

SYNAPCITY-DT: INTELIGENCIA ENERGÉTICA URBANA IMPULSADA POR IA PARA CIUDADES INTELIGENTES

UN MARCO DE GEMELO DIGITAL ORIENTADO A LA DECISIÓN PARA LA GESTIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE URBANA CONSCIENTE DE LA INCERTIDUMBRE

TAREQ ANWAR SHIKDAR ¹, HANNU LAAKSONEN ¹

¹ UNIVERSITY OF VAASA, FINLAND

PALABRAS CLAVE	RESUMEN
Gemelo digital urbano Ciudades inteligentes Sistemas energéticos impulsados por IA Inteligencia de energías renovables Control consciente del riesgo Sistemas PV-BESS Resiliencia urbana	Este estudio presenta SYNAPCITY-DT, un marco de gemelo digital de energía urbana impulsado por IA para la operación adaptativa de energía renovable bajo incertidumbre. El marco integra el pronóstico fotovoltaico probabilístico, la optimización del almacenamiento de energía en baterías consciente del riesgo y la inteligencia operativa dentro de un entorno unificado de gemelo digital. Utilizando datos operativos reales de un sistema PV-BESS a escala de servicio público en Finlandia, el marco evalúa la propagación de la incertidumbre a través del pronóstico, la planificación y la toma de decisiones operativas. Los resultados muestran que el control adaptativo consciente del riesgo mejora la resiliencia operativa, el aprovechamiento de la flexibilidad y la robustez de las decisiones bajo distintos horizontes de pronóstico. El estudio demuestra el potencial de los gemelos digitales habilitados por IA como sistemas escalables de inteligencia energética urbana que apoyan ciudades inteligentes resilientes y sostenibles.

RECIBIDO: 14 / 05 / 2026

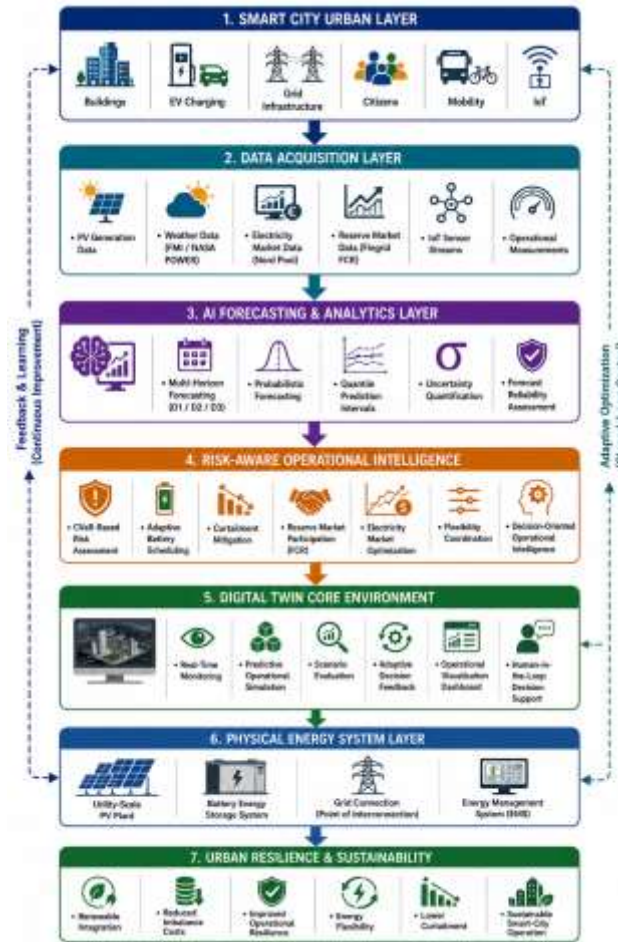
ACEPTADO: 23 / 08 / 2026

1. Introducción y trabajos relacionados

Las ciudades avanzan rápidamente hacia infraestructuras energéticas intensivas en renovables y basadas en datos, como parte de las iniciativas globales de descarbonización y de transformación hacia la ciudad inteligente. La creciente electrificación, la generación renovable distribuida, la integración del almacenamiento de energía, la movilidad eléctrica y los servicios urbanos inteligentes están remodelando de forma fundamental la manera en que las ciudades modernas generan, consumen y gestionan la energía. El despliegue acelerado de sistemas fotovoltaicos (PV), sistemas de almacenamiento de energía en baterías (BESS) y centrales renovables híbridas introduce una complejidad operativa considerable, porque la generación renovable es intrínsecamente variable, dependiente de la meteorología e incierta (International Energy Agency, 2025). Al mismo tiempo, se espera que los sistemas energéticos urbanos mantengan una alta fiabilidad, resiliencia, asequibilidad y sostenibilidad bajo condiciones de operación cada vez más dinámicas.

Los avances recientes en inteligencia artificial (IA), pronóstico probabilístico y tecnologías de gemelo digital han creado nuevas oportunidades para la gestión inteligente de la energía urbana. Los enfoques de aprendizaje profundo, incluidas las redes neuronales recurrentes, las arquitecturas Transformer y los marcos de pronóstico probabilístico, han demostrado una gran capacidad para el pronóstico de la generación renovable y la cuantificación de la incertidumbre (Al-Dahidi et al., 2024; Wang et al., 2026; Xiong et al., 2025). De forma similar, los sistemas de almacenamiento de energía se reconocen cada vez más como facilitadores críticos para la integración de renovables, la suavización de la potencia, el aporte de flexibilidad y los servicios de apoyo a la red (Amorim et al., 2024; Cao et al., 2022; Yang et al., 2024). En paralelo, los gemelos digitales han surgido como plataformas ciberfísicas prometedoras, capaces de habilitar la monitorización en tiempo real, la simulación, la analítica predictiva y la optimización operativa en entornos urbanos (Elnosh et al., 2026; Zhang et al., 2024).

Figura 1. Arquitectura integrada de inteligencia energética urbana SYNAPCITY-DT propuesta.



Fuente: Elaboración propia, 2026.

La Figura 1 presenta la arquitectura integrada de inteligencia energética urbana SYNAPCITY-DT propuesta, que combina el pronóstico probabilístico, la inteligencia operativa consciente del riesgo, la coordinación adaptativa de baterías, la interacción con el mercado eléctrico y el apoyo a la decisión asistido por gemelo digital para una gestión resiliente de la energía en la ciudad inteligente.

A pesar de estos avances, la investigación existente suele tratar el pronóstico, la operación del almacenamiento, la optimización y las funcionalidades del gemelo digital como dominios de investigación parcialmente independientes. Los estudios de pronóstico enfatizan con frecuencia las métricas de precisión de la predicción sin analizar plenamente sus consecuencias operativas sobre la fiabilidad del despacho, los costes por desequilibrio, la participación en reservas o la degradación de las baterías (Lindberg et al., 2024; Sweeney et al., 2020). De forma similar, muchos estudios de optimización de BESS se centran principalmente en el dimensionamiento o la programación determinista, simplificando la propagación de la incertidumbre y el riesgo operativo (Liu et al., 2023; Ruan et al., 2025). Aunque los marcos recientes de gemelo digital apoyan la monitorización y la visualización, muchos siguen siendo limitados a la hora de integrar inteligencia operativa consciente de la incertidumbre, toma de decisiones probabilística y control adaptativo consciente del riesgo dentro de un marco energético urbano unificado (Elnosh et al., 2026).

La rápida evolución de las centrales renovables híbridas a escala de servicio público amplifica aún más estos retos. Las revisiones recientes subrayan que los futuros sistemas energéticos híbridos deben coordinar simultáneamente el pronóstico, la participación en el mercado, la flexibilidad del almacenamiento, el aporte de reservas y la gestión de la fiabilidad bajo condiciones renovables inciertas (Das et al., 2025; Zhu et al., 2025). A nivel urbano, estos retos se vuelven aún más críticos, porque las ciudades inteligentes requieren

una interacción continua entre los sistemas de energía renovable, las infraestructuras IoT, los mercados eléctricos, las redes de movilidad y los servicios públicos digitales. En consecuencia, los sistemas energéticos urbanos inteligentes requieren cada vez más no solo capacidad predictiva, sino también inteligencia operativa adaptativa capaz de evaluar la incertidumbre, el riesgo, la flexibilidad y la confianza del sistema antes de ejecutar decisiones operativas. El pronóstico probabilístico ha surgido como una dirección importante para gestionar la incertidumbre renovable en los mercados eléctricos y la planificación operativa. A diferencia de los pronósticos deterministas, el pronóstico probabilístico proporciona intervalos de predicción y distribuciones por cuantiles que caracterizan mejor la propagación de la incertidumbre y el riesgo operativo (Maciejowska et al., 2024; Visser et al., 2024). Estudios recientes demuestran que el pronóstico renovable probabilístico puede mejorar significativamente las estrategias de oferta, la programación de reservas y la participación en el mercado bajo incertidumbre (Agakishiev et al., 2025; Wang et al., 2024). Los marcos de optimización conscientes del riesgo que utilizan el Valor en Riesgo Condicional (CVaR) también han ganado creciente atención para el comercio de energía renovable y la planificación integrada de sistemas energéticos (Jadidoleslam, 2025; Xuan et al., 2021). Sin embargo, la integración del pronóstico probabilístico, la inteligencia operativa basada en CVaR y los gemelos digitales a escala urbana sigue estando insuficientemente explorada.

Además, la investigación reciente sobre energía en ciudades inteligentes destaca la creciente importancia de sistemas de IA adaptativos, explicables e interoperables, capaces de apoyar la toma de decisiones urbana en tiempo real. Los gemelos digitales potenciados por IA, combinados con infraestructuras IoT, pueden apoyar el control predictivo, la simulación de escenarios, el análisis de resiliencia y la transparencia operativa a través de sistemas urbanos interconectados (Yang et al., 2025; Zhang et al., 2024). No obstante, muchas implementaciones actuales siguen orientadas principalmente a la monitorización más que a la decisión. A medida que los sistemas energéticos urbanos se vuelven cada vez más autónomos e intensivos en renovables, crece la necesidad de gemelos digitales capaces de integrar pronóstico consciente de la incertidumbre, optimización operativa, interacción con el mercado e inteligencia adaptativa dentro de un marco de lazo cerrado.

Para abordar estas limitaciones, este artículo propone SYNAPCITY-DT, un marco de inteligencia energética urbana impulsado por IA que integra el pronóstico renovable probabilístico, la optimización operativa consciente del riesgo, la gestión de la flexibilidad de las baterías y la inteligencia de decisión asistida por gemelo digital para ciudades inteligentes. A diferencia de los gemelos digitales convencionales, centrados principalmente en la monitorización y la visualización, el marco propuesto introduce una arquitectura orientada a la decisión capaz de combinar la cuantificación de la incertidumbre, la inteligencia operativa adaptativa y la gestión energética en tiempo real dentro de un ecosistema energético urbano integrado.

El marco combina el pronóstico probabilístico multihorizonte, la programación consciente del riesgo mediante optimización basada en CVaR, la coordinación del almacenamiento de energía en baterías, la interacción con el mercado eléctrico y los bucles de retroalimentación de gemelo digital en tiempo real. La arquitectura propuesta se valida mediante un caso de estudio fotovoltaico finlandés a escala de servicio público que integra datos reales de generación renovable, observaciones meteorológicas, precios del mercado eléctrico e información del mercado de reservas. Mediante este enfoque, SYNAPCITY-DT busca apoyar una operación de energía renovable urbana más resiliente, adaptativa e inteligente bajo incertidumbre, contribuyendo al mismo tiempo a las infraestructuras de ciudad inteligente de próxima generación impulsadas por IA. La Tabla 1 resume la laguna de investigación y aborda las carencias en el sistema propuesto.

Tabla 1. Resumen de la investigación relacionada y las lagunas identificadas

Área de investigación	Avances recientes	Principales limitaciones	Laguna de investigación abordada en SYNAPCITY-DT
Pronóstico de renovables	El aprendizaje profundo, el pronóstico probabilístico y los modelos Transformer mejoran la precisión de la predicción de renovables (Al-Dahidi et al., 2024; Wang et al., 2026)	El pronóstico a menudo se evalúa solo mediante métricas numéricas de precisión	Vincula el pronóstico probabilístico directamente con la inteligencia de decisión operativa
Sistemas de almacenamiento de energía en baterías	Estrategias avanzadas de dimensionamiento y operación mejoran la flexibilidad renovable (Amorim et al., 2024; Ruan et al., 2025)	Muchos enfoques simplifican los efectos de la incertidumbre y la degradación	Integra la operación adaptativa de BESS consciente de la incertidumbre
Participación en el mercado eléctrico	Las ofertas conscientes del riesgo y las estrategias de mercado probabilísticas mejoran la rentabilidad (Agakishiev et al., 2025; Wang et al., 2024)	Integración limitada con gemelos digitales urbanos e inteligencia en tiempo real	Combina la participación en el mercado con gemelos digitales operativos urbanos
Gemelos digitales para sistemas energéticos	Se expanden las capacidades de monitorización en tiempo real y de analítica predictiva (Elnosh et al., 2026; Zhang et al., 2024)	La mayoría de los gemelos digitales siguen centrados en la monitorización más que en la decisión	Introduce inteligencia de gemelo digital orientada a la decisión
Centrales renovables híbridas	La coordinación híbrida PV-BESS mejora la flexibilidad y la fiabilidad (Das et al., 2025; Zhu et al., 2025)	El pronóstico, la optimización y la operación a menudo permanecen débilmente acoplados	Crea un marco operativo integrado consciente de la incertidumbre
Sistemas energéticos de ciudad inteligente	La IA y el IoT apoyan cada vez más la sostenibilidad y la resiliencia urbanas	Los sistemas existentes carecen de inteligencia operativa adaptativa bajo incertidumbre	Desarrolla una arquitectura adaptativa de inteligencia energética urbana impulsada por IA

Fuente: Elaboración propia, 2026.

Las principales contribuciones de este artículo se resumen a continuación:

1. Se propone un novedoso marco de inteligencia energética urbana impulsado por IA, denominado SYNAPCITY-DT, para la gestión energética de ciudades inteligentes consciente de la incertidumbre.
2. Se integra un marco de pronóstico renovable probabilístico multihorizonte con la optimización operativa consciente del riesgo y la inteligencia de decisión asistida por gemelo digital.
3. Se desarrolla una arquitectura operativa basada en CVaR para mejorar la programación de la energía renovable, la gestión de la flexibilidad y la participación en el mercado bajo incertidumbre.
4. Se introduce un marco de retroalimentación de gemelo digital en tiempo real para apoyar la monitorización adaptativa, la explicabilidad y la resiliencia operativa.
5. El marco propuesto se valida mediante un caso de estudio real de un sistema fotovoltaico a escala de servicio público en Finlandia que integra generación

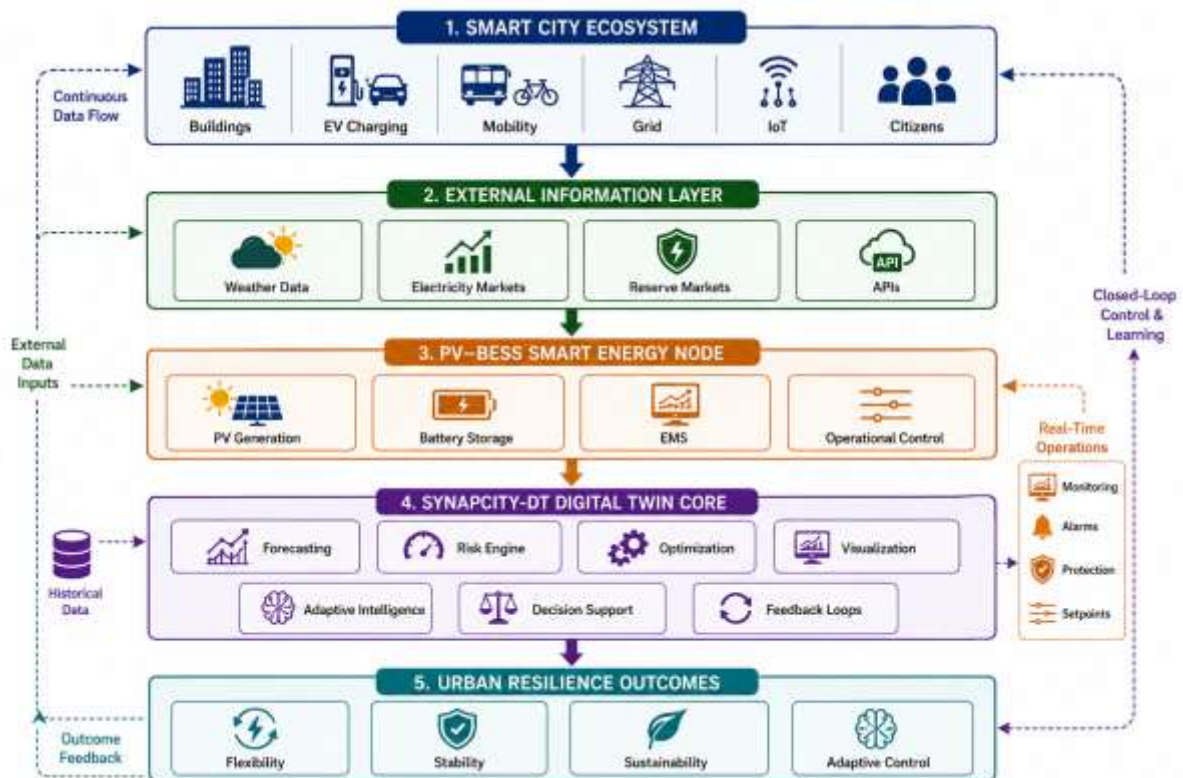
renovable, observaciones meteorológicas, datos del mercado eléctrico e información del mercado de reservas.

