

## Bases para el desarrollo y aplicación de Gemelos Digitales en la industria de la energía eléctrica

Alvarez, Gonzalo; Kröhling, Dan; Martinez, Ernesto

### Gonzalo Alvarez

galvarez@santafe-conicet.gov.ar  
Instituto de Desarrollo y Diseño (INGAR) –  
CONICET – UTN, Argentina

### Dan Kröhling

d.krohling@santafe-conicet.gov.ar  
Instituto de Desarrollo y Diseño (INGAR) –  
CONICET – UTN, Argentina

### Ernesto Martinez

ecmarti@santafe-conicet.gov.ar  
Instituto de Desarrollo y Diseño (INGAR) –  
CONICET – UTN, Argentina

### Ingenio Tecnológico

Universidad Tecnológica Nacional, Argentina  
ISSN-e: 2618-4931  
Periodicidad: Frecuencia continua  
vol. 5, e043, 2023  
ingenio@frlp.utn.edu.ar

Recepción: 03 Diciembre 2023  
Aprobación: 04 Diciembre 2023  
Publicación: 04 Diciembre 2023

URL: <http://portal.amelica.org/ameli/journal/266/2663842007/>



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-  
NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional.

**Resumen:** En la actualidad, la expansión y mejora de los sistemas de energía eléctrica se realiza de manera integral. Esto hace que en los sistemas actuales se busque la incorporación de nuevas tecnologías y enfoques en el marco de la Industria 4.0. A raíz de esto, una de las tecnologías que ha cobrado importancia en los últimos años es la de los llamados gemelos digitales.

Un gemelo digital es una representación virtual, parcial o completa, de un sistema físico o proceso que permanentemente evoluciona a la par del sistema o proceso real. Un vehículo, una turbina eólica o una ciudad entera pueden representarse mediante gemelos digitales. Para implementar y operar estos gemelos digitales es necesaria la utilización de sensores en el sistema físico o proceso para recoger información en tiempo real del estado de funcionamiento que permite adaptar el comportamiento simulado.

Este estudio tiene como objetivo promover la aplicación de la tecnología de gemelos digitales en sistemas eléctricos, además de discutir los desafíos para su implementación. Se presenta una propuesta para el desarrollo y aplicación de la tecnología de gemelos digitales en diferentes campos, con preferencia en el de la generación eléctrica.

**Palabras clave:** Energías renovables, Gemelo Digital, Sistemas eléctricos, Energía Sostenible.

**Abstract:** Nowadays, the expansion and improvement of electric power systems is carried out in a comprehensive manner. This means that the incorporation of new technologies and approaches are being sought in the current systems to implement Industry 4.0. As a result, one of the technologies that has gained importance in recent years is the so-called digital twins.

A digital twin is a partial or complete virtual representation of a physical system or process that evolves continuously along with the real system or process. A vehicle, a wind turbine or an entire city can be represented by digital twins. To implement and operate these digital twins, it is necessary to use sensors in the physical system or process to collect real-time information of the operating state so that the simulated behavior can be adapted.

This study aims to promote the application of digital twin technology in electrical systems, as well as discuss the challenges for its implementation. A proposal is presented for the development and application of digital twin technology in different fields, preferably in the field of power generation. The objective of this study is to provide a reference for the applications of digital twin technology in the smart energy industry.

**Keywords:** Renewable Energies, Digital Twin, Electrical Systems, Sustainable Energy.

## INTRODUCCIÓN

El cambio climático es un problema urgente que afecta la sustentabilidad del planeta y la continuidad de las distintas formas de vida. Los efectos devastadores del cambio climático, como el aumento del nivel del mar, los eventos climáticos extremos y la pérdida de biodiversidad, son cada vez más obvios. La comunidad científica y gubernamental está trabajando para encontrar soluciones efectivas para reducir la contaminación ambiental, que es una de las principales causas del cambio climático. La contaminación mundial, especialmente las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) de diversas fuentes antropogénicas, ha tenido un impacto alarmante en nuestro planeta. La actividad humana, especialmente desde la Revolución Industrial, ha liberado masivamente CO<sub>2</sub> a la atmósfera, desencadenando el efecto invernadero (Qiao et al., 2019).

Las emisiones de CO<sub>2</sub> y otros gases de efecto invernadero atrapan el calor solar en la atmósfera provocando un aumento de la temperatura global conocido como “calentamiento global” a escala planetaria. Este cambio climático acelerado ha tenido una serie de impactos devastadores y perturbadores en nuestro medio ambiente y ecosistemas (Tollefson, 2021). Algunos de los impactos más preocupantes incluyen el deshielo de los glaciares y las capas de hielo en los polos (“So Much Ice Is Melting That Earth’s Crust Is Moving,” 2021), el aumento del nivel del mar y la acidificación de los océanos, lo que amenaza la biodiversidad marina. Además, el cambio climático ha contribuido a la ocurrencia de eventos climáticos extremos, que más frecuentes y severos, como olas de calor intensas, inundaciones devastadoras y sequías prolongadas. Es por ello que la transición energética (Hamid et al., 2022) y la descarbonización (Cacciari & Singhal, 2022) son dos de los desafíos más importantes que enfrenta el mundo para garantizar la continuidad de la vida y la biodiversidad de la flora y la fauna tal como la conocemos (Bridge & Gailing, 2020).

Los gemelos digitales son una poderosa herramienta que puede contribuir en el cambio fundamental de un sistema energético dependiente de combustibles fósiles hacia uno impulsado por fuentes de energía renovables. Esta es una tarea compleja que requiere de soluciones innovadoras y precisas. Aun así, los gemelos digitales pueden ayudar a mejorar la eficiencia energética, reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y garantizar el suministro eléctrico (Ghenai et al., 2022). También pueden ayudar a identificar oportunidades de inversión en infraestructura y a mejorar la resiliencia del sistema energético.

La incorporación de nuevas tecnologías en los sistemas de energía eléctrica involucra fuentes renovables y tecnologías de generación novedosas que no fueron populares en el pasado (generación fotovoltaica y eólica, vehículos eléctricos, etc.). Una de las principales formas de mejorar la eficiencia del sistema eléctrico actual es a través de la implementación de tecnologías novedosas en el campo de los procesos de control y operación (esto abarca las etapas de generación, transmisión y distribución). Entre dichas tecnologías con gran potencial de aplicación se encuentran los llamados gemelos digitales.

El término “gemelo digital” (o DT, por sus siglas en inglés) ha adquirido gran relevancia en la actualidad, pero se inventó hace más de 20 años (Batty, 2018). Los DTs se mencionaron por primera vez en (Gelernter, 1991), pero fue Michael Grieves en 2002, durante una presentación en la Universidad de Michigan a la industria para la formación de un centro de Gestión del Ciclo de Vida del Producto (PLM), quien introdujo el concepto con todos los elementos del DT: espacio real y virtual, y el vínculo entre esos espacios (Grieves, 2016). Sucintamente, un DT podría definirse como una representación dinámica virtual de un sistema físico o de cualquier tipo de proceso que está conectado a él a lo largo de todo el ciclo de vida para el intercambio bidireccional de datos (Trauer et al., 2020).

