



PROYECTO: TwinXdustry - Investigación y desarrollo de una metodología para la implementación de gemelos digitales en procesos de manufactura claves para el tejido industrial valenciano

Nº Expediente: IMAMCA/2020/1

PROGRAMA:

Plan de Actividades de Carácter no Económico

ENTIDAD BENEFICIARIA: AICE, INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CERÁMICA
NIF: G46271144

PAQUETE DE TRABAJO PT1: Revisión del estado del arte

Fecha: julio 2020

Entregable Nº	Nombre del entregable	Paquete trabajo Nº
E.1.1	Revisión bibliográfica de las tecnologías asociadas a los desarrollos del proyecto	1



1 . Introducció

Este documento recoge los resultados de la revisión bibliográfica y estado del arte de las tecnologías empleadas en la implementación de gemelos digitales. La recopilación de información se ha centrado en la búsqueda de artículos científicos, tesis doctorales, patentes y literatura técnica con referencia a las tecnologías empleadas en la implementación de gemelos digitales.

Por otra parte, se revisan las tecnologías que se encuentran actualmente disponibles en el mercado para implementar gemelos digitales y se resumen aquellas susceptibles de ser utilizadas para la implementación de gemelos digitales en el proceso de manufactura del tejido industrial valenciano.

2 . Objetivo del proyecto

El objetivo principal del proyecto es desarrollar y validar una metodología que permita implantar, de manera sistematizada, gemelos digitales en el ámbito de la producción manufacturera, con especial atención al proceso de fabricación de baldosas cerámicas y a los procesos de ensamblado en la industria automovilística.

El objetivo particular que se persigue en este informe consiste en realizar un análisis del estado del arte en cuanto a las distintas formas de implementar un gemelo digital. El fin último es aplicar la opción técnica y económica más favorable al proceso de fabricación de baldosas cerámicas y a los procesos de ensamblado de la industria automovilística.

3 . Método

Se ha realizado una revisión de las tecnologías de implementación de un modelo digital. En el proceso se ha hecho uso, tanto de bases de datos de publicaciones científico-técnicas, como de proyectos de investigación, y de búsquedas específicas a través de Internet. A partir de los resultados de la búsqueda, se describen a continuación los antecedentes y el principio de funcionamiento de la técnica, sus características, los “suites” comerciales, si lo hay, y los casos de aplicación.

4 . Antecedentes del gemelo digital

En unos mercados cada vez más competitivos, la mejora de los mecanismos de toma de decisión asociada a la digitalización de los procesos de fabricación supone una gran oportunidad para optimizar la productividad y eficiencia de las empresas industriales. En efecto, en un entorno globalizado y dinámico de elevada complejidad, la toma de decisiones debe realizarse de forma correcta y con la mayor rapidez posible para seguir manteniendo la competitividad a largo plazo. Así, el potencial económico de la Industria 4.0 reside en su habilidad para acelerar la toma de decisiones corporativa y adaptar los procesos internos de las organizaciones a los cambios del entorno, gracias al análisis continuo de grandes volúmenes de datos y a la interconexión entre los sistemas ciber-físicos y las personas (Monostori et al., 2016).

Hoy en día, el avanzado grado de instrumentación de los procesos industriales facilita la captura de datos en múltiples puntos de adquisición a lo largo de todo el ciclo productivo. Al mismo tiempo, las tecnologías disponibles permiten registrar en tiempo real todos los eventos y estados que se dan en un proceso. Esto ofrece la posibilidad de disponer de un modelo digital de la fábrica, actualizado en todo momento, el cual se conoce habitualmente como “gemelo digital” (Uhlemann, Lehmann, & Steinhilper, 2017). El interés de disponer de un “gemelo digital” del proceso de fabricación es, por un lado, el conocer en tiempo real lo que está sucediendo en el mismo y, por otro lado, el poder realizar una gestión de las decisiones en base a la información generada a partir de datos reales.

Numerosos trabajos de investigación han puesto de manifiesto que el despliegue del “gemelo digital” es una etapa fundamental en el camino de transformación hacia la Industria 4.0 de cualquier empresa manufacturera (Kritzinger, Karner, Traar, Henjes, & Sihn, 2018; Negri, Fumagalli, & Macchi, 2017).

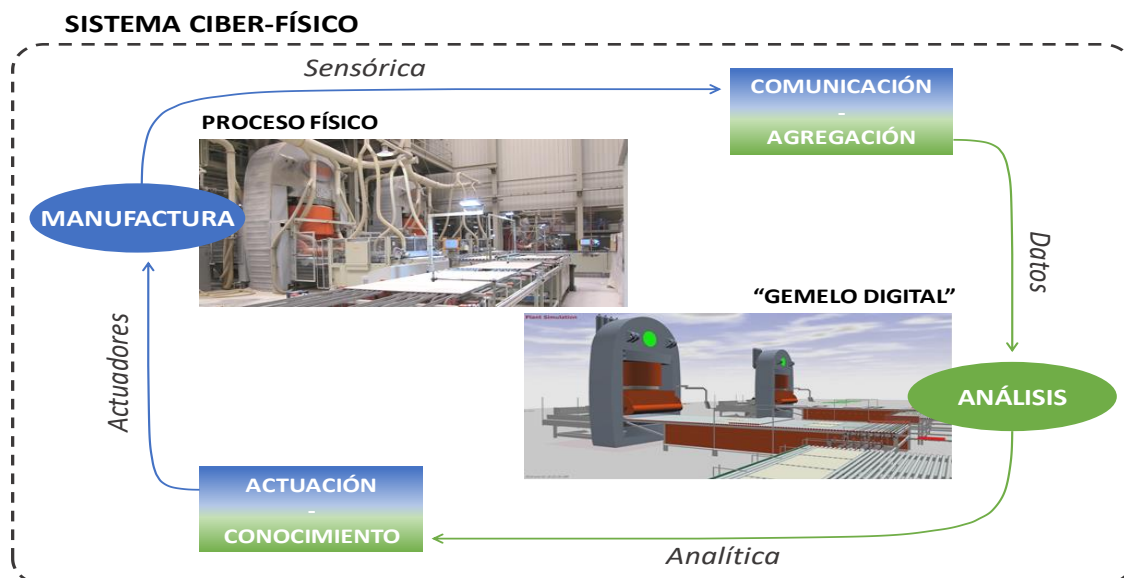


Figura 1. Sistema ciber-físico en un entorno productivo resultante de la integración entre el “gemelo digital” y el mundo físico.