2. Sistema energético urbano y marco de gemelo digital

2.1. Concepto de nodo de energía urbana

La creciente penetración de fuentes de energía renovable, recursos de flexibilidad distribuidos e infraestructuras digitales está transformando los sistemas eléctricos convencionales en ecosistemas energéticos urbanos interconectados. En las futuras ciudades inteligentes, se espera que los activos de energía renovable operen no solo como unidades de generación de electricidad, sino también como nodos energéticos inteligentes y adaptativos, capaces de interactuar dinámicamente con los mercados eléctricos, los servicios de apoyo a la red, los sistemas de almacenamiento, las infraestructuras de movilidad y las plataformas digitales urbanas (Das et al., 2025; Hofbauer et al., 2022). En este contexto, los sistemas fotovoltaicos (PV) integrados con sistemas de almacenamiento de energía en baterías (BESS) se están convirtiendo en componentes críticos para posibilitar una operación de energía urbana resiliente y orientada a la flexibilidad (Baccino & Santarelli, 2023; Čović et al., 2024). La Figura 2 muestra la representación conceptual del ecosistema de nodo de energía urbana SYNAPCITY-DT, que integra generación renovable, almacenamiento en baterías, interacción con el mercado eléctrico, inteligencia operativa adaptativa y gestión de energía urbana asistida por gemelo digital.

Figura 2. Ecosistema de nodo de energía urbana.



Fuente: Elaboración propia, 2026.

Sin embargo, la integración a gran escala de energía renovable introduce una incertidumbre operativa significativa debido a la intermitencia, la variabilidad meteorológica, la fluctuación de los precios de la electricidad y la dinámica del mercado de balance (Ejuh Che et al., 2025; Pavlík et al., 2025). Los enfoques tradicionales de gestión de energía renovable se apoyan con frecuencia en el pronóstico determinista y en estrategias de programación estáticas, que a menudo limitan la adaptabilidad operativa bajo

condiciones de operación inciertas (Sweeney et al., 2020). Estas limitaciones se vuelven cada vez más críticas en entornos de ciudad inteligente, donde las infraestructuras urbanas requieren una coordinación continua entre la generación renovable, la flexibilidad del almacenamiento, la participación en el mercado y la inteligencia operativa en tiempo real.

Dentro del marco propuesto, el sistema PV-BESS se modela como un nodo de energía urbana inteligente que opera dentro de un ecosistema energético urbano ciberfísico. El nodo propuesto intercambia información de forma continua con los servicios meteorológicos, los mercados eléctricos, las plataformas del mercado de reservas, los sensores operativos y los entornos de gemelo digital. En lugar de funcionar únicamente como una instalación de generación renovable, el sistema opera como una plataforma de inteligencia operativa adaptativa, capaz de realizar pronóstico consciente de la incertidumbre, programación consciente del riesgo, coordinación de la flexibilidad de las baterías y gestión energética resiliente.

El concepto de nodo de energía urbana propuesto integra múltiples funcionalidades operativas, incluidas el pronóstico probabilístico, el despacho adaptativo de baterías, la participación en el mercado de reservas, la mitigación del riesgo de desequilibrio, la reducción del recorte (curtailment) y la supervisión operativa asistida por gemelo digital. Esta integración permite una sincronización continua entre la infraestructura física y las capas de apoyo a la decisión inteligentes, lo que posibilita que el marco operativo evolucione desde la programación reactiva convencional hacia una inteligencia energética urbana adaptativa y predictiva.

2.2. Arquitectura multicapa de SYNAPCITY-DT

El marco SYNAPCITY-DT propuesto se diseña como una arquitectura jerárquica multicapa de inteligencia energética urbana que integra la adquisición heterogénea de datos, el pronóstico probabilístico, la optimización operativa y el control adaptativo asistido por gemelo digital. La arquitectura combina componentes tanto cibernéticos como físicos del sistema dentro de un entorno unificado de inteligencia operativa.

La primera capa corresponde a la capa de adquisición e integración de datos, que recopila de forma continua mediciones operativas, observaciones meteorológicas, precios del mercado eléctrico, información del mercado de reservas y señales de monitorización basadas en IoT. En este estudio, el marco integra observaciones meteorológicas del Instituto Meteorológico Finlandés (FMI), datos de radiación solar de NASA POWER, precios del mercado eléctrico del día siguiente de Nord Pool e información del mercado de reservas de Fingrid (Finnish Meteorological Institute, 2025; NASA POWER, 2025; Nord Pool, 2025; Fingrid, 2025). Los conjuntos de datos recopilados proporcionan la base para el pronóstico, la cuantificación de la incertidumbre, la programación operativa y la sincronización del gemelo digital. La Figura 3 presenta la arquitectura multicapa del marco SYNAPCITY-DT propuesto, que integra el pronóstico probabilístico, la optimización consciente del riesgo, la analítica del gemelo digital y los objetivos de resiliencia energética urbana.

Figura 3. Arquitectura multicapa de SYNAPCITY-DT.



Fuente: Elaboración propia, 2026.

La segunda capa consiste en el motor de pronóstico y análisis de incertidumbre basado en IA. Esta capa realiza un pronóstico probabilístico multihorizonte mediante métodos de predicción por cuantiles, capaces de estimar distribuciones de incertidumbre de la generación renovable en lugar de salidas deterministas únicas. Estudios recientes han demostrado que el pronóstico probabilístico proporciona un valor operativo superior para el comercio de energía renovable, la programación de reservas y la planificación operativa adaptativa en comparación con los enfoques deterministas (Maciejowska et al., 2024; Visser et al., 2024). En el marco propuesto, el pronóstico probabilístico permite la propagación de la incertidumbre a través de las capas de decisión operativa posteriores.

La tercera capa corresponde al motor de inteligencia operativa y optimización. Esta capa integra la programación de baterías, el despacho adaptativo, la asignación de reservas, la mitigación del recorte y la participación en el mercado eléctrico bajo condiciones renovables inciertas. La adaptación operativa se realiza mediante principios de optimización conscientes del riesgo, capaces de equilibrar la rentabilidad esperada y la robustez operativa. Además, la operación de las baterías considera las restricciones de estado de carga (SOC), las eficiencias de carga y descarga, los compromisos de reserva y la disponibilidad de flexibilidad bajo condiciones operativas conscientes de la incertidumbre (Karrari et al., 2022; Rezaeimozafer et al., 2024).

La cuarta capa representa el entorno operativo de gemelo digital. Esta capa sincroniza de forma continua los estados operativos virtuales con las mediciones reales del sistema físico para apoyar la monitorización predictiva, la analítica adaptativa, la visualización operativa y la simulación de escenarios. A diferencia de los gemelos digitales convencionales orientados a la monitorización, el marco propuesto integra inteligencia operativa consciente de la incertidumbre y apoyo adaptativo a la decisión dentro del entorno de gemelo digital (Elnosh et al., 2026; Zhang et al., 2024).

Por último, la capa de resiliencia urbana y apoyo a la decisión traduce las salidas operativas en objetivos energéticos urbanos de nivel superior, incluidas la mejora de la flexibilidad, la integración de renovables, la resiliencia operativa y la gestión sostenible de la energía en la ciudad inteligente. Mediante esta estructura jerárquica, SYNAPCITY-DT permite una interacción coordinada entre la inteligencia de pronóstico, la optimización adaptativa y la operación del sistema energético urbano.

2.3. Inteligencia operativa probabilística

Una limitación importante en muchos sistemas de gestión de energía renovable existentes es el débil acoplamiento entre las salidas del pronóstico y la toma de decisiones operativas. Los modelos de pronóstico se evalúan con frecuencia mediante métricas estadísticas de precisión como el MAE o el RMSE, mientras que las implicaciones operativas de la incertidumbre sobre la fiabilidad del despacho, la exposición al desequilibrio, la participación en reservas y la degradación de las baterías reciben comparativamente menos atención (Lindberg et al., 2024; Wang et al., 2024). Sin embargo, en los sistemas urbanos ricos en renovables, la incertidumbre afecta directamente a la flexibilidad operativa, al desempeño en el mercado y a la resiliencia del sistema.

Para abordar esta limitación, SYNAPCITY-DT introduce un marco de inteligencia operativa probabilística que propaga explícitamente la incertidumbre a través de las capas de pronóstico, optimización y control operativo. En lugar de apoyarse en predicciones deterministas, el marco utiliza el pronóstico probabilístico por cuantiles para caracterizar múltiples escenarios de generación renovable en distintos horizontes de pronóstico. Estas salidas probabilísticas se incorporan luego a la programación adaptativa de baterías, la participación en reservas y la optimización del despacho en el mercado.

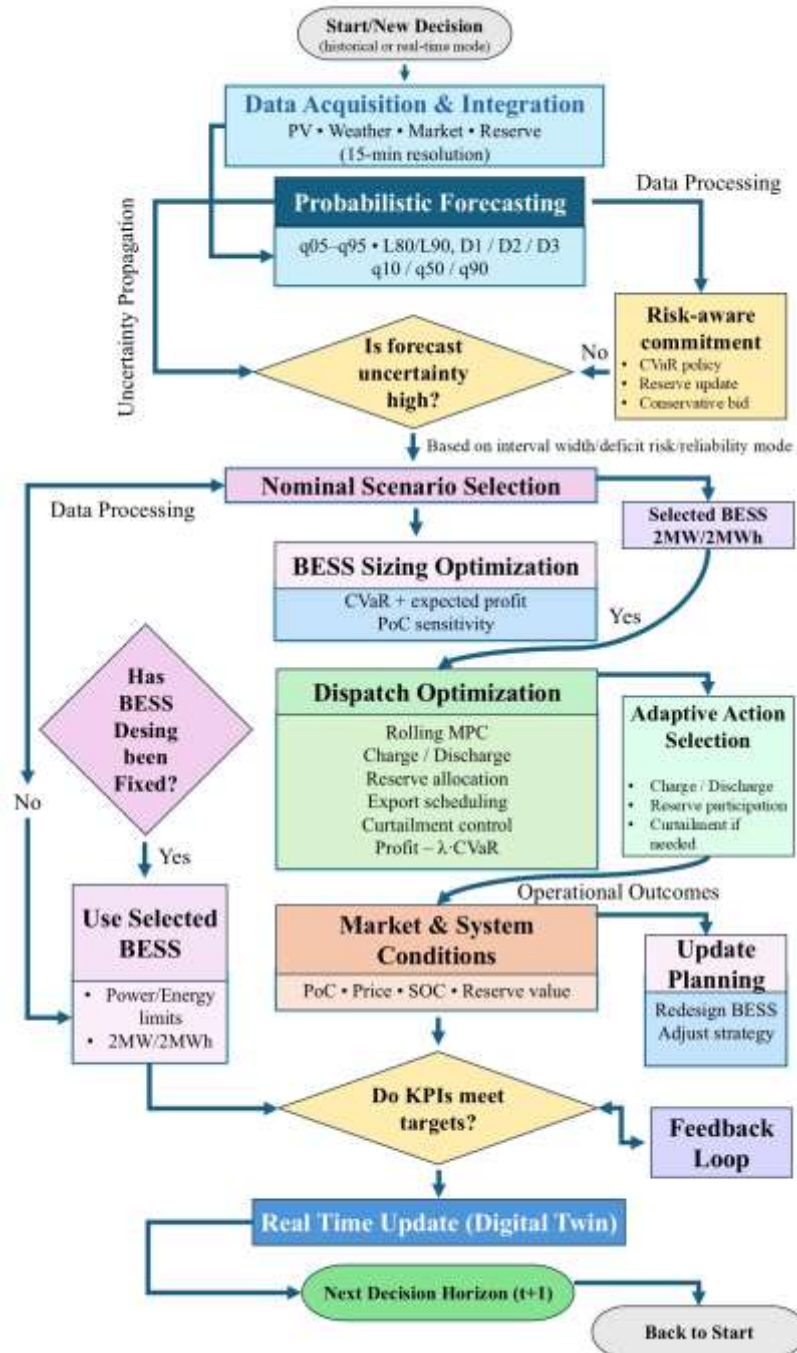
El motor de inteligencia operativa evalúa la incertidumbre del pronóstico junto con las condiciones del mercado eléctrico, las oportunidades del mercado de reservas, la flexibilidad de las baterías y las restricciones operativas para determinar acciones de control adaptativas. En consecuencia, la carga, la descarga, la programación de exportación y los compromisos de reserva se ajustan de forma continua según los niveles de confianza operativa y de severidad de la incertidumbre.

La adaptación operativa consciente del riesgo se implementa mediante un marco de optimización basado en el Valor en Riesgo Condicional (CVaR), ampliamente adoptado en la optimización estocástica de sistemas energéticos y en la toma de decisiones en el mercado eléctrico (Conejo et al., 2010; Shapiro et al., 2021). El objetivo operativo se formula como:

$$\max \mathbb{E}[Profit] - \lambda \cdot CVaR_{\beta}$$

Donde $\mathbb{E}[Profit]$ representa el beneficio operativo esperado, λ denota el parámetro de aversión al riesgo, y $CVaR_{\beta}$ cuantifica las pérdidas esperadas más allá de un nivel de confianza seleccionado β . Esta formulación permite al marco equilibrar la rentabilidad económica frente a la exposición a pérdidas operativas extremas y penalizaciones por desequilibrio bajo condiciones renovables inciertas (Wipplinger, 2007; Xuan et al., 2021).

Además, la capa de inteligencia operativa incorpora una coordinación adaptativa de la flexibilidad de las baterías, considerando las eficiencias de carga y descarga, las restricciones de SOC, la disponibilidad de margen de reserva, las condiciones de recorte y la dinámica de los precios de mercado. Esto permite al marco ajustar dinámicamente el comportamiento operativo según la evolución de la incertidumbre y las condiciones de operación del sistema. La Figura 4 muestra el flujo de trabajo de propagación de la incertidumbre orientado a la decisión implementado dentro del marco SYNAPCITY-DT.

Figura 4. Flujo de trabajo operativo de la incertidumbre a la decisión.

Fuente: Elaboración propia, 2026.

2.4. Inteligencia operativa del gemelo digital

El entorno de gemelo digital constituye la capa central de coordinación del marco SYNAPCITY-DT propuesto. A diferencia de los gemelos digitales convencionales orientados a la monitorización, el marco propuesto integra inteligencia operativa predictiva, analítica consciente de la incertidumbre, monitorización adaptativa y apoyo a la decisión en tiempo real dentro de un entorno ciberfísico sincronizado de forma continua.

El gemelo digital recibe de forma continua mediciones operativas, información de mercado, actualizaciones del pronóstico probabilístico y salidas de optimización del sistema PV-BESS físico. Estas entradas se utilizan para generar representaciones operativas dinámicas capaces de evaluar el comportamiento del sistema bajo condiciones cambiantes

de generación renovable y de mercado. Mediante la sincronización continua entre los estados operativos físicos y virtuales, el gemelo digital apoya la monitorización predictiva, el diagnóstico adaptativo, la evaluación de escenarios y la explicabilidad operativa.

Una de las principales funcionalidades del marco propuesto es la integración de la visualización de la incertidumbre y la transparencia operativa. Los intervalos de incertidumbre del pronóstico, los márgenes de flexibilidad de las baterías, el estado de asignación de reservas, las condiciones de mercado y los indicadores de riesgo operativo se monitorizan y visualizan de forma continua a través del entorno de gemelo digital. Esta capacidad permite tanto la toma de decisiones automatizada como la supervisión operativa con intervención humana (human-in-the-loop).

