

CONAMA 2024

CONGRESO NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE

GEDAI: El Gemelo Digital para la mejora de energía y agua residual de proceso

Mejora del rendimiento y la
competitividad de las industrias
manufactureras



CONAMA 2024

GEDAI: GEMELO DIGITAL PARA MEJORA ENERGÉTICA Y DE AGUA RESIDUAL DE PROCESO

Autor Principal: Alejandro Rubio Rico (ITE)

Otros autores: Andrés Lluna Arriaga (ITE), Fernando Mengod Bautista (ITE), Luis Enrique Ruiz Pérdomo (ITE), Pedro José Cutillas Sánchez (ITE)

RESUMEN

En un contexto global definido por estrategias cada vez más exigentes de reducción de emisiones y optimización del uso de recursos, la industria manufacturera lucha por mantener e incrementar su competitividad mientras garantiza su cumplimiento. El problema se torna oportunidad al considerar la adopción de la tecnología de Gemelo Digital para mejorar la competitividad mediante la innovación tecnológica. En este sentido, en el proyecto GEDAI se ha desarrollado y validado una metodología para fomentar y acelerar la implementación de Gemelos Digitales en industrias manufactureras de cualquier sector y tamaño. En el proyecto se han desarrollado e implementado una serie de prototipos que han permitido a las empresas colaboradoras mejorar su capacidad predictiva, la optimización de recursos clave como el agua y la energía, y el ahorro de costes.

LA ENERGÍA EN LA INDUSTRIA: DE COSTE A RECURSO ESTRATÉGICO

Energía, clima y estrategia política

La energía ha estado tradicionalmente relacionada con la actividad manufacturera y la competitividad de las empresas, hasta el punto de que en las distintas revoluciones industriales ha jugado un papel crucial. Este hecho ha propiciado que la sociedad moderna se asiente sobre unas bases de consumo intensivo de energía, de manera que tanto el estilo de vida de los ciudadanos de países desarrollados, como la cadena manufacturera que componen los tejidos industriales modernos dependen todavía en gran medida de fuentes de energía intensivas, como los combustibles fósiles [1]. En este contexto, la progresiva automatización y mejora tecnológica de los procesos, la globalización como desencadenante de la necesidad de mejorar la competitividad a nivel internacional, y el progresivo incremento de los costes e inflación monetaria, han provocado que la dependencia energética esté excesivamente condicionada a la disponibilidad de unas reservas de combustibles fósiles finitas cuyo impacto medioambiental resulta inasumible en el medio y largo plazo.

En este contexto, la Unión Europea (UE) ha liderado tradicionalmente una serie de iniciativas estratégicas y políticas con el foco principalmente en minimizar el impacto medioambiental y la consecuente alteración irreversible del clima. El siguiente gráfico revela el planteamiento, en 2017, que se hacía desde el tribunal de Cuentas Europeo, de diferentes escenarios de reducción de emisiones para cumplir los objetivos totales de reducción marcados para 2030 y 2050.