En este ámbito, el “gemelo digital” constituye una representación virtual y dinámica del sistema productivo. Esta representación, haciendo uso de diferentes metodologías de simulación, es capaz de mantenerse perfectamente sincronizada con el sistema físico gracias a la combinación de modelos matemáticos y una elaboración en tiempo real de los datos facilitados por la instrumentación de proceso. El conjunto formado por el “gemelo digital” y el entorno físico representado constituye lo que se conoce como un sistema Ciber-Físico (Y. Lu, Liu, Wang, Huang, & Xu, 2020)(ver figura 1).

El disponer de un “gemelo digital” en un proceso de manufactura como la fabricación de baldosas cerámicas o el de ensamblado en la industria automovilística ofrecería la posibilidad de simular y optimizar el sistema productivo, contribuyendo a una mejora significativa de la competitividad, la productividad y la eficiencia. Dichas acciones de optimización suelen referirse a tres aspectos comunes en todos los procesos de fabricación:

- Planificación y control de la producción:
 - Planificación de ordenes productivas en base a supuestos estadísticos.
 - Mejora de la toma de decisiones en planta gracias al soporte proporcionado por un análisis detallado de la producción.
 - Planificación y ejecución autónoma de órdenes productivas en base a las predicciones realizadas por el “gemelo digital”.
- Mantenimiento de los elementos productivos:
 - Evaluación del impacto de los cambios de estado “aguas arriba” o “aguas abajo” en una determinada etapa del proceso.
 - Identificación y evaluación de posibles medidas de mantenimiento preventivo.
 - Evaluación del estado de funcionamiento de los elementos productivos en base a métodos descriptivos y algoritmos de “machine learning”.
 - Integración, gestión y análisis combinado de datos de proceso y de la maquinaria a lo largo de su ciclo de vida para alcanzar un mayor grado de transparencia en el diagnóstico del estado del equipamiento.
- Gestión y adaptación de operaciones en planta:
 - Comparación en tiempo real de los datos procesados con un “gemelo digital” de la planta trabajando al 100% de eficiencia para detectar e identificar desviaciones de manera más rápida.

- Análisis continuo del sistema productivo, evaluando posibles cambios en las operaciones planificadas, en base al procesado automático de datos.

Además de estos aspectos propios de la gestión productiva, si el “gemelo digital” incorpora modelos de comportamiento del producto a lo largo del proceso de fabricación, sus propiedades fisicoquímicas pueden ser evaluadas durante todo el proceso e interrelacionadas con las variables productivas. Esta posibilidad contribuye no sólo a mejorar la eficiencia de la producción, sino también a incrementar la calidad de los productos fabricados y a mantenerla en niveles óptimos.

La consecución de un “gemelo digital” implica una serie de pasos previos, que van ligados al grado de integración que pueda establecerse entre el proceso físico y su copia virtual (ver figura 2). En primera instancia, es imprescindible disponer de un modelo digital, el cual es una representación digital del proceso físico, que no utiliza ningún tipo de intercambio automatizado de datos entre el mundo físico y el entorno digital. Estos modelos pueden estar constituidos por modelos de simulación, modelos matemáticos o cualquier otro tipo de modelo de objetos físicos que no empleen ningún tipo de integración automática de datos.

Una vez desplegado el modelo digital de un proceso, existe la posibilidad de generar su “sombra digital” gracias a la implementación de un flujo unidireccional y automatizado de datos entre el estado del proceso físico y el mundo digital. En esta situación, un cambio en el estado del proceso físico se traduce directamente en un cambio en el proceso digital, pero no en viceversa.

Finalmente, si el flujo de datos entre el proceso físico y el digital está completamente integrado en ambas direcciones, se puede hacer referencia al “gemelo digital”. En esta situación el proceso digital ejerce acciones de control sobre el proceso físico, de tal manera que un cambio en el proceso físico conduce directamente a un cambio en el estado del “gemelo digital” y viceversa.

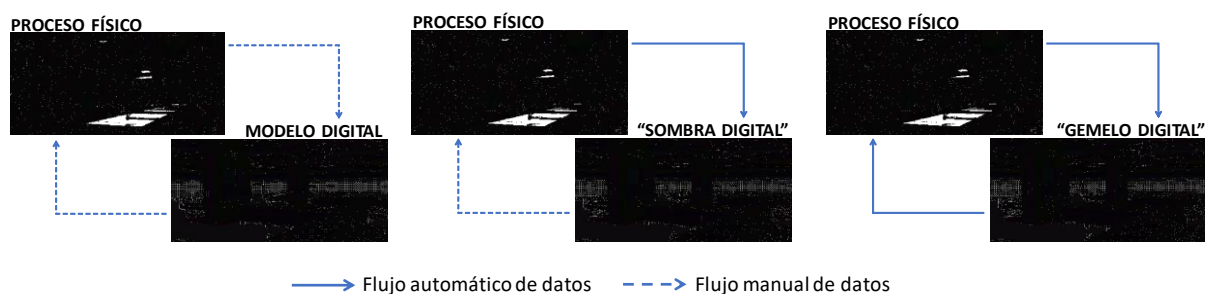


Figura 2. Posibles flujos de información entre el proceso físico y el proceso digital asociado dependiendo del grado de integración alcanzado.