Además, el gemelo digital apoya el aprendizaje operativo adaptativo evaluando de forma continua la eficacia de las acciones operativas previas bajo condiciones de incertidumbre variables. Esto permite al marco pasar de enfoques de programación estáticos hacia una inteligencia energética urbana adaptativa y consciente del contexto.

La integración del pronóstico probabilístico, la optimización consciente del riesgo, la coordinación de la flexibilidad de las baterías y el control adaptativo asistido por gemelo digital permite que SYNAPCITY-DT opere como un marco escalable de inteligencia energética urbana, capaz de apoyar infraestructuras de ciudad inteligente resilientes e intensivas en renovables.

3. Metodología y caso de estudio

3.1. Caso de estudio y descripción del sistema

El marco SYNAPCITY-DT propuesto se validó utilizando datos operativos reales del Parque Solar Heinäneva, situado en Finlandia. El caso de estudio representa un sistema fotovoltaico (PV) a escala de servicio público conectado a la red, que opera bajo condiciones climáticas nórdicas caracterizadas por una fuerte variabilidad estacional, rápidas fluctuaciones de irradiancia y patrones de generación renovable muy dinámicos. Estas características hacen que el entorno finlandés sea particularmente adecuado para evaluar la inteligencia operativa consciente de la incertidumbre y la gestión adaptativa de la energía renovable.

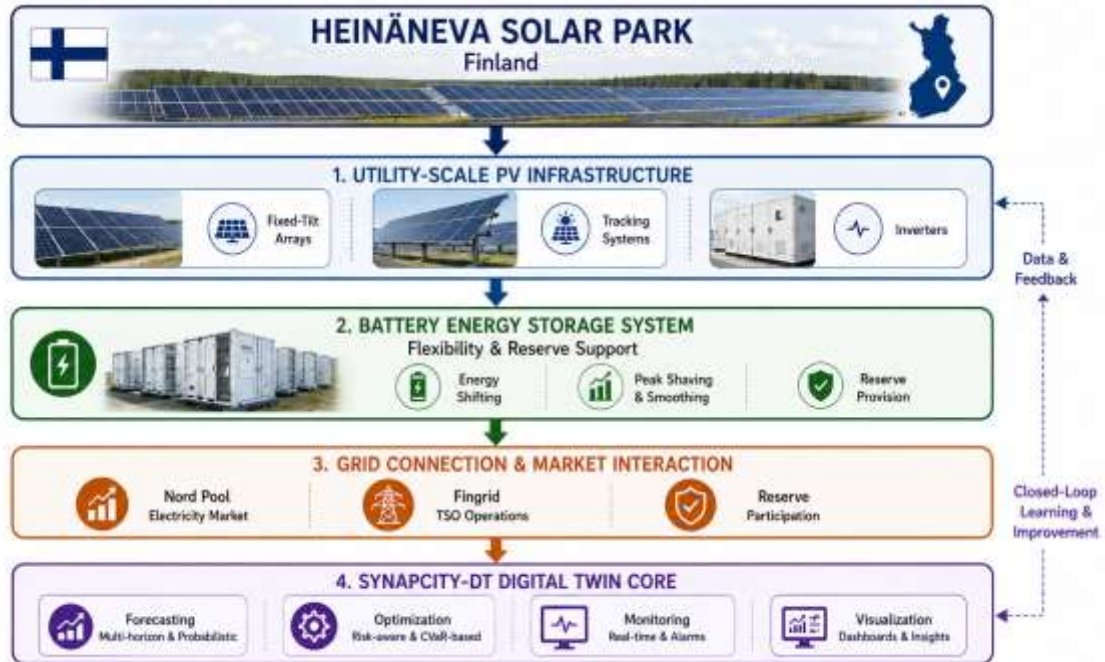
El Parque Solar Heinäneva opera como un activo de generación renovable a gran escala conectado a la red eléctrica a través de una interfaz de punto de conexión (PoC) restringido. La planta consta de aproximadamente 80 MW de capacidad fotovoltaica instalada, con una producción anual de energía renovable del orden de 80 GWh. El sistema incluye múltiples bloques fotovoltaicos que integran configuraciones tanto de inclinación fija como con seguimiento, para mejorar la captación de energía renovable bajo condiciones solares variables. Además, el marco operativo incorpora un sistema de almacenamiento de energía en baterías (BESS) empleado para la coordinación de la flexibilidad, la participación en reservas, la mitigación de la incertidumbre y el apoyo al despacho adaptativo.

El entorno operativo considerado en este estudio combina la generación renovable, la participación en el mercado eléctrico, la interacción con el mercado de reservas y la coordinación adaptativa del almacenamiento bajo condiciones renovables inciertas. A diferencia de la operación de energía renovable determinista convencional, el marco propuesto adapta de forma continua las decisiones operativas según la incertidumbre del pronóstico, las condiciones de mercado, las oportunidades de reserva y el estado de flexibilidad del sistema.

El caso de estudio utiliza mediciones operativas con resolución temporal de 15 minutos que abarcan aproximadamente 4,5 meses de operación real de la planta. El conjunto de datos integra mediciones de generación fotovoltaica, observaciones meteorológicas, precios del mercado eléctrico, información del mercado de reservas y variables operativas del sistema dentro de un marco unificado de inteligencia energética urbana. A través de este entorno de despliegue real, el marco propuesto evalúa la interacción entre el pronóstico probabilístico, la optimización operativa adaptativa y la inteligencia de decisión asistida por gemelo digital bajo condiciones prácticas de operación. La Figura 5 presenta una

panorámica del caso de estudio del nodo de energía inteligente PV-BESS finlandés a escala de servicio público, integrado dentro del marco SYNAPCITY-DT propuesto.

Figura 5. Nodo de energía inteligente PV-BESS a escala de servicio público en Finlandia.



Fuente: Elaboración propia, 2026.

3.2. Adquisición e integración de datos

El marco SYNAPCITY-DT integra conjuntos de datos operativos, meteorológicos y de mercado heterogéneos dentro de un entorno unificado de gemelo digital orientado a la decisión. El objetivo de la capa de integración de datos es sincronizar de forma continua las mediciones del mundo real con los procesos de pronóstico, optimización y control operativo adaptativo.

Las mediciones operativas fotovoltaicas se obtuvieron directamente del sistema de generación renovable a escala de servicio público e incluyen variables asociadas a la potencia de salida fotovoltaica, los niveles de exportación, las condiciones de recorte, la operación de los inversores y las mediciones de estado del sistema. Las observaciones meteorológicas se adquirieron del Instituto Meteorológico Finlandés (FMI) y se complementaron con conjuntos de datos de radiación solar de NASA POWER. Los precios del mercado eléctrico se obtuvieron del mercado del día siguiente de Nord Pool, mientras que la información del mercado de reservas se adquirió de los conjuntos de datos de la Reserva de Contención de Frecuencia (FCR) de Fingrid.

Todos los conjuntos de datos se sincronizaron a una resolución temporal unificada de 15 minutos para garantizar la compatibilidad entre las capas de pronóstico, optimización y control operativo. El preprocesamiento de datos incluyó la alineación temporal, la interpolación de observaciones faltantes, la normalización, la inspección de valores atípicos y la armonización de variables entre fuentes de datos heterogéneas. El conjunto de datos integrado contenía aproximadamente 12 700 observaciones operativas y múltiples variables de energía renovable, de mercado y ambientales utilizadas a lo largo del marco de pronóstico e inteligencia operativa.

La integración de múltiples conjuntos de datos heterogéneos permite al marco propuesto captar las interacciones entre la variabilidad renovable, la dinámica del mercado, la flexibilidad operativa y las oportunidades de reserva bajo condiciones reales de operación. Esta integración multidominio es esencial para apoyar la inteligencia energética urbana consciente de la incertidumbre y la operación adaptativa del gemelo digital.

Tabla 2. Resumen de los conjuntos de datos integrados

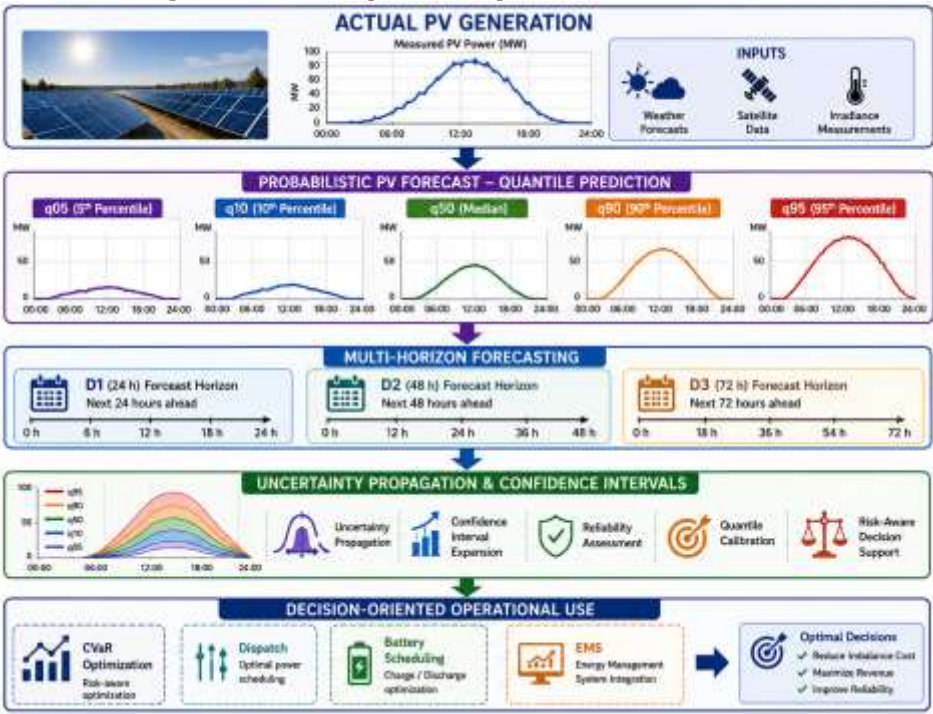
Categoría del conjunto de datos	Fuente	Resolución	Variables principales
Datos operativos fotovoltaicos	Planta fotovoltaica a escala de servicio público	15 min	Producción PV, exportación, recorte
Datos meteorológicos	FMI	15 min	Temperatura, irradiancia, velocidad del viento
Datos de radiación solar	NASA POWER	15 min	Indicadores de irradiancia solar
Datos del mercado eléctrico	Nord Pool	Cada hora	Precios de electricidad del día siguiente
Datos del mercado de reservas	Fingrid	Cada hora	Precios FCR y valores de reserva

Fuente: Elaboración propia, 2026.

3.3. Marco de pronóstico probabilístico

La capa de pronóstico de SYNAPCITY-DT está diseñada para caracterizar la incertidumbre de la generación renovable mediante un pronóstico probabilístico multihorizonte, en lugar de una estimación puntual determinista. En los sistemas energéticos urbanos ricos en renovables, la incertidumbre operativa afecta directamente a la programación del despacho, la asignación de reservas, el uso del almacenamiento y la participación en el mercado eléctrico. En consecuencia, el pronóstico consciente de la incertidumbre resulta esencial para la toma de decisiones operativas adaptativa. La Figura 6 muestra la estructura de pronóstico probabilístico multihorizonte utilizada dentro del marco SYNAPCITY-DT para la operación de energía renovable consciente de la incertidumbre.

Figura 6. Marco de pronóstico probabilístico multihorizonte



Fuente: Elaboración propia, 2026.

El marco de pronóstico propuesto genera pronósticos probabilísticos por cuantiles a través de múltiples horizontes operativos denominados D1, D2 y D3, que corresponden respectivamente a ventanas de pronóstico de 24 horas, 48 horas y 72 horas. Se utilizan intervalos por cuantiles que van de q_{05} a q_{95} para caracterizar las distribuciones de incertidumbre y los intervalos de confianza operativa. Los intervalos de predicción permiten a la capa de inteligencia operativa evaluar la severidad de la incertidumbre y adaptar el comportamiento operativo en consecuencia.

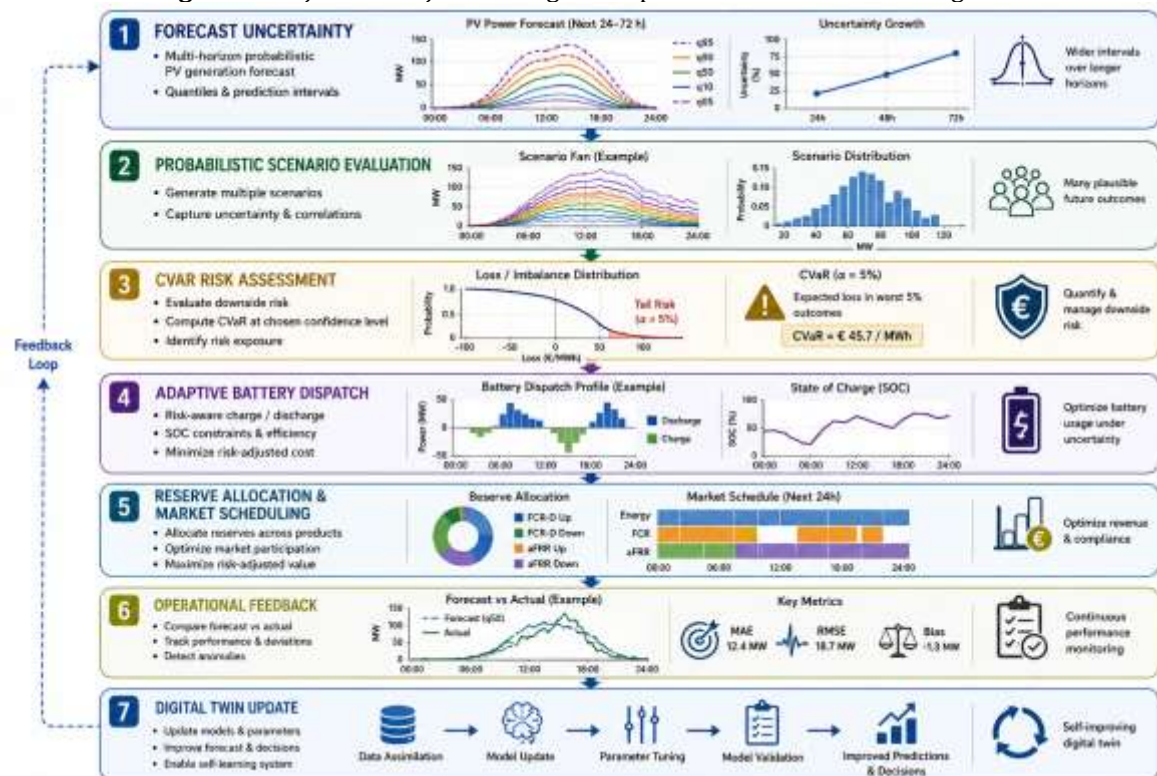
A diferencia de los enfoques de pronóstico determinista que proporcionan un único valor de generación esperado, el marco probabilístico capta explícitamente la variabilidad y la propagación de la incertidumbre bajo condiciones meteorológicas cambiantes. Por tanto, la capa de pronóstico permite al sistema operativo evaluar no solo la generación renovable esperada, sino también los límites de confianza, la exposición al riesgo y los requisitos de flexibilidad operativa.

El marco de pronóstico probabilístico se integra directamente con las capas de inteligencia operativa posteriores, lo que permite que la información de incertidumbre influya en la programación de reservas, el despacho de baterías, la mitigación del recorte y las decisiones del mercado eléctrico. Esta integración posibilita la adaptación operativa según la severidad de la incertidumbre y la confianza del pronóstico.

3.4. Optimización operativa consciente del riesgo

La capa de inteligencia operativa de SYNAPCITY-DT realiza una programación adaptativa de energía renovable bajo condiciones inciertas de generación renovable y de mercado eléctrico. El marco de optimización coordina simultáneamente el despacho de baterías, la participación en reservas, la programación de exportación, la mitigación del recorte y la interacción con el mercado, teniendo en cuenta la flexibilidad operativa y la propagación de la incertidumbre. La Figura 7 presenta un flujo de trabajo de inteligencia operativa consciente del riesgo que integra el pronóstico probabilístico, la coordinación adaptativa de baterías, la programación de reservas y la adaptación operativa asistida por gemelo digital.

Figura 7. Flujo de trabajo de inteligencia operativa consciente del riesgo



Fuente: Elaboración propia, 2026.

