

# Gemelos Digitales

Alberto Sols

Academia de las Ciencias y las Artes Militares  
Sección de Prospectiva de la Tecnología Militar

26 de noviembre de 2020

## Industria 4.0

El término *Industria 4.0* fue acuñado en la Feria de Hannover en 2011, para referirse a las fábricas inteligentes que hacían uso de tecnologías digitales para ganar en eficacia y competitividad, revolucionando las cadenas de suministro. La Industria 4.0 implica la completa digitalización de productos y procesos a lo largo de la cadena de suministro, incrementado el valor para los usuarios de productos y servicios. La cuarta revolución industrial se caracteriza por los sistemas inteligentes

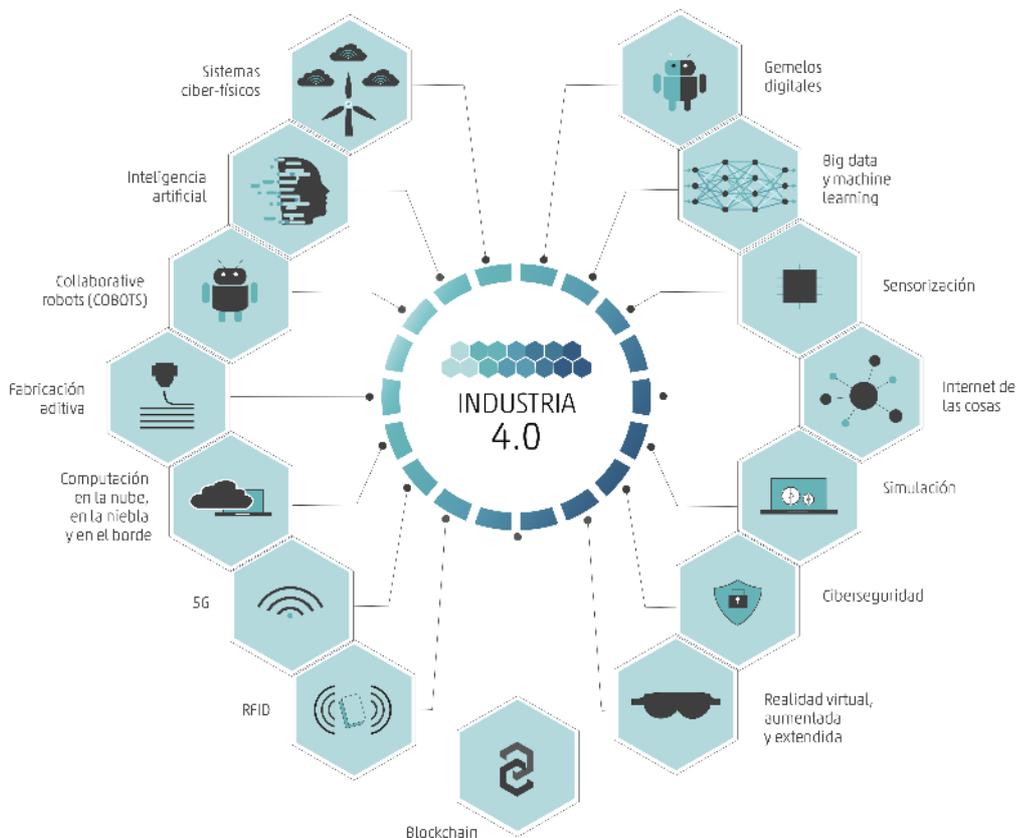


Figura 1. Las tecnologías posibilitadoras de la Industria 4.0

y autónomos gracias a los grandes volúmenes de datos que pueden manejarse y a los algoritmos de aprendizaje automático (*machine learning*); es la era de la hiperconectividad y los sistemas ciberfísicos. El impacto de esta revolución va mucho más allá que el de las predecesoras, por la ubicuidad, rapidez de su aplicación y poder disruptivo en todos los ámbitos industriales. La cuarta revolución industrial permite aumentar de forma notable la capacidad de la industria a través de la integración de sistemas ciberfísicos en los procesos de diseño, fabricación y apoyo de los sistemas, lo que se traduce en importantes ventajas como la personalización extrema, la servitización, fabricación en la nube, el pago por uso, las integraciones horizontal y vertical de sistemas de información, el mantenimiento proactivo, las mejoras en productividad y en competitividad, y las mejoras en el diseño de futuros sistemas. Una de las tecnologías facilitadoras de la industria 4.0 son los llamados gemelos digitales, como se muestra en la Figura 1.

