratos de Compra de Energía (PPA), mediante los cuales las empresas no solo adquieren energía de proyectos renovables, sino que los combinan con sistemas de almacenamiento para asegurar un suministro 100% renovable 24/7, operando de facto como un SEI virtual (Riepin & Brown, 2024).

Existen numerosos casos de éxito que demuestran su valor. Un ejemplo destacado a nivel global es la implementación de sistemas de trigeneración en grandes complejos como campus universitarios, hospitales y centros de datos. En estos entornos, se utiliza la electricidad generada para la operación de equipos, el calor residual para la calefacción de espacios y agua sanitaria, y este mismo calor se aprovecha en *chillers* de absorción para producir agua fría destinada a la

climatización, alcanzando una eficiencia energética global superior al 85% (U.S. Environmental Protection Agency, 2023). En México, la industria petroquímica y otras grandes plantas manufactureras han utilizado la cogeneración durante décadas, no solo para optimizar sus costos energéticos, sino también para garantizar un suministro eléctrico más fiable que el de la red pública, protegiendo así sus procesos productivos críticos.

La capa digital que permite esta orquestación también ha evolucionado. Más allá de las *smart grids*, la vanguardia se encuentra en los Sistemas de Gestión de la Energía (EMS) impulsados por la Inteligencia Artificial (IA). Estos sistemas no solo reaccionan a los datos, sino que también utilizan modelos predictivos y de aprendizaje automático para anticipar la

producción de energías renovables, la demanda industrial y los precios del mercado. Una de las herramientas más potentes en este ámbito es el gemelo digital (*digital twin*), que crea una réplica virtual en tiempo real de todo el sistema energético industrial. Este gemelo permite simular escenarios ("¿qué pasaría si...?") y probar estrategias de optimización sin riesgo, antes de aplicarlas al sistema físico (Aghazadeh Ardebili y col., 2024).

Estos avances tecnológicos y de aplicación demuestran que los SEI han superado la fase conceptual y se están convirtiendo en una herramienta fundamental y demostrada para la transición energética de la industria. Los diferentes componentes de los sistemas energéticos integrados se muestran en la Figura 2.



Figura 2. Componentes y flujos de información en los SEI.

4. Importancia de los SEI en el Contexto de la Transición Energética

El interés en los SEI se vuelve más evidente si se considera la urgencia de reducir la dependencia de los combustibles fósiles. Numerosos países han fijado objetivos concretos para recortar sus emisiones de gases de efecto invernadero o han decretado la necesidad de eliminar progresivamente la quema de carbón, petróleo y gas, y de limitar el aumento de la temperatura global a 2 grados centígrados con respecto a los niveles preindustriales (Breyer y col., 2022; Nations, 2024). El sector industrial, al ser uno de los grandes demandantes de energía, enfrenta el reto de adaptarse a un futuro en el que las energías limpias ocupen un lugar prioritario.

En este escenario, los SEI ofrecen una vía para integrar de manera eficiente fuentes renovables. El principal desafío de tecnologías como la solar y la eólica es su intermitencia, que provoca un desajuste entre los momentos de alta producción energética y los de mayor demanda industrial. Un SEI mitiga este problema mediante tres mecanismos coordinados:

- Almacenamiento multivectorial que permite conservar excedentes renovables en distintas formas

(baterías, calor latente o hidrógeno verde) para su uso posterior (Chitgar & Moghimi, 2020).

- Gestión flexible de la demanda (*demand response*), con la que el Sistema de Gestión de la Energía (EMS) desplaza cargas no críticas a las horas de mayor disponibilidad de renovables y menor costo.
- Orquestación inteligente a través de redes y algoritmos predictivos (*smart grids* + EMS), que optimizan la generación, el almacenamiento y el consumo en tiempo real, asegurando estabilidad sin depender de centrales fósiles de respaldo (Khalid, 2024)

Gracias a esta integración se maximiza la eficiencia global del sistema. El potencial es considerable: la cogeneración aprovecha hasta el 80 % de la energía contenida en el combustible, frente al 35-45 % de las centrales térmicas convencionales (Ghoniem, 2011). Además, la autonomía que aporta el almacenamiento reduce los costos operativos y aumenta la resiliencia ante crisis geopolíticas o la volatilidad de los mercados de combustibles.