La adaptación operativa consciente del riesgo se implementa mediante un marco de optimización estocástica basado en el Valor en Riesgo Condicional (CVaR) introducido en la sección anterior. El objetivo de optimización equilibra la rentabilidad operativa esperada frente a la exposición a resultados operativos adversos y riesgos de desequilibrio bajo condiciones renovables inciertas. Al incorporar una lógica de decisión consciente de la incertidumbre, el marco posibilita un comportamiento operativo adaptativo según los niveles de confianza del pronóstico y la dinámica del mercado.

El motor de inteligencia operativa evalúa de forma continua y simultánea las distribuciones probabilísticas del pronóstico, los precios del mercado eléctrico, las oportunidades del mercado de reservas, las condiciones de estado de carga (SOC) de las baterías, las eficiencias de carga y descarga, las limitaciones de exportación y los requisitos de asignación de reservas. La operación de las baterías se ajusta dinámicamente según la severidad de la incertidumbre y las condiciones de confianza operativa. Bajo niveles elevados de incertidumbre, el marco adopta estrategias de programación más conservadoras, incluidos compromisos de reserva reducidos, restricciones de despacho adaptativas y mayores márgenes de flexibilidad operativa para mitigar la exposición al desequilibrio y la inestabilidad operativa.

Para mejorar la adaptabilidad operativa, el marco de optimización opera con una estructura de horizonte deslizante (rolling-horizon) en la que los pronósticos, las mediciones operativas y las condiciones de mercado se actualizan de forma continua dentro del entorno de gemelo digital. En cada intervalo operativo, el marco reevalúa la incertidumbre del pronóstico, las condiciones de mercado y la flexibilidad del sistema antes de actualizar las decisiones operativas para los horizontes de programación posteriores. Esta estructura adaptativa permite un aprendizaje operativo continuo y un refinamiento de las decisiones consciente de la incertidumbre bajo condiciones renovables y de mercado cambiantes.

Por tanto, la capa de optimización operativa funciona no solo como un mecanismo de programación, sino también como un motor de inteligencia operativa adaptativa, capaz de coordinar dinámicamente la generación renovable, la flexibilidad del almacenamiento y la participación en el mercado dentro del ecosistema energético urbano SYNAPCITY-DT más amplio.

3.5. Entorno operativo de gemelo digital

El marco SYNAPCITY-DT propuesto integra un entorno de gemelo digital sincronizado de forma continua para la monitorización en tiempo real, la visualización operativa, la analítica predictiva y la supervisión operativa adaptativa. El gemelo digital funciona como la capa de coordinación ciberfísica que conecta la inteligencia de pronóstico, la optimización operativa y la infraestructura física de energía renovable.

El gemelo digital recibe de forma continua mediciones operativas, actualizaciones de mercado, pronósticos probabilísticos, salidas de optimización e información de reservas del sistema PV-BESS físico. Estas entradas se integran dentro de un entorno unificado de visualización e inteligencia operativa, capaz de evaluar el comportamiento del sistema bajo condiciones renovables y de mercado variables.

Una funcionalidad importante del gemelo digital es la visualización operativa consciente de la incertidumbre. Los intervalos de confianza del pronóstico, los compromisos de reserva, las trayectorias del estado de carga, los programas de exportación y los indicadores de riesgo operativo se monitorizan y visualizan de forma continua en tiempo real. Esto permite tanto la adaptación operativa automatizada como la toma de decisiones de supervisión con intervención humana (human-in-the-loop).

Además, el gemelo digital apoya la analítica operativa predictiva y la evaluación de escenarios comparando de forma continua los resultados operativos con las condiciones esperadas del pronóstico y los objetivos de optimización. Mediante bucles de

retroalimentación adaptativos, el marco permite un refinamiento operativo continuo bajo condiciones de incertidumbre cambiantes.

La integración del pronóstico probabilístico, la optimización adaptativa y la sincronización del gemelo digital en tiempo real permite que SYNAPCITY-DT opere como una plataforma escalable de inteligencia energética urbana, adecuada para las futuras infraestructuras de ciudad inteligente intensivas en renovables.

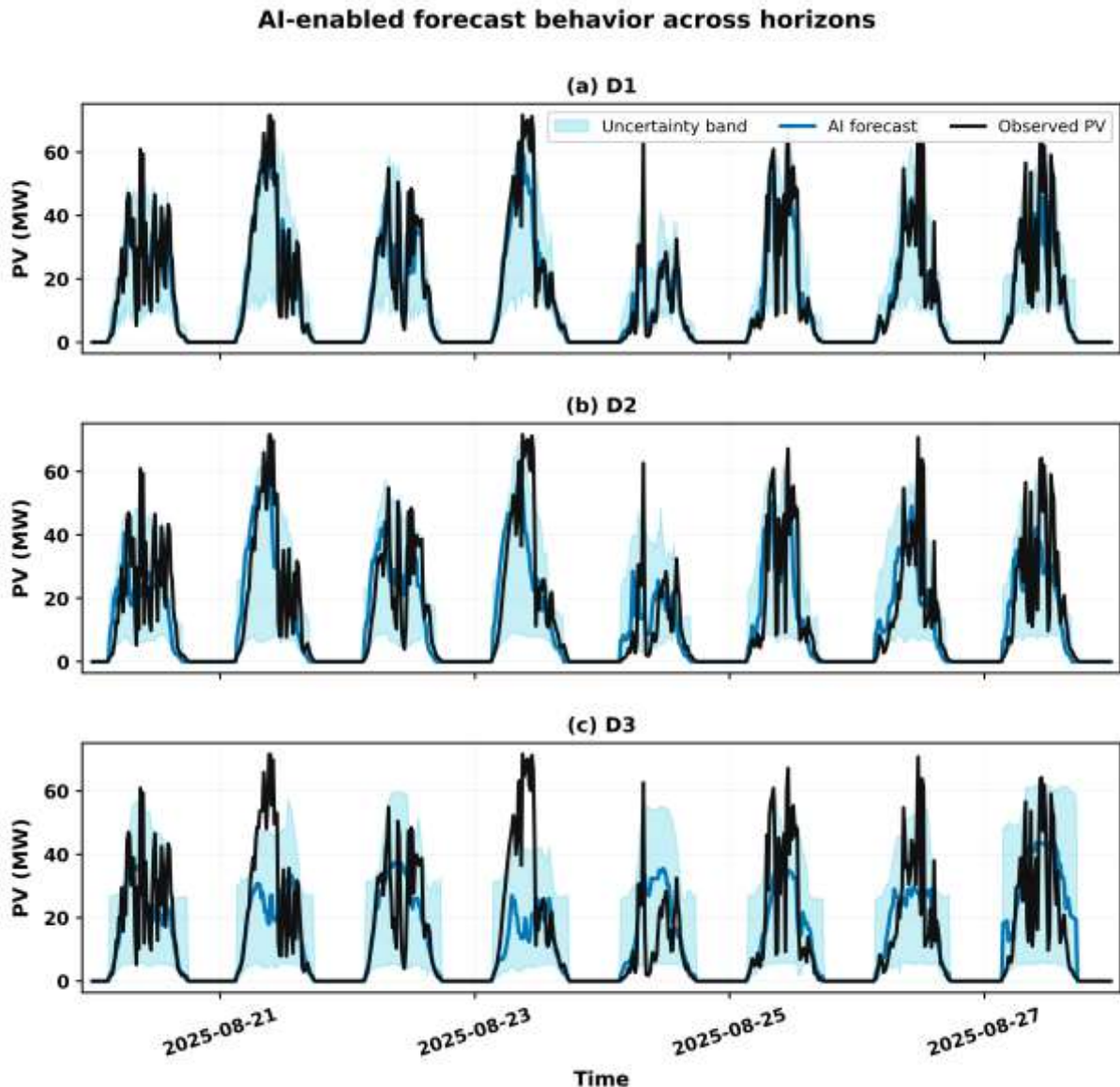
4. Fiabilidad del pronóstico y evolución de la incertidumbre

4.1. Entorno operativo de gemelo digital

La caracterización precisa de la incertidumbre de la generación renovable es esencial para la coordinación operativa adaptativa en entornos de energía inteligente intensivos en renovables. Dentro del marco SYNAPCITY-DT propuesto, el pronóstico probabilístico se utiliza no solo para la predicción de la generación renovable, sino también como un mecanismo directo de inteligencia operativa que apoya la programación adaptativa, la coordinación de reservas y la toma de decisiones consciente de la incertidumbre. La Figura 8 presenta el comportamiento del pronóstico multihorizonte del marco de pronóstico probabilístico habilitado por IA propuesto a través de los horizontes operativos D1, D2 y D3.

Los resultados del pronóstico demuestran una clara evolución de la propagación de la incertidumbre a medida que aumenta el horizonte de predicción. El horizonte de pronóstico D1 exhibe intervalos de incertidumbre relativamente estrechos y una fuerte concordancia entre los perfiles de generación fotovoltaica previstos y observados. En cambio, el horizonte D2 introduce una ampliación moderada de la incertidumbre, en particular durante condiciones de irradiancia que cambian rápidamente y períodos de generación pico. El horizonte D3 muestra intervalos de predicción sustancialmente mayores y una menor confianza operativa debido a la creciente acumulación de incertidumbre meteorológica a lo largo de horizontes de pronóstico más largos.

Las bandas de incertidumbre cada vez más amplias observadas en la Figura 8 ponen de relieve la importancia operativa del pronóstico probabilístico en la coordinación de la energía renovable. En lugar de apoyarse en pronósticos puntuales deterministas, el marco propuesto evalúa de forma continua los niveles de confianza del pronóstico y la evolución de los intervalos para apoyar un comportamiento operativo adaptativo. Bajo condiciones de alta incertidumbre, la capa de inteligencia operativa modifica dinámicamente el comportamiento de programación, los compromisos de reserva y la flexibilidad del despacho para reducir la exposición al desequilibrio y la inestabilidad operativa.

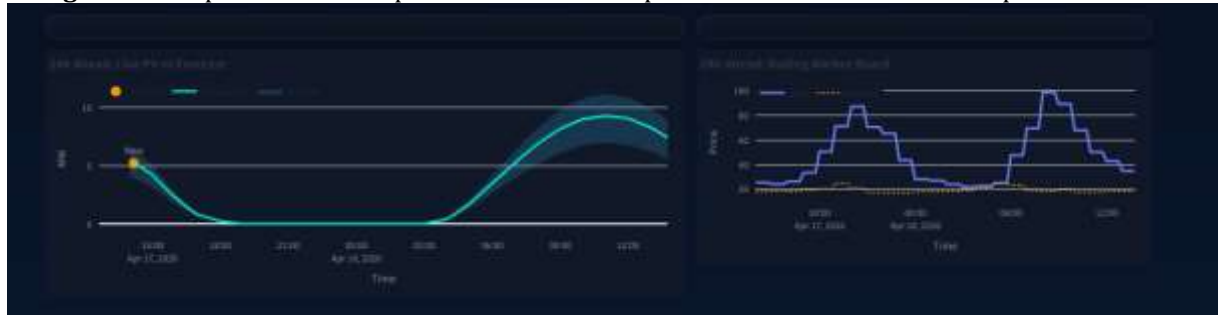
Figura 8. Comportamiento del pronóstico habilitado por IA en distintos horizontes operativos

Fuente: Elaboración propia, 2026.

El comportamiento del pronóstico revela además la creciente complejidad operativa asociada a la coordinación de energía renovable a largo horizonte. Mientras que los pronósticos a corto horizonte preservan una fuerte concordancia temporal con el comportamiento de generación observado, los horizontes de pronóstico más largos exhiben rangos de incertidumbre mayores y una menor estabilidad de la confianza, en particular durante intervalos de generación renovable muy variable. Estos resultados demuestran la necesidad de integrar la inteligencia operativa consciente de la incertidumbre directamente en los sistemas de gestión de energía renovable que operan dentro de las futuras infraestructuras de ciudad inteligente.

Para operativizar la inteligencia de pronóstico dentro de la coordinación del sistema en tiempo real, el marco SYNAPCITY-DT integra las salidas del pronóstico probabilístico directamente en el entorno operativo de gemelo digital. La Figura 9 ilustra el entorno de analítica operativa de pronóstico-mercado en tiempo real implementado dentro del marco de gemelo digital propuesto. El panel operativo sincroniza de forma continua los intervalos del pronóstico probabilístico, las condiciones de mercado deslizantes y los indicadores operativos dentro de un entorno unificado de inteligencia operativa.

Figura 9. Comportamiento del pronóstico habilitado por IA en distintos horizontes operativos



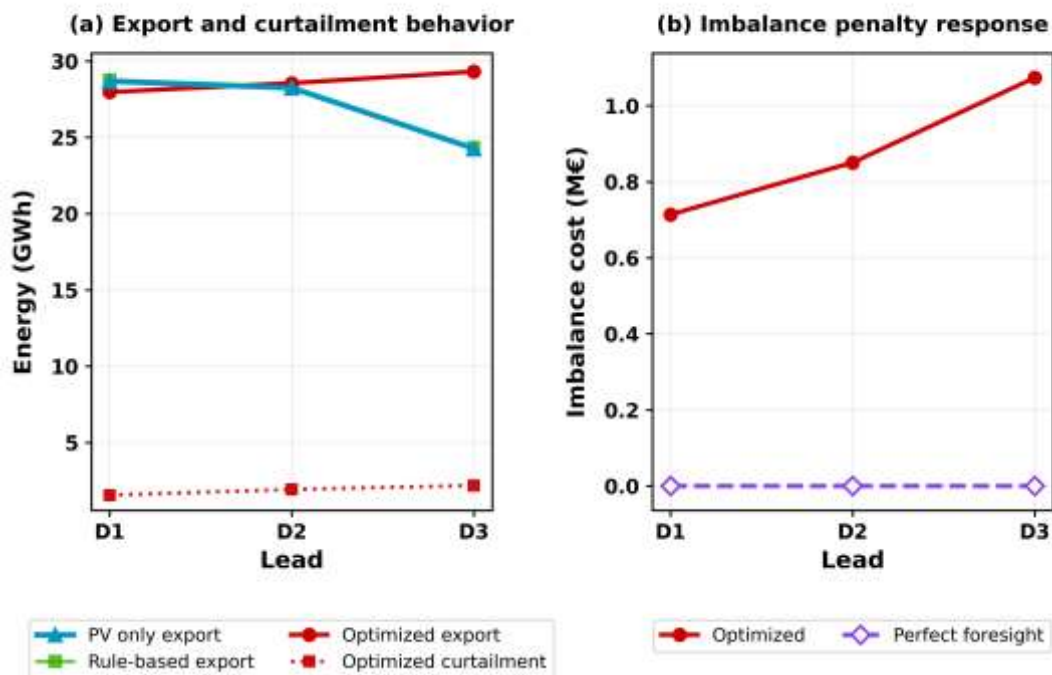
Fuente: Elaboración propia, 2026.

4.2. Riesgo operativo y desempeño económico

El comportamiento del desempeño operativo del marco SYNAPCITY-DT propuesto se evaluó bajo una coordinación de despacho consciente de la incertidumbre a través de los horizontes de pronóstico D1, D2 y D3. El análisis se centra en la optimización de la exportación, la gestión del recorte y la mitigación de los costes por desequilibrio bajo una creciente incertidumbre del pronóstico y condiciones operativas cambiantes. La Figura 10 presenta el comportamiento operativo del sistema bajo una coordinación de despacho inteligente.

Figura 10. Comportamiento operativo del sistema bajo despacho inteligente

Operational system behavior under intelligent dispatch



Fuente: Elaboración propia, 2026.