## **Gemelos digitales**

El término *digital twin* fue acuñado por el Dr. Michael Grieves en 2002 en la presentación del *Product Lifecycle Management Center* de la Universidad de Michigan. Los gemelos digitales o *digital twins* son conjuntos de modelos o réplicas digitales de sistemas. El gemelo digital permite simular, experimentar y analizar el comportamiento de un sistema, activo físico, proceso o producto, para optimizar su gestión. Un gemelo digital no es un modelo de un sistema, sino el conjunto de modelos necesarios para poder representar, de manera suficientemente precisa, el sistema de interés. Como dijo Albert Einstein, «en la medida en la que los modelos son ciertos, no representan la realidad; y en la medida en la que representan la realidad, no son ciertos». Los modelos que integran el gemelo digital de un sistema deben ser, por un lado, lo bastante fieles como para representar cada uno adecuadamente ciertas características o propiedades del sistema, cuyo estado y comportamiento son de interés; y por otro lado, el conjunto debe ser lo bastante completo como para que puedan analizarse todos los aspectos relevantes de la utilización y el mantenimiento del sistema. Hay diferentes tipos de modelos que pueden integrar el gemelo digital de un sistema incluyendo, por ejemplo, los análisis funcionales que convirtieron los requisitos en una arquitectura funcional; o el diagrama de bloques de fiabilidad del sistema; o los diagramas causales que expliquen el comportamiento del sistema; o los diferentes diagramas empleados en la ingeniería de sistemas basada en modelos (*model-based systems engineering*) para representar aspectos de un sistema. La Figura 2 muestra un conjunto parcial de los modelos que integran el gemelo digital de una plataforma petrolífera.