Los sistemas físicos, como un coche, un camión, un aerogenerador o una ciudad entera, pueden representarse mediante un DT. Un DT de este tipo de sistemas puede simular fielmente el comportamiento del mismo en tiempo real teniendo en cuenta los datos adquiridos a partir de sensores inteligentes (Al-Waisi & Agyeman, 2018). En algunos campos específicos, la NASA aplica DTs para observar el estado de las naves espaciales. Empresas del campo de los sistemas de energía eléctrica como General Electric los utilizan para recrear las operaciones de las turbinas eólicas (Tao & Qi, 2019).

Los procesos industriales también pueden representarse y simularse mediante DTs, y este tipo de aplicaciones ya se están implementando en muchos ámbitos. Aquí, el término "proceso" se refiere a una colección de acciones o procesos interconectados, físicos y abstractos, con un objetivo final específico. Por ejemplo, en (Galuzin et al., 2022), se propone un DT autónomo de una empresa o proyecto para la fabricación de aviones y coches eléctricos. Con la ayuda de un DT, un sistema físico o cualquier tipo de proceso puede reproducirse digitalmente, analizarse y optimizarse en tiempo real. Los DTs ya se utilizan en sectores como la fabricación, los sistemas de energía eléctrica y la industria aeroespacial para mejorar el flujo de trabajo y la eficiencia. En las fábricas de automóviles, los DTs se implantan en la cadena de montaje para evitar costosas pérdidas durante el tiempo de diseño. El uso de DTs también es importante como soporte para la toma de decisiones en la logística y el transporte ya que puede utilizarse para controlar el estado de barcos, aviones y camiones mediante sensores inteligentes. DHL es una de las mayores empresas de este sector y utiliza los DTs para tres fines principales: DT para almacenes, DTs para la cadena de suministro y servicios logísticos postventa (DHL, 2022). En el ámbito de la salud, los DTs se utilizan para recrear virtualmente "teatro de operaciones" en quirófanos para la formación en prácticas quirúrgicas y para evitar posibles infecciones manteniendo condiciones asépticas.

Existen diversas motivaciones para adoptar estas detalladas representaciones digitales es como herramienta de digitalización. En primer lugar, los DTs pueden utilizarse para realizar simulaciones antes de crear el sistema o proceso físico en aras de predecir y comprender mejor su posible funcionamiento. En general, un DT podría considerarse el objeto actual del diseño. Un objeto de este tipo permite reducir los costes de funcionamiento y desarrollo cuando es necesario diseñar y crear un nuevo producto o un servicio, junto con la evaluación de un ciclo de desarrollo totalmente informatizado, desde el diseño hasta la implementación e incluso el desmantelamiento.

En segundo lugar, los DTs utilizan sensores en el sistema o proceso físico durante el funcionamiento para recoger datos en tiempo real sobre los resultados, el estado de funcionamiento, las condiciones o cualquier información relevante que conecte el sistema o proceso con el entorno. Los datos recogidos se analizan y administran para actualizar el DT y ofrecen la posibilidad de supervisar, controlar y optimizar el funcionamiento en tiempo real. Además, los DTs proporcionan una ayuda primordial a los humanos en la simplificación y comprensión de las tareas al otorgar información relevante a partir de los datos disponibles. Por ejemplo, un DT podría englobar un modelo de simulación detallado que puede actualizarse y evolucionar continuamente junto con el sistema o proceso físico durante el funcionamiento en tiempo real.

En tercer lugar, los datos en tiempo real recogidos por los sensores permiten detectar perturbaciones no medidas, anticipar circunstancias cambiantes, diagnosticar el mal funcionamiento de componentes, la optimización dinámica de la supervisión de condiciones y la ayuda durante el desarrollo de proyectos para un nuevo producto o servicio. El DT podría mejorarse aún más con modelos de aprendizaje automático para predecir comportamientos variables en el tiempo de un sistema físico o proceso industrial que ha dado cambios en su estado de funcionamiento o condición por un evento inesperado en la simulación de escenarios futuros. Además, el DT podría estar dotado de la capacidad de reaccionar de forma autónoma a la respuesta del sistema para optimizar o controlar todo el sistema al tiempo que salvaguarda un funcionamiento fiable.

La problemática de la toma de decisiones distribuida que los prosumidores o gestores de comunidades encuentran en los sistemas de energía eléctrica pone de relieve el papel crucial que desempeñan los DTs para la abordar problemas de coordinación de múltiples agentes y la monitorización del estado o situación

del sistema en tiempo real. Los DTs tienen la capacidad de mejorar considerablemente el control de las operaciones energéticas dispersas por la red con la inclusión de software adecuado y sensores inteligentes. Los DTs permiten estrategias más eficaces del sistema energético al ofrecer una representación digital exhaustiva, mejorando la capacidad de decisión de los operadores encargados de las fases de generación, transmisión y distribución. Con el fin de añadir objetividad al proceso de toma de decisiones, los DTs también tienen la capacidad de analizar las interacciones entre los diversos elementos del entorno, así como evaluar la eficacia de las transacciones de electricidad para los pequeños prosumidores y además tener en cuenta las relaciones de las partes interesadas entre los prosumidores y las empresas de distribución (Fichera et al., 2020). Todos estos elementos son claves para permitir una optimización distribuida y en tiempo real de los recursos, al tiempo que se tienen en cuenta las necesidades individuales de las partes interesadas y los aspectos de bienestar social de la red.

Los DTs podrían utilizarse en los sistemas de energía eléctrica para reducir los costes operativos, aumentar los ingresos, evitar cortes o apagones, automatizar la toma de decisiones y mejorar la salud general del sistema (Fichera et al., 2020). Hay ejemplos notables que muestran las ventajas de combinar los DTs con redes neuronales o enfoques de programación matemática para evaluar y mejorar el rendimiento de los generadores eléctricos y la planificación de los recursos energéticos, a pesar de la escasez de investigaciones sobre el tema. A continuación, se presentan algunos ejemplos. En (Zhang et al., 2020) se evalúa el funcionamiento de una red inteligente (o SG, por sus siglas en inglés) combinando nociones de SG con el rendimiento de DTs para determinar problemas y resolverlos antes que el rendimiento en el mundo real. Los autores de (Podvalny & Vasiljev, 2021) analizan el funcionamiento de una SG con un DT utilizando redes neuronales para determinar las mejores opciones de funcionamiento. Asimismo, en (Darbali-Zamora et al., 2021) se optimiza la planificación de recursos energéticos para rutas de distribución utilizando un DT. El método propuesto utiliza la optimización por enjambre de partículas y otras técnicas de simulación. Además, en (Cioara et al., 2021) se puede encontrar una revisión de la literatura actual sobre la operación de los sistemas eléctricos de potencia y las SG.