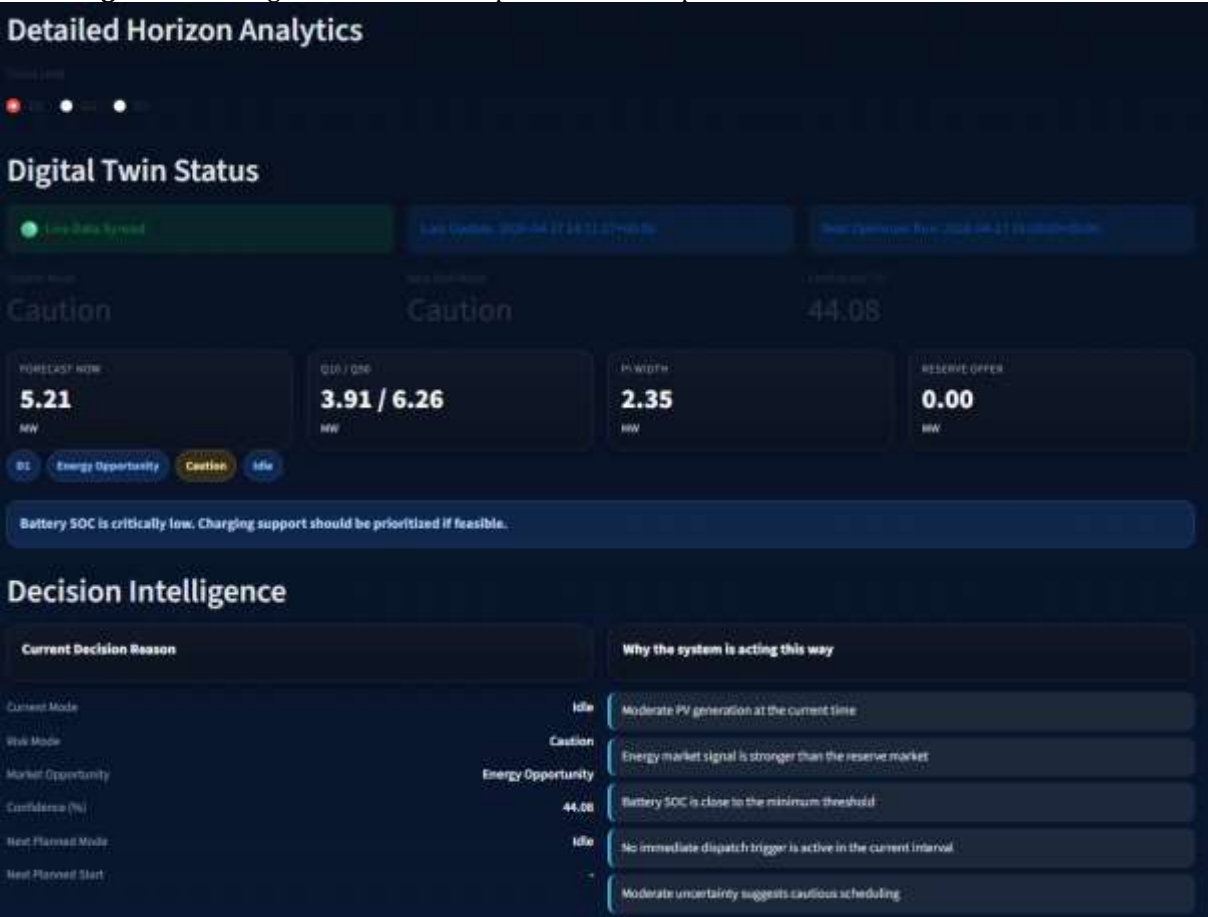
Los resultados demuestran que la estrategia operativa optimizada preserva de forma consistente un mayor rendimiento de exportación en comparación con los enfoques convencionales de solo PV y de despacho basado en reglas. Mientras que las estrategias de solo PV y basadas en reglas experimentan una degradación sustancial de la exportación bajo una incertidumbre creciente, el marco de optimización propuesto mantiene un rendimiento de exportación relativamente estable a través de todos los horizontes de pronóstico mediante una programación adaptativa y una coordinación operativa consciente de la incertidumbre.

El comportamiento operativo revela además la creciente importancia de una coordinación inteligente del recorte bajo condiciones de incertidumbre a largo horizonte. Aunque el recorte optimizado aumenta moderadamente de D1 a D3, el marco de despacho adaptativo logra preservar una mayor estabilidad operativa de la exportación mientras mitiga una exposición excesiva al desequilibrio. Esto demuestra que un recorte estratégico limitado puede mejorar la robustez operativa global cuando se coordina mediante mecanismos de optimización conscientes de la incertidumbre.

La Figura 10(b) ilustra además la evolución del coste por desequilibrio bajo una creciente incertidumbre del pronóstico. Las penalizaciones por desequilibrio aumentan gradualmente de D1 a D3 debido a la ampliación de los intervalos de incertidumbre del pronóstico observada en la Sección 4.1. Sin embargo, el marco de optimización operativa mantiene un crecimiento controlado del desequilibrio a pesar de las condiciones de generación renovable cada vez más inciertas. En cambio, el escenario de referencia de previsión perfecta elimina teóricamente las penalizaciones por desequilibrio, pero representa un escenario operativo idealizado no alcanzable en despliegues prácticos del mundo real.

Los resultados operativos demuestran, por tanto, la eficacia de integrar el pronóstico probabilístico y el despacho adaptativo basado en CVaR dentro de un marco unificado de inteligencia operativa. En lugar de maximizar la exportación de forma agresiva bajo condiciones inciertas, el marco propuesto equilibra dinámicamente la rentabilidad, la estabilidad operativa y la exposición al riesgo mediante una coordinación adaptativa de las decisiones.

Figura 11. Inteligencia de decisión operativa en tiempo real dentro de SYNAPCITY-DT



Fuente: Elaboración propia, 2026.

Para operativizar estas decisiones adaptativas dentro del entorno de gemelo digital en tiempo real, la plataforma SYNAPCITY-DT evalúa de forma continua los niveles de confianza

operativa, las condiciones de estado de la batería, la propagación de la incertidumbre y las oportunidades de mercado. La Figura 11 presenta el entorno de inteligencia de decisión operativa integrado dentro del marco de gemelo digital.

El entorno operativo de gemelo digital evalúa de forma continua indicadores operativos conscientes de la incertidumbre, como la confianza del pronóstico, la anchura del intervalo de predicción, las oportunidades de reserva, el estado de carga (SOC) de la batería y la disponibilidad operativa adaptativa. La plataforma categoriza dinámicamente las condiciones operativas en modos operativos adaptativos en función de la incertidumbre en evolución y el comportamiento del estado del sistema.

Como se muestra en la Figura 11, el entorno operativo identifica condiciones de incertidumbre elevada mediante la interpretación combinada de los intervalos del pronóstico, las métricas de confianza y el estado operativo de la batería. El módulo de inteligencia de decisión genera a continuación explicaciones de razonamiento operativo que apoyan una supervisión operativa explicable y la transparencia del control adaptativo. En lugar de funcionar como una plataforma de optimización estática, el marco adapta de forma continua la coordinación del despacho según la evolución de la generación renovable y las condiciones de mercado.

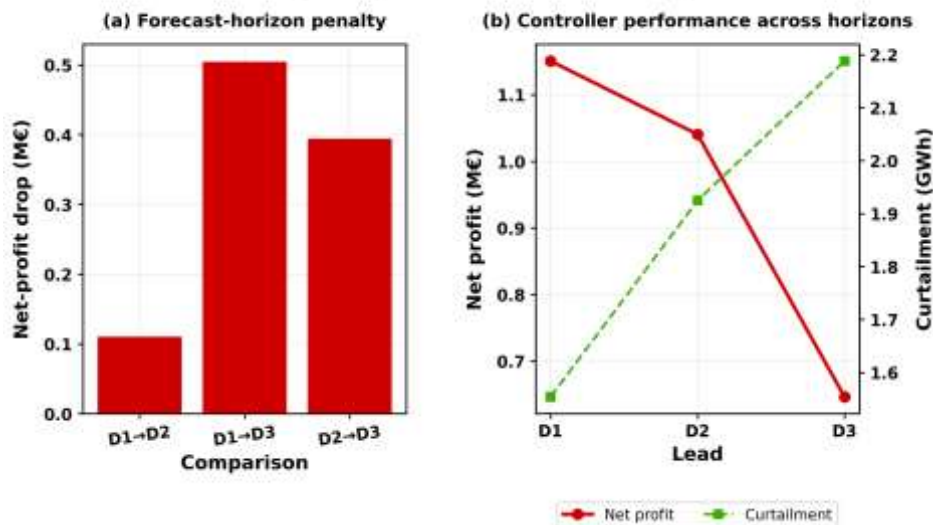
El acoplamiento operativo entre la conciencia de la incertidumbre y la explicabilidad de las decisiones es particularmente importante para las futuras infraestructuras energéticas de ciudad inteligente, donde la variabilidad renovable, la volatilidad del mercado eléctrico y la complejidad operativa interactúan de forma continua. Mediante la sincronización del gemelo digital en tiempo real y el razonamiento operativo adaptativo, el marco propuesto mejora tanto la inteligencia operativa automatizada como la conciencia situacional supervisada por humanos.

En conjunto, los resultados demuestran que el marco SYNAPCITY-DT combina con éxito el pronóstico probabilístico, la optimización consciente del riesgo, la coordinación operativa adaptativa y la inteligencia explicable de gemelo digital en un entorno operativo unificado de energía renovable, capaz de apoyar una gestión energética de ciudad inteligente resiliente y consciente de la incertidumbre.

4.3. Adaptive Battery Coordination and Operational Flexibility

La coordinación adaptativa de baterías es esencial para los sistemas de energía inteligente ricos en renovables que operan bajo condiciones inciertas de generación y de mercado eléctrico. Dentro del marco SYNAPCITY-DT, el sistema de almacenamiento de energía en baterías (BESS) funciona no solo como un activo de balance de energía, sino también como un mecanismo adaptativo de flexibilidad operativa, capaz de coordinar la participación en reservas, la mitigación de la incertidumbre, la estabilización de la exportación y la adaptación del despacho consciente del riesgo. La Figura 12 presenta el comportamiento de flexibilidad operativa del marco de control inteligente propuesto a través de distintos horizontes de pronóstico.

Figura 12. Penalización por horizonte de pronóstico y rendimiento del controlador inteligente
Forecast-horizon penalty for smart controller performance



Fuente: Elaboración propia, 2026.

Los resultados demuestran una clara relación operativa entre la incertidumbre del pronóstico y el comportamiento de coordinación adaptativa de baterías. A medida que los horizontes de pronóstico aumentan de D1 a D3, el marco operativo experimenta reducciones progresivas del beneficio operativo neto, acompañadas de un comportamiento de recorte creciente. Esta degradación del desempeño se asocia principalmente a la ampliación de los intervalos de incertidumbre analizada en la Sección 4.1, que obliga al controlador operativo a adoptar estrategias de programación cada vez más conservadoras para reducir la exposición al desequilibrio y la inestabilidad operativa.

A pesar de la creciente incertidumbre, el marco de control inteligente preserva la estabilidad operativa mediante una coordinación adaptativa de la flexibilidad. En lugar de maximizar de forma agresiva la exportación bajo condiciones inciertas, el controlador reasigna dinámicamente la flexibilidad de las baterías hacia la estabilización operativa y el comportamiento de apoyo a reservas. Esto demuestra la importancia de una programación de baterías consciente de la incertidumbre dentro de los entornos de gestión energética intensivos en renovables.

La Figura 12(a) ilustra además la penalización por horizonte de pronóstico asociada a la creciente propagación de la incertidumbre. La mayor penalización operativa se produce entre los horizontes de pronóstico D1 y D3, lo que pone de relieve el considerable valor operativo del pronóstico probabilístico a corto horizonte para la coordinación adaptativa de la energía renovable. Estos resultados confirman que la rentabilidad operativa está fuertemente acoplada a la fiabilidad del pronóstico y a la gestión adaptativa de la flexibilidad.

Para apoyar la adaptación operativa en tiempo real, el marco SYNAPCITY-DT evalúa de forma continua las transiciones operativas, la suavidad del despacho y el comportamiento de conmutación mediante la supervisión integrada del gemelo digital. La Figura 13 presenta el entorno de analítica del comportamiento de conmutación operativa implementado dentro del marco propuesto.

Figura 13. Analítica del comportamiento de conmutación operativa y coordinación de la flexibilidad



Fuente: Elaboración propia, 2026.

La analítica operativa revela que la frecuencia de transición del despacho aumenta bajo horizontes de pronóstico más largos, debido a la creciente adaptación operativa impulsada por la incertidumbre. El horizonte operativo D1 exhibe un comportamiento de despacho relativamente estable con una actividad de conmutación mínima, mientras que los horizontes D2 y D3 requieren transiciones operativas adaptativas progresivamente mayores entre los modos de carga, descarga y apoyo a reservas.

Es importante destacar que el marco operativo mantiene un comportamiento de conmutación controlado a pesar de las crecientes condiciones de incertidumbre. Una conmutación excesiva del despacho puede acelerar la degradación de la batería, reducir la estabilidad operativa e incrementar el estrés del sistema. Por ello, el marco propuesto incorpora mecanismos de coordinación operativa adaptativa que equilibran la capacidad de respuesta de la flexibilidad con la suavidad del despacho y la continuidad operativa.

Además de la monitorización de las transiciones operativas, el entorno de gemelo digital supervisa de forma continua el estado de carga (SOC) de la batería, las oportunidades de reserva, la disponibilidad operativa y las condiciones de mercado. La Figura 14 presenta el entorno de acción adaptativa de baterías y coordinación de reservas integrado dentro del gemelo digital operativo.

Figura 14. Entorno de carga–descarga adaptativa de baterías y coordinación de reservas



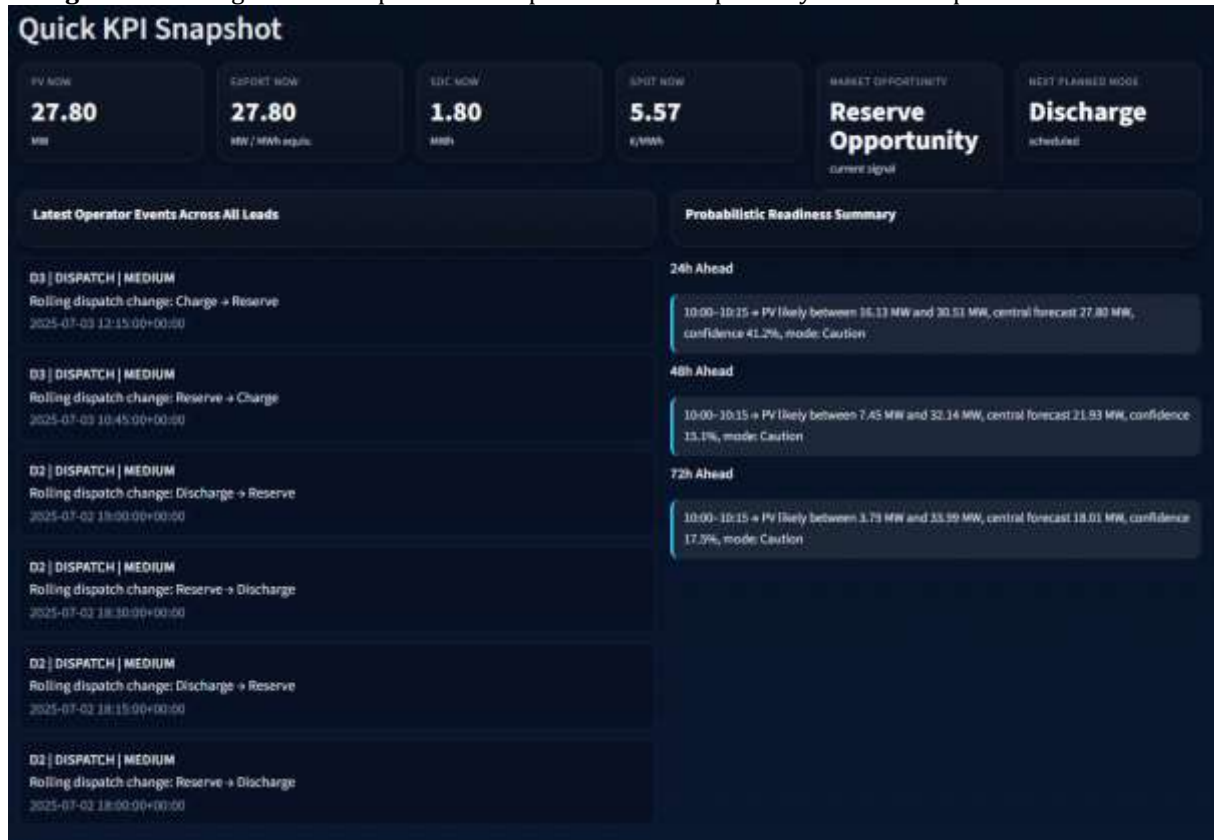
Fuente: Elaboración propia, 2026.

El entorno operativo coordina dinámicamente la carga, la descarga y la asignación de reservas según la incertidumbre del pronóstico, las condiciones del mercado eléctrico, las restricciones de SOC de la batería y los niveles de riesgo operativo. Como se muestra en la Figura 14, el marco evalúa de forma continua las oportunidades operativas al tiempo que preserva las restricciones de seguridad operativa y los márgenes de reserva conscientes de la incertidumbre.