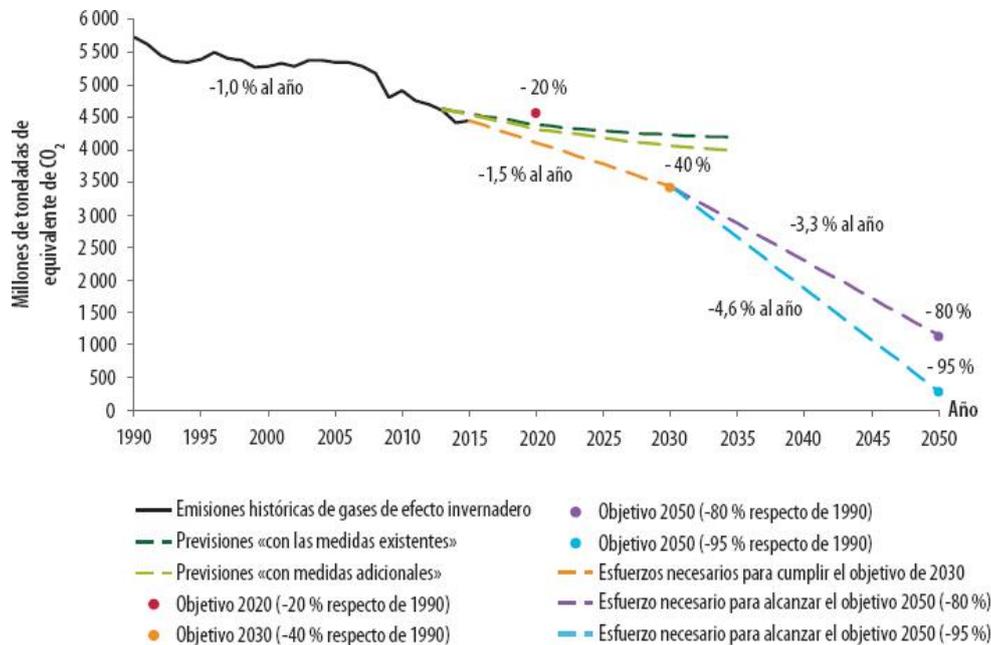


Figura 1. Estimaciones de las emisiones pasadas y futuras en comparación con los objetivos de reducción de las emisiones. (Tribunal de cuentas europeo, Análisis panorámico 2017)

Se aprecia con ello que la Unión Europea se ha posicionado progresivamente como líder en la acción estratégica de minimizar el impacto de las actividades humanas en el clima, planteando objetivos que escalaban en ambición de manera proporcional al horizonte temporal considerado. Algunas de las estrategias y políticas europeas reseñables en este sentido se citan a continuación:

- Clima y energía para 2030/50 (2014)
- Economía hipocarbónica competitiva en 2050 (2018)
- Economía circular (2014-2019)
- The European Green Deal (2019): Europa neutra en 2050
- Estrategia industrial europea actualizada (2020).

Se resalta esta última referencia por su esencial papel en dibujar las bases de la transición hacia una economía ecológica y digital. En ella, se planteaba el concepto de energía descarbonizada abundante, accesible y asequible como uno de los principales mecanismos de aceleración. Ello ya revelaba que la competitividad de la UE y su tejido productivo dependía estrechamente de la energía, y que era por ello necesario favorecer y propiciar el entorno necesario para una verdadera **transformación** hacia una economía más **sostenible, digital, competitiva y resiliente**.

Poco después de la publicación de dicha estrategia se precipitarían los eventos de la crisis de COVID-19, con una consecuente crisis de la economía mundial, con impacto particular en la Unión Europea y su entorno económico. Entre los muchos motivos, dicha crisis evidenció la

fragilidad de un tejido industrial excesivamente dependiente del funcionamiento de las cadenas de suministro globalizadas, con un alto grado de externalización de actividades productivas clave. Estas dependencias, además de haber generado unas relaciones económicas muy poco convenientes para los intereses estratégicos de la UE, evidenciaron el enorme impacto de las relaciones internacionales con Rusia y demás países exportadores de combustibles fósiles tanto en el precio de la energía como, lo que es peor, en la misma disponibilidad del suministro energético.

Ello daría lugar al caldo de cultivo perfecto para que, en 2022, con la invasión de Rusia a Ucrania, la Comisión Europea planteara una estrategia que garantice la disponibilidad de energía limpia, segura y a precios estables. Este plan, denominado **REPowerEU** [2], tenía como objetivos principales ahorrar energía, diversificar las fuentes de aprovisionamiento energético de la UE y producir energía de origen renovable, con un componente de generación local. De hecho, la eficiencia energética ocupa un lugar muy importante en la estrategia de la UE para garantizar su competitividad y seguridad energética. Relacionado con ello y como pilar que refuerza dicho posicionamiento, se encuentra la reciente Directiva (UE) 2023/1791, también conocida como directiva de eficiencia energética actualizada que modifica la anterior Directiva 2012/27/UE.

LA EFICIENCIA ENERGÉTICA COMO FACTOR DE COMPETITIVIDAD INDUSTRIAL EN ESPAÑA

Partiendo del contexto internacional descrito en el punto anterior, conviene reflexionar sobre las implicaciones que suponen para las plantas productivas presentes y futuras de la industria manufacturera. Es importante entender que la mejora de la eficiencia energética ha ido progresivamente ganando peso entre las prioridades de dichas empresas de manera relativamente lenta pero constante. De hecho, para la gran mayoría de empresas con actividad productiva en España, mejorar la eficiencia energética de las plantas productivas ha estado tradicionalmente motivado tanto por disminuir el coste energético inherente a cada proceso industrial como por exigencias normativas según tamaños y características de las empresas. Esto ha ocasionado que, en algunos sectores industriales con actividades intensivas en energía, como las refinerías de petróleo, las metalúrgicas o la industria química, por poner algunos ejemplos, se abordara de manera natural y progresiva la mejora permanente de la eficiencia de sus procesos por una cuestión de sostenibilidad tanto medioambiental como, sobre todo, económica de su actividad.