Aunque no existen restricciones técnicas para la aplicación de los DTs, se necesita más investigación y desarrollo para aumentar la operación y el mantenimiento de los sistemas de energía eléctrica. Los recursos energéticos renovables descentralizados, como las células fotovoltaicas y las turbinas eólicas, ya están disponibles e integrados con dispositivos de almacenamiento de energía, mientras que los sensores inteligentes son capaces de capturar datos y actuar a petición (Plewnia, 2019). Los DTs están capacitados para representar centrales eléctricas, líneas de transmisión y centros de distribución. Sin embargo, muchos aspectos metodológicos y de implementación no están del todo desarrollados para mejorar las operaciones y el mantenimiento de los sistemas de energía eléctrica.

## DESARROLLO

Un DT creado para representar sistemas de energía eléctrica depende principalmente de los aspectos que el diseñador de dicho DT quiera tener en cuenta. Sin embargo, las capacidades del DT estarán limitadas por la cantidad, variedad, calidad y precisión de los datos obtenidos de los sensores inteligentes ubicados en el sistema. En este sentido, los datos permiten actualizar los modelos que representan los comportamientos del sistema e incluso las acciones autónomas que los sensores inteligentes pueden ejecutar para modificar cualquier comportamiento incorrecto del sistema y diagnosticar una falla o condición no deseada. Por ello, es obligatorio comprender qué tipo de modelo son necesarios (puramente inductivo, basado en principios fundamentales o híbridos) y qué datos adquirir para diseñar un DT para sistemas eléctricos de potencia.

## 1. Gemelos digitales aplicados a sistemas de energía eléctrica

La complejidad de la estructura de un DT para un dado sistema eléctrico de potencia se deberá diseñar en función del tipo de aplicación prevista. Los sistemas eléctricos actuales constituyen una obra de ingeniería muy compleja. Esto se debe a que existe una gran cantidad de datos generados que deben ser recolectados, lo que a su vez permite a las empresas encargadas de las etapas de generación, transmisión o distribución realizar numerosos estudios, planificar y desarrollar tareas de operación o mantenimiento, etc. Una vez diseñado el DT para un sistema eléctrico (tanto para todo el sistema como para una parte, como un generador o un grupo de generadores), los operadores del sistema y el DT reciben esta gran cantidad de datos, dependiendo de la etapa en la que se esté operando (consumos, temperatura, precios de la electricidad, disponibilidad de generación). Estos datos se introducen en el DT y se procesan para determinar las mejores decisiones. En este sentido, los DTs proporcionan valiosos conocimientos y predicciones que pueden ser utilizados por los operadores del sistema eléctrico para optimizar sus estrategias de oferta y responder a los cambios en tiempo real en el sistema eléctrico, lo que en última instancia conduce a un funcionamiento más eficiente, fiable y rentable del sistema eléctrico.

La literatura relacionada podría arrojar algo de luz sobre la complejidad de construir un DT para sistemas de energía eléctrica. Por ejemplo, los modelos dinámicos RMS (que suelen utilizar una representación fasorial de las redes) y EMT (EMT por Electromagnetic Transient, que proporciona más detalles de funcionamiento al representar los sistemas) implican la realización de DTs a gran escala (Chow & Sanchez - Gasca, 2019). El diseño de un DT para sistemas de potencia basados en datos se realiza mediante el uso de métodos basados en diseños de caja negra o “data-driven” (Palensky et al., 2022). En la literatura, existe un gran número de trabajos en los que se utilizan técnicas de aprendizaje automático para representar los comportamientos de sistemas físicos con el fin de abordar este problema (Chakraborty & Adhikari, 2021). En (Ladj et al., 2021), se presenta un método de aprendizaje automático no supervisado para procesar los datos recogidos y decodificar el contexto operativo para el dominio de la fabricación. En (Kaur et al., 2020), se estudia la relación entre los DTs y las técnicas de aprendizaje automático. En (Ladj et al., 2021) se hace una revisión exhaustiva de todas las aplicaciones de los algoritmos de aprendizaje automático.

Basándose en (Palensky et al., 2022), se puede realizar una clasificación de los DTs en los sistemas eléctricos según el tipo de aplicación:

- i. Cuadros de mando (también llamados sombras digitales): dedicados a realizar una visualización del estado del proceso.
- ii. Gemelos estáticos (relacionados con el tamaño): utilizados para optimizar el diseño de un sistema eléctrico.
- iii. Gemelos de diseño dinámico: optimizan un proceso para que funcione de forma dinámica.
- iv. Detector de anomalías: recorre el sistema representado en tiempo real, realizando comparaciones y determinando fallos o disfunciones.
- v. Gemelos de observación y programación: se utilizan para predecir escenarios futuros basándose en registros anteriores (meteorología, rendimiento, viento, registro fotovoltaico).
- vi. Control predictivo: controla el comportamiento futuro del sistema a costa de una gran potencia de procesamiento y algoritmos computacionales rápidos para resolver problemas complejos.

Para obtener una representación digital de un sistema eléctrico (o de una parte del sistema), la Figura 1 es útil para visualizar la metodología propuesta en el presente trabajo. Como ya se ha mencionado, la primera parte consiste en la recogida de datos del sistema físico. Posteriormente, estos datos son almacenados y analizados por el DT. Basándose en un enfoque metodológico determinado (como las técnicas clásicas de optimización o simulación), el DT determina la configuración de parámetros o acciones a realizar para mantener el funcionamiento del sistema en el mejor estado posible. Posteriormente, el operador o los sistemas

automáticos realizarán las maniobras sugeridas por el DT tras un proceso de análisis que puede incluir incluso conocimiento heurístico. Una vez realizadas las acciones requeridas, el sistema debería experimentar un cambio que se ajuste a lo que el DT suponía o predecía. A continuación, se recogen los nuevos datos que miden el cambio de estado del sistema físico. Esta medición sirve de retroalimentación para el DT, en el que se comparan los resultados y a partir de lo cual se pueden detectar situaciones particulares que pueden determinar un comportamiento incorrecto o incluso una falla.

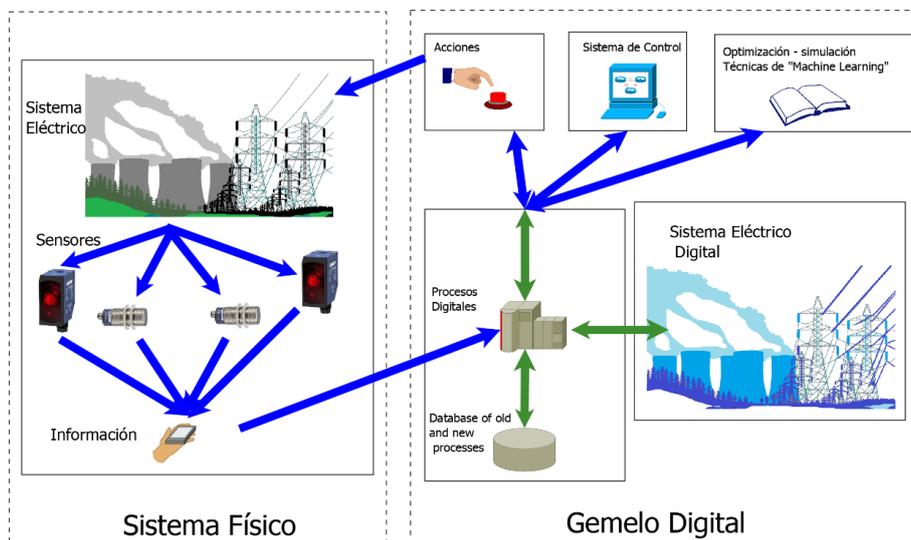


FIGURA 1

Esquema para la creación de DTs aplicados a sistemas de energía eléctrica.