Implementar un “gemelo digital” en una empresa cerámica o de ensamblaje es un gran reto debido, fundamentalmente, a que la información se encuentra generalmente descentralizada en diferentes islas de datos, no existiendo, en muchos casos, un único origen válido (Mallol Gasch, 2006). Sin embargo, desde el punto de vista de la implementación de un “gemelo digital” del proceso de fabricación, en los últimos años se han producido avances significativos en la integración de los datos procedentes de los diferentes equipos productivos. De hecho, existen varias experiencias piloto, como la descrita en (Hervas, Estelles, Mallol, & Boix, 2019), que demuestran la posibilidad de integrar completamente en una planta cerámica los datos industriales referentes, tanto a las variables de proceso de cada etapa del proceso, como a las variables de operación del equipamiento. Ante esta situación, se ha considerado interesante explorar en el presente trabajo las posibilidades de generar un modelo digital del proceso de fabricación de baldosas cerámicas haciendo uso de herramientas de simulación y visualización de código abierto, que sienten las bases para la consecución del “gemelo digital” en un futuro inmediato.

5 . Estado de la técnica para la implementación de gemelos digitales

Para generar un gemelo digital, se requiere de una serie de herramientas y metodologías que, en su conjunto, permiten crear la representación virtual y dinámica del sistema físico. Esta serie de herramientas y metodologías se enmarcan en 4 grandes grupos desde el punto de vista del diseño (Figura 3): comunicación, representación, computación y microservicios.

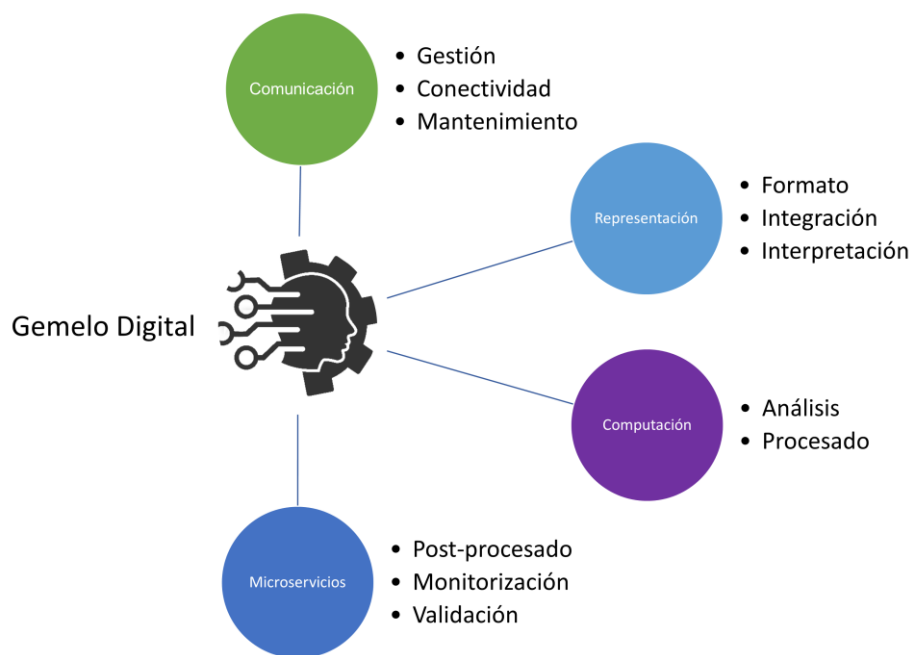


Figura 3. Partes de las que consta un gemelo digital.

A continuación, se describen cada uno de estos cuatro grandes bloques.

5.1 Comunicación

La comunicación es esencial para adquirir y transmitir la información entre equipos y dispositivos informáticos. La arquitectura de la red de transmisión, los protocolos de intercambio, así como las plataformas intermedias de transmisión de la información (bases de datos, APIs, servidores de aplicaciones...) deben decidirse antes de implementar el gemelo digital. Las arquitecturas de red más habituales utilizadas para la creación de un gemelo digital se adjuntan en la Tabla 1.

Tabla 1. Arquitectura de red para la creación de un gemelo digital.

Referencias	Arquitectura	Descripción
(Leng et al., 2019; J. Liu, Zhou, Tian, Liu, & Jing, 2019; H Zhang, Liu, Chen, Zhang, & Leng, 2017)	J2EE SSH	Plataforma multi-thread y distribuida basada en aplicaciones Web.
(Arafsha, Laamarti, & El Saddik, 2019)	Maestro-Esclavo	Modelo de comunicación donde los equipos tienen control unidireccional.
(Lee, Noh, Kim, & Kang, 2018)	Orientada al servicio	Diseño de servicios vía aplicación de componentes.
(P. Zheng, Lin, Chen, & Xu, 2018)	Cliente-Servidor	Modelo en el cual un servidor maneja los recursos consumidos.

Por otro lado, los protocolos de red suelen estructurarse en un modelo de interconexión de sistemas abiertos (modelo OSI) que especifica a que capa de transmisión pertenece cada protocolo. La Tabla 2 clasifica distintos trabajos relevantes en los que se utilizan diferentes protocolos de intercambio de datos, dependiendo de la capa a la que pertenecen según el modelo OSI.

Tabla 2. Protocolo de intercambio de datos para la creación del gemelo digital.

Capa OSI	Referencias	Protocolo / Regla	Descripción
Aplicación – Presentación – Sesión	(Ardanza, Moreno, Segura, de la Cruz, & Aguinaga, 2019; Bao, Guo, Li, & Zhang, 2019; Gilchrist, 2016; Y. Zheng, Yang, & Cheng, 2019)	OPC UA	Protocolo de comunicación máquina-máquina en un entorno industrial.
	(J. Liu et al., 2019; L.-L. Liu, Wan, Gao, Li, & Feng, 2019; H Zhang et al., 2017)	OPC	Predecesor del protocolo OPC UA.
	(Leng et al., 2019)	CoAP	Protocolo para aplicaciones en internet con equipos limitados.
	(Park et al., 2019)	SOAP	Protocolo de intercambio de información estructurada para su implementación en servicios web.
	(Nikolakis, Alexopoulos, Xanthakis, & Chrysosolouris, 2019)	NTP	Protocolo de red para la sincronización de ciclos de reloj entre sistemas.
	(Haijun Zhang, Zhang, & Yan, 2019)	Profinet	Estándar industrial para la comunicación mediante Ethernet para la adquisición de datos y control de equipos.
	(Haijun Zhang et al., 2019)	Wireless-HART	Uso de una tecnología de red para la transmisión inalámbrica.
Transporte	(Laaki, Miche, & Tammi, 2019)	TCP	Protocolo principal para intercambiar información entre dos usuarios.
	(Ardanza et al., 2019; C. Liu, Vengayil, Lu, & Xu, 2019)	TCP/IP	Conjunto de protocolos de comunicación para interconectar dispositivos
	(Laaki et al., 2019)	UDP	Protocolo para crear conexiones de baja latencia y con pérdidas reducidas
Conexión de datos	(Moreno et al., 2017)	Ethernet/IP	Protocolo de red industrial ampliamente utilizado a nivel de proceso y planificación.
	(Kim, Shin, Kim, & Kim, 2018)	OpenFlow	Protocolo que da acceso al plano de reenvío de información.