Normativamente se establecieron a nivel nacional una serie de herramientas reguladoras y certificadoras, como el RD 56/2016 o las ventajas de la certificación de implantar un Sistema de Gestión Energética mediante la ISO 50001, con el fin de estandarizar, estructurar y fomentar la mejora de la eficiencia energética. Sin embargo, sin considerar las obligatoriedades de realizar auditorías energéticas para empresas de cierto tamaño exigidas por el anteriormente citado Real Decreto, ni los previamente citados casos de sectores intensivos en consumo energético, se puede afirmar, de manera general, que hasta hace relativamente poco en España la cultura

del ahorro energético estaba limitada a considerar la energía consumida como un coste más a asumir como parte de la actividad productiva.

Es en este contexto cuando, a raíz de acontecimientos como los referidos en el anterior apartado, la energía ha evolucionado desde la categoría de coste hasta representar un verdadero recurso estratégico para las empresas manufactureras. Un recurso que debe ser gestionado de la manera lo más eficiente posible, con una estrategia que cada empresa, independientemente de su tamaño, debe diseñar y ejecutar. En conclusión, de un escenario en que la eficiencia energética se exige principalmente por cuestión normativa o como un aspecto tangencial de la actividad, se ha producido una evolución a un escenario en que la energía consumida por el tejido industrial se sitúa en el foco de sus actuaciones prioritarias, y optimizar dicho consumo es una cuestión de competitividad, no solo de exigencia normativa.

EL BINOMIO AGUA-ENERGÍA

Se constata con ello que la energía es un recurso estratégico clave y con una especial importancia en el caso de España, debido a sus particularidades climáticas y geográficas. Sin embargo, en este punto conviene introducir el agua como recurso igualmente estratégico por su extenso y variado uso, agravado por su disponibilidad limitada. En este sentido, el ya longevo término de **binomio agua-energía** [4] se ve directamente afectado por el impacto de la crisis climática, ya que el acceso al agua como recurso natural se dificulta por la climatología, incluyendo posibles sequías y disponibilidad limitada al grado de evaporación que se da en los embalses.

Comunidades Autónomas como Cataluña, Andalucía, Extremadura, Aragón o Galicia anunciaron durante 2023 restricciones en el consumo de agua tanto para usos residenciales como agrícolas e industriales. En un escenario de desertificación progresiva y aumento de la temperatura media global, España está expuesta a que estas restricciones continúen dándose en el futuro por necesidad de racionalizar el uso del agua. Las sequías no afectan solo al consumo final, sino que también condicionan la generación de energía del país, cuyo mix energético todavía depende de manera reseñable de la energía hidráulica, tal y como se puede apreciar en la siguiente imagen de la generación eléctrica en los últimos años:

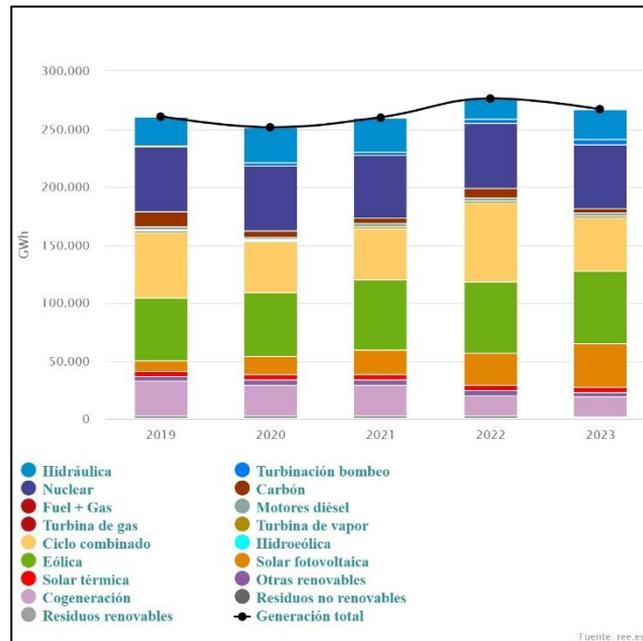


Figura 2. Evolución anual de la generación de energía eléctrica en España. (Fuente: REE)