La Figura 2 muestra el esquema de diseño y funcionamiento de un DT aplicado a una SG dentro de un mercado entre pares (peer-to-peer o P2P) del tipo completo. Un sistema eléctrico P2P es un mercado en el que los consumidores y los productores de energía pueden comerciar directamente entre sí, sin realizar transacciones con una empresa de servicios públicos. Diversas tecnologías, como la tecnología Blockchain (Kröhling & Martínez, 2019), pueden utilizarse para registrar las transacciones y garantizar la seguridad de la red. Una discusión más profunda sobre los sistemas P2P se encuentra en (Alvarez, 2022).

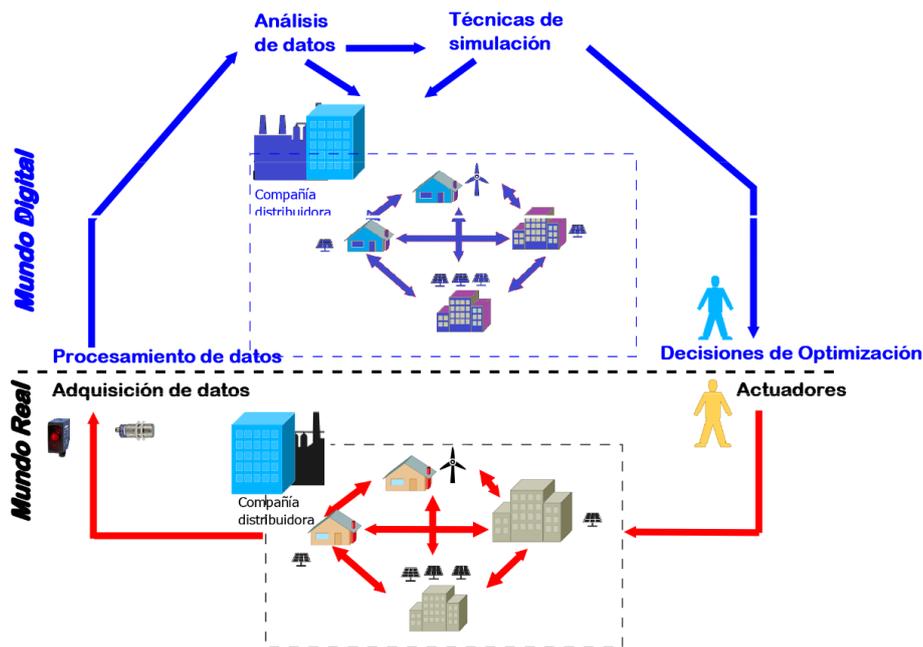


FIGURA 2

Esquema para un DT aplicado a un SG considerando un modelo de mercado P2P completo.

En la Figura 2, el diseño se compone de un operador para toda la red. Por lo tanto, incluye una representación detallada de la operación (tan precisa como se requiera) del sistema físico de la SG. Es importante señalar que se eligió un modelo P2P completo como modelo a representar en el esquema, pero los DTs pueden utilizarse en la representación de cualquier naturaleza de mercado de prosumidores.

## 2. Un gemelo digital para redes eléctricas inteligentes

Un DT para administrar y operar eficientemente una SG tendrá una gran cantidad de datos o insumos informativos para analizar, así como problemas que atender. Por ejemplo, las disponibilidades de los generadores dependen de las fuentes de generación. Si por ejemplo se consideran generadores térmicos, los insumos se refieren a los niveles actuales de generación, límites, horas en operación, horas mínimas que deben estar en estado de apagado, horas mínimas que deben estar en estado de encendido y la disponibilidad de su combustible. Si los generadores disponibles corresponden a tecnologías renovables, los principales insumos están mayoritariamente relacionados con la disponibilidad de estas fuentes. En el caso de la generación fotovoltaica, el dato principal es la incidencia solar para los colectores con base en la previsión de disponibilidad de este tipo de energía. Para la generación eólica, la disponibilidad de la fuente está preprogramada en función de la previsión de viento en tiempo real, directamente relacionada con las mediciones obtenidas con anemómetros.

Las condiciones de la red también son importantes para un DT de SG. Se pueden observar muchos problemas como desbordamientos de línea. No es posible transmitir la generación programada de un generador o una transacción P2P programada entre prosumidores si la línea correspondiente no soporta la cantidad de electricidad calculada. Por estas razones, el modelo debe considerar varios factores con respecto a las redes eléctricas, por ejemplo, los flujos máximos que las líneas pueden soportar. En este sentido, el DT debe analizar cada una de las transacciones que se calcularon y su impacto en la red considerando las restricciones apuntadas.

Otro factor importante a tener en cuenta es la correcta especificación de los requerimientos que se espera que el DT pueda cumplir. Un DT debe crearse de acuerdo a las necesidades de la empresa o entidad que decida adoptarlo para mejorar su funcionamiento. Por ejemplo, se puede diseñar un DT para ayudar a las funciones de un simple prosumidor, un administrador de una comunidad de prosumidores, una empresa distribuidora, una empresa de transmisión de alta tensión, una empresa generadora, una ISO o una mezcla entre cualquiera de ellas.

De acuerdo a las diversas problemáticas analizadas, la Figura 3 presenta un posible diagrama de flujos para un DT de una SG. Este esquema involucra las tareas principales que debería realizar tal DT. Inicialmente, el DT obtiene los datos en tiempo real a partir de sensores inteligentes ubicados a lo largo de toda la SG. Esos datos son almacenados en una base de datos históricos. Datos en tiempo real e históricos se utilizan en el análisis para generación de información actual y pronósticos sobre la SG, así como para actualizar el DT. Esta actualización permite al DT reflejar con la mayor exactitud posible lo que está ocurriendo en la SG.

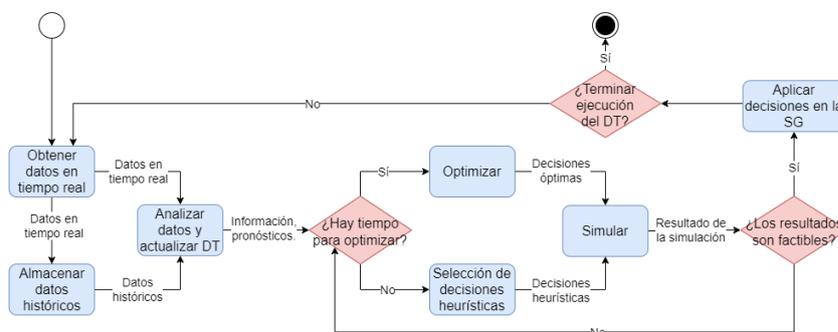


FIGURA 3  
Diagrama de flujo de un DT aplicado a una SG.