Finalmente, la Tabla 3 resume las plataformas intermedias claves para encajar la heterogeneidad arquitectónica de la infraestructura industrial sin alterarla, lo que facilita la adopción del gemelo digital en el actual ecosistema de fabricación. Este tipo de plataformas intermedias son imprescindibles para la adquisición de la información en entornos heterogéneos, ya sea información obtenida de sensores en tiempo real o almacenada en otros equipos.

Tabla 3. Plataformas intermedias para el desarrollo de softwares en un entorno de gemelo digital.

Referencias	Herramientas	Descripción
(P. Zheng et al., 2018)	Amazon EC2	Entorno basado en la nube mediante aplicación web.
(Damjanovic-Behrendt & Behrendt, 2019; Lovas et al., 2018)	Docker	Productos que utilizan un sistema virtual para desarrollar y entregar software en contenedores.
(Damjanovic-Behrendt & Behrendt, 2019)	Kubernetes	Contenedor open-source para la automatización, escalado y manejo de aplicaciones.
(C. Liu, Vengayil, Zhong, & Xu, 2018)	LabVIEW	Plataforma gráfica de diseño de sistemas complejos
(Lovas et al., 2018)	OpenNebula	Plataforma en la nube para el control de centros de información distribuida.
(He, Guo, & Zheng, 2018)	Pavater	Sistema basado en Internet de las Cosas (IoT) para la monitorización y toma de decisiones en tiempo real.
(Lee et al., 2018)	Spark	Motor de procesamiento de información distribuida de propósito general.

5.2 Representación

La información generada en cualquier espacio en el cual se trabaja con máquinas posee particularidades únicas y específicas del trabajo que se desempeña, del tipo de máquinas utilizadas y del sistema de funcionamiento propio del espacio de trabajo. Por ello, la heterogeneidad de la información y el conocimiento generado necesita ser modelado e integrado dentro de un sistema común. La Tabla 4 incluye distintos trabajos de creación de un gemelo digital en los que se describen bases de datos de distinta índole. Las bases de datos NoSQL parecen ser las ideales para alcanzar el conocimiento deseado del entorno, aunque las bases de datos SQL todavía siguen siendo importantes en el nuevo paradigma. La popularidad de las bases de datos NoSQL se debe a su adaptabilidad y flexibilidad, de forma que se adecuan a distintos modelos de descripción de recursos (RDF), y las hacen ideales para la estandarización de la información de forma rápida y directa.

Tabla 4. Bases de datos y sistemas de administración de la información para la creación de un gemelo digital.

Referencias	Herramienta	Descripción
(Y. Lu & Xu, 2019)	AWS DynamoDB	Base de datos NoSQL basada en la nube cuya propiedad es de AWS S3.
(Q. Liu, Zhang, Leng, & Chen, 2019; Rodič, 2017)	MS SQL	Base de datos relacional.
(Lovas et al., 2018)	MySQL	Base de datos relacional de código abierto.
(Lovas et al., 2018; Nikolakis et al., 2019)	Apache Cassandra	Base de datos NoSQL de código abierto.
(Schluse, Priggemeyer, Atorf, & Rossmann, 2018)	Versatile Simulation database	Base de datos en tiempo real capaz de almacenar estructuras UML.
(Angrish, Starly, Lee, & Cohen, 2017; Arafsha et al., 2019)	MongoDB	Programa de base de datos multi-plataforma orientada a documentos tipo NoSQL.
(Schneider, Wicaksono, & Ovtcharova, 2019)	Ontotext	Base de datos semántica basada en grafos con minado de texto, para datos desestructurados.
(P. Zheng et al., 2018)	SQLite 3	Base de datos relacional especialmente diseñada para programas de usuario final.
(Damjanovic-Behrendt & Behrendt, 2019)	InfluxDB	Base de datos que soporta la transformación de los datos y la predicción de consultas.

5.3 Computación

Tras la selección del motor de almacenamiento, los modelos computacionales son los encargados del procesamiento de la información en tiempo real o bien en lotes distribuidos. Tanto la extracción automatizada del conocimiento de un conjunto heterogéneo de fuentes de información, como su consulta y procesamiento, son cruciales para la construcción del gemelo digital. El aprendizaje automático y las herramientas de procesamiento de datos proporcionan un amplio rango de soluciones que van desde la interpretabilidad hasta la automatización. Con ellas se consigue dotar al gemelo digital de capacidad de decisión vía herramientas tales como la visión computerizada. La Tabla 5 resume un conjunto de herramientas de procesamiento de datos utilizado por investigadores en el campo de la digitalización industrial. Por otro lado, la Tabla 6 incluye trabajos desglosados por las metodologías y algoritmos utilizados para el procesamiento de la información de su gemelo digital.

Tabla 5. Procesamiento de datos para la creación de un gemelo digital.