Para cerrar el ciclo de interdependencias se deben examinar los procesos de tratamiento de agua en la industria. Si bien el agua se debe gestionar de la manera más inteligente y eficiente posible a nivel nacional y regional (al igual que la energía), la gestión del agua empleada en producción industrial debe ser adaptada a las necesidades de cada proceso y organización, con dos objetivos principales [3]:

- Obtener las calidades de agua necesarias para el proceso
- Minimizar los costes a nivel operativo, de volumen, de consumo y de contaminación

En este proceso de adaptar la calidad de agua que demanda cada proceso se cuenta con la particularidad añadida de la normativa de calidad del agua que aplica en cada caso. Esta necesidad de tratamiento de agua en industria implica, por lo general, disponer de una Estación de depuración de aguas residuales industriales (EDARI) en la que se lleve a cabo el tratamiento adecuado y necesario tanto a las características como a la cantidad de agua que se genera en planta. El tipo de tratamiento y tecnología empleada variará según los contaminantes a eliminar y la calidad final que se deba cumplir, y en cualquier caso se requiere energía para, como mínimo, trasegar el agua entre las etapas de tratamiento y hasta su vertido. Existen incluso tecnologías de tratamiento intensivas en energía eléctrica, como la electrodiálisis reversible, la ósmosis inversa, o la electrodesionización, por poner algunos ejemplos, que requieren de energía adicional para aplicar el procedimiento de tratamiento correspondiente. En estos casos, la huella energética asociada al vertido será todavía mayor.

Con ello, se da un ciclo de interacciones en que la energía condiciona la capacidad de acción para mitigar los efectos del cambio climático y la viabilidad de tratar y emplear agua tanto para uso de distintos sectores, entre ellos el industrial. Dicha agua, a su vez, debe ser convenientemente tratada, transportada y adecuada empleando energía para ello. Para cerrar

CONAMA 2024

GEDAI: GEMELO DIGITAL PARA MEJORA ENERGÉTICA Y DE AGUA RESIDUAL DE PROCESO

el círculo de interacciones, la climatología afecta de manera directa a la disponibilidad del agua y a la disponibilidad y precio de la energía.



Figura 3. Relación entre consumo energético, agua de proceso e impacto climático. (Fuente: ITE)

Esta interrelación agua-energía-clima no pasa desapercibida para comités de expertos y legisladores. De hecho, las exigencias de la Unión Europea a través de la revisión de directivas europeas de tratamiento de aguas residuales reflejan los retos a los que se enfrenta el sector del agua, destacando la necesidad asegurar una mayor trazabilidad hacia los vertidos industriales y la búsqueda de la neutralidad energética del sector. De nuevo, esto posiciona a la industria manufacturera que emplea agua en su proceso de transformación en el foco del sector y, en consecuencia, deben tomar acciones para optimizar la gestión del agua y reaprovecharla al máximo en previsión a futuras exigencias normativas y con vistas a mejorar la competitividad ante previsible escenarios de disponibilidad limitada. En este escenario, el **Gemelo Digital** es una de las herramientas con mayor potencial de optimizar la gestión de la energía y el agua.

EL GEMELO DIGITAL COMO HERRAMIENTA TRANSFORMADORA

¿Qué es un Gemelo Digital?

El concepto de Gemelo Digital, contrariamente a la percepción popular, tiene su origen en el libro *Mirror Worlds* publicado por David Gelertner en 1993 [5], que plantea la posibilidad de crear representaciones virtuales detalladas de objetos y sistemas físicos reales para poder simular y analizar su comportamiento en un entorno totalmente digital. Sin embargo, su definición más práctica, con aplicación a la fabricación, se atribuye popularmente a Michael Grieves en 2002, que lo acuñó y presentó durante una conferencia de la Asociación de Ingenieros de Fabricación en Michigan [6]. La NASA asimismo ha tenido una tradición consolidada de empleo de Gemelos Digitales para mejorar simulacros de modelos físicos de aeronaves y obras de ingeniería similares, dadas las restricciones de testeo de tratar con componentes altamente tecnológicos y, por ende, de grandes costes.