Una vez actualizado el DT, se analiza si el tiempo disponible permite optimizar el rendimiento de la SG.

Esta operación se produce la etapa de control de la imagen que se muestra en la Figura 3 bajo la pregunta “¿Hay tiempo para optimizar?”. En caso afirmativo, el DT realiza una optimización matemática de las operaciones de la SG a partir de la información obtenida y obtiene un conjunto de decisiones óptimas (teóricamente factibles) para operar la SG. En caso negativo, el DT debe tomar medidas correctivas de índole heurística con el fin de mantener la red en funcionamiento, a pesar de que las condiciones de operación ya no serán las óptimas.

El tiempo donde se evalúa si hay tiempo o no para la optimización, depende de dos cosas. El sistema de prueba, y el tiempo en que se ejecuta la optimización, en cuanto a actualizaciones del sistema. Por ejemplo, si el tiempo “seteado” para actualizar resultados de optimización es de 10 minutos, y dado el tamaño o la complejidad del sistema este lleva más de 10 minutos para resolverse, en ese caso se procede a la selección de decisiones heurísticas. Los tiempos de proceso para la optimización no solo dependen del tamaño la SG, sino también de su tipo de organización. En el trabajo de (Alvarez, 2022), se reporta que pasar de un sistema Full P2P (es decir donde todos los prosumidores comercian entre sí), a un sistema de “Community Manager” aumenta el tiempo de procesamiento un 350%.

Las decisiones tomadas podrían aplicarse directamente sobre la SG, pero el DT permite comprobar la factibilidad de aplicar tales decisiones de acuerdo al estado actual de la SG en un simulador. Este simulador, previamente actualizado en función de los datos recogidos, es una copia fiel, aunque virtual, de la SG. Si los resultados de la simulación aseguran que las decisiones son factibles de aplicar sobre la SG, entonces simplemente se procede con los cambios en la SG. En caso contrario, se comprueba la posibilidad de una nueva optimización con los datos actualizados al instante gracias a los sensores inteligentes ubicados en la SG.

## RESULTADOS

En esta sección, se presentan los resultados obtenidos en el DT que se definió para una SG de referencia. Tal SG se presenta en (Papathanassiou et al., 2005). En la SG hay diez prosumidores que realizan intercambios P2P entre ellos. A la vez, los prosumidores se conectan a la red principal. En caso de no poder resolver sus necesidades de energía eléctrica con los intercambios P2P, los prosumidores pueden obtener la energía de la red principal, aunque incurriendo en las pérdidas típicas referidas a la transformación (Kröhling et al., 2023).

Los prosumidores considerados son de tres tipos diferentes: departamento, residencia o comercio. Cada tipo de prosumidor tiene un perfil de carga característico, que se presenta en la Figura 4. Tales perfiles se obtuvieron utilizando el modelo de demanda CREST, provisto en (McKenna & Thomson, 2016). También, cada uno de los prosumidores cuenta con generadores de tipo eólico o solar.

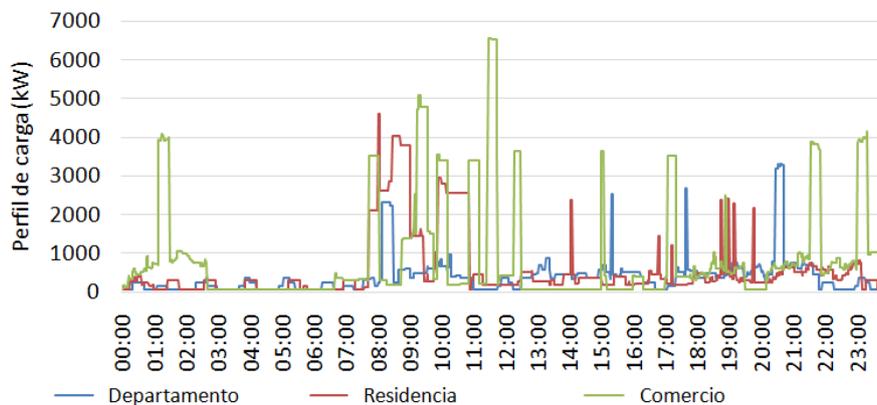


FIGURA 4  
Perfil de carga por tipo de prosumidor en la SG de referencia.

A continuación, se presentan los resultados preliminares referidos al optimizador y simulador, que son parte del DT propuesto para la SG.

### 1. Resultados del optimizador

Para representar el modelo matemático de optimización del DT, se utiliza Pyomo. Pyomo es una biblioteca de código abierto basada en Python que se usa para formular y resolver problemas de optimización (Hart et al., 2011). Es una opción popular para abordar problemas complejos en una amplia gama de aplicaciones industriales, comerciales y de ingeniería. Pyomo tiene muchas ventajas, como:

**Flexibilidad:** Pyomo puede modelar problemas lineales, no lineales, enteros y mixtos.

**Expresividad:** Pyomo proporciona una sintaxis simple y clara para definir modelos matemáticos. Esto hace que sea más fácil crear y comprender modelos, incluso para usuarios nuevos en optimización.

**Facilidad de uso:** Pyomo está diseñado para ser fácil de usar incluso para los principiantes en programación. Su sintaxis es similar a la notación matemática convencional, lo que hace que sea más fácil de entender el código.

**Eficiencia:** Pyomo puede integrarse con una amplia gama de soluciones de optimización comerciales y de código abierto para garantizar un rendimiento óptimo en términos de tiempo de ejecución y calidad de la solución.

**Integración con Python:** Pyomo se beneficia de la amplia biblioteca de herramientas y funcionalidades del lenguaje de programación Python al estar basado en él. Esto hace que sea más fácil integrarse con otros sistemas y bibliotecas, lo que aumenta la potencia y flexibilidad del Digital Twin.

Este código es una implementación de un modelo de programación matemática en Pyomo. El modelo se utiliza para realizar una planificación energética entre pares (pares o comunidades) que generan, compran y venden energía eléctrica en diferentes intervalos de tiempo.

En este modelo, se definen diferentes conjuntos, parámetros y variables que representan las características del sistema de energía y las decisiones que se deben tomar para optimizar el consumo y la generación de energía.

Se presenta una descripción de los elementos más importantes del modelo:

Conjuntos:

*PEER*: Representa los diferentes pares (prosumidores) en el sistema de energía.

*T*: Representa los intervalos de tiempo (time intervals) en los que se divide el horario de planificación (por ejemplo, cada intervalo podría ser una hora del día).

*L*: Representa las líneas de transmisión disponibles para transferir energía entre pares prosumidores.

*FC*: Representa los generadores de celdas de combustible disponibles para alguno de los pares.

Parámetros:

*p\_dkt\_sg*: Es un diccionario que contiene los consumos de energía de cada peer en cada intervalo de tiempo (kW).