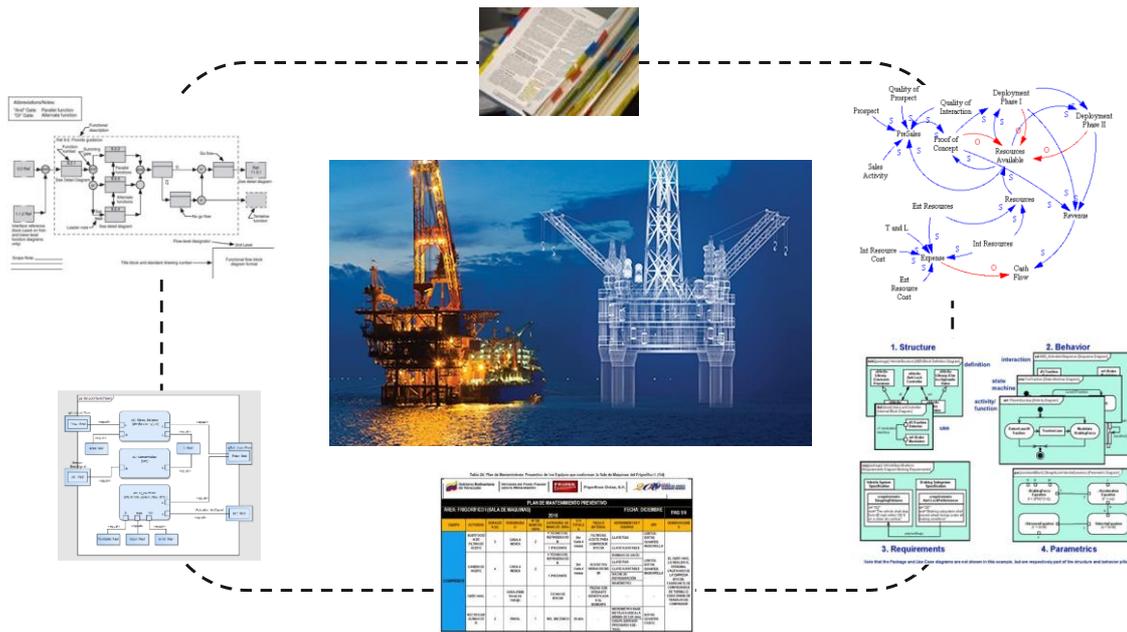


Figura 2. Ejemplo de gemelo digital

Para que el gemelo digital represente fielmente al sistema objeto de interés, deben sincronizarse la realidad física y la realidad virtual (el gemelo digital); el control de la configuración debe ser, por tanto, permanente y bidireccional, a lo largo de todo el ciclo de vida del sistema, como se muestra en la Figura 3.

