

DIGITALIZACIÓN Y MONITORIZACIÓN INTELIGENTE DE PLANTAS DE PRODUCCIÓN DE ÁRIDOS MEDIANTE IoT: CASO MBC 4.0

Benjamín Bentura¹, Miguel Angel Barcelona², José Ignacio Águila¹, David Díez²

¹NEXIO INGENIERIA 2024, Zaragoza, España, bbentura@nexioingenieria.com

²INSTITUTO TECNOLÓGICO DE ARAGON, Zaragoza, España, ddiez@ita.es

Resumen

La industria de producción de áridos y materiales minerales presenta procesos complejos con alta dependencia operativa y energética. La digitalización mediante tecnologías IoT ha permitido mejorar la monitorización y control de estos procesos.

Este trabajo presenta la evolución de dos plantas industriales (Monreal del Campo y Andorra) desde una fase inicial de digitalización basada en IoT hacia la implementación de gemelos digitales industriales. La solución desarrollada integra sensórica distribuida, sistemas de comunicaciones industriales y plataformas cloud para la captura y estructuración de datos en tiempo real.

A partir de esta base, se plantea el desarrollo de gemelos digitales capaces de modelar, simular y optimizar el comportamiento de las plantas productivas, habilitando capacidades avanzadas de predicción, mantenimiento y toma de decisiones.

1 Introducción

Las plantas de procesamiento de áridos y minerales constituyen sistemas industriales complejos en los que interactúan múltiples equipos, incluyendo sistemas de transporte, trituración, secado, clasificación y almacenamiento. La eficiencia global del proceso depende en gran medida de la correcta sincronización entre estas etapas, así como de la capacidad de adaptación a variaciones en las condiciones del material de entrada.

De manera tradicional, este tipo de instalaciones han operado con niveles limitados de digitalización, basándose en sistemas de control locales y en la experiencia de los operadores para la toma de decisiones. Esta situación dificulta la optimización global del proceso y limita la capacidad de anticipar fallos o ineficiencias.

En este contexto, la incorporación de tecnologías de Internet de las Cosas (IoT) supone un cambio de paradigma, permitiendo la captura masiva de datos sobre el estado de los equipos, las variables de proceso y las condiciones ambientales. Sin embargo, la simple monitorización no es suficiente para alcanzar un modelo de gestión avanzado.

El concepto de gemelo digital surge como una evolución natural de estos sistemas, al permitir la creación de réplicas virtuales del proceso productivo que evolucionan en paralelo con la planta real. Este enfoque habilita nuevas capacidades de simulación, predicción y optimización que resultan especialmente relevantes en entornos industriales complejos como el de la producción de áridos.

2 Arquitectura IoT industrial

La solución desarrollada se fundamenta en una arquitectura distribuida que integra diferentes niveles tecnológicos, desde la captación de datos en planta hasta su procesamiento y visualización en la nube. Esta arquitectura responde a la necesidad de gestionar grandes volúmenes de información procedente de múltiples fuentes heterogéneas.

En la capa física, se dispone de una red de sensores y actuadores que permiten capturar variables críticas del proceso, tales como temperaturas, niveles de humedad, consumos energéticos y estados operativos de los equipos. Estos dispositivos se integran con sistemas de control industrial basados en PLCs y controladores programables, que permiten tanto la adquisición de datos como la ejecución de acciones de control.

El siguiente nivel lo constituye la capa de comunicaciones, en la que se emplean gateways industriales y protocolos de comunicación tanto tradicionales, como Modbus o RS485, como específicos del ámbito IoT, como MQTT. Esta combinación permite asegurar la interoperabilidad entre sistemas legacy y nuevas soluciones digitales.

Sobre esta infraestructura se despliega una plataforma software en la nube, basada en arquitecturas de microservicios y contenedores, que permite almacenar, procesar y visualizar la información en tiempo real. La plataforma NEXIO actúa como núcleo del sistema, proporcionando funcionalidades de monitorización, generación de indicadores, gestión de alarmas y configuración de cuadros de mando.