*max\_pv\_gen*: Es un diccionario que indica la máxima potencia solar que puede ser generada por cada peer en cada intervalo de tiempo (MW).

*max\_wind\_gen*: Es un diccionario que indica la máxima potencia eólica que puede ser generada por cada peer en cada intervalo de tiempo (MW).

*max\_pot\_gas\_sg*: Es un diccionario que indica la máxima potencia que puede ser generada por generadores de gas natural para cada peer (kW).

*precio\_compra\_al\_com*: Es un diccionario que indica el precio al que el sistema de energía compra energía a cada peer (USD por MWh).

*precio\_venta\_al\_com*: Es un diccionario que indica el precio al que el sistema de energía vende energía a cada peer (USD por MWh).

*costo\_termica\_gas\_natural\_sg, costo\_solar\_sg, costo\_wind\_sg, costo\_distribution, costo\_fuel\_cel*: Son costos de generación para diferentes fuentes de energía (USD por kWh).

*precio\_venta\_del\_com\_a\_distr*: Es el precio al que los pares venden electricidad a la distribuidora (USD por kWh).

*precio\_compra\_del\_com\_a\_distr*: Es el precio al que los pares compran electricidad de la distribuidora (USD por kWh).

*max\_p\_gas*: Es un diccionario que indica la máxima producción de energía de generadores de gas natural para cada peer (kW).

*max\_fuel\_cel*: Es un diccionario que indica la máxima producción de energía de generadores de celdas de combustible para cada peer (kW).

## Variables

Las variables que representan las decisiones a tomar se definirán en la sección que falta en el código. Estas variables probablemente representarán la cantidad de energía generada, comprada y vendida por cada prosumidor en cada intervalo de tiempo.

Este modelo se utiliza para optimizar la generación y el consumo de energía eléctrica entre los pares en el mercado, teniendo en cuenta los costos y las restricciones específicas del sistema. La función objetivo consiste

en maximizar los ingresos totales del sistema o minimizar los costos totales de energía, dependiendo del enfoque de optimización deseado.

### *Función Objetivo*

La función objetivo (Z) busca minimizar el costo total de producción y distribución de energía. Es una combinación lineal de diversos costos de generación y compra de energía, menos los ingresos obtenidos por la venta de energía a la compañía de distribución. La función objetivo se observa en la Fig. 5, usando Jupyter Notebook (Randles et al., 2017).

```
#####
#####
##### objective function
#####

Z = (
  sum(precio_compra_al_com[peer] * model.buy_power_to_com[peer,t] for peer in model.PEER for t in model.T)
+ sum(costo_termica_gas_natural_sg * model.p_gas_sg[peer,t] for peer in model.PEER for t in model.T)
+ sum(costo_solar_sg * model.p_solar_sg[peer,t] for peer in model.PEER for t in model.T)
+ sum(costo_wind_sg * model.p_wind_sg2[peer,t] for peer in model.PEER for t in model.T)
+ sum(costo_fuel_cel * model.p_fuel_cell[peer,t] for peer in model.PEER for t in model.T)
+ sum(precio_compra_del_com_a_distr * model.buy_power_to_distribution[peer,t] for peer in model.PEER for t in model.T)

- sum(model.precio_venta_al_com[peer] * model.sell_power_to_com[peer,t] for peer in model.PEER for t in model.T)

# sum(precio_venta_del_com_a_distr * model.sell_power_to_distribution[peer,t] for peer in model.PEER for t in model.T)
)

# default objective sense --> minimize
model.objective = pe.Objective(sense = pe.minimize, expr = Z)

#model.objective.pprint()
```

FIGURA 5

Porción de código donde se ve la función objetivo usando Jupyter Notebook.

### *Restricciones*

Restricción de límite superior para la generación de energía a gas para cada par y tiempo:

$$\text{model.f\_uplim\_p\_gas\_sg: model.p\_gas\_sg[peer, t] \leq \text{max\_pot\_gas\_sg[peer]}$$

Restricción de límite superior para la generación de energía solar para cada par y tiempo:

$$\text{model.f\_uplim\_p\_solar\_sg: model.p\_solar\_sg[peer, t] \leq \text{max\_pv\_gen[peer, t]}$$

Restricción de límite superior para la generación de energía eólica para cada par y tiempo:

$$\text{model.f\_uplim\_p\_wind\_sg2: model.p\_wind\_sg2[peer, t] \leq \text{max\_wind\_gen[peer, t]}$$

Restricción de límite superior para la generación de energía mediante celdas de combustible para cada par y tiempo:

$$\text{model.f\_uplim\_p\_fuel\_cell: model.p\_fuel\_cell[peer, t] \leq \text{max\_fuel\_cel[peer]}$$

Restricción de balance de potencia para cada par y tiempo:

$$\begin{aligned} \text{model.balance\_potencia\_peer\_X: } & \text{model.p\_gas\_sg[X, t]} + \text{model.p\_solar\_sg[X, t]} + \\ & \text{model.p\_wind\_sg2[X, t]} + \text{model.p\_fuel\_cell[X, t]} + \text{model.buy\_power\_to\_com[X, t]} + \\ & \text{model.buy\_power\_to\_distribution[X, t]} + \text{model.p\_battery[t]} == \text{model.p\_dkt\_sg[X, t]} + \\ & \text{model.sell\_power\_to\_com[X, t]} + \text{model.sell\_power\_to\_distribution[X, t]} \end{aligned}$$

Restricción para limitar la potencia total vendida a la compañía de distribución por todos los pares en cada tiempo:

$\text{model.balance\_pot\_sell\_a\_com: } \sum(\text{model.sell\_power\_to\_com}[\text{peer}, t] \text{ for peer in model.PEER}) \leq \sum(\text{model.p\_gas\_sg}[\text{peer}, t] \text{ for peer in model.PEER}) + \sum(\text{model.p\_solar\_sg}[\text{peer}, t] \text{ for peer in model.PEER}) + \sum(\text{model.p\_wind\_sg2}[\text{peer}, t] \text{ for peer in model.PEER}) + \sum(\text{model.p\_fuel\_cell}[\text{peer}, t] \text{ for peer in model.PEER}) + \text{model.p\_battery}[t]$

Restricción de condición inicial para la potencia de la batería:

$\text{model.initial\_cond\_battery: } \sum(\text{model.p\_battery}[t] \text{ for } t \text{ in model.T}) \leq 30$

Restricción para equilibrar la potencia comprada y vendida a la compañía de distribución en cada tiempo:

$\text{model.balance\_pot\_buy\_a\_com: } \sum(\text{model.buy\_power\_to\_com}[\text{peer}, t] \text{ for peer in model.PEER}) = \sum(\text{model.sell\_power\_to\_com}[\text{peer}, t] \text{ for peer in model.PEER})$

## 2. Resultados del simulador

Para representar el simulador de la SG, se utiliza Python, que tiene como ventaja que es una Toolbox de código abierto. El simulador, tal como se mencionó anteriormente, es una representación fiel de una SG real, aunque en la virtualidad. De esta manera, el simulador representa de manera virtual a los prosumidores, las líneas de transmisión, los generadores, las restricciones de la SG, las condiciones de generación (por ejemplo, condiciones atmosféricas para la generación eólica).