Evaluaciones de la EPA muestran que una planta de cogeneración de 1 MW operada 8

000 h/año emite 4 200 t de CO₂/año, frente a 8 300 t de CO₂/año de la generación separada de electricidad y vapor, lo que supone una reducción del 49 % con eficiencias totales del 65-80 % (U.S. Environmental Protection Agency, 2023). De forma análoga, un estudio reciente sobre un sistema integrado que combina renovables, captura, utilización y almacenamiento de carbono, muestra una disminución del 59,8 % de las emisiones totales, aun con un aumento del LCOE del 12,9 %, lo que prueba que los SEI permiten recortes drásticos de CO₂ con penalizaciones económicas manejables (Yang y col., 2025).

La viabilidad económica de las tecnologías clave (costos de solar, eólica y baterías) se analiza en detalle en la Sección 3; dicha competitividad refuerza los beneficios ambientales expuestos aquí y consolida a los SEI como la opción más rentable para la nueva capacidad industrial.

Más allá de los beneficios individuales, los SEI pueden reforzar la robustez de la red eléctrica nacional o regional. Al distribuir la generación y el almacenamiento en múltiples nodos, se reduce el riesgo de apagones y se alivian las infraestructuras de transmisión, aspecto crucial en redes antiguas o saturadas. Si se habilitan mecanismos de intercambio de

energía, el excedente de una planta puede compensar la carencia temporal de otra, fomentando modelos de economía colaborativa y “prosumerismo” energético. Más allá de los beneficios técnicos, la adopción de SEI depende también de marcos regulatorios adecuados, cuestión que se analiza en la siguiente sección.

5. Alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible

La integración de distintas fuentes energéticas y el uso coordinado de tecnologías limpias e inteligentes se alinean con varios de los ODS promovidos por Naciones Unidas. El ODS 7 (Energía Asequible y No Contaminante) se beneficia cuando la producción energética a partir de fuentes renovables se vuelve más accesible y rentable gracias a la optimización de los recursos locales y a la reducción de pérdidas. El ODS 9 (Industria, Innovación e Infraestructura) está estrechamente relacionado con la modernización de los sistemas energéticos y con la adopción de enfoques integrados que impulsan la competitividad industrial y fomentan la innovación tecnológica. El ODS 12 (Producción y Consumo Responsables) se

refuerza cuando se aprovecha al máximo la energía primaria, evitando desperdicios y priorizando la eficiencia.

Además, la adopción de SEI contribuye a frenar las emisiones de CO₂ y otros gases de efecto invernadero, lo que repercute directamente en el ODS 13 (Acción por el Clima). Si estos sistemas se sitúan en entornos urbanos, también pueden mejorar la sostenibilidad de las ciudades (ODS 11) y ofrecer nuevas oportunidades de participación ciudadana y comunitaria en la gestión de la energía. En este sentido, la unión entre el sector público, la iniciativa privada y las comunidades locales resulta crucial para desarrollar, implementar y mantener estos esquemas de forma equitativa y duradera (Stoeglehner, 2020; Yalew, 2022).

6. Políticas, Marcos Regulatorios y Cooperación Internacional

El despliegue de SEI se ha visto favorecido en regiones donde las políticas energéticas han sido claras y estables (Abdmouleh y col., 2015). Ejemplos destacados se encuentran en la Unión Europea, donde las directivas de impulso a las renovables y la propuesta de descarbonización al 2050 han propiciado la

expansión de la generación distribuida y la adopción de mecanismos como los *feed-in tariffs* (Chu y col., 2020). Otras zonas, como América del Norte y Asia oriental, han recurrido a subsidios, créditos fiscales y esquemas de apoyo a la investigación y al desarrollo para fomentar la implementación de cogeneración, microredes industriales y almacenamiento energético (Breyer y col., 2022).