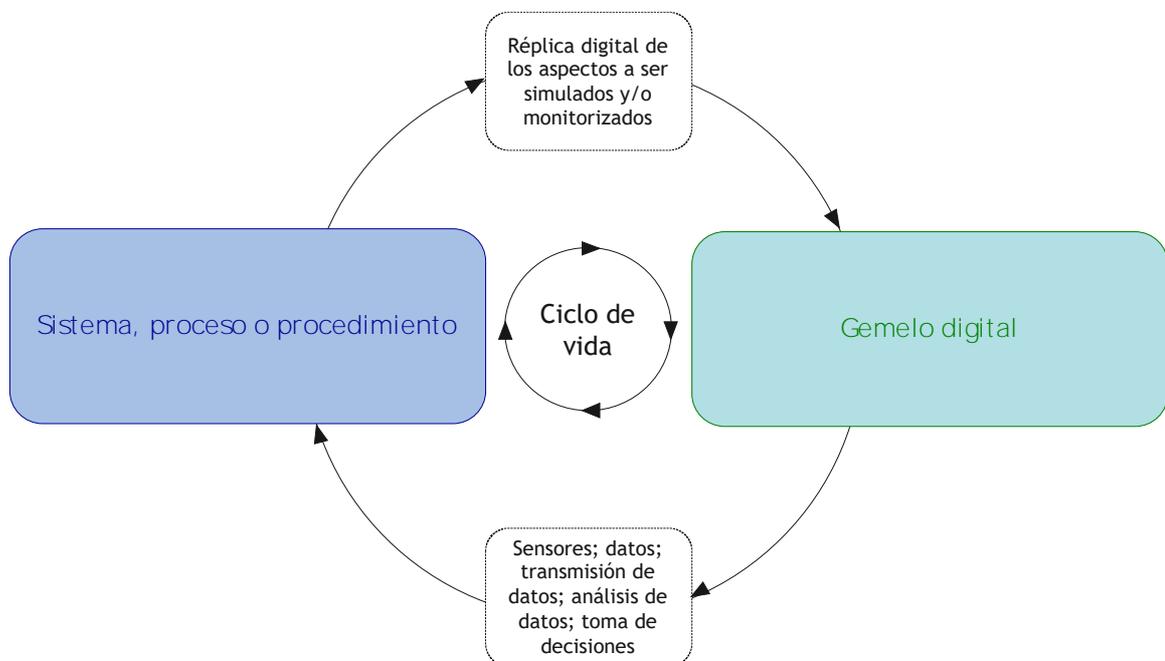


Figura 3. Control bidireccional de la configuración

Los gemelos digitales se apoyan en otras de las tecnologías que posibilitan la cuarta revolución industrial. Los sensores son clave para monitorizar valores de parámetros relevantes de un sistema o proceso. Los sensores son dispositivos que captan magnitudes físicas de su entorno. La ampliación del espectro de magnitudes que pueden ser medidas, junto con el abaratamiento de los sensores y la mejora de su fiabilidad, permiten monitorizar innumerables parámetros, que alimentan los modelos del gemelo digital para permitir los análisis y simulaciones que sean requeridos. Pero esas ingentes cantidades de datos que son capturados deben ser enviados desde donde son tomados a donde son colectivamente procesados; eso requiere de sistemas de comunicación, como son RFID y las sucesivas generaciones de telefonía móvil, con la prometedora 5G dentro del espectro de tecnologías de la industria 4.0. Las herramientas de aprendizaje automático o *machine learning* son vitales para procesar enormes cantidades de datos que normalmente son desestructurados. Los entornos de internet de las cosas, que son dispositivos conectados a internet y entre sí. Cada objeto o cosa número único de identificación y una dirección *Internet Protocol* única (ahora, en la nueva IPv6 que permite la identificación de un número casi ilimitado de objetos). El tratamiento de los datos puede realizarse en distintos entornos, hablándose de computación en la nube, la niebla o el borde. La computación en la nube (*cloud computing*) es el ofrecimiento de servicios de computación a través de una red (normalmente, internet), bajo demanda y con pago por uso. Cuando esos recursos de computación se encuentran directamente vinculados a los sensores y dispositivos que generan los datos, o en redes conectados a ellos, se habla respectivamente de computación en el borde (*edge computing*) o computación en la niebla (*fog computing*). La cercanía de esos recursos de computación disminuye el tiempo requerido para desplazar tanto los datos como el resultado y recomendaciones de las técnicas de analítica predictiva.

Desde su inicio, los modelos digitales sufren una permanente evolución y mejora. De los más simples modelos iniciales de sistemas o procesos se pasó a los modelos con captura de datos mediante sensores. El siguiente paso fueron los gemelos digitales que incorporaron técnicas de inteligencia artificial y aprendizaje profundo, en múltiples capas. El siguiente paso serán los gemelos digitales autónomos, que tendrán capacidad propia de actuación sobre el sistema físico.

Son muchos los beneficios que ofrecen los gemelos digitales, entre los que cabe destacar:

- a) Validación de sistemas. En ingeniería de sistemas los procesos de verificación y validación son vitales. Los gemelos digitales pueden ayudar a contrastar, mediante simulaciones, la efectividad de un sistema en diferentes momentos del ciclo de vida, desde las etapas iniciales de la fase de diseño. Pueden ser muy valiosos en las revisiones formales de diseño, en las que debe decidirse si

- se compromete el paso a la siguiente fase.
- b) Detección temprana de fallos o problemas. Los gemelos digitales permiten simular por adelantado el futuro comportamiento previsible del sistema, alertando de cualquier posible avería. Incluso en ciertos casos pueden trabajar de forma autónoma al ser capaces de analizar una situación, identificar soluciones e incluso ponerlas en marcha.
  - c) Mantenimiento proactivo. La monitorización del estado de los elementos de un sistema permite una optimización de su mantenimiento, que no sólo se limite al estado o condición de esos elementos, sino a su previsible evolución.
  - d) Programas de refresco de tecnología. Los gemelos digitales permiten simular el efecto que tendrá en un sistema la normalmente costosa y compleja inserción de nuevas tecnologías o la actualización de las existentes, antes de proceder a su ejecución.
  - e) Análisis de diferentes escenarios de despliegue. Antes de desplegar un sistema en un nuevo entorno y/o asignarle nuevos perfiles de misión, su gemelo digital permitirá realizar las adecuadas simulaciones para realizar el llamado concepto de operaciones, analizar la esperada efectividad del sistema y detectar posibles problemas o aspectos a ser mejorados.
  - f) Familias de sistemas. Casi todos los sistemas acaban siendo parte de familias de sistemas, ya sean federaciones de sistemas o sistemas de sistemas. El gemelo digital ayuda a analizar la manera en la que el sistema se interrelacionará con otros sistemas, especialmente los de las familias a los que pueda pertenecer.
  - g) Mejora de la robustez de procesos. El seguimiento del estado de un proceso posibilita su análisis y aplicación de técnicas como los métodos de Taguchi, para introducir de manera continua, sistemática e intencional los cambios que aumenten y los hagan más robustos, es decir, más inmunes a perturbaciones externas (ruidos).