En la actualidad, sin embargo, el concepto moderno de Gemelo Digital se asocia más a sistemas informáticos diseñados con el objetivo de reproducir, de manera lo más fielmente posible, el comportamiento del sistema u objeto real. Para ello, resulta crucial disponer de los datos y la información necesaria para replicar convenientemente el sistema, en cuya versión digital (En otras palabras, su *gemelo digital*) se realizarán las simulaciones para obtener distintos resultados.

Las ventajas de realizar simulaciones de procesos industriales reales en un entorno totalmente digital son enormes por diferentes motivos; la capacidad de predicción de resultados, la posibilidad de emplear la computación para obtener información de valor a partir de fuentes de datos, la capacidad de ejecutar diferentes escenarios e hipótesis y validarlos sin necesidad de hacer cambios físicos sobre el proceso... Las potenciales aplicaciones son enormes a medida que la industria se digitaliza progresivamente. Sin embargo, el modelo que representa digitalmente el proceso real debe reproducir correctamente el funcionamiento de éste, por lo que es importante que el Gemelo Digital reciba y procese datos asociados al funcionamiento de dicho proceso, creando una conexión efectiva entre la realidad y la simulación.

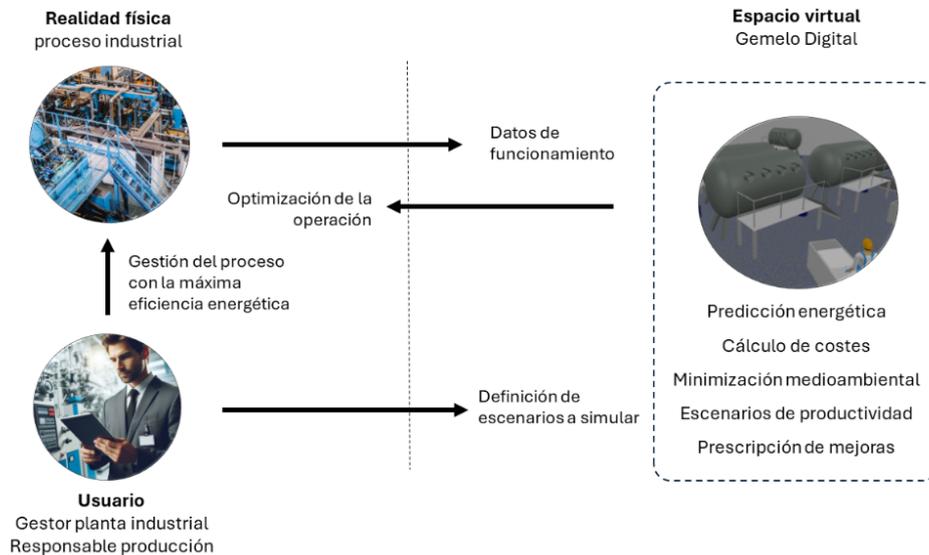


Figura 4. Concepto de Gemelo Digital aplicado a la mejora de la gestión energética de procesos (Fuente: ITE)

Como se aprecia, el **Gemelo Digital** es una herramienta lo suficientemente potente como para abordar la optimización de la operativa de una actividad manufacturera de una manera holística, combinando un enfoque de optimización no solo de la energía consumida y la eficiencia operativa del proceso, también del impacto medioambiental y de la viabilidad económica de cada decisión que se tome. La clave de todo ello se encuentra en la posibilidad de ejecutar simulaciones alternativas al escenario real en que sucede la planta; estas simulaciones permitirán examinar, gracias a la capacidad de computación actual, multitud de escenarios que llevarán a la selección de uno o varios óptimos en base a los criterios que se seleccionen.

Siguiendo la lógica de la figura presentada, se parte del proceso de manufactura a optimizar, del cual se debe realizar una copia virtual basada en un modelo digital. Dicho modelo contendrá todas las características del proceso original y permitirá con ello tanto replicar su comportamiento real (verificando que las simulaciones que se obtienen son acordes a la realidad y que el modelo es correcto) como simular escenarios no materializados.

El círculo lo cierran dos agentes más. Por un lado, la conexión efectiva mediante datos reales de proceso que se van actualizando proporciona un contexto creciente donde el Gemelo Digital proporciona su máximo valor. Por otro, es el gestor o responsable de la explotación de dicho proceso quien aprovecha el Gemelo Digital para obtener los resultados reales de mayor interés e impacto compatibles con la operativa de la empresa. Son por ello igualmente importantes los cuatro elementos citados: proceso real, modelo digital, gestor de proceso e interconexión entre realidad y espacio virtual.