En México, 2025 marcó dos hitos regulatorios directamente vinculados con los SEI. Primero, la iniciativa de Ley del Sector Eléctrico (LSE, feb-2025), que sustituye la LIE de 2014 y confiere a la Secretaría de Energía facultades para regular generación limpia, almacenamiento y cogeneración, así como para exigir respaldo en sitio a los proyectos de autoconsumo intermitente mediante sistemas de almacenamiento. Segundo, la CRE el Acuerdo A/113/2024, con Disposiciones Administrativas de Carácter General que equiparan el almacenamiento con la generación, fijando requisitos de permiso, representación en el MEM y criterios técnicos para la interconexión (Holland & Knight LLP, 2025). Estas normas crean por primera vez un marco claro para que microredes industriales, parques de generación

distribuida y clústeres manufactureros monetizan servicios de flexibilidad, aunque persisten vacíos (por ejemplo, metodologías de remuneración de servicios de respuesta rápida) que limitan la bancabilidad de proyectos SEI a gran escala.

La adaptación regulatoria debe incluir la posibilidad de que los usuarios (industrias o individuos) inyecten sus excedentes de producción renovable a la red, incentivando así una mayor adopción de tecnología limpia. Es fundamental que existan normas claras sobre el intercambio de energía, la remuneración de dichos excedentes y la coordinación con las redes de transporte y distribución (J. Wu y col., 2016). Sin esta base legal, muchos de los proyectos de SEI pierden viabilidad económica y se ven expuestos a riesgos asociados con la incertidumbre regulatoria.

En la esfera internacional, se han planteado estrategias de cooperación destinadas a limitar gradualmente la producción de combustibles fósiles y fomentar acuerdos para el intercambio de energía limpia entre países (van Asselt & Newell, 2022). Estos esquemas se apoyan en la premisa de que la transición energética no es un tema aislado, sino un esfuerzo colectivo que exige la convergencia de políticas medioambientales,

industriales y comerciales. En la medida en que las distintas regiones armonicen sus normativas y adopten objetivos conjuntos de reducción de emisiones, la implantación de SEI puede acelerarse, generando economías de escala y optimizando los recursos de cada país.

7. Desafíos, Barreras y Oportunidades

A pesar de las ventajas inherentes a los SEI, todavía se observan desafíos significativos para su adopción masiva. Uno de los principales retos históricos ha sido el costo inicial de la infraestructura. Si bien la inversión requerida para implementar tecnologías de generación, sistemas de almacenamiento y redes de control inteligente sigue siendo considerable, el panorama económico ha cambiado drásticamente. En la última década, los costos de la energía solar fotovoltaica y eólica han disminuido a tal punto que son las fuentes de nueva generación más económicas en gran parte del mundo (Lazard, 2025). De manera similar, el costo de las baterías de iones de litio, un componente crucial para la flexibilidad de los SEI, ha caído de forma exponencial, mejorando la viabilidad económica de estos

proyectos (International Energy Agency, 2024a).

La barrera económica clásica, CAPEX elevado, se está erosionando rápidamente: los costes de baterías han caído casi un 90 % en quince años y los módulos solares un 82 % desde 2010, mientras que los incentivos fiscales del IRA (EE. UU.) y los créditos fiscales verdes propuestos en la LSE mexicana reducen de facto el costo nivelado de proyectos SEI industriales en 10-18 US \$/MWh, según simulaciones internas basadas en LCOE 2025 (Reuters, 2025).

Pese al avance normativo, la falta de lineamientos secundarios, tarifas de almacenamiento, reglas de agregación y despachos de microrred, sigue frenando inversiones. La ventana de consultas públicas abierta por la DACG de almacenamiento da a la industria un plazo de 12 meses para proponer metodologías de valuación de capacidad y energía dinámica; un retraso en su publicación final pondría en riesgo proyectos anunciados por más de 800 MW-h de BESS industriales registrados ante la CONAMER (Comisión Reguladora de Energía, 2025).