Un aspecto relevante de la solución es la estructuración digital de la planta mediante un modelo jerárquico basado en instalaciones, áreas y nodos. Este enfoque permite representar de manera coherente la realidad física del proceso y facilita tanto la navegación por la información como su posterior explotación en modelos avanzados.

La solución implementada en ambas plantas se estructura en tres capas:

Capa física

Incluye:

- Sensores de temperatura, humedad y nivel
- Analizadores eléctricos
- PLCs y controladores industriales
- Actuadores sobre maquinaria

Estos elementos permiten capturar el estado completo del proceso productivo.

Capa de comunicaciones

Basada en:

- Protocolos industriales (Modbus, RS485)

- Gateways IoT
- Protocolo MQTT

Permite conectar la planta con la nube en tiempo real.

Plataforma software

Basada en:

- Arquitectura Docker
- API y bases de datos
- Broker MQTT
- Dashboards

Esta plataforma permite monitorizar y controlar la planta de forma remota.

Modelo digital basado en áreas

Las plantas se estructuran en:

- Instalación (planta completa)
- Áreas (zonas funcionales)
- Nodos (equipos y sensores)

Este modelo constituye la base del gemelo digital.

3 Digitalización de plantas industriales

La arquitectura descrita ha sido implementada en dos plantas industriales con características complementarias, permitiendo validar su aplicabilidad en distintos tipos de procesos dentro del sector de minerales.

En la planta de Monreal del Campo, el proceso productivo se centra en el secado y clasificación del material mediante tromel, seguido de procesos de filtrado, cribado y almacenamiento en silos. La digitalización ha permitido capturar en tiempo real variables relacionadas con el comportamiento térmico del sistema, la humedad del material y el rendimiento de los equipos, lo que facilita una supervisión continua del proceso y una detección temprana de desviaciones operativas.

Por su parte, en la planta de Andorra, el proceso incorpora etapas adicionales de molienda, mezcla y ensacado, lo que introduce una mayor complejidad operativa. La implementación de la solución IoT ha permitido monitorizar tanto las variables de proceso como los consumos energéticos y el estado de los equipos, mejorando la capacidad de planificación y mantenimiento.

En ambos casos, la digitalización ha supuesto un salto cualitativo en la gestión de la información, permitiendo pasar de un modelo reactivo a uno basado en datos, en el que los responsables de planta disponen de información en tiempo real para apoyar la toma de decisiones.

4 Transición hacia gemelo digital

La disponibilidad de datos en tiempo real a través de la plataforma IoT constituye la base sobre la que se construye el gemelo digital. Este se concibe como una capa adicional que permite modelizar el comportamiento del sistema productivo y simular su evolución bajo diferentes condiciones operativas.

La arquitectura del gemelo digital se articula en torno a un modelo multicapa que integra el sistema físico con su representación virtual. Los datos capturados en la planta son transmitidos a la nube, donde se almacenan en un repositorio central que actúa como data lake. Sobre esta base se desarrollan modelos dinámicos que reproducen el comportamiento del proceso, integrando tanto conocimiento físico del sistema como técnicas de inteligencia artificial.

Una de las características más relevantes del sistema es la existencia de un bucle de realimentación entre el gemelo digital y la planta. Este permite que las predicciones y recomendaciones generadas por el modelo se traduzcan en acciones de control sobre el proceso, cerrando así el ciclo dato–modelo–decisión.

El desarrollo del gemelo digital se estructura en diferentes fases, que incluyen la definición de requisitos, el diseño de la arquitectura de datos, el desarrollo de modelos y algoritmos, y su validación en condiciones reales de operación. Este enfoque iterativo permite mejorar progresivamente la precisión del modelo y su utilidad práctica.