El uso de gemelos digitales es muy prometedor, pero no está exento de sus propios retos y riesgo, entre los que destacan:

- 1) Coste de diseño. Además del esfuerzo que requiere diseñar y desarrollar un sistema, generar su gemelo digital supone un enorme esfuerzo adicional en términos de tiempo, recursos y dinero, que debe ser adecuadamente valorado.
- 2) Coste de la operación y mantenimiento. El uso del gemelo digital requiere personal especializado, por un lado, y una configuración permanentemente actualizada, por otro. Son importantes costes recurrentes que deben ser también tenidos en cuenta, antes de acometer su desarrollo.
- 3) Sistemas heredados. Los sistemas suelen trabajar o se usan junto con otros sistemas, o son parte de familias de sistemas. Esos otros sistemas pueden llevar muchos años en operación. No es fácil desarrollar gemelos digitales de esos sistemas heredados, por lo que debe valorarse bien el verdadero alcance y las posibles limitaciones del gemelo digital que se quiera desarrollar.
- 4) Ciberseguridad. Si los sistemas físicos pueden ser objeto de ataques de distinta índole, los gemelos digitales presentan sus propios riesgos. La ciberseguridad es clave, para asegurar que se tiene el acceso necesitado a los datos y que se preserva su integridad, impidiendo accesos y modificaciones no autorizadas.

## Reducción de la brecha de capacidades

Por las ventajas asociadas a su uso, los gemelos digitales se están convirtiendo en una herramienta clave en ingeniería de sistemas para ayudar a reducir la brecha de capacidades que experimentan los sistemas durante su vida operativa. Al permitir una gestión más eficaz y eficiente, a través de la simulación y análisis en tiempo real, se logran optimizar las iniciativas de apoyo logístico basado en las prestaciones y de los programas de refresco de tecnología, como se muestra en la Figura 4.

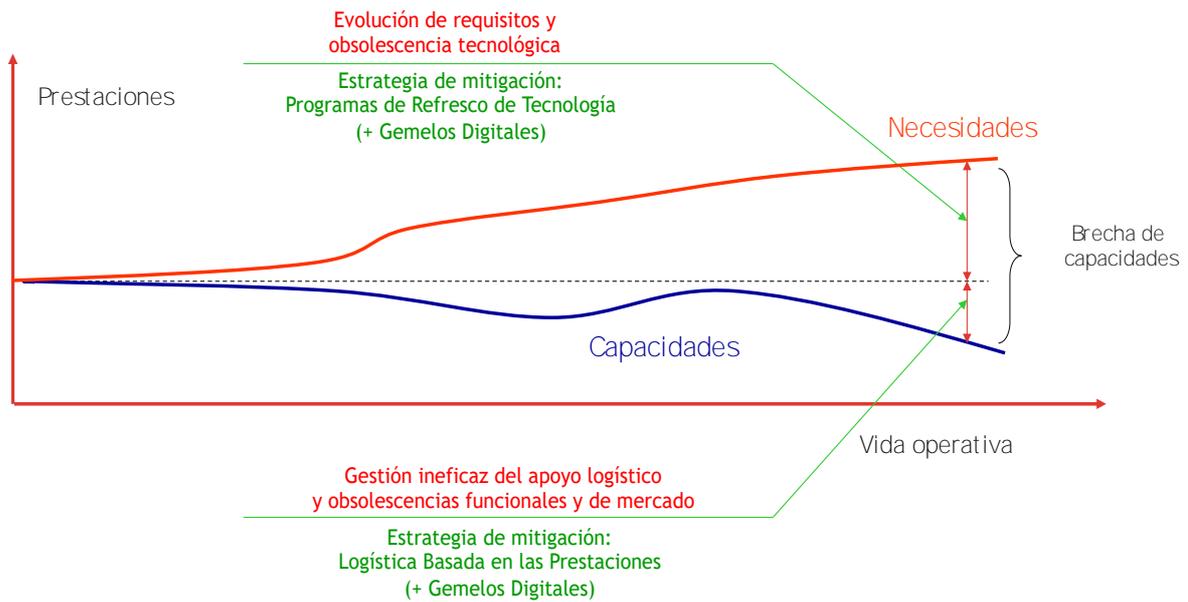


Figura 4. Reducción de la brecha de capacidades, con ingeniería de sistemas y uso de gemelos digitales