Los resultados de programación operativa demuestran además la integración de la inteligencia operativa explicable dentro del marco propuesto. El entorno de gemelo digital proporciona una visibilidad continua de las acciones operativas programadas, el contexto operativo, la asignación de capacidad de reserva y las recomendaciones operativas adaptativas. Esto mejora tanto la coordinación operativa automatizada como la conciencia situacional supervisada por humanos dentro de los entornos de energía inteligente ricos en renovables. El entorno integrado de KPI sincroniza de forma continua los eventos operativos, las condiciones de confianza del pronóstico, las oportunidades de reserva y los indicadores de flexibilidad operativa a través de múltiples horizontes operativos. Esto permite al marco operativo mantener una coordinación adaptativa bajo condiciones de generación renovable y de mercado eléctrico en evolución dinámica.

En conjunto, los resultados demuestran que el marco SYNAPCITY-DT propuesto integra con éxito la coordinación de baterías consciente de la incertidumbre, la flexibilidad operativa adaptativa, la inteligencia de apoyo a reservas y la supervisión explicable del gemelo digital en un entorno operativo unificado, capaz de apoyar una gestión resiliente de la energía renovable dentro de las futuras infraestructuras de ciudad inteligente.

La Figura 15 presenta además el entorno integrado de disponibilidad operativa y flexibilidad probabilística dentro del marco de gemelo digital propuesto.

Figura 15. Inteligencia de disponibilidad operativa en tiempo real y flexibilidad probabilística

Fuente: Elaboración propia, 2026.

4.4. Entorno integrado de inteligencia operativa de gemelo digital

El marco SYNAPCITY-DT se evaluó además mediante un entorno operativo integrado de gemelo digital, capaz de combinar el pronóstico probabilístico, la optimización adaptativa del despacho, la coordinación de reservas, la inteligencia del operador y la monitorización de decisiones en tiempo real dentro de una interfaz operativa unificada. A diferencia de los paneles de control supervisorio convencionales, que proporcionan principalmente una visualización pasiva, el marco propuesto realiza un razonamiento operativo activo sincronizando de forma continua la incertidumbre del pronóstico, las señales de mercado, las condiciones de las baterías y las restricciones operativas en una capa de inteligencia adaptativa.

La Figura 16 presenta el panel operativo global del entorno SYNAPCITY-DT propuesto. La plataforma integrada combina la monitorización operativa multihorizonte (D1, D2 y D3), la evaluación de disponibilidad probabilística, la coordinación del despacho, la interpretación del estado de riesgo, la programación de reservas y las alertas operativas dentro de un único entorno de control inteligente. El marco actualiza de forma continua los intervalos de confianza del pronóstico, las condiciones de estado de carga de la batería, las oportunidades de reserva, el comportamiento de exportación y los indicadores de conciencia del riesgo bajo horizontes operativos deslizantes. Esto permite una coordinación dinámica entre la inteligencia de pronóstico y las decisiones de control operativo.

El entorno de gemelo digital incorpora además funciones de explicabilidad de la inteligencia de decisión. En lugar de mostrar únicamente las salidas operativas, el marco proporciona explicaciones interpretables sobre por qué se seleccionan acciones específicas bajo condiciones operativas cambiantes. Como se muestra en la Figura 16, la interfaz operativa identifica simultáneamente las oportunidades de reserva, los niveles de incertidumbre, las restricciones de las baterías y las condiciones de mercado, al tiempo que genera recomendaciones operativas adaptativas. Este comportamiento operativo

explicable resulta cada vez más importante en los futuros entornos de red inteligente habilitados por IA, donde los operadores requieren una comprensión transparente de las decisiones autónomas del sistema.

El panel operativo también demuestra una coordinación de la flexibilidad multicapa a través de los horizontes de pronóstico. El horizonte D1 exhibe en general una mayor confianza del pronóstico y una menor exposición a la incertidumbre, mientras que D2 y D3 activan cada vez más modos operativos orientados a la cautela debido a intervalos de incertidumbre más amplios y a un mayor riesgo operativo. En consecuencia, el marco modifica de forma adaptativa la participación en reservas, el comportamiento de carga/descarga y la agresividad del despacho según la propagación de la incertidumbre a través de los horizontes de pronóstico.

La Figura 16 presenta el entorno integrado de inteligencia operativa SYNAPCITY-DT desarrollado para la coordinación de energía renovable en tiempo real y la supervisión operativa adaptativa.

Figura 16. Entorno integrado de inteligencia operativa SYNAPCITY-DT



Fuente: Elaboración propia, 2026.

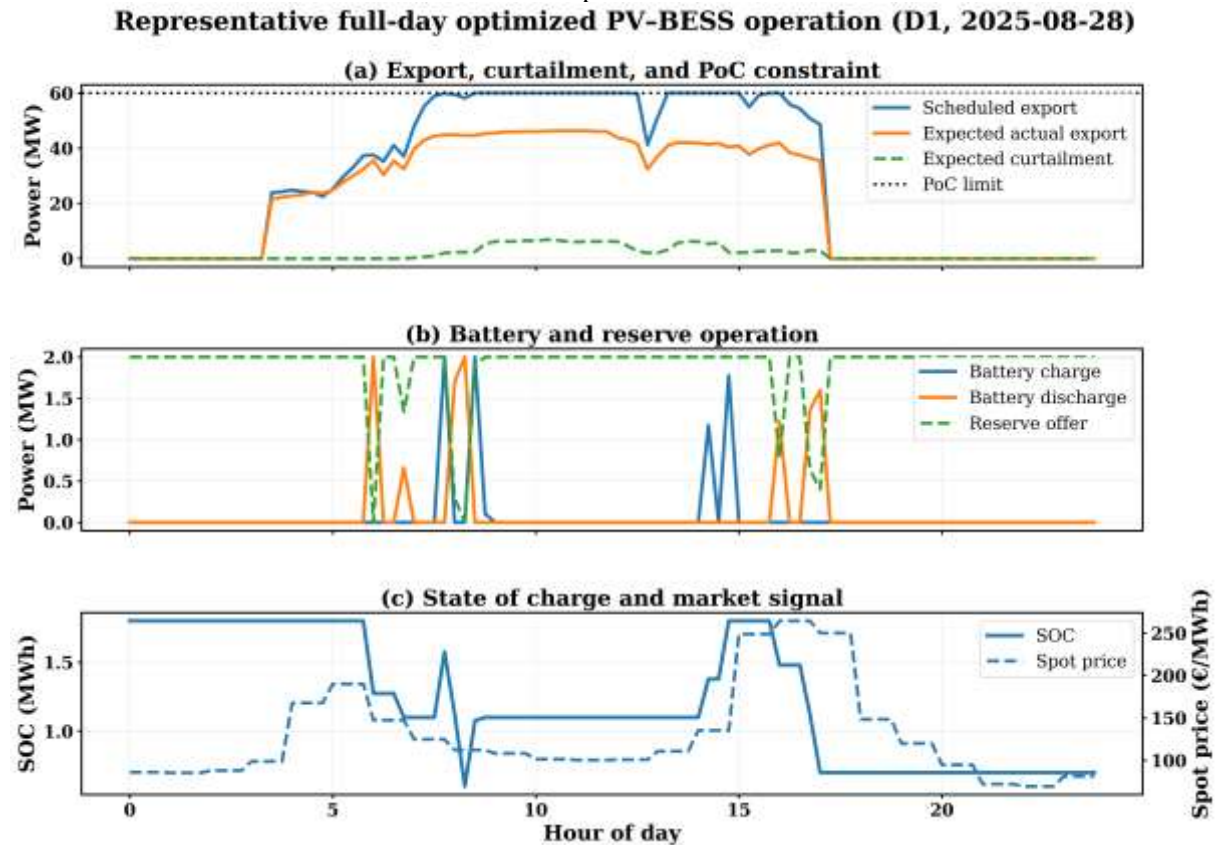
La Figura 17 ilustra una operación representativa de un día completo del marco de despacho PV-BESS optimizado bajo el horizonte operativo D1. La figura demuestra la interacción coordinada entre la exportación programada, la generación renovable esperada, la mitigación del recorte, la participación en reservas y la operación de las baterías bajo la limitación impuesta por el punto de conexión (PoC). Durante los períodos de alta generación, el marco de optimización ajusta dinámicamente la programación de exportación al tiempo que coordina la carga de baterías y la asignación de reservas para mantener la viabilidad operativa y reducir la exposición al desequilibrio.

Las capas operativas inferiores mostradas en la Figura 17 demuestran además la interacción adaptativa entre el comportamiento de carga/descarga de las baterías, la activación de reservas, la evolución del estado de carga y las señales del mercado eléctrico a lo largo del horizonte operativo. El marco de optimización preserva la flexibilidad operativa manteniendo estratégicamente la disponibilidad de energía de la batería durante los períodos inciertos, al tiempo que aprovecha las condiciones de mercado favorables bajo niveles de confianza operativa más altos. Este comportamiento adaptativo coordinado ilustra cómo el entorno de gemelo digital propuesto realiza una sincronización operativa continua entre el pronóstico consciente de la incertidumbre, la participación en el mercado y la gestión de la flexibilidad de las baterías.

En conjunto, los resultados demuestran que SYNAPCITY-DT no opera meramente como una plataforma de visualización, sino como un marco integrado de inteligencia operativa, capaz de combinar el pronóstico probabilístico, la optimización adaptativa, el apoyo explicable a la decisión y la coordinación operativa en tiempo real dentro de un entorno unificado de gestión energética de ciudad inteligente. El marco representa, por tanto, una

transición desde las arquitecturas convencionales de monitorización pasiva hacia sistemas inteligentes de coordinación energética urbana ciberfísica, capaces de apoyar las futuras infraestructuras de red inteligente dominadas por renovables.

Figura 17. Comportamiento operativo representativo de un día completo del marco de despacho PV-BESS optimizado



Fuente: Elaboración propia, 2026.

4.5. Implicaciones a nivel de sistema para la ciudad inteligente e inteligencia energética urbana

La Figura 18 presenta el resumen comparativo integrado de la estrategia operativa optimizada a través de los horizontes de pronóstico D1, D2 y D3. Los resultados demuestran cómo la incertidumbre del horizonte de pronóstico influye en el desempeño económico a largo plazo, la eficiencia de utilización de renovables, el comportamiento de uso de las baterías y los indicadores de sostenibilidad operativa dentro del marco SYNAPCITY-DT propuesto.

Los resultados de beneficio neto anual indican que el horizonte operativo D1 alcanzó el mayor desempeño económico, llegando aproximadamente a 3,18 millones de euros anuales, seguido de D2 con aproximadamente 2,88 millones de euros y de D3 con aproximadamente 1,79 millones de euros. Se observa una tendencia similar en el análisis del valor actual neto (VAN), donde D1 alcanzó el mayor valor de inversión a largo plazo, superando los 26 millones de euros, mientras que D3 produjo el VAN más bajo, de aproximadamente 14,5 millones de euros. Estos resultados demuestran que los horizontes operativos más cortos, con menor exposición a la incertidumbre, permiten una programación económicamente más eficiente y una mejor captación del valor de la energía renovable.

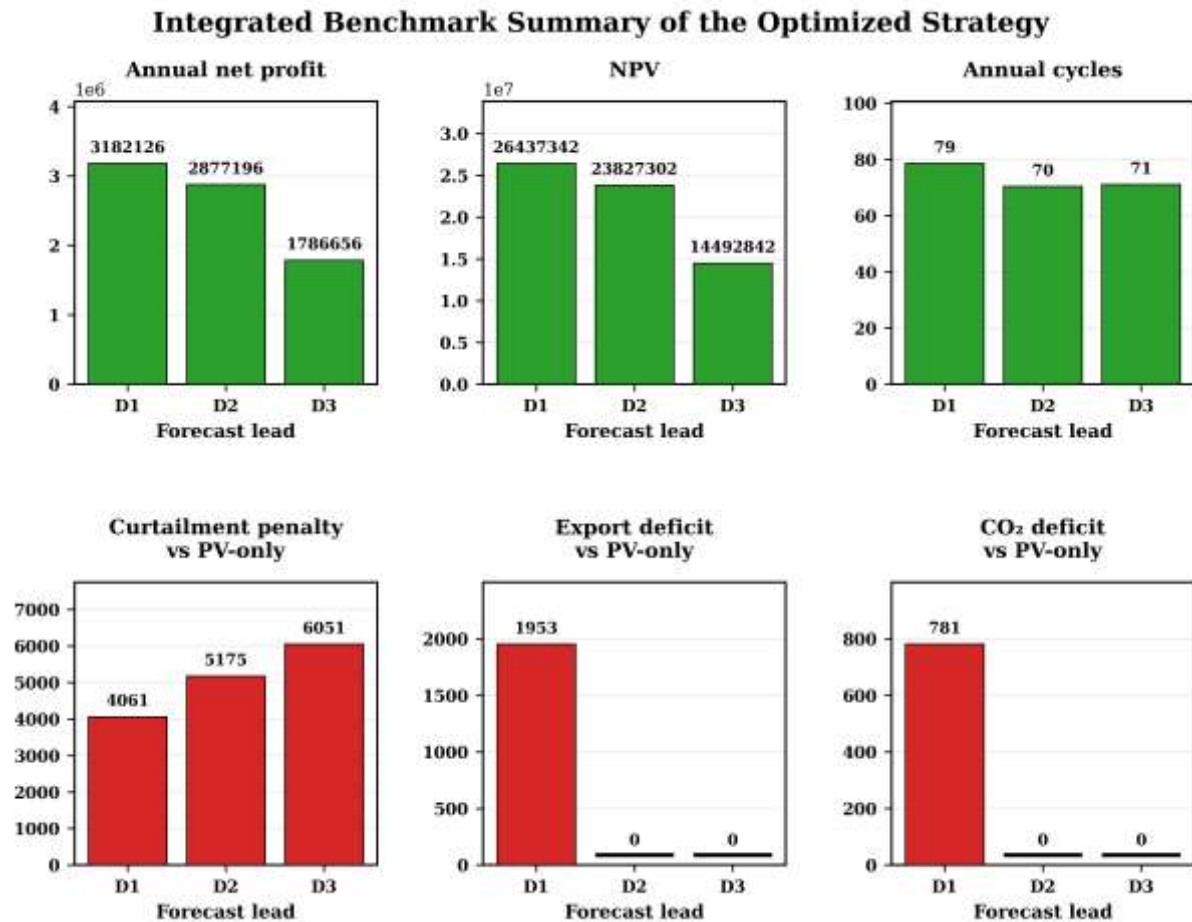
El comportamiento anual de ciclado de las baterías se mantuvo relativamente estable a través de los horizontes operativos, con aproximadamente 79 ciclos para D1, 70 ciclos para D2 y 71 ciclos para D3. Esto indica que el marco de optimización propuesto mantiene un uso equilibrado del almacenamiento sin incrementar excesivamente la exposición a la

degradación de las baterías, a pesar de las condiciones de incertidumbre operativa cambiantes. Los resultados sugieren, por tanto, que el marco coordina con éxito de forma simultánea la flexibilidad operativa y la programación consciente de la degradación.

El análisis relativo al recorte demuestra además la influencia de la incertidumbre del pronóstico en la eficiencia de utilización de la energía renovable. Como se muestra en la Figura 18, las penalizaciones por recorte aumentaron progresivamente de D1 hacia D3, lo que indica que unos intervalos de incertidumbre más amplios obligan a una programación de exportación y a una reserva de flexibilidad cada vez más conservadoras. En consecuencia, los horizontes de pronóstico más largos reducen la eficiencia de utilización de la energía renovable debido a la mayor incertidumbre operativa y al comportamiento de control precautorio.

Curiosamente, los indicadores de déficit de exportación y relacionados con el CO₂ revelan características operativas distintas entre horizontes. El horizonte D1 exhibió déficits medibles de exportación y de CO₂ en relación con la operación de solo PV, mientras que D2 y D3 mostraron un comportamiento de déficit cercano a cero. Esto indica que la estrategia de horizonte más corto prioriza una participación agresiva en el mercado y la utilización de la energía renovable para maximizar la rentabilidad, introduciendo ocasionalmente déficits de exportación limitados y las correspondientes contrapartidas operativas. En cambio, las estrategias más conservadoras D2 y D3 reducen la exposición operativa y los riesgos de déficit adoptando políticas de programación más estrictas y conscientes de la incertidumbre.