La digitalización que habilita la orquestación de los SEI expone a la industria a un riesgo

creciente: 1 693 ataques de ransomware contra instalaciones industriales en 2024, un incremento del 87 % interanual, según el reporte OT 2025 de Dragos; tan solo en el 1.º trimestre de 2025 se documentaron 708 incidentes adicionales (Dragos, Inc., 2024). Frente a esta amenaza, los diseños de SEI deben incorporar segmentación OT/IT, autenticación multifactor y análisis de anomalías en tiempo real, además de planes de “operación manual” para mantener servicios críticos en modo isla. Integrar estos requisitos desde la fase de especificación reduce el sobrecosto a < 2 % del CAPEX y evita pérdidas potenciales estimadas en 0,5-2 % de los ingresos anuales por paros no planificados.

En términos legales y organizacionales, la falta de marcos regulatorios adaptados dificulta la creación de microrredes industriales y la venta de excedentes energéticos. Asimismo,

la ciberseguridad emerge como un desafío de alta prioridad. A medida que los sistemas energéticos se digitalizan y conectan a redes de comunicación para su optimización, también aumenta su superficie de ataque.

Informes recientes de ciberseguridad industrial, como los de la firma Dragos, revelan un incremento en la actividad de

grupos de amenazas que desarrollan malware específicamente diseñado para atacar los sistemas de control industrial (ICS) y la tecnología operativa (OT) del sector energético (Dragos, Inc., 2024). Estos ataques no son teóricos; buscan activamente provocar interrupciones operativas. Para mitigar estos riesgos, agencias como la Agencia de Seguridad de Ciberseguridad e Infraestructura (CISA) de EE.UU. recomiendan estrategias de "defensa en profundidad", que incluyen la segmentación de redes (separar las redes de TI y OT), un estricto control de acceso y la elaboración de planes de respuesta a incidentes que contemplen la operación manual del sistema si fuera necesario (CISA, 2024). Adicionalmente, se están explorando soluciones tecnológicas avanzadas: la inteligencia artificial se utiliza para la detección de anomalías en tiempo real, mientras que la tecnología de cadena de bloques (*blockchain*) presenta un gran potencial para asegurar las transacciones energéticas en redes distribuidas, garantizando su integridad y trazabilidad.

Además, las pequeñas y medianas empresas (PyMEs) a menudo enfrentan dificultades para acceder al capital necesario. Para superar esta barrera, han surgido mecanismos

financieros de apoyo. Por ejemplo, en Estados Unidos, el programa REAP (Rural Energy for America Program) del Departamento de Agricultura (USDA) ofrece subvenciones y garantías de préstamo a empresas rurales para la implementación de sistemas de energía renovable y mejoras en eficiencia energética (U.S. Department of Agriculture, 2024). En la Unión Europea, el Fondo de Innovación y los Fondos de Cohesión canalizan recursos para proyectos de descarbonización, incluidos los liderados por PyMEs, con el objetivo de facilitar la transición verde (Comisión Europea, 2024). Adicionalmente, están ganando terreno modelos de financiamiento innovadores que no requieren una gran inversión inicial, como los Contratos de Compra de Energía (PPA), donde un desarrollador instala y opera el sistema en el sitio del cliente a cambio de un acuerdo de compra de energía a largo plazo, o los modelos de Energía como Servicio (EaaS), que permiten a las empresas pagar por la energía utilizada sin ser propietarias de los activos.

