

2021 ENTREGABLE



Proyectos

“DIGITUIN”

DESARROLLO DE UNA INFRAESTRUCTURA DIGITAL PARA LA
CONSTRUCCIÓN DE MODELOS DE PROCESOS MEDIANTE
GEMELOS DIGITALES

Resumen de resultados del proyecto

Número de proyecto: 22100064

Expediente: IMDEEA/2021/52

Duración: Del 01/07/2021 al 30/09/2022

Coordinado en AIDIMME por: SÁNCHEZ ASINS, JOSÉ LUIS

Línea de I+D: INDUSTRIA 4.0



GENERALITAT
VALENCIANA

IVACE
INSTITUTO VALENCIANO DE
COMPETITIVIDAD EMPRESARIAL



Cofinanciado por
la Unión Europea

ÍNDICE

1	Arquitecturas de referencia para la construcción de gemelos digitales	3
2	Definición de la arquitectura del gemelo.....	11
2.1	Arquitectura propuesta para el gemelo digital	12
2.2	Capa de análisis.....	12
2.2.1	Teoría sobre aprendizaje automático	13
2.2.2	Redes neuronales.....	15
2.2.3	Uso de las redes neuronales en el gemelo digital.....	17
2.2.4	Análisis de datos y aprendizaje	18
2.3	Visualización e interacción.....	20
2.4	Tecnología Transfer Learning	21
3	Desarrollo del modelo del proceso	24
3.1	Descripción del proceso.....	24
3.2	Variables identificadas:	25
3.3	Arquitectura y almacenamiento de datos.....	26
3.3.1	Sensores adicionales.....	27
3.3.2	Extracción de datos del PLC existente	28
3.3.3	Recogida y almacenamiento de datos	29
3.3.4	Conexión a internet	29
3.3.5	Servidor cloud	29
3.4	Análisis de datos	31
3.4.1	Datos en planta.....	31
3.4.2	Servidor remoto.....	32
3.4.3	Sistemas predictivos	33
3.4.4	Azure	34
4	Desarrollo del entorno gráfico para la generación del modelo virtualizado	35
5	Desarrollo del sistema de interacción con el gemelo digital.....	38
5.1	Desarrollo del gemelo.....	38
5.2	Sistemas de interacción con el gemelo digital.....	43
6	Pruebas.....	44
7	Verificación de la tecnología Transfer Learning.....	46
8	Conclusiones	47



“DIGITUIN” - Desarrollo de una infraestructura digital para la construcción de modelos de procesos mediante gemelos digitales

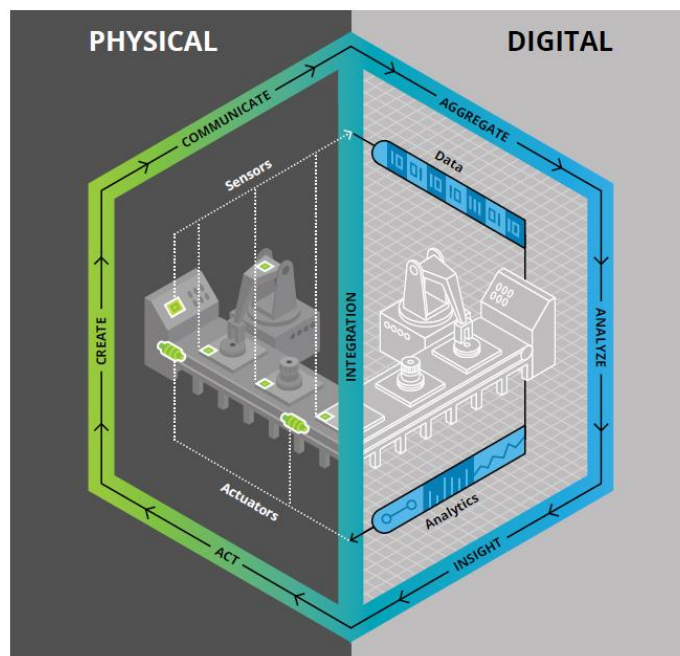
1 Arquitecturas de referencia para la construcción de gemelos digitales

El concepto de emplear modelos que imitan el comportamiento de productos reales, se remonta al programa Apolo de la NASA, en donde emplearon dos vehículos espaciales idénticos para permitir reflejar las condiciones del mismo durante las misiones.

La tecnología de gemelos digitales consiste en crear réplicas virtuales de objetos o procesos que simulan el comportamiento de estos, con el objetivo de analizar su efectividad y/o comportamiento en determinados casos para mejorar su efectividad.