La complejidad de replicar la realidad

En este punto, se constata el enorme potencial de esta herramienta, que plantea un camino verdaderamente transformador potenciado por un ecosistema de irrupción del *Internet de las cosas*. La clave del valor añadido que proporcionan los Gemelos Digitales orientados a la sostenibilidad está en la mejora de la competitividad en términos de coste, de rendimiento energético y, en esencia, de mejora medioambiental alcanzable por parte de las empresas. Sin embargo, no todo son ventajas, ya que implantar una herramienta de este tipo también presenta una serie de desafíos y barreras.

La primera de ellas está relacionada con la consecución e implantación de un Gemelo Digital lo suficientemente representativo de la realidad que pretende replicarse, ya que su grado de ajuste a la realidad depende, en gran medida, de la capacidad de realizar modelos lo suficientemente buenos como para que “capturen” correctamente las características del objeto real. Esta condición se puede traducir en dos requisitos iniciales, cada uno de ellos asociados a una fase de implementación de un Gemelo Digital; representación (R1) y replicación (R2) [7]. La **representación** exige un correcto entendimiento del comportamiento del sistema físico y disponer los mecanismos para recogida y representación de los datos característicos de dicho sistema. La **replicación**, por su parte, marca como requisito la capacidad de duplicar el sistema en un espacio virtual empleando la estructura definida en la fase de replicación

Estos conceptos pueden parecer teóricamente viables de alcanzar, pero en la práctica requieren de altos niveles de digitalización de aquellos elementos modelizados, unidos a las herramientas de explotación y análisis avanzado de dichos datos, así como de un modelo del proceso lo suficientemente sólido como para poder cumplir todas las funcionalidades que se le requieren. La necesidad de disponer de todos estos elementos se traduce, en la práctica, en una barrera económica directa a la inversión, que se acentúa aún más si cabe en pequeñas y medianas empresas dada su limitada capacidad de financiar estas actuaciones con fondos propios.

Esto desemboca de manera directa en otra de las limitaciones para el despliegue de Gemelos Digitales, como es la dependencia de disponibilidad de datos en tiempo real de alta calidad para garantizar un funcionamiento efectivo de los Gemelos Digitales. Otra limitación recurrente de los Gemelos Digitales está en la infrutilización de sus capacidades, convenientemente asociada a una incorrecta interpretación de las necesidades con las que la empresa pretende explotarlo y el contexto en que pretende hacerlo. Finalmente, existe una última barrera para la implementación a gran escala de esta herramienta, y está relacionada con la dificultad evidente de proyectar de manera efectiva el concepto de Gemelo Digital a su aplicación práctica [7].

GEDAI: MEJORA DEL RENDIMIENTO MEDIANTE GEMELOS DIGITALES

Objetivos del proyecto

En este contexto, el Instituto Tecnológico de la Energía ITE, trabaja en el **proyecto GEDAI** que busca la mejora del rendimiento mediante el despliegue de Gemelos Energéticos Digitales y productivos de aplicación a la cadena de valor del binomio tratamiento de Agua y sector productivo Industrial. Con ello se pretende desarrollar y aplicar una metodología de prototipado e implantación de Gemelos Digitales que permita dar respuesta a varias de las necesidades expuestas previamente.

Como ya se ha justificado, la herramienta de Gemelo Digital con aplicación a análisis energético y medioambiental permite, desde su concepto, potenciar las capacidades de gestión de las empresas manufactureras de todos tipos y tamaños. Sin embargo, uno de los principales retos que condicionan su despliegue está en proporcionar un enfoque estandarizado para que cualquier perfil de empresa pueda tener acceso a esta tecnología con independencia de sus particularidades y limitaciones. La estandarización en la adopción de la herramienta también beneficia a grandes empresas o procesos complejos, dado que proporciona un método claro para identificar necesidades y traducirlas en requisitos técnicos y, posteriormente, funcionalidades que el Gemelo Digital debe cumplir.

Como objetivo específico, GEDAI persigue una serie de beneficios para las empresas participantes en él, entre los que se encuentran la mejora de su capacidad de predicción del consumo energético y el incremento de su capacidad de estimación de impacto medioambiental de la operativa de máquinas intensivas en consumo energético, entre las que la huella hídrica juega, asimismo, un papel muy importante.