Referencias	Herramienta	Descripción
(Y. Lu & Xu, 2019)	AWS Elastic MapReduce	Herramientas de AWS para el procesamiento de big data mediante Hadoop.
(Damjanovic-Behrendt & Behrendt, 2019)	Elastic Stack / ELK Stack	Herramienta para la búsqueda, análisis y visualización de información en tiempo real. Consiste en tres softwares complementarios como Elasticsearch, Logstash y Kibana.
(Lee et al., 2018)	Hbase	Base de datos no relacional de código abierto.
(MacDonald, 2017)	IoT EL20 Edge Computing	Sistema analítico desarrollado por Hewlett-Packard.
(Denos, Sommer, Favaloro, Pipes, & Avery, 2018; Schluse et al., 2018)	MATLAB / Simulink	Sistema de procesamiento de datos.
(Tan, Yang, Yoshida, & Takakuwa, 2019)	MS Excel VBA	Aplicación para editar scripts personalizados y automatizar acciones.
(Alam & Saddik, 2017)	QFSM	Herramienta gráfica para el diseño de máquinas de estado finito.
(Lee et al., 2018)	Reduce	Función capaz de extraer vectores característicos de una serie de datos temporal.
(Damjanovic-Behrendt & Behrendt, 2019)	TensorFlow	Librería de código abierto para el flujo de datos y programación diferenciable en aplicaciones de aprendizaje automático.

Tabla 6. Aprendizaje automático y análisis para la creación de gemelos digitales.

Referencias	Metodología / Algoritmo	Descripción
(Lee et al., 2018; Park et al., 2019; Zhuang, Liu, & Xiong, 2018)	Redes neuronales artificiales	Sistemas de computación basados en ejemplos sin reglas específicas.
(Zhuang et al., 2018)	Método de elementos de frontera	Simula funciones físicas y el funcionamiento de elementos.
(Madni, Madni, & Lucero, 2019)	DMFEA	Funciones de identificación de diseño, modos de fallo y efectos severos.
(Ding, Chan, Zhang, Zhou, & Zhang, 2019; Xu, 2017)	Redes neuronales profundas	Parte de métodos de aprendizaje automático basado en redes neuronales.
(Rodič, 2017)	Simulación por eventos discretos	Modelos de sistema de operación como una secuencia de eventos en el tiempo.
(P. Zheng et al., 2018)	Transformada discreta de Fourier	Calcula la frecuencia de la información con una suma periódica de la transformada de Fourier continua.

(Alam & Saddik, 2017; Li, Mahadevan, Ling, Choze, & Wang, 2017)	Redes dinámicas Bayesianas	Redes Bayesianas que relacionan variables sobre pasos temporales adyacentes.
(Haag & Anderl, 2018; Li et al., 2017; Söderberg et al., 2018; Zhuang et al., 2018)	Análisis FEM	Método numérico para resolver problemas ingenieriles y matemáticos.
(Söderberg et al., 2018)	Simulación Monte Carlo	Técnica para determinar el impacto de riesgo y la incertidumbre en los resultados potenciales de visualización.
(Oyekan et al., 2019)	Filtrado Savitzky-Golay	Método de reducción de ruido e información a partir del ruido de un sensor.
(Tao & Zhang, 2017)	VV & A	Conjunto de procesos que determinan la precisión de un modelo o simulación.

5.4 Microservicios

Los microservicios son considerados como herramientas de desarrollo de software construidos como un conjunto de servicios flexibles acoplados. También puede describirse como un estilo de arquitectura que da lugar a una aplicación relativamente pequeña, consistente, aislada y autónoma para dar varios servicios que realizan tareas específicas.

La Tabla 7 proporciona una lista de herramientas de virtualización en sistemas de producción modernos, que permiten monitorizar y trazar servicios de zonas de trabajo para resolver conflictos, además de ayudar y controlar la toma de decisiones. Los microservicios pueden considerarse como una capa de abstracción superior que engloba parte de las herramientas descritas anteriormente, en función del servicio que se desea aportar. La Tabla 8 destaca las herramientas utilizadas en la creación de un modelo y la generación de una réplica industrial de alta fidelidad. Finalmente, Tabla 9 muestra algunas de las herramientas de validación utilizadas por diversos investigadores, que proporcionan soporte para la verificación de la precisión e integridad de los datos.

Tabla 7. Microservicios de virtualización para la creación de un gemelo digital.

Referencias	Herramienta de virtualización	Descripción
(Gilchrist, 2016; Rodič, 2017; Zhuang et al., 2018)	ERP	Gestión integrada en tiempo real de los ámbitos de negocio de una empresa.
(Bao et al., 2019; Stark, Kind, & Neumeyer, 2017; Haijun Zhang et al., 2019)	SCADA	Arquitectura de un sistema de control que involucra dispositivos, comunicaciones de red y una interfaz gráfica para supervisar la gestión de procesos.
(Lee et al., 2018; L.-L. Liu et al., 2019; Schneider et al., 2019; Stark et al., 2017; Xu, 2017)	PLC	Arquitectura de hardware para el monitoreo y control de un proceso productivo.

Tabla 8. Microservicios de modelado y simulación para la creación de un gemelo digital.

Referencias	Herramientas	Descripción
(Popa et al., 2018)	ANSYS Simplorer	Simplificación de las simulaciones multidominio en un entorno de diseño.
(R. Lu & Brilakis, 2019)	Autodesk Revit	Software de modelaje de creación de información.
(Datta, 2016)	Avatar software	Simulación aplicada utilizada para mimetizar escenarios operativos.
(Schneider et al., 2019)	Dymola	Herramienta de simulación y modelización de Dassault Systems.
(Lovas et al., 2018)	EasySIM	Software de simulación para el diseño y simulación de operaciones.
(Sierla, Kyrki, Aarnio, & Vyatkin, 2018)	JMonkeyEngine 3.0	Motor de modelado 3D open-source enfocado a videojuegos.

(Moreno et al., 2017)	Lantek Expert Punch	CAD/CAM software de simulación para la automatización de una punzonadora CNC.
(Luo, Hu, Zhang, & Wei, 2019)	MWorks	Herramienta de código abierto para el diseño y la realización en tiempo real de experimentos.
(Ding et al., 2019; Lee et al., 2018)	Plant Simulation	Aplicación de modelización, simulación y optimización de sistemas y procesos
(Rodič, 2017)	SIMIO	Simulador genérico de un proceso de fabricación Flow-shop.
(Laaki et al., 2019; Lee et al., 2018; Leng et al., 2019; J. Liu et al., 2019; Oyekan et al., 2019)	Unity3D Engine	Motor multiplataforma para la creación de modelos y simulaciones.