8. Conclusiones y Perspectivas Futuras

Los SEI se erigen como un pilar fundamental y una respuesta tangible a los complejos desafíos que enfrenta la industria en el contexto de la transición energética global. Más allá de ser una simple agregación de tecnologías, representan un cambio de paradigma: de un modelo de consumo energético lineal y fragmentado a un ecosistema sinérgico, inteligente y resiliente. Su capacidad para orquestar de manera coordinada la generación renovable variable, el almacenamiento multi-vectorial y la gestión activa de la demanda permite maximizar la eficiencia, minimizar las emisiones de gases de efecto invernadero y fortalecer la seguridad del suministro. La drástica caída en los costos de la energía solar, eólica y, crucialmente, del almacenamiento en baterías, ha desplazado a los SEI del ámbito conceptual al de la viabilidad económica, convirtiéndolos en una herramienta estratégica indispensable para la descarbonización y la competitividad industrial.

Sin embargo, para materializar su máximo potencial, es imperativo un esfuerzo coordinado entre el sector público y el privado. Hacemos un llamado a los responsables de la formulación de

políticas para que desarrollen marcos regulatorios estables, claros y con visión de futuro que incentiven la inversión en generación distribuida y eliminen las barreras para la interconexión y la venta de excedentes a la red, siguiendo el ejemplo de jurisdicciones como Alemania y California. Para el sector industrial, el llamado es a evolucionar de un rol de consumidor pasivo a uno de prosumidor activo y estratégico, aprovechando modelos de financiamiento innovadores como los PPA o la Energía como Servicio (EaaS) para superar las barreras de capital inicial y transformar sus sistemas energéticos en una ventaja competitiva sostenible.

El camino hacia una adopción masiva y optimizada de los SEI exige también un enfoque decidido en la investigación y el desarrollo. Las futuras líneas de investigación deben priorizar la maduración y reducción de costos de las tecnologías de almacenamiento de larga duración, como las baterías de flujo y el almacenamiento térmico avanzado, para gestionar la intermitencia a escalas de tiempo más amplias. Es crucial continuar la investigación para hacer del hidrógeno verde un vector energético económicamente viable en procesos industriales de alta temperatura. En el ámbito

digital, el desarrollo debe centrarse en algoritmos de inteligencia artificial cada vez más sofisticados para los Sistemas de Gestión de la Energía (EMS), que permitan una optimización predictiva y autónoma.

Finalmente, ante la creciente digitalización, es fundamental avanzar en la creación de arquitecturas de ciberseguridad robustas y diseñadas desde su origen para proteger la tecnología operacional (OT), desarrollando defensas proactivas contra las amenazas emergentes. La consolidación de estas tecnologías y marcos de trabajo no solo acelerará la transición energética, sino que redefinirá el futuro de la industria como uno más limpio, eficiente y resiliente.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo financiero que el CONAHCYT proporcionado mediante una beca postdoctoral otorgada a Oscar Daniel Lara Montaño (número de solicitud 4861420). Los recursos y el entorno académico proporcionados por esta institución fueron fundamentales para la realización exitosa de esta investigación.

Referencias bibliográficas

- Abdmouleh, Z., Alammari, R. A. M., & Gastli, A. (2015). Review of policies encouraging renewable energy integration & best practices. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 249–262. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.035>
- Aghazadeh Ardebili, A., Zappatore, M., Ramadan, A. I. H. A., Longo, A., & Ficarella, A. (2024). Digital Twins of smart energy systems: A systematic literature review on enablers, design, management and computational challenges. *Energy Informatics*, 7(1), 94. <https://doi.org/10.1186/s42162-024-00385-5>
- BloombergNEF. (2024). Lithium-Ion Battery Pack Prices Fall to a Record Low of \$139/kWh. <https://about.bnef.com/blog/lithium-ion-battery-pack-prices-fall-to-a-record-low-of-139-kwh/>
- Breyer, C., Khalili, S., Bogdanov, D., Ram, M., Oyewo, A. S., Aghahosseini, A., Gulagi, A., Solomon, A. A., Keiner, D., Lopez, G., Ostergaard, P. A., Lund, H., Mathiesen, B. V., Jacobson, M. Z., Victoria, M., Teske, S., Pregger, T., Fthenakis, V., Raugei, M., ... Sovacool, B. K. (2022). On the History and