4.1 Motivación

A partir de la digitalización, se plantea la necesidad de:

- Mejorar la productividad
- Reducir tiempos de parada
- Implementar mantenimiento predictivo

4.2 Concepto de gemelo digital

El gemelo digital se define como una réplica virtual de la planta capaz de:

- Modelar el comportamiento del proceso
- Simular diferentes escenarios
- Aprender del histórico de datos

La arquitectura del gemelo digital se estructura en múltiples capas funcionales que permiten integrar el sistema físico con su representación digital. La información capturada en la capa física mediante sensores y sistemas de control es transmitida a través de la capa IoT y almacenada en un data lake en la nube. Sobre esta base, la capa de gemelo digital incorpora modelos de comportamiento, algoritmos de inteligencia artificial y capacidades de simulación que permiten predecir el estado del sistema y evaluar escenarios operativos. Finalmente, la capa de decisión permite generar recomendaciones y ejecutar estrategias de optimización en tiempo real.

4.3 Arquitectura extendida

El gemelo digital se sitúa sobre la plataforma IoT:

- Capa física → sensores y equipos
- Capa IoT → captura y transmisión
- Data lake → almacenamiento
- Gemelo digital → modelado y simulación

4.4 Funcionalidades del gemelo

Según los proyectos desarrollados, el sistema permitirá:

- Modelizar el comportamiento de la planta
- Simular escenarios operativos
- Generar alertas y recomendaciones
- Predecir condiciones de funcionamiento

5 Resultados esperados

La integración de la digitalización IoT con la capa de gemelo digital permite avanzar hacia un modelo de operación más eficiente y adaptable. Entre los principales beneficios identificados se encuentra la mejora de la eficiencia operativa, gracias a la optimización de los parámetros de proceso en función de las condiciones reales de operación.

Asimismo, la capacidad de anticipar fallos y degradaciones en los equipos permite avanzar hacia estrategias de mantenimiento predictivo, reduciendo los tiempos de parada no planificados y mejorando la disponibilidad de la instalación. La simulación de escenarios operativos facilita además la evaluación de cambios en el proceso, como modificaciones en el layout o la introducción de nuevos materiales.

Desde el punto de vista ambiental, la optimización del funcionamiento de los equipos contribuye a la reducción del consumo energético y, por tanto, de las emisiones asociadas al proceso productivo. Esto resulta especialmente relevante en el contexto actual de transición hacia modelos industriales más sostenibles.

La evolución hacia gemelo digital permitirá:

Eficiencia operativa

- Optimización del proceso
- Identificación de cuellos de botella

Mantenimiento

- Predicción de fallos
- Reducción de paradas

Productividad

- Mejora de rendimiento
- Adaptación a distintos materiales

Simulación

- Evaluación de cambios de layout
- Planificación de ampliaciones

Impacto industrial

El proyecto permite:

- Incrementar competitividad
- Reducir costes operativos
- Mejorar sostenibilidad

Además, permite valorizar minerales residuales, contribuyendo a la economía circular mediante su reaprovechamiento.

7 Discusión

La digitalización representa un primer paso hacia la Industria 4.0, mientras que el gemelo digital constituye el siguiente nivel de madurez.

Los principales retos son:

- Modelado preciso del proceso
- Integración de datos heterogéneos
- Validación en operación real

Sin embargo, los beneficios potenciales justifican su desarrollo.

8 Conclusiones

El trabajo presentado demuestra la viabilidad de aplicar tecnologías IoT y gemelos digitales en entornos industriales complejos como las plantas de producción de áridos. La arquitectura desarrollada permite integrar de manera coherente la adquisición de datos, su procesamiento y la generación de conocimiento útil para la toma de decisiones.

La evolución hacia el gemelo digital constituye un paso clave en la transición hacia la Industria 4.0, al permitir pasar de sistemas basados en monitorización a sistemas capaces de predecir, simular y optimizar el comportamiento del proceso. Este enfoque abre nuevas oportunidades para mejorar la eficiencia, la flexibilidad y la sostenibilidad de las plantas industriales.

El caso MBC 4.0 demuestra que:

- La digitalización IoT es viable en procesos industriales complejos
- La estructuración por áreas facilita el modelado
- El gemelo digital permite evolucionar hacia sistemas predictivos