Tabla 9. Microservicios de validación para la creación de un gemelo digital.

Referencias	Herramientas de validación	Descripción
(Iglesias et al., 2017)	ANSYS	Software que utiliza el método de los elementos finitos para resolver modelos discretizados.
(GE, 2016)	GE OptFlex	Conjunto de soluciones para el análisis y mitigación de escenarios no planeados.
(Bilberg & Malik, 2019; Caputo, Greco, Fera, & Macchiaroli, 2019)	Tecnomatix process simulate	Software de gestión del proceso y herramienta PLM de Siemens.

5.5 Conclusiones

Se ha realizado una revisión bibliográfica que ha permitido tomar consciencia de las múltiples herramientas existentes para la implementación de un gemelo digital en la industria cerámica y de la automoción presente en la Comunidad Valenciana. En esta revisión no se ha tenido en cuenta la digitalización de la gestión del ciclo de vida del producto, al encontrarse fuera del ámbito de este proyecto. El gemelo digital que se plantea para este proyecto debe organizarse sobre 4 conceptos fundamentales: comunicación, representación, computación y microservicios. De todos los trabajos consultados, es destacable el realizado por (Rodič, 2017), cuya implementación va a ser muy semejante a la que se desea realizar en este trabajo. En la Tabla 10 se resumen las tecnologías que se desean adoptar en este proyecto para cada uno de los conceptos en los que se basa un gemelo digital. Dicha tabla incluye además una breve descripción de la razón por la cual se ha decidido utilizar cada tecnología. Las decisiones no se consideran inmutables, por lo que a medida que avance el proyecto es posible que se deba recurrir a herramientas distintas o a servicios más específicos en función de las necesidades puntuales.

Tabla 10. Resumen de las tecnologías a adoptar para la implementación del gemelo digital en este proyecto.

Colección de tecnologías	Sub-tecnología	Regla / Herramienta / Método	Razón
Comunicación	Arquitectura de red	Arquitectura orientada al servicio	Orientar la generación de aplicaciones a la entrega de soluciones se cree que es la forma más natural y comprensible de diseñar el gemelo digital.
	Protocolo de comunicación	de OPC-UA	Los últimos años la industria tiende a la estandarización de sus comunicaciones. OPC-UA incluye todas las especificaciones requeridas para que estas sean seguras, escalables e interoperables entre sí.

	Plataforma intermedia	Desarrollo propio en C#	No se han identificado problemas generales que requieran de una estandarización general de la información. Cualquier problema de interoperabilidad que se encuentre durante el desarrollo del software tratará de solventarse utilizando la misma herramienta de desarrollo.
Representación	Base de datos	MySQL	La información requerida de las plantas industriales a estudiar no parece ser excesivamente elevada. Los profesionales involucrados en este proyecto consideran que las bases de datos SQL pueden funcionar perfectamente en este campo.
Computación	Procesado computacional	NexusIntegra	Software especializado en gestionar, operar y explotar los datos generados en plantas industriales. Basado en librerías de terceros de código abierto, la madurez de este software comercial se considera ideal para desarrollar esta tecnología en el menor tiempo posible.
	Analíticas	Simulación por eventos discretos	Esta metodología de simulación se asemeja de forma muy natural al proceso de fabricación en los sectores en los que se desea implantar el gemelo digital en este proyecto.
Microservicios	Virtualización	SCADA	Tipo de virtualización en la que se basa el software NexusIntegra.
	Modelizado y Simulación	JaamSIM (personalizado)	Software de simulación por eventos discretos de código abierto que permite su total modificación para adaptarse a las exigencias tanto del cliente final como de las industrias en las que será utilizado.
	Validación	-	No se contempla un microservicio de validación externa de la metodología. No obstante, el gemelo digital será validado antes de su implementación.