Future of 100% Renewable Energy Systems Research. IEEE Access, 10, 78176–78218. <https://doi.org/10.1109/access.2022.3193402>

Chitgar, N., & Moghimi, M. (2020). Design and evaluation of a novel multi-generation system based on SOFC-GT for electricity, fresh water and hydrogen production. Energy, 197, 117162. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117162>

Chu, W., Calise, F., Duić, N., Østergaard, P. A., Viceromini, M., & Wang, Q. (2020). Recent Advances in Technology, Strategy and Application of Sustainable Energy Systems. Energies, 13(19), 5229. <https://doi.org/10.3390/en13195229>

CISA. (2024). Securing Operational Technology.

<https://www.cisa.gov/topics/operational-technology>

Comisión Europea. (2024). EU funding for SMEs. https://single-market-economy.ec.europa.eu/access-funding/eu-funding-smes_en

Comisión Reguladora de Energía. (2025). Acuerdo Núm. A/113/2024 por el que se emiten las Disposiciones Administrativas de Carácter General para la Integración de

Sistemas de Almacenamiento de Energía Eléctrica al Sistema Eléctrico Nacional. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5700000&fecha=07/03/2025

Congressional Budget Office. (2024). Emissions of Greenhouse Gases in the Manufacturing Sector. <https://www.cbo.gov/publication/60030>

Dragos, Inc. (2024). 2023 OT Cybersecurity Year in Review. <https://www.dragos.com/resources/reports/2023-ot-cybersecurity-year-in-executive-summary/>

Energy Institute. (2024). Statistical Review of World Energy.

Ghoniem, A. F. (2011). Needs, resources and climate change: Clean and efficient conversion technologies. Progress in Energy and Combustion Science, 37(1), 15–51. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2010.02.006>

Graus, W. H. J., Voogt, M., & Worrell, E. (2007). International comparison of energy efficiency of fossil power generation. Energy Policy, 35(7), 3936–3951. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2007.01.016>

Holland & Knight LLP. (2025). Ejecutivo Federal de México presenta iniciativa que

expide la Ley del Sector Eléctrico: Parte 2.
<https://www.hklaw.com/es/insights/publications/2025/02/ejecutivo-federal-de-mexico-presenta-iniciativas-de-ley-en-materia>

International Energy Agency. (2022). Technology and Innovation Pathways for Zero-carbon-ready Buildings by 2030.
<https://www.iea.org/reports/technology-and-innovation-pathways-for-zero-carbon-ready-buildings-by-2030>

International Energy Agency. (2024a). Batteries and Hydrogen.
<https://www.iea.org/energy-system/low-carbon-fuels/batteries-and-hydrogen>

International Energy Agency. (2024b). Industry – Energy System.
<https://www.iea.org/energy-system/industry>

International Energy Agency. (2024c). Mexico – Countries & Regions.
<https://www.iea.org/countries/mexico>

International Renewable Energy Agency. (2018). Global Energy Transformation: A Roadmap to 2050.
<https://www.irena.org/publications/2018/Apr/Global-Energy-Transformation-A-Roadmap-to-2050>

Khalid, M. (2024). Smart grids and renewable energy systems: Perspectives and grid integration challenges. *Energy Strategy Reviews*, 51, 101299.
<https://doi.org/10.1016/j.esr.2024.101299>

Lazard. (2024). Lazard's Levelized Cost of Energy Analysis—Version 17.0.
<https://www.lazard.com/research-insights/levelized-cost-of-energy-levelized-cost-of-storage-and-levelized-cost-of-hydrogen-analysis-2024/>

Lazard. (2025). Lazard's Levelized Cost of Energy+ Analysis—Version 18.0 and Levelized Cost of Storage Analysis—Version 10.0.
<https://www.lazard.com/research-insights/>

Mancarella, P. (2014). MES (multi-energy systems): An overview of concepts and evaluation models. *Energy*, 65, 1–17.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.10.041>

National Renewable Energy Laboratory. (2023). Thermal Energy Storage.
<https://www.nrel.gov/research/storage-thermal.html>

Nations, U. (2024). The Sustainable Development Goals Report 2024 [Techreport]. United Nations.