El simulador permite analizar los escenarios con los intercambios o transacciones que se podrían concretar entre los prosumidores. Gran parte de este simulador está definido en (Kröhling et al., 2022) para parques eco-industriales. En este caso particular, el simulador se aplica a una SG y permite analizar si un conjunto de decisiones (óptimas o heurísticas) pueden ser aplicadas sobre la SG de referencia.

La Figura 6 presenta una salida o resultante para este simulador, en el que los cinco prosumidores intercambian energía de manera P2P. Esto les permite evitar intercambios con la red principal y los costos de transformación de la energía asociados.

En esta figura, puede notarse que hay dos prosumidores con exceso de energía al inicio de la simulación (prosumidores 2 y 5) y tres prosumidores con déficit de energía (prosumidores 1, 3 y 4). Luego de ejecutar la simulación con las decisiones óptimas obtenidas previamente, puede notarse que los prosumidores con exceso de energía logran vender todo lo que producen en exceso a los prosumidores con déficit. También puede verse el precio al que se vende la energía entre ellos, producto de algún acuerdo previamente establecido o de la misma toma de decisiones óptima.

El simulador permite mostrar no solo cómo se realizarán los intercambios entre los prosumidores, sino también si habrá intercambios con la red principal. En este caso, los prosumidores 1, 3 y 4 deberán comprar la energía faltante a la red principal. También, al ser el simulador una representación virtual fiel de la SG, la ejecución asegura que estos intercambios son factibles de realizar y que no se están obviando ninguna de las restricciones impuestas, como ser los toques en las líneas de transmisión o la capacidad de generación de los generadores.

```

>> Prosumers' status at the beginning of the simulation:
Prosumer 1 has 180 kWh of energy deficit.
Prosumer 2 has 22 kWh of energy surplus.
Prosumer 3 has 158 kWh of energy deficit.
Prosumer 4 has 296 kWh of energy deficit.
Prosumer 5 has 76 kWh of energy surplus.

>>Simulation begins...

>>Simulation ends.

>> Agreements at the end of the simulation:
Prosumer 5 agrees to exchange with Prosumer 1 an amount of 76 kWh with a price of 0.838 [$/Wh] in time step 132.0.
Prosumer 2 agrees to exchange with Prosumer 4 an amount of 22 kWh with a price of 0.897 [$/Wh] in time step 111.0.

>> Prosumers' status at the end of the simulation:
Prosumer 1 had an initial deficit of 180 kWh. The prosumer end up with 104 kWh of energy deficit.
Prosumer 2 had an initial surplus of 22 kWh. The prosumer end up with 0 kWh of energy surplus.
Prosumer 3 had an initial deficit of 158 kWh. The prosumer end up with 158 kWh of energy deficit.
Prosumer 4 had an initial deficit of 296 kWh. The prosumer end up with 274 kWh of energy deficit.
Prosumer 5 had an initial surplus of 76 kWh. The prosumer end up with 0 kWh of energy surplus.

```

FIGURA 6  
Ejecución del simulador en Python.

## CONCLUSIONES

En este trabajo se han explorado diversos aspectos que son claves en el desarrollo y la aplicación de gemelos digitales (DT) en el ámbito de la gestión y operación de sistemas eléctricos de potencia. El estudio destaca la importancia de los gemelos digitales como herramientas poderosas para mejorar la eficiencia, la confiabilidad y la rentabilidad de los sistemas eléctricos. En el desarrollo del artículo, se resalta cómo los gemelos digitales son construidos en función de los aspectos considerados relevantes por los diseñadores, y cómo su funcionalidad se encuentra limitada por la disponibilidad y precisión de los datos recopilados a través de sensores inteligentes. Estos datos permiten la actualización continua de los modelos que representan el comportamiento del sistema eléctrico y la ejecución de acciones autónomas para corregir anomalías.

Además, el trabajo proporciona un enfoque estructurado para la creación y operación de un DT en una red inteligente (SG). El esquema propuesto es un aporte al delineamiento de las tareas principales que un DT debe llevar a cabo para optimizar la operación de una red eléctrica de tipo SG. Desde la recopilación de datos en tiempo real a través de sensores inteligentes, hasta la toma de decisiones y la validación a través de un simulador, el enfoque propuesto proporciona una clara perspectiva para abordar el funcionamiento efectivo de un DT en la operación de una SG.

El enfoque en la optimización es otro aspecto destacado del trabajo. El análisis detallado de las restricciones específicas, como la disponibilidad de generadores y las limitaciones de la red, ilustra cómo el DT puede utilizar modelos matemáticos de optimización para generar decisiones óptimas. Al considerar tanto las limitaciones físicas como las restricciones económicas, el trabajo muestra cómo un DT puede mejorar la eficiencia en la generación, distribución y consumo de energía eléctrica.