6 . Bibliografia

- Alam, K. M., & Saddik, A. El. (2017). C2PS: A Digital Twin Architecture Reference Model for the Cloud-Based Cyber-Physical Systems. *IEEE Access*, 5, 2050–2062. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2657006>
- Angrish, A., Starly, B., Lee, Y.-S., & Cohen, P. H. (2017). A flexible data schema and system architecture for the virtualization of manufacturing machines (VMM). *Journal of Manufacturing Systems*, 45, 236–247. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2017.10.003>
- Arafsha, F., Laamarti, F., & El Saddik, A. (2019). Cyber-Physical System Framework for Measurement and Analysis of Physical Activities. *Electronics*, 8(2), 248. <https://doi.org/10.3390/electronics8020248>
- Ardanza, A., Moreno, A., Segura, Á., de la Cruz, M., & Aguinaga, D. (2019). Sustainable and flexible industrial human machine interfaces to support adaptable applications in the Industry 4.0 paradigm. *International Journal of Production Research*, 57(12), 4045–4059. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1572932>
- Bao, J., Guo, D., Li, J., & Zhang, J. (2019). The modelling and operations for the digital twin in the context of manufacturing. *Enterprise Information Systems*, 13(4), 534–556. <https://doi.org/10.1080/17517575.2018.1526324>
- Bilberg, A., & Malik, A. A. (2019). Digital twin driven human–robot collaborative assembly. *CIRP Annals*, 68(1), 499–502. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cirp.2019.04.011>
- Caputo, F., Greco, A., Fera, M., & Macchiaroli, R. (2019). Digital twins to enhance the integration of ergonomics in the workplace design. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 71, 20–31. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ergon.2019.02.001>
- Damjanovic-Behrendt, V., & Behrendt, W. (2019). An open source approach to the design and implementation of Digital Twins for Smart Manufacturing. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 32(4–5), 366–384. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2019.1599436>
- Datta, S. P. A. (2016). Emergence of digital twins. *Journal of Innovation Management*, 5(3), 14–33.
- Denos, B. R., Sommer, D. E., Favaloro, A. J., Pipes, R. B., & Avery, W. B. (2018). Fiber orientation measurement from mesoscale CT scans of prepreg platelet molded composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 114, 241–249. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2018.08.024>
- Ding, K., Chan, F. T. S., Zhang, X., Zhou, G., & Zhang, F. (2019). Defining a Digital Twin-based Cyber-Physical Production System for autonomous manufacturing in smart shop floors. *International Journal of Production Research*, 57(20), 6315–6334. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1566661>
- GE. (2016). Ge digital twin analytic engine for the digital power plant. Retrieved June 25, 2020, from https://www.ge.com/digital/sites/default/files/download_assets/%0ADigital-Twin-for-the-digital-power-plant-.pdf
- Gilchrist, A. (2016). *Industry 4.0: the industrial internet of things*. Springer.
- Haag, S., & Anderl, R. (2018). Digital twin – Proof of concept. *Manufacturing Letters*, 15, 64–66. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2018.02.006>
- He, Y., Guo, J., & Zheng, X. (2018). From Surveillance to Digital Twin: Challenges and Recent Advances of Signal Processing for Industrial Internet of Things. *IEEE Signal Processing Magazine*, 35(5), 120–129. <https://doi.org/10.1109/MSP.2018.2842228>
- Hervas, J. L., Estelles, S., Mallol, G., & Boix, J. (2019). A place-based policy for promoting Industry 4.0: the case of the Castellon ceramic tile district. *European Planning Studies*, 27(9), 1838–1856. <https://doi.org/10.1080/09654313.2019.1642855>
- Iglesias, D., Bunting, P., Esquembri, S., Hollocombe, J., Silburn, S., Vitton-Mea, L., ... Valcarcel, D. (2017). Digital twin applications for the JET divertor. *Fusion Engineering and Design*, 125, 71–76. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2017.10.012>
- Kim, H., Shin, H., Kim, H. S., & Kim, W. T. (2018). VR-CPES: A novel cyber-physical education systems for interactive VR services based on a mobile platform. *Mobile Information Systems*, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/8941241>
- Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J., & Sihn, W. (2018). Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), 1016–1022. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.474>
- Laaki, H., Miche, Y., & Tammi, K. (2019). Prototyping a Digital Twin for Real Time Remote Control Over Mobile Networks: Application of Remote Surgery. *IEEE Access*, 7, 20325–20336. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2897018>
- Lee, J., Noh, S., Kim, H.-J., & Kang, Y.-S. (2018). Implementation of Cyber-Physical Production Systems for Quality Prediction and Operation Control in Metal Casting. *Sensors*, 18(5), 1428. <https://doi.org/10.3390/s18051428>
- Leng, J., Zhang, H., Yan, D., Liu, Q., Chen, X., & Zhang, D. (2019). Digital twin-driven manufacturing cyber-physical system for parallel controlling of smart workshop. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 10(3), 1155–1166. <https://doi.org/10.1007/s12652-018-0881-5>
- Li, C., Mahadevan, S., Ling, Y., Choe, S., & Wang, L. (2017). Dynamic Bayesian Network for Aircraft Wing Health Monitoring Digital Twin. *AIAA Journal*, 55(3), 930–941. <https://doi.org/10.2514/1.J055201>
- Liu, C., Vengayil, H., Lu, Y., & Xu, X. (2019). A Cyber-Physical Machine Tools Platform using OPC UA and MTConnect. *Journal of Manufacturing Systems*, 51, 61–74. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2019.04.006>
- Liu, C., Vengayil, H., Zhong, R. Y., & Xu, X. (2018). A systematic development method for cyber-physical machine tools. *Journal of Manufacturing Systems*, 48, 13–24. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.02.001>
- Liu, J., Zhou, H., Tian, G., Liu, X., & Jing, X. (2019). Digital twin-based process reuse and evaluation approach for smart process planning. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 100(5), 1619–1634. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2748-5>