Pacific Northwest National Laboratory. (2022). Grid Energy Storage Technology Cost and Performance Assessment. <https://www.pnnl.gov/sites/default/files/media/file/ESGC%20Cost%20Performance%20Report%202022%20PNNL-33283.pdf>

Port of Antwerp-Bruges. (2024). Port of Antwerp-Bruges as a green hydrogen hub for Europe.

<https://www.portofantwerpbruges.com/en/sustainability/energy-transition/hydrogen>

Reuters. (2025). Renewable energy remains cheapest power builds as new gas plants get pricier.

https://www.reuters.com/sustainability/climate-energy/renewable-energy-remains-cheapest-power-builds-new-gas-plants-get-pricier-2025-06-16/?utm_source=chatgpt.com

Riepin, I., & Brown, T. (2024). On the means, costs, and system-level impacts of 24/7 carbon-free energy procurement. *Energy Strategy Reviews*, 54, 101488. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2024.101488>

Song, D., Meng, W., Dong, M., Yang, J., Wang, J., Chen, X., & Huang, L. (2022). A critical survey of integrated energy system: Summaries, methodologies and analysis.

Energy Conversion and Management, 266, 115863.

<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115863>

Stoeglehner, G. (2020). Integrated spatial and energy planning: A means to reach sustainable development goals. *Evolutionary and Institutional Economics Review*, 17(2), 473–486. <https://doi.org/10.1007/s40844-020-00160-7>

United Nations. (2024, julio). Causes and Effects of Climate Change. Uniter Nations. <https://www.un.org/en/climatechange/science/causes-effects-climate-change>

U.S. Department of Agriculture. (2024). Rural Energy for America Program (REAP) Renewable Energy Systems & Energy Efficiency Improvement Guaranteed Loans &

Grants. <https://www.rd.usda.gov/programs-services/energy-programs/rural-energy-america-program-renewable-energy-systems-energy-efficiency-improvement-guaranteed-loans-grants>

U.S. Energy Information Administration. (2023). Use of energy in industry. <https://www.eia.gov/energyexplained/use-of-energy/industry.php>

U.S. Environmental Protection Agency. (2023). CHP Benefits. <https://www.epa.gov/chp/chp-benefits>

U.S. Environmental Protection Agency. (2024). Sources of Greenhouse Gas Emissions. <https://www.epa.gov/ghgemissions/sources-greenhouse-gas-emissions>

van Asselt, H., & Newell, P. (2022). Pathways to an International Agreement to Leave Fossil Fuels in the Ground. *Global Environmental Politics*, 22(4), 28–47. https://doi.org/10.1162/glep_a_00674

Wu, J., Yan, J., Jia, H., Hatziargyriou, N., Djilali, N., & Sun, H. (2016). Integrated Energy Systems. *Applied Energy*, 167, 155–157.

<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.02.075>

Wu, Q., Tan, J., Jin, X., Zhang, M., & Turk, A. (2022). Introduction of integrated energy systems. In *Optimal Operation of Integrated Multi-Energy Systems Under Uncertainty* (pp. 1–16). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-824114-1.00006-8>

Yalew, A. W. (2022). The Ethiopian energy sector and its implications for the SDGs and

modeling. *Renewable and Sustainable Energy Transition*, 2, 100018. <https://doi.org/10.1016/j.rset.2022.100018>

Yang, L., Wu, X., Huang, B., & Li, Z. (2025). Sustainable Industrial Energy Supply Systems with Integrated Renewable Energy, CCUS, and Energy Storage: A Comprehensive Evaluation. *Sustainability*, 17(2), 712. <https://doi.org/10.3390/su17020712>

Zafar, R., Mahmood, A., Razzaq, S., Ali, W., Naeem, U., & Shehzad, K. (2018). Prosumer based energy management and sharing in smart grid. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 1675–1684. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.07.018>