Resultados obtenidos

El resultado principal del proyecto es la obtención de una **metodología de diseño, despliegue y puesta en marcha de Gemelos Digitales** en entornos productivos de cualquier tipo. La siguiente figura representa cada una de las fases de la metodología obtenida y validada:

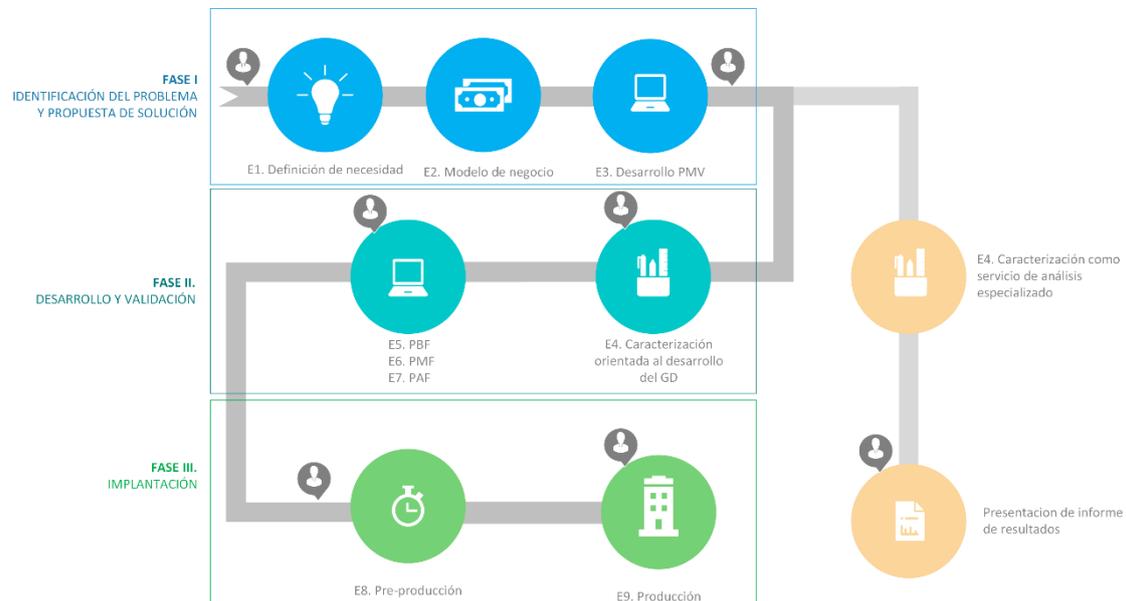


Figura 5. Metodología implementación Gemelos Digitales (Fuente: Proyecto GEDAI, ITE)

Como aspectos diferenciadores, el diseño de la metodología se ha estructurado en 3 fases con objetivos particulares:

- La primera fase de **diagnóstico del problema** pretende la barrera de adecuación de los Gemelos Digitales a la realidad y la necesidad, identificando las prioridades verdaderas que subyacen al contexto del usuario final del Gemelo Digital
- La segunda fase de **desarrollo y validación** tiene como objetivo realizar un desarrollo iterativo incorporando funcionalidades de manera progresiva y validándolas en cada una de las etapas con el usuario final. Este planteamiento está alineado con los principios del Design Thinking, según el cual se construyen las soluciones en base a la necesidad y de una manera flexible e iterativa. [9]
- La última fase de **implantación** involucra el despliegue del Gemelo Digital en planta, primero en un entorno de pre-producción para, finalmente, realizar el despliegue de la herramienta en la planta industrial.

En cada una de las etapas de la metodología se aplican una serie de métodos y herramientas que, convenientemente aplicados, posibilitan un despliegue ágil y enfocado a la necesidad de Gemelos Digitales para cualquier tipo de planta, abarcando todo el ciclo de vida de dicho Gemelo Digital hasta su puesta en producción. Este aspecto posibilita que la tecnología sea accesible a plantas con bajo nivel de digitalización de los procesos que pretenden replicarse, ya que adapta el desarrollo a las particularidades de cada empresa. Como consecuencia, acerca a las PYMES

En la siguiente figura se muestra un prototipo de Gemelo Digital de una planta textil en que se realizan predicciones de huella energética, hídrica y medioambiental, además de proporcionar información del impacto en los cambios de las planificaciones de la producción en el corto plazo, desde el punto de vista de energía consumida (kWh) y coste de operación (€):