- Liu, L.-L., Wan, X., Gao, Z., Li, X., & Feng, B. (2019). Research on modelling and optimization of hot rolling scheduling. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 10(3), 1201–1216. <https://doi.org/10.1007/s12652-018-0944-7>
- Liu, Q., Zhang, H., Leng, J., & Chen, X. (2019). Digital twin-driven rapid individualised designing of automated flow-shop manufacturing system. *International Journal of Production Research*, 57(12), 3903–3919. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1471243>
- Lovas, R., Farkas, A., Marosi, A. C., Ács, S., Kovács, J., Szalóki, Á., & Kádár, B. (2018). Orchestrated platform for cyber-physical systems. *Complexity*, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/8281079>
- Lu, R., & Brilakis, I. (2019). Digital twinning of existing reinforced concrete bridges from labelled point clusters. *Automation in Construction*, 105, 102837. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102837>
- Lu, Y., Liu, C., Wang, K. I.-K., Huang, H., & Xu, X. (2020). Digital Twin-driven smart manufacturing: Connotation, reference model, applications and research issues. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 61, 101837. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.101837>
- Lu, Y., & Xu, X. (2019). Cloud-based manufacturing equipment and big data analytics to enable on-demand manufacturing services. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 57, 92–102. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rcim.2018.11.006>
- Luo, W., Hu, T., Zhang, C., & Wei, Y. (2019). Digital twin for CNC machine tool: modeling and using strategy. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 10(3), 1129–1140. <https://doi.org/10.1007/s12652-018-0946-5>
- MacDonald, C. (2017). Creating a Digital Twin for a Pump. *Ansys Advantage Issue*, 1. Retrieved from <http://www.ansys.com/-/media/Ansys/corporate/resourcelibrary/article/Creating-a-Digital-Twin-for-a-Pump-AA-V11-I1.pdf>
- Madni, A., Madni, C., & Lucero, S. (2019). Leveraging Digital Twin Technology in Model-Based Systems Engineering. *Systems*, 7(1), 7. <https://doi.org/10.3390/systems7010007>
- Mallol Gasch, J. G. (2006). Control y automatización en la industria cerámica. Evolución y perspectivas. In *IX Congreso Mundial de la Calidad del Azulejo y del Pavimento Cerámico.Qualicer 2006* (p. 24). Castellón, Spain: : IX Congreso Mundial de la Calidad del Azulejo y del Pavimento Cerámico.Qualicer 2006.
- Monostori, L., Kádár, B., Bauernhansl, T., Kondoh, S., Kumara, S., Reinhart, G., ... Ueda, K. (2016). Cyber-physical systems in manufacturing. *CIRP Annals*, 65(2), 621–641. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.06.005>
- Moreno, A., Velez, G., Ardanza, A., Barandiaran, I., de Infante, Á. R., & Chopitea, R. (2017). Virtualisation process of a sheet metal punching machine within the Industry 4.0 vision. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 11(2), 365–373. <https://doi.org/10.1007/s12008-016-0319-2>
- Negri, E., Fumagalli, L., & Macchi, M. (2017). A Review of the Roles of Digital Twin in CPS-based Production Systems. *Procedia Manufacturing*, 11, 939–948. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.198>
- Nikolakis, N., Alexopoulos, K., Xanthakis, E., & Chrysosolouris, G. (2019). The digital twin implementation for linking the virtual representation of human-based production tasks to their physical counterpart in the factory-floor. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 32(1), 1–12. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2018.1529430>
- Oyekan, J. O., Hutabarat, W., Tiwari, A., Grech, R., Aung, M. H., Mariani, M. P., ... Dupuis, C. (2019). The effectiveness of virtual environments in developing collaborative strategies between industrial robots and humans. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 55, 41–54. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rcim.2018.07.006>
- Park, K. T., Im, S. J., Kang, Y.-S., Noh, S. Do, Kang, Y. T., & Yang, S. G. (2019). Service-oriented platform for smart operation of dyeing and finishing industry. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 32(3), 307–326. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2019.1572225>
- Popa, C. L., Cotet, C. E., Popescu, D., Solea, M. F., Şaşcîm (Dumitrescu), S. G., & Dobrescu, T. (2018). Material flow design and simulation for a glass panel recycling installation. *Waste Management & Research*, 36(7), 653–660. <https://doi.org/10.1177/0734242X18775487>
- Rodič, B. (2017). Industry 4.0 and the New Simulation Modelling Paradigm. *Organizacija*, 50(3), 193–207. <https://doi.org/10.1515/orga-2017-0017>
- Schluse, M., Priggemeyer, M., Atorf, L., & Rossmann, J. (2018). Experimentable Digital Twins—Streamlining Simulation-Based Systems Engineering for Industry 4.0. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 14(4), 1722–1731. <https://doi.org/10.1109/TII.2018.2804917>
- Schneider, G. F., Wicaksono, H., & Ovtcharova, J. (2019). Virtual engineering of cyber-physical automation systems: The case of control logic. *Advanced Engineering Informatics*, 39, 127–143. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aei.2018.11.009>
- Sierla, S., Kyrki, V., Aarnio, P., & Vyatkin, V. (2018). Automatic assembly planning based on digital product descriptions. *Computers in Industry*, 97, 34–46. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compind.2018.01.013>
- Söderberg, R., Wärmefjord, K., Madrid, J., Lorin, S., Forslund, A., & Lindkvist, L. (2018). An information and simulation framework for increased quality in welded components. *CIRP Annals*, 67(1), 165–168. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cirp.2018.04.118>
- Stark, R., Kind, S., & Neumeyer, S. (2017). Innovations in digital modelling for next generation manufacturing system design. *CIRP Annals*, 66(1), 169–172. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.04.045>
- Tan, Y., Yang, W., Yoshida, K., & Takakuwa, S. (2019). Application of IoT-Aided Simulation to Manufacturing Systems in Cyber-Physical System. *Machines*, 7(1), 2. <https://doi.org/10.3390/machines7010002>
- Tao, F., & Zhang, M. (2017). Digital Twin Shop-Floor: A New Shop-Floor Paradigm Towards Smart Manufacturing. *IEEE Access*, 5, 20418–20427. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2756069>
- Uhlemann, T. H.-J., Lehmann, C., & Steinhilper, R. (2017). The Digital Twin: Realizing the Cyber-Physical Production System for Industry 4.0. *Procedia CIRP*, 61, 335–340. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.11.152>



- Xu, X. (2017). Machine Tool 4.0 for the new era of manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 92(5), 1893–1900. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0300-7>
- Zhang, H, Liu, Q., Chen, X., Zhang, D., & Leng, J. (2017). A Digital Twin-Based Approach for Designing and Multi-Objective Optimization of Hollow Glass Production Line. *IEEE Access*, 5, 26901–26911. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2766453>
- Zhang, Haijun, Zhang, G., & Yan, Q. (2019). Digital twin-driven cyber-physical production system towards smart shop-floor. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 10(11), 4439–4453. <https://doi.org/10.1007/s12652-018-1125-4>
- Zheng, P., Lin, T.-J., Chen, C.-H., & Xu, X. (2018). A systematic design approach for service innovation of smart product-service systems. *Journal of Cleaner Production*, 201, 657–667. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.101>
- Zheng, Y., Yang, S., & Cheng, H. (2019). An application framework of digital twin and its case study. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 10(3), 1141–1153. <https://doi.org/10.1007/s12652-018-0911-3>
- Zhuang, C., Liu, J., & Xiong, H. (2018). Digital twin-based smart production management and control framework for the complex product assembly shop-floor. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 96(1), 1149–1163. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-1617-6>

7 Abreviaciones

OSI	Open system interconnection
OPC-UA	Open platform communication unified architecture
CoAP	Constrained application protocol
SOAP	Simple object access protocol
NTP	Network time protocol
TCP/IP	Transmission control protocol / internet protocol
UDT	User datagram protocol
DMFEA	Design failure mode and effects analysis
FEM	Finite Element Method
VV & A	Verification validation and accreditation
ERP	Enterprise resource planning
SCADA	Supervisory control and data acquisition
PLC	Programmable logic controller