En conjunto, los resultados a nivel de sistema demuestran que el marco SYNAPCITY-DT propuesto permite contrapartidas adaptativas entre la rentabilidad, la utilización de la energía renovable, la robustez operativa y la gestión de la incertidumbre a través de los horizontes de pronóstico. El marco proporciona, por tanto, no solo una optimización localizada del despacho, sino también una inteligencia operativa energética urbana más amplia, capaz de apoyar las futuras infraestructuras de ciudad inteligente dominadas por renovables mediante el pronóstico coordinado, la gestión adaptativa de la flexibilidad y la toma de decisiones operativas consciente de la incertidumbre.

Figura 18. Resumen comparativo integrado de la estrategia operativa optimizada

Fuente: Elaboración propia, 2026.

5. Discusión

5.1. Inteligencia operativa y coordinación energética guiada por el pronóstico

Los resultados demuestran que el desempeño operativo de la energía renovable depende en gran medida de la incertidumbre del pronóstico y de su propagación hacia la toma de decisiones operativas posterior. El marco SYNAPCITY-DT propuesto aborda este reto integrando estrechamente el pronóstico probabilístico, la optimización operativa adaptativa y la coordinación del gemelo digital dentro de un entorno unificado de inteligencia operativa. A diferencia de los enfoques convencionales de programación de energía renovable, donde el pronóstico y el despacho se tratan con frecuencia como tareas aisladas, el marco propuesto incorpora de forma continua la conciencia de la incertidumbre en la coordinación operativa y la gestión adaptativa de la flexibilidad.

Los resultados operativos comparativos mostrados en las Figuras 9, 11, 13 y 18 indican que los horizontes de pronóstico más cortos proporcionan un desempeño operativo y una eficiencia económica sustancialmente mejores. El horizonte D1 alcanzó de forma consistente la mayor rentabilidad, la mayor utilización de la energía renovable y la menor exposición al recorte, debido a unos intervalos de incertidumbre más estrechos y a una mayor confianza en el despacho. En cambio, el horizonte D3 exhibió un comportamiento operativo cada vez más conservador, derivado de una mayor propagación de la incertidumbre y de una exposición al riesgo operativo elevada.

Estos hallazgos demuestran que el desempeño del pronóstico operativo no debería evaluarse únicamente mediante métricas estadísticas de precisión como el RMSE o el MAE. En cambio, el valor operativo del pronóstico debería valorarse según su influencia en la

toma de decisiones posterior, la coordinación de reservas, la asignación de flexibilidad, la mitigación del desequilibrio y la resiliencia operativa. Dentro del marco propuesto, el pronóstico probabilístico funciona como un mecanismo de inteligencia operativa que influye directamente en la coordinación adaptativa del despacho y en la gestión energética consciente de la incertidumbre.

Los resultados operativos ponen de relieve, además, la importancia de la adaptación operativa deslizante dentro de los sistemas de energía inteligente ricos en renovables. Al sincronizar de forma continua los pronósticos, las mediciones operativas, las oportunidades de reserva y las señales del mercado eléctrico, el marco actualiza dinámicamente el comportamiento operativo según la evolución de las condiciones renovables y de mercado. Esta coordinación operativa adaptativa resulta cada vez más importante para las futuras infraestructuras de ciudad inteligente, donde se espera que la variabilidad renovable y la incertidumbre operativa se intensifiquen significativamente.

5.2. Inteligencia de gemelo digital y operación explicable de la red inteligente

Una contribución importante de este estudio es la integración de la inteligencia operativa explicable dentro de un entorno de gemelo digital en tiempo real. Los gemelos digitales de energía renovable existentes se centran con frecuencia en la visualización, la monitorización, el mantenimiento predictivo o la representación del sistema ciberfísico. En cambio, el marco SYNAPCITY-DT propuesto permite un razonamiento operativo activo y una supervisión operativa adaptativa bajo condiciones inciertas de generación renovable.

Como se ilustra en las Figuras 16 y 17, el entorno de gemelo digital sincroniza de forma continua los pronósticos probabilísticos, las restricciones operativas, las condiciones de flexibilidad de las baterías, las oportunidades de reserva, los programas de despacho y las condiciones de mercado dentro de una arquitectura unificada de inteligencia operativa. Por tanto, el marco actúa no solo como una plataforma de visualización, sino también como una capa de coordinación operativa adaptativa, capaz de apoyar una gestión de la energía renovable consciente de la incertidumbre.

Una característica importante del marco propuesto es su capacidad de decisión operativa explicable. En lugar de generar salidas de optimización opacas, el panel operativo comunica de forma continua por qué se seleccionan decisiones operativas concretas bajo condiciones operativas cambiantes. Los niveles de incertidumbre del pronóstico, las oportunidades de reserva, las condiciones de SOC de la batería, los indicadores de disponibilidad operativa y las señales de conciencia del mercado se integran en recomendaciones operativas interpretables, visibles para los operadores del sistema.

Esta capa de explicabilidad es particularmente importante para las futuras infraestructuras de red inteligente habilitadas por IA, donde los sistemas operativos autónomos deben seguir siendo transparentes, interpretables y operativamente fiables. Los operadores humanos que supervisan sistemas de energía urbana intensivos en renovables requieren una conciencia situacional continua y una visibilidad del razonamiento operativo para mantener la confianza en el comportamiento operativo adaptativo impulsado por IA.

El entorno integrado de coordinación multihorizonte refuerza además la resiliencia operativa al permitir la supervisión simultánea de las condiciones operativas D1, D2 y D3. En lugar de apoyarse en un único pronóstico operativo, el marco evalúa de forma continua y simultánea la propagación de la incertidumbre y las condiciones de flexibilidad operativa a través de múltiples horizontes. Esto permite la identificación proactiva de escaseces de reserva, limitaciones de flexibilidad y condiciones de riesgo operativo elevado antes de que surja una inestabilidad crítica.

Los resultados sugieren, por tanto, que los futuros gemelos digitales de ciudad inteligente deberían evolucionar desde representaciones ciberfísicas pasivas hacia sistemas de inteligencia operativa adaptativa, capaces de una coordinación consciente de la incertidumbre, un apoyo a la decisión explicable y una sincronización operativa en tiempo real.

5.3. Implicaciones para la ciudad inteligente y la energía urbana

La creciente penetración de recursos de energía renovable dentro de las infraestructuras energéticas urbanas introduce una variabilidad operativa sustancial, requisitos de flexibilidad y una complejidad de coordinación considerables. El marco SYNAPCITY-DT propuesto aborda estos retos integrando el pronóstico consciente de la incertidumbre, la gestión adaptativa de la flexibilidad, la inteligencia operativa y la coordinación del gemelo digital en una arquitectura unificada de gestión de la energía renovable.

Los resultados demuestran que la coordinación operativa inteligente puede mejorar sustancialmente la eficiencia de utilización de la energía renovable, la robustez operativa y la gestión adaptativa de la flexibilidad bajo condiciones inciertas de generación renovable. Estas capacidades son especialmente relevantes para los futuros entornos de ciudad inteligente, donde la generación renovable distribuida, los sistemas de almacenamiento en baterías, los vehículos eléctricos, los edificios inteligentes y los mecanismos de flexibilidad de la demanda deben operar dentro de ecosistemas energéticos ciberfísicos cada vez más dinámicos.

El entorno de panel operativo mostrado en la Figura 16 pone de relieve, además, la importancia de una inteligencia operativa centrada en el ser humano dentro de las futuras infraestructuras de red inteligente. Aunque la optimización operativa se automatiza cada vez más, los futuros sistemas energéticos urbanos seguirán requiriendo una supervisión operativa interpretable, transparencia operativa y conciencia situacional del operador para garantizar una coordinación fiable habilitada por IA. Por tanto, la capa de inteligencia operativa explicable contribuye no solo a la eficiencia operativa, sino también a la resiliencia de la ciudad inteligente supervisada por humanos y a una gobernanza adaptativa.

El marco propuesto apoya además la transición más amplia hacia sistemas autónomos de coordinación de energía urbana. Mediante la sincronización continua de la inteligencia de pronóstico, la conciencia del mercado, la coordinación de reservas y la flexibilidad operativa, el marco permite una gestión energética ciberfísica adaptativa, capaz de responder dinámicamente a las condiciones renovables y de mercado cambiantes.

Desde una perspectiva de sostenibilidad, el marco contribuye a mejorar la eficiencia de utilización de la energía renovable al tiempo que reduce la exposición al recorte y las pérdidas operativas relacionadas con el desequilibrio. Tales mejoras pueden reforzar la integración de los recursos renovables dentro de los futuros sistemas energéticos urbanos neutros en carbono, apoyando al mismo tiempo el desarrollo de infraestructuras de ciudad inteligente resilientes y adaptativas.

5.4. Contribuciones de la investigación y novedad

Este estudio contribuye a los dominios de investigación de la energía renovable y la ciudad inteligente mediante varias innovaciones metodológicas y operativas. En primer lugar, el marco SYNAPCITY-DT propuesto integra el pronóstico probabilístico, la optimización consciente del riesgo, la coordinación adaptativa de baterías, la participación en reservas, la explicabilidad operativa y la sincronización del gemelo digital dentro de un entorno unificado de inteligencia operativa. Los estudios existentes investigan con frecuencia estos componentes de forma independiente, mientras que el marco propuesto realiza una integración operativa coordinada a través de las capas de pronóstico, optimización y ejecución.

En segundo lugar, el estudio introduce una arquitectura de inteligencia operativa consciente de la incertidumbre, capaz de adaptar dinámicamente el comportamiento operativo según las condiciones de confianza del pronóstico y la propagación del riesgo operativo. La estructura de coordinación multihorizonte propuesta permite una supervisión operativa adaptativa continua bajo condiciones cambiantes de generación renovable y de mercado eléctrico.

En tercer lugar, el marco aporta un entorno de inteligencia operativa explicable para los gemelos digitales de energía renovable. A diferencia de los paneles operativos

convencionales centrados principalmente en la visualización, el entorno propuesto explica de forma continua el razonamiento operativo asociado a las condiciones de incertidumbre, las oportunidades de reserva, los riesgos operativos y las restricciones operativas de las baterías.

En cuarto lugar, el estudio aporta una perspectiva de evaluación operativa en la que el desempeño del pronóstico se valora según su impacto operativo posterior, en lugar de por la precisión de pronóstico puramente estadística. Esto permite una evaluación más realista de los sistemas de pronóstico que operan dentro de entornos operativos de red inteligente ricos en renovables.

Por último, el marco propuesto demuestra cómo la inteligencia operativa integrada puede apoyar las futuras infraestructuras energéticas de ciudad inteligente mediante la gestión adaptativa de la flexibilidad, la sincronización ciberfísica y la coordinación de energía renovable consciente de la incertidumbre.

5.5. Limitaciones y líneas de investigación futuras

A pesar de los prometedores resultados obtenidos en este estudio, deben reconocerse varias limitaciones. En primer lugar, el marco propuesto se evaluó utilizando un único caso de estudio de un sistema PV-BESS a escala de servicio público situado en Finlandia. Aunque el entorno operativo seleccionado proporciona una variabilidad de generación renovable y un comportamiento de interacción con el mercado eléctrico realistas, una validación adicional en distintas regiones climáticas e infraestructuras energéticas urbanas reforzaría la generalizabilidad del marco.

En segundo lugar, el análisis operativo utilizó un conjunto de datos histórico limitado que abarca aproximadamente 4,5 meses de mediciones operativas. Aunque el conjunto de datos capta condiciones realistas de incertidumbre operativa y variabilidad renovable, unos conjuntos de datos multiestacionales a más largo plazo permitirían un análisis más exhaustivo de la robustez operativa a largo plazo y de la propagación estacional de la incertidumbre.

En tercer lugar, el comportamiento de degradación de las baterías se representó mediante supuestos operativos simplificados, en lugar de un modelado electroquímico detallado de la degradación. La investigación futura podría integrar modelos de envejecimiento de baterías basados en la física y una optimización operativa consciente del ciclo de vida para mejorar el análisis de sostenibilidad del almacenamiento a largo plazo.

En cuarto lugar, el presente marco se centra principalmente en la coordinación a nivel operativo y no incorpora explícitamente restricciones detalladas de flujo de potencia en corriente alterna (AC) ni un modelado de la interacción con la red de distribución urbana. Los estudios futuros podrían integrar restricciones operativas conscientes de la red, la coordinación de la estabilidad de tensión y el análisis de la interacción energética urbana distribuida dentro del entorno de gemelo digital.

Entre las posibles líneas de investigación futuras se incluyen:

- coordinación multiagente de energía urbana,
- gemelos digitales federados,
- control operativo habilitado por IA en el borde (edge-AI),
- integración de vehículos eléctricos y de vehículo-a-red (V2G),
- coordinación de energía de hidrógeno,
- despacho adaptativo basado en aprendizaje por refuerzo,
- comercio de flexibilidad distribuida,
- y orquestación de energía renovable a escala de ciudad.

La integración de estas tecnologías puede reforzar aún más la capacidad de los sistemas de inteligencia energética urbana basados en gemelos digitales para apoyar las futuras infraestructuras de ciudad inteligente autónomas y dominadas por renovables.

6. Conclusión

Este estudio presentó SYNAPCITY-DT, un marco de gemelo digital de energía urbana impulsado por IA para la coordinación de energía renovable consciente de la incertidumbre dentro de las futuras infraestructuras de ciudad inteligente. El marco propuesto integra el pronóstico fotovoltaico probabilístico, la optimización operativa consciente del riesgo, la coordinación adaptativa de la flexibilidad de las baterías, la participación en reservas y la inteligencia explicable de gemelo digital dentro de un entorno operativo unificado, capaz de apoyar sistemas energéticos ciberfísicos ricos en renovables.

Los resultados demostraron que la incertidumbre del pronóstico influye significativamente en el comportamiento operativo posterior, la eficiencia de utilización de la energía renovable, la coordinación de reservas y la rentabilidad operativa. El análisis comparativo a través de los horizontes operativos D1, D2 y D3 reveló que los horizontes de pronóstico más cortos proporcionan una mayor confianza operativa, una menor exposición al recorte y un mayor desempeño económico a largo plazo. Al mismo tiempo, los horizontes operativos más largos requieren estrategias operativas cada vez más conservadoras debido a la propagación de la incertidumbre y a la exposición al riesgo operativo elevada.

El marco propuesto demostró, además, la importancia de integrar el pronóstico probabilístico directamente en los procesos de toma de decisiones operativas. En lugar de tratar el pronóstico y el control operativo como funciones aisladas, SYNAPCITY-DT sincroniza de forma continua el pronóstico consciente de la incertidumbre, la gestión de la flexibilidad operativa, la coordinación de reservas y la interacción con el mercado eléctrico dentro de un entorno de inteligencia operativa deslizante. Esta estructura de coordinación integrada mejoró la robustez operativa al tiempo que permitió una gestión adaptativa de la energía renovable bajo condiciones operativas que cambian dinámicamente.

Una contribución importante del estudio es la integración de la inteligencia operativa explicable dentro de un entorno de gemelo digital en tiempo real. El marco de panel propuesto no solo visualiza las condiciones operativas, sino que también proporciona un razonamiento operativo interpretable asociado a los niveles de incertidumbre, las oportunidades de reserva, las restricciones de las baterías y la coordinación adaptativa del despacho. Esta capa de explicabilidad refuerza la conciencia situacional del operador y contribuye a una operación de red inteligente fiable y habilitada por IA dentro de las futuras infraestructuras energéticas urbanas.

El estudio demostró además que los gemelos digitales para sistemas de energía renovable deberían evolucionar más allá de las plataformas pasivas de visualización y monitorización hacia entornos inteligentes de coordinación operativa ciberfísica, capaces de un razonamiento adaptativo, una sincronización consciente de la incertidumbre y una supervisión operativa en tiempo real. Por tanto, el marco propuesto contribuye al desarrollo más amplio de sistemas energéticos de ciudad inteligente resilientes, dominados por renovables y habilitados por IA.

Aunque el marco se evaluó mediante un caso de estudio PV-BESS a escala de servicio público bajo condiciones de operación nórdicas, la arquitectura de inteligencia operativa propuesta sigue siendo escalable a aplicaciones energéticas urbanas más amplias que involucran recursos renovables distribuidos, microrredes inteligentes, coordinación de la flexibilidad urbana y futuros ecosistemas energéticos autónomos.

La investigación futura puede extender el marco hacia la coordinación operativa multiagente, los gemelos digitales federados, la inteligencia de despacho basada en aprendizaje por refuerzo, la integración de vehículos eléctricos, la coordinación de energía de hidrógeno y la orquestación de energía renovable a escala de ciudad. La integración de estas tecnologías puede reforzar aún más la capacidad de los gemelos digitales impulsados por IA para apoyar las futuras infraestructuras energéticas de ciudad inteligente resilientes, adaptativas y sostenibles.