En pocas palabras, un «Gemelo Digital» es un modelo virtual de un proceso, producto o servicio a través de la información obtenida de sensores o automatismos. Esta unión del mundo físico con el virtual permite el análisis inteligente de datos y la monitorización de sistemas para (ciudadesdelfuturo, 2017):

- Evitar problemas antes de que se produzcan
- Prevenir tiempos de inactividad
- Desarrollar nuevas oportunidades de negocio
- Planificar el futuro mediante simulaciones
- Personalizar la producción a los requerimientos del cliente



Manufacturing process digital twin model. Source: Deloitte University Press



**GENERALITAT
VALENCIANA**

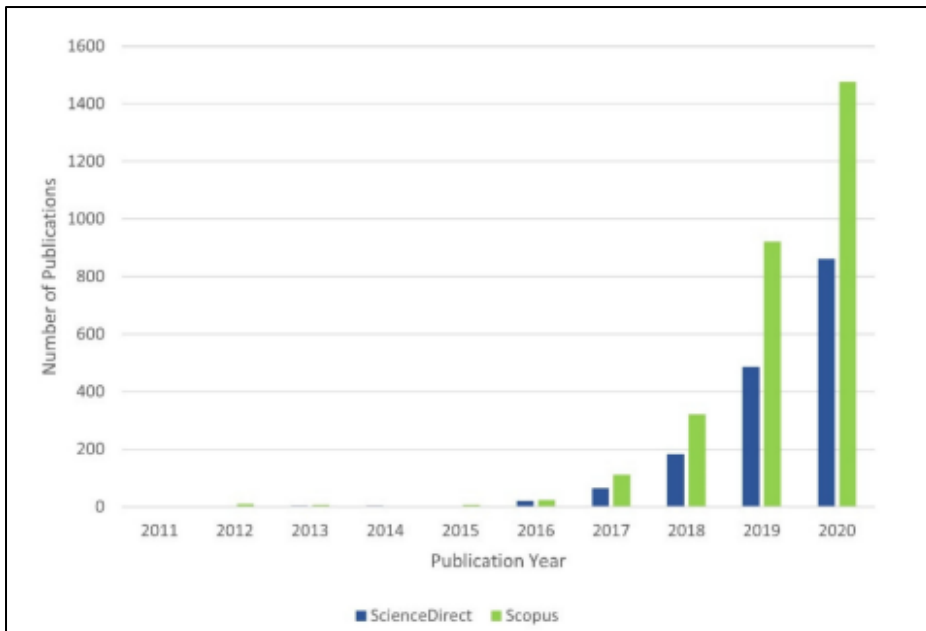
IVACE
INSTITUTO VALENCIANO DE
COMPETITIVIDAD EMPRESARIAL



**Cofinanciado por
la Unión Europea**

“DIGITUIN” - Desarrollo de una infraestructura digital para la construcción de modelos de procesos mediante gemelos digitales

A pesar de que el concepto Gemelo Digital no es del todo nuevo, en la última década es cuando ha tomado mayor relevancia y popularidad gracias a las investigaciones en dicho campo. Esta se puede observar en el crecimiento exponencial del número de publicaciones encontradas en Scopus y ScienceDirect (limitado al idioma inglés) que contienen el término 'Digital Twin' en el título del artículo, resumen o como palabras clave de 2011 a 2020. El aumento en las publicaciones es bastante reciente. (Singh, Fuenmayor, Hinchy, Qiao, Murray, & Devine, 2021)



Número de publicaciones relacionadas con Digital Twin por año desde 2011 to 2020

Fuente: (Singh, Fuenmayor, Hinchy, Qiao, Murray, & Devine, 2021)

Como se indica en la misma publicación, el aumento en el número de publicaciones relacionadas con los gemelos digitales ha llevado a la confusión entre diferentes terminologías relacionadas con la digitalización de las industrias.

Además de generarse otro problema, como la falta de consenso sobre la descripción y distintos tipos de gemelo digital, lo que aumenta la confusión (Singh, Fuenmayor, Hinchy, Qiao, Murray, & Devine, 2021)

La primera definición de gemelo digital surge de la mano del profesor de la Universidad de Michigan, Michael Grieves, en 2002 durante una presentación sobre la gestión del ciclo de vida del producto en la industria. (Grieves & Vickers, 2017)

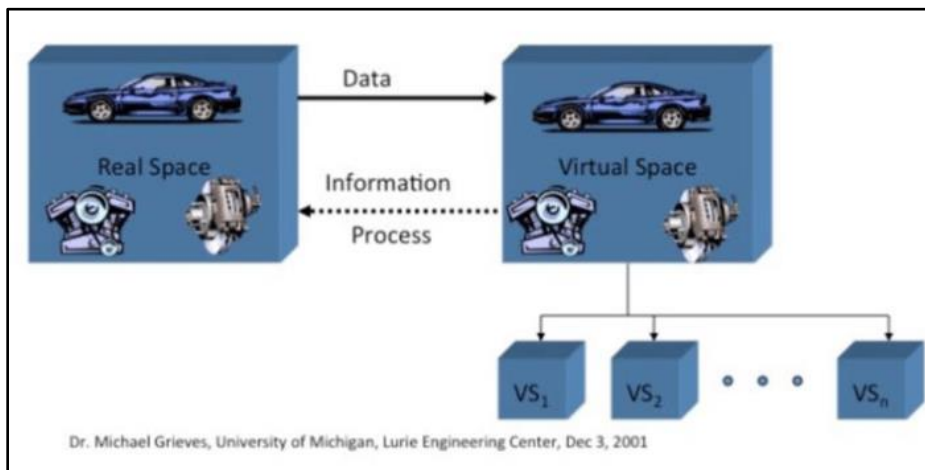
M. Grieves, estableció una arquitectura general de gemelo digital estándar (Grieves, 2014), en ella se presenta un gemelo digital como una estructura formada por tres componentes: un espacio real, un espacio virtual y la conexión entre ellos, es decir, el mecanismo de enlace para el flujo de datos e información entre los ambos. El modelo se denominó "Mirrored Spaces Model".