Figura 6. Prototipo de gemelo digital en empresa del sector textil. (Fuente: proyecto GEDAI, ITE)

Los principales impactos que destacar en el proyecto gracias a la aplicación de la metodología y el desarrollo y despliegue de los Gemelos Digitales de cada empresa colaboradora son:

- Incremento de la capacidad predictiva de las empresas en cuanto al coste de la energía, el agua requerida, el consumo energético y las emisiones de cada máquina incluida en el prototipo
- Posibilitar la validación de puesta en marcha de nuevas etapas de tratamiento de agua para maximizar su reaprovechamiento en el propio proceso
- Mejorar la visibilidad de impactos energéticos, económicos y medioambientales al obtener un cálculo detallado y realista de las respectivas huellas de cada máquina
- Soporte a la toma de decisiones operativas mediante la simulación de escenarios de optimización de la secuenciación de la producción según disponibilidad de recurso solar
- Mejora de la gestión operativa mediante la simulación de escenarios de reagrupación de lotes para optimización de los baños, minimizando con ello el uso del agua

CONCLUSIONES

En un contexto cada vez más exigente en términos de sostenibilidad y competitividad, las empresas manufactureras enfrentan retos complejos relacionados con una gestión de la energía y el agua, como recursos clave, que cada vez debe ser más eficiente. Ante la transición acelerada y orientada a objetivos que plantea la normativa tanto nacional como europea, los sectores industriales se ven obligados a adaptar sus procesos productivos y operacionales para cumplir con estos requisitos manteniendo e, idealmente, incrementando su competitividad. Solo enfoques de trabajo innovadores, como la adopción de la tecnología de Gemelo Digital, logran transformaciones significativas que sustenten el camino hacia ese cumplimiento de normativas y de mejora de resultados operacionales.

El proyecto GEDAI se alinea con la necesidad de hacer llegar la tecnología de Gemelo Digital para la mejora de eficiencia energética y de impacto medioambiental en empresas manufactureras de diferentes sectores. La aplicación de la metodología muestra que el potencial de retorno de las empresas es incalculable en términos de aspectos como el incremento de la capacidad predictiva de esta o la mejora de la visibilidad de los impactos y el funcionamiento detallado de la maquinaria de planta.

AGRADECIMIENTOS

El proyecto GEDAI “Mejora del rendimiento mediante el despliegue de Gemelos Energéticos Digitales y productivos de aplicación a la cadena de valor del binomio tratamiento de Agua y sector productivo Industria”, IMAMCA/2023/9, ha sido financiado por el Instituto Valenciano de Competitividad e Innovación (IVACE+i)

BIBLIOGRAFIA

- [1] Arrázola, J. M., & Pérez, J. M. (2013). *La Huella Ecológica de la Energía y sus conexiones con la Economía y la Geopolítica*. Universidad Autónoma de Madrid.
- [2] Comisión Europea. (2022). *REPowerEU: Plan para reducir la dependencia de los combustibles fósiles rusos y acelerar la transición energética*. Recuperado de <https://ec.europa.eu>.
- [3] Martí Costa, S. (2020). *Tratamientos de aguas* (5ª ed.). STENCO.
- [4] Cabrera, E., Pardo, M. A., Cabrera Jr, E., & Cobacho, R. (2010). Agua y energía en España. Un reto complejo y fascinante. *Ingeniería del agua*, 17(3), 235-246.
- [5] Gelernter, D. (1991). *Mirror worlds: Or the day software puts the universe in a shoebox...how it will happen and what it will mean*. Oxford University Press
- [6] Grieves, M., *Virtually Intelligent Product Systems: Digital and Physical Twins*, in *Complex Systems Engineering: Theory and Practice*, S. Flumerfelt, et al., Editors. 2019, American Institute of Aeronautics and Astronautics. p. 175-200.
- [7] Wooley, A., Silva, D. F., & Bitencourt, J. (2023). When is a simulation a digital twin? A systematic literature review. *Manufacturing Letters*, 35, 940-951
- [8] Domínguez, L. G. I. (2024). Gemelos Digitales en la Industria 5.0—una Revisión Sistemática de Literatura. *European Public & Social Innovation Review*, 9, 1-21
- [9] Brown, T. (2009). *Change by design: How design thinking creates new alternatives for business and society*. HarperCollins.