En última instancia, el trabajo resalta la versatilidad de los DTs en la gestión de sistemas eléctricos. Al considerar diversos actores, desde prosumidores individuales hasta grandes empresas de transmisión, el trabajo ofrece un enfoque adaptable y escalable. De esta forma, los DTs no solo son capaces de abordar los desafíos técnicos, sino también de adaptarse a las necesidades y objetivos específicos de diferentes entidades. El artículo también pone de relieve la importancia del simulador, que representa de manera virtual la red eléctrica, permitiendo probar y validar las decisiones tomadas por el gemelo digital en un entorno seguro y controlado. Los resultados de la simulación muestran cómo los prosumidores pueden intercambiar energía de manera eficiente, evitando costosos intercambios con la red principal y demostrando la viabilidad de las decisiones óptimas.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Al-Waisi, Z., & Agyeman, M. O. (2018). On the Challenges and Opportunities of Smart Meters in Smart Homes and Smart Grids. *Proceedings of the 2nd International Symposium on Computer Science and Intelligent Control*, 1–6. <https://doi.org/10.1145/3284557.3284561>
- Alvarez, G. (2022). Integrated modeling of the peer-to-peer markets in the energy industry. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 13(1), 101–118. <https://doi.org/10.5267/j.ijiec.2021.7.002>
- Batty, M. (2018). Digital twins. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 45(5), 817–820. <https://doi.org/10.1177/2399808318796416>
- Bridge, G., & Gailing, L. (2020). New energy spaces: Towards a geographical political economy of energy transition. *Environment and Planning A: Economy and Space*, 52(6), 1037–1050. <https://doi.org/10.1177/0308518X20939570>
- Cacciari, M., & Singhal, R. (2022, October 31). How Can Digital Technologies Help Companies Overcome the Decarbonization Challenges? *Day 2 Tue, November 01, 2022*. <https://doi.org/10.2118/210980-MS>
- Chakraborty, S., & Adhikari, S. (2021). Machine learning based digital twin for dynamical systems with multiple time-scales. *Computers & Structures*, 243, 106410. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2020.106410>
- Chow, J. H., & Sanchez - Gasca, J. J. (2019). *Power System Modeling, Computation, and Control*. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119546924>
- Cioara, T., Anghel, I., Antal, M., Salomie, I., Antal, C., & Ioan, A. G. (2021). *An Overview of Digital Twins Application Domains in Smart Energy Grid*. <http://arxiv.org/abs/2104.07904>
- Darbali-Zamora, R., Johnson, J., Summers, A., Jones, C. B., Hansen, C., & Showalter, C. (2021). State Estimation-Based Distributed Energy Resource Optimization for Distribution Voltage Regulation in Telemetry-Sparse Environments Using a Real-Time Digital Twin. *Energies*, 14(3), 774. <https://doi.org/10.3390/en14030774>
- DHL. (2022). *Digital Twins*. Insights & Innovation. [https://www.dhl.com/global-en/home/insights-and-innovation/thought-leadership/trend-reports/virtual-reality-digital-twins.html#:~:text=As unique%2C virtual representations of,maintain their assets more effectively.](https://www.dhl.com/global-en/home/insights-and-innovation/thought-leadership/trend-reports/virtual-reality-digital-twins.html#:~:text=As%20unique%20virtual%20representations%20of,maintain%20their%20assets%20more%20effectively.)
- Fichera, A., Pluchino, A., & Volpe, R. (2020). From self-consumption to decentralized distribution among prosumers: A model including technological, operational and spatial issues. *Energy Conversion and Management*, 217, 112932. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112932>
- Galuzin, V., Galitskaya, A., Grachev, S., Larukhin, V., Novichkov, D., Skobelev, P., & Zhilyaev, A. (2022). Autonomous Digital Twin of Enterprise: Method and Toolset for Knowledge-Based Multi-Agent Adaptive Management of Tasks and Resources in Real Time. *Mathematics*, 10(10), 1662. <https://doi.org/10.3390/math10101662>
- Gelernter, D. (1991). *Mirror Worlds: Or the Day Software Puts the Universe in a Shoebox...How It Will Happen and What It Will Mean*. Oxford University Press.
- Ghenai, C., Husein, L. A., Al Nahlawi, M., Hamid, A. K., & Bettayeb, M. (2022). Recent trends of digital twin technologies in the energy sector: A comprehensive review. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 54, 102837. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102837>
- Grieves, M. (2016). Origins of the Digital Twin Concept. *Florida Institute of Technology / NASA*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.26367.61609>
- Hamid, I., Alam, M. S., Kanwal, A., Jena, P. K., Murshed, M., & Alam, R. (2022). Decarbonization pathways: the roles of foreign direct investments, governance, democracy, economic growth, and renewable energy transition. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(33), 49816–49831. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-18935-3>
- Hart, W. E., Watson, J.-P., & Woodruff, D. L. (2011). Pyomo: modeling and solving mathematical programs in Python. *Mathematical Programming Computation*, 3(3), 219–260. <https://doi.org/10.1007/s12532-011-0026-8>

- Kaur, M. J., Mishra, V. P., & Maheshwari, P. (2020). *The Convergence of Digital Twin, IoT, and Machine Learning: Transforming Data into Action* (pp. 3–17). [https://doi.org/10.1007/978-3-030-18732-3\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-18732-3_1)
- Kröhling, D. E., Chiotti, O. J. A., & Martínez, E. C. (2023). Artificial Theory of Mind in contextual automated negotiations within peer-to-peer markets. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 120, 105887. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.105887>
- Kröhling, D. E., & Martínez, E. C. (2019). *Contract Settlements for Exchanging Utilities through Automated Negotiations between Prosumers in Eco-Industrial Parks using Reinforcement Learning* (pp. 1675–1680). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818634-3.50280-0>
- Kröhling, D. E., Mione, F., Hernández, F., & Martínez, E. C. (2022). A peer-to-peer market for utility exchanges in Eco-Industrial Parks using automated negotiations. *Expert Systems with Applications*, 191(September 2021), 116211. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.116211>
- Ladj, A., Wang, Z., Meski, O., Belkadi, F., Ritou, M., & Da Cunha, C. (2021). A knowledge-based Digital Shadow for machining industry in a Digital Twin perspective. *Journal of Manufacturing Systems*, 58(August), 168–179. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.07.018>
- McKenna, E., & Thomson, M. (2016). High-resolution stochastic integrated thermal–electrical domestic demand model. *Applied Energy*, 165, 445–461. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.12.089>
- Palensky, P., Cvetkovic, M., Gusain, D., & Joseph, A. (2022). Digital twins and their use in future power systems. *Digital Twin*, 1, 4. <https://doi.org/10.12688/digitaltwin.17435.2>
- Papathanassiou, S., Hatziaziyriou, N., & Strunz, K. (2005). A benchmark low voltage microgrid network. *Proceedings of the CIGRE Symposium: Power Systems with Dispersed Generation*. CIGRE, 1–8.
- Plewnia, F. (2019). The Energy System and the Sharing Economy: Interfaces and Overlaps and what to Learn from them. *Energies*, 12(3), 339. <https://doi.org/10.3390/en12030339>
- Podvalny, S. L., & Vasiljev, E. M. (2021). Digital twin for smart electricity distribution networks. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1035(1), 012047. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1035/1/012047>
- Qiao, H., Zheng, F., Jiang, H., & Dong, K. (2019). The greenhouse effect of the agriculture-economic growth-renewable energy nexus: Evidence from G20 countries. *Science of The Total Environment*, 671, 722–731. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.336>
- Randles, B. M., Pasquetto, I. V., Golshan, M. S., & Borgman, C. L. (2017). Using the Jupyter Notebook as a Tool for Open Science: An Empirical Study. *2017 ACM/IEEE Joint Conference on Digital Libraries (JCDL)*, 1–2. <https://doi.org/10.1109/JCDL.2017.7991618>
- So much ice is melting that Earth's crust is moving. (2021). *Nature*, 597(7874), 10–10. <https://doi.org/10.1038/d41586-021-02285-0>
- Tao, F., & Qi, Q. (2019). Make more digital twins. *Nature*, 573(7775), 490–491. <https://doi.org/10.1038/d41586-019-02849-1>
- Tollefson, J. (2021). IPCC climate report: Earth is warmer than it's been in 125,000 years. *Nature*, 596(7871), 171–172. <https://doi.org/10.1038/d41586-021-02179-1>
- Trauer, J., Schweigert-Recksiek, S., Engel, C., Spreitzer, K., & Zimmermann, M. (2020). WHAT IS A DIGITAL TWIN? – DEFINITIONS AND INSIGHTS FROM AN INDUSTRIAL CASE STUDY IN TECHNICAL PRODUCT DEVELOPMENT. *Proceedings of the Design Society: DESIGN Conference*, 1, 757–766. <https://doi.org/10.1017/dsd.2020.15>
- Zhang, G., Huo, C., Zheng, L., & Li, X. (2020). An Architecture Based on Digital Twins for Smart Power Distribution System. *2020 3rd International Conference on Artificial Intelligence and Big Data (ICAIBD)*, 29–33. <https://doi.org/10.1109/ICAIBD49809.2020.9137461>