“DIGITUIN” - Desarrollo de una infraestructura digital para la construcción de modelos de procesos mediante gemelos digitales

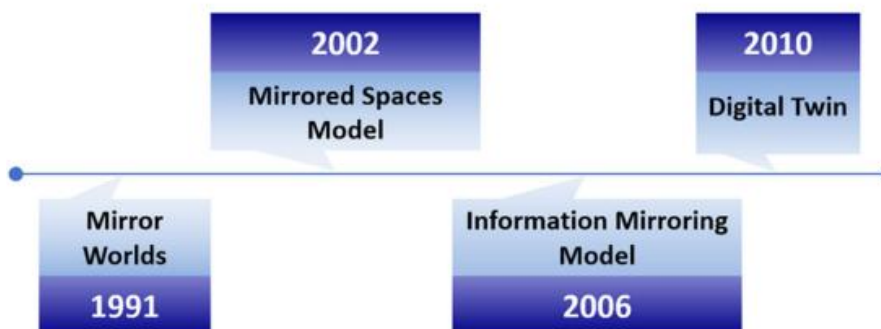
Un concepto similar en el que los modelos de software imitan la realidad a partir de la entrada de información del mundo físico fue imaginado por Gelernter en 1991 y fue denominado "Mirror Worlds". (Gelernter, 1993)

En 2003, Kary Främling et al. También propuso "Una arquitectura basada en agentes en la que cada elemento de producto tiene su correspondiente 'contraparte virtual' o agente asociado" como solución a la ineficiencia de la transferencia de información producción en papel para la Gestión del ciclo de vida de producto (PLM). (Främling, Holmström, Ala-Risku, & Kärkkäinen, 2003)

En 2006, el nombre del modelo conceptual propuesto por Grieves se cambió de "Mirrored Spaces Model" a "Information Mirroring Model". El modelo enfatiza que el mecanismo de enlace entre dos espacios es bidireccional y tiene múltiples espacios virtuales para un solo espacio real donde se alternan y se pueden explorar ideas o diseños.



Diapositiva Original de la presentación de M. Grieves. Fuente: (Grieves & Vickers, 2017)



Línea de tiempo de la evolución del Gemelo Digital.
Fuente: (Singh, Fuenmayor, Hinchy, Qiao, Murray, & Devine, 2021)

Los avances tecnológicos realizados en cuanto, a capacidad de almacenaje de datos y procesamiento de los mismos, así como la irrupción del IIoT y la conectividad de los dispositivos, han dado la posibilidad de desarrollar los Gemelos Digitales.



**GENERALITAT
VALENCIANA**

IVACE
INSTITUTO VALENCIANO DE
COMPETITIVIDAD EMPRESARIAL



**Cofinanciado por
la Unión Europea**

“DIGITUIN” - Desarrollo de una infraestructura digital para la construcción de modelos de procesos mediante gemelos digitales

En párrafos anteriores de habla de la falta de consenso en la descripción del gemelo digital, la cual tiene su reflejo en la existencia de diferentes visiones en cuanto a la arquitectura de un gemelo digital. De tal forma podemos encontrarnos arquitecturas propuestas por distintos investigadores en las que se definen gemelos digitales con distintos números de capas.

Algunas definen el gemelo digital con 3 capas, como el modelo anteriormente comentado desarrollado por Michael Grieves o agregando algunas capas más.

El modelo (Stark, Kind, & Neumeyer, 2017) caracteriza el gemelo digital como (1) una instancia única del modelo maestro digital universal de un activo, (2) su Sombra digital y (3) un enlace inteligente de los dos elementos anteriores

Se proponen modelos con más capas, como el propuesto por (Tao, Zhang, Liu, & Nee, 2018) y está compuesto por: (1) Entidad física, (2) Entidad virtual, (3) Servicios para entidad física y virtual, (4) Datos, (5) Conexión entre la entidad física, la virtual, los servicios y los datos.

O el planteado por (Ponomarev, Kudryashov, Popelnukha, & Potekhin, 2017) que presenta: (1) capa ciberfísica; (2) capa de almacenamiento de datos / procesamiento primario; (3) capa de almacenamiento y computación distribuida; (4) capa de modelos y algoritmos; (5) capa de visualización e