7. Agradecimientos

Este trabajo se desarrolló en el marco del Programa de Máster Conjunto Erasmus Mundus en Ciudades y Comunidades Inteligentes (SMACCs), cuyo entorno académico interdisciplinar contribuyó significativamente al desarrollo de la perspectiva de investigación presentada en este artículo.

Los autores agradecen a EPV Energia Oy por proporcionar perspectivas prácticas sobre sistemas de energía renovable que respaldaron la motivación operativa de este estudio.

Los autores agradecen además el uso de conjuntos de datos y servicios de acceso público proporcionados por el Instituto Meteorológico Finlandés (FMI), NASA POWER, Nord Pool, ENTSO-E y Fingrid, que respaldaron el análisis operativo y la evaluación de energía renovable realizados en este trabajo.

Los autores también reconocen el uso de herramientas de escritura y apoyo lingüístico asistidas por inteligencia artificial, incluidas ChatGPT, Grammarly y QuillBot, para el refinamiento del lenguaje, la mejora de la gramática y la organización del manuscrito durante su preparación. Todo el análisis científico, el desarrollo metodológico, las interpretaciones y las conclusiones presentadas en este artículo son responsabilidad exclusiva de los autores.

Referencias

- Abdalla, A. A., El Moursi, M. S., El-Fouly, T. H. M., & Al Hosani, K. H. (2026). A state-of-the-art review of adaptive, predictive, synergistic, and degradation-aware power variability smoothing techniques in photovoltaic power plants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 230, Article 116687. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.116687>
- Agakishiev, I., Härdle, W. K., Kopa, M., Kozmik, K., & Petukhina, A. (2025). Multivariate probabilistic forecasting of electricity prices with trading applications. *Energy Economics*, 141, Article 108008. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2024.108008>
- Al-Dahidi, S., Madhiarasan, M., Al-Ghussain, L., Abubaker, A. M., Ahmad, A. D., Alrbai, M., Aghaei, M., Alahmer, H., Alahmer, A., Baraldi, P., & Zio, E. (2024). Forecasting solar photovoltaic power production: A comprehensive review and innovative data-driven modeling framework. *Energies*, 17(16), 4145. <https://doi.org/10.3390/en17164145>
- Ali, A., Yousif, M., Numan, M., & Kazmi, S. A. A. (2025). Coordinated generation and transmission expansion planning with energy storage systems to facilitate high penetration of renewable energy. *IEEE Access*, 13, 176801–176812. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3617374>
- Allahvirdizadeh, Y., Galvani, S., & Shayanfar, H. (2021). Data clustering based probabilistic optimal scheduling of an energy hub considering risk-averse. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 128, Article 106774. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.106774>
- Amorim, W. C. S., Cupertino, A. F., Pereira, H. A., & Mendes, V. F. (2024). On sizing of battery energy storage systems for PV plants power smoothing. *Electric Power Systems Research*, 229, Article 110114. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2024.110114>
- Assaad, C., Leon, J. P. M., Quick, J., Göçmen, T., Ghazouani, S., & Das, K. (2025). Enabling efficient sizing of hybrid power plants: A surrogate-based approach to energy management system modeling. *Wind Energy Science*, 10, 559–578. <https://doi.org/10.5194/wes-10-559-2025>
- Baccino, F., & Santarelli, M. (2023). Advanced battery energy storage systems for hybrid power and energy management. In *7th International Hybrid Power Plants & Systems Workshop (HYB 2023)* (pp. 90–95). <https://doi.org/10.1049/icp.2023.1437>
- Bernecker, M., Sgarciu, S., Kan, X., Anvari, M., Riepin, I., & Müsgens, F. (2026). Adaptive robust optimization for European electricity system planning considering regional Dunkelflaute events. *Applied Energy*, 412, Article 127671. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2026.127671>
- Cao, Y., Wu, Q., Zhang, H., & Li, C. (2022). Optimal sizing of hybrid energy storage system considering power smoothing and transient frequency regulation. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 142, Article 108227. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2022.108227>
- Chen, Y., Li, X., & Zhao, S. (2024). A novel photovoltaic power prediction method based on a long short-term memory network optimized by an improved sparrow search algorithm. *Electronics*, 13(5), 993. <https://doi.org/10.3390/electronics13050993>
- Conejo, A. J., Carrión, M., & Morales, J. M. (2010). *Decision making under uncertainty in electricity markets*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7421-1>
- Čović, N., Pavić, I., & Pandžić, H. (2024). Multi-energy balancing services provision from a hybrid power plant: PV, battery, and hydrogen technologies. *Applied Energy*, 374, Article 123966. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.123966>
- Das, K., Hansen, A. D., Leon, J. P. M., Zhu, R., Gupta, M., Pérez-Rúa, J.-A., Long, Q., Pombo, D. V., Barlas, A., Gocmen, T., Sogachev, A., Koivisto, M., Cutululis, N. A., & Sørensen, P. E. (2025). Research challenges and opportunities of utility-scale hybrid power plants. *WIREs Energy and Environment*, 14, e70001. <https://doi.org/10.1002/wene.70001>
- Deb, K. (2011). Multi-objective optimisation using evolutionary algorithms: An introduction. In L. Wang, A. Ng, & K. Deb (Eds.), *Multi-objective evolutionary*

- optimisation for product design and manufacturing*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-0-85729-652-8_1
- Domínguez, R., & Vitali, S. (2021). Multi-chronological hierarchical clustering to solve capacity expansion problems with renewable sources. *Energy*, 227, Article 120491. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120491>
- Ejuh Che, E., Roland Abeng, K., Iweh, C. D., Tsekouras, G. J., & Fopah-Lele, A. (2025). The impact of integrating variable renewable energy sources into grid-connected power systems: Challenges, mitigation strategies, and prospects. *Energies*, 18(3), 689. <https://doi.org/10.3390/en18030689>
- Elnosh, A., Calais, M., & Parlevliet, D. (2026). A systematic literature review of digital twin research for photovoltaic systems: Trends, challenges, and opportunities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 226, Article 116326. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.116326>
- ENTSO-E. (2026, April 15). *Electricity balancing and European balancing market framework*. https://www.entsoe.eu/network_codes/eb/
- Esmaeili Aliabadi, D., & Pinto, T. (2025). Modeling electricity markets and energy systems: Challenges and opportunities. *Energies*, 18(2), 245. <https://doi.org/10.3390/en18020245>
- Finnish Meteorological Institute. (2025). *Open data services*. <https://en.ilmatieteenlaitos.fi/open-data>
- Fingrid. (2025). *Frequency containment reserves (FCR) data*. <https://www.fingrid.fi>
- Gao, Q., Chen, Y., Yang, D., Zhang, H., Yang, G., Shen, Y., Xia, X., & Liu, B. (2025). Firm power generation with photovoltaic overbuilding and pumped hydro storage. *Energy*, 324, Article 135800. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.135800>
- Gao, X., Chan, K. W., Xia, S., Zhou, B., Lu, X., & Xu, D. (2019). Risk-constrained offering strategy for a hybrid power plant consisting of wind power producer and electric vehicle aggregator. *Energy*, 177, 183–191.
- Gardemeister, L., Liikkanen, J., Meriläinen, A., Kosonen, A., Ruusunen, J., Lindfors, A. V., Atlaskin, E., & Ahola, J. (2025). Spatial optimization of solar PV and wind power capacity in Finland and correlation analysis. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 173, Article 111386. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2025.111386>
- Glasserman, P. (2003). *Monte Carlo methods in financial engineering*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-21617-1>
- Holtinen, H., Lindroos, T. J., Lehtilä, A., Koljonen, T., Kiviluoma, J., & Korpås, M. (2025). Estimating the CO2 impacts of wind energy in the transition towards carbon-neutral energy systems. *Energies*, 18(6), 1548. <https://doi.org/10.3390/en18061548>
- Hofbauer, L., McDowall, W., & Pye, S. (2022). Challenges and opportunities for energy system modelling to foster multi-level governance of energy transitions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 161, Article 112330. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112330>
- Iheanetu, K. J. (2022). Solar photovoltaic power forecasting: A review. *Sustainability*, 14(24), 17005. <https://doi.org/10.3390/su142417005>
- International Energy Agency. (2025). *Renewables 2025: Analysis and forecast to 2030*. <https://www.iea.org/reports/renewables-2025>
- Jadidoleslam, M. (2025). Risk-constrained participation of virtual power plants in day-ahead energy and reserve markets based on multi-objective operation of active distribution network. *Scientific Reports*, 15, 9145. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-93688-w>
- Karrari, S., Ludwig, N., De Carne, G., & Noe, M. (2022). Sizing of hybrid energy storage systems using recurring daily patterns. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 13(4), 3290–3300. <https://doi.org/10.1109/TSG.2022.3156860>

- Lappalainen, K., & Valkealahti, S. (2022). Sizing of energy storage systems for ramp rate control of photovoltaic strings. *Renewable Energy*, 196, 1366–1375. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.07.069>
- Lindberg, O., Zhu, R., & Widén, J. (2024). Quantifying the value of probabilistic forecasts when trading renewable hybrid power parks in day-ahead markets: A Nordic case study. *Renewable Energy*, 237, Article 121617. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.121617>
- Liu, Y., Zhong, Y., & Tang, C. (2023). Optimal sizing of photovoltaic/energy storage hybrid power systems: Considering output characteristics and uncertainty factors. *Energies*, 16(14), 5549. <https://doi.org/10.3390/en16145549>
- Luo, C., Al-Messabi, N., Kuang, Z., Ma, C., El-Amin, I., Deng, H., & Li, Y. (2025). Photovoltaic system modeling and forecasting techniques: A survey. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 162, Article 112516. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2025.112516>
- Maciejowska, K., Serafin, T., & Uniejewski, B. (2024). Probabilistic forecasting with a hybrid Factor-QRA approach: Application to electricity trading. *Electric Power Systems Research*, 234, Article 110541. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2024.110541>
- Meng, A., Wang, P., Zhai, G., Zeng, C., Chen, S., Yang, X., & Yin, H. (2022). Electricity price forecasting with high penetration of renewable energy using attention-based LSTM network trained by crisscross optimization. *Energy*, 254, Article 124212. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124212>
- Mottola, F., Proto, D., & Russo, A. (2024). Probabilistic planning of a battery energy storage system in a hybrid microgrid based on the Taguchi arrays. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 157, Article 109886. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2024.109886>
- Mystakidis, A., Koukaras, P., Tsalikidis, N., Ioannidis, D., & Tjortjis, C. (2024). Energy forecasting: A comprehensive review of techniques and technologies. *Energies*, 17(7), 1662. <https://doi.org/10.3390/en17071662>
- NASA POWER. (2025). *NASA POWER data access viewer*. <https://power.larc.nasa.gov>
- Nord Pool. (2025). *Day-ahead market data*. <https://www.nordpoolgroup.com>
- Pavlík, M., Kurimský, F., & Ševc, K. (2025). Renewable energy and price stability: An analysis of volatility and market shifts in the European electricity sector (2015–2025). *Applied Sciences*, 15(12), 6397. <https://doi.org/10.3390/app15126397>
- Rezaeimozafer, M., Barrett, E., Monaghan, R. F. D., & Duffy, M. (2024). A stochastic method for behind-the-meter PV-battery energy storage systems sizing with degradation minimization by limiting battery cycling. *Journal of Energy Storage*, 86, Article 111199. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.111199>
- Ruan, P., Su, Q., Zhang, L., Luo, J., Diao, Y., Xie, L., & Zheng, H. (2025). Optimal siting and sizing of hybrid energy storage systems in high-penetration renewable energy systems. *Energies*, 18(9), 2196. <https://doi.org/10.3390/en18092196>
- Ruiz-Abellón, M. C., Fernández-Jiménez, L. A., Guillamón, A., & Gabaldón, A. (2024). Applications of probabilistic forecasting in demand response. *Applied Sciences*, 14(21), 9716. <https://doi.org/10.3390/app14219716>
- Shapiro, A., Dentcheva, D., & Ruszczyński, A. (2021). *Lectures on stochastic programming: Modeling and theory* (3rd ed.). Society for Industrial and Applied Mathematics. <https://doi.org/10.1137/1.9781611976595>
- Smyl, S., Pełka, P., & Dudek, G. (2026). Probabilistic multi-regional solar power forecasting with any-quantile recurrent neural networks. *arXiv*, Article abs/2602.05660.
- Soroudi, A. (2017). *Power system optimization modeling in GAMS*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-62350-4>
- Sun, M., Feng, C., & Zhang, J. (2020). Probabilistic solar power forecasting based on weather scenario generation. *Applied Energy*, 266, Article 114823. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114823>

- Sweeney, C., Bessa, R. J., Browell, J., & Pinson, P. (2020). The future of forecasting for renewable energy. *WIREs Energy and Environment*, 9, e365. <https://doi.org/10.1002/wene.365>
- Talvi, M., & Lappalainen, K. (2024). Sizing of energy storage systems for different levels of PV and wind power in combined PV-wind power plants. In *41st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC) proceedings*. <https://doi.org/10.4229/EUPVSEC2024/5DV.2.4>
- Teixeira, R., Cerveira, A., Pires, E. J. S., & Baptista, J. (2024). Advancing renewable energy forecasting: A comprehensive review of renewable energy forecasting methods. *Energies*, 17(14), 3480. <https://doi.org/10.3390/en17143480>
- Tkac, M., Kajanová, M., & Bracinik, P. (2023). A review of advanced control strategies of microgrids with charging stations. *Energies*, 16(18), 6692. <https://doi.org/10.3390/en16186692>
- Visser, L. R., AlSkaif, T. A., Khurram, A., Kleissl, J., & van Sark, W. G. H. J. M. (2024). Probabilistic solar power forecasting: An economic and technical evaluation of an optimal market bidding strategy. *Applied Energy*, 370, Article 123573. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.123573>
- Wang, J., Zhou, Y., Zhang, Y., Lin, F., & Wang, J. (2024). Risk-averse optimal combining forecasts for renewable energy trading under CVaR assessment of forecast errors. *IEEE Transactions on Power Systems*, 39(1), 2296–2309. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2023.3268337>
- Wang, Z., Wu, S., Huang, Y., Liu, R., & Liu, X. (2026). A comprehensive review of deep learning for solar nowcasting: Enhancing accuracy, reliability, and interpretability. *Applied Energy*, 407, Article 127378. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2026.127378>
- Wipplinger, E. (2007). Philippe Jorion: Value at risk – The new benchmark for managing financial risk. *Financial Markets and Portfolio Management*, 21, 397–398. <https://doi.org/10.1007/s11408-007-0057-3>
- Xiong, B., Chen, Y., Chen, D., Fu, J., & Zhang, D. (2025). Deep probabilistic solar power forecasting with Transformer and Gaussian process approximation. *Applied Energy*, 382.
- Xuan, A., Shen, X., Guo, Q., & Sun, H. (2021). A conditional value-at-risk based planning model for integrated energy system with energy storage and renewables. *Applied Energy*, 294, Article 116971. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116971>
- Yang, G., Yang, D., Liu, B., & Zhang, H. (2024). The role of short- and long-duration energy storage in reducing the cost of firm photovoltaic generation. *Applied Energy*, 374, Article 123914. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.123914>
- Yang, Z., Kong, D., Chen, Z., Zhang, Z., Du, D., & Zhu, Z. (2025). A data-driven battery energy storage regulation approach integrating machine learning forecasting models for enhancing building energy flexibility A case study of a net-zero carbon building in China. *Buildings*, 15(19), 3611. <https://doi.org/10.3390/buildings15193611>
- Zhang, X., Li, Y., Li, T., Gui, Y., Sun, Q., & Gao, D. W. (2024). Digital twin empowered PV power prediction. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 12(5), 1472–1483. <https://doi.org/10.35833/MPCE.2023.000351>
- Zhu, R., Das, K., Sørensen, P. E., & Hansen, A. D. (2025). A review on energy management system for grid-connected utility-scale renewable hybrid power plants. *WIREs Energy and Environment*, 14, e70004. <https://doi.org/10.1002/wene.70004>
- Zhu, R., Murcia Leon, J. P., Friis-Møller, M., Gupta, M., & Das, K. (2026). Optimal sizing of renewable hybrid power plants considering component reliability as a multi-discipline optimization under uncertainty. *Applied Energy*, 404, Article 127138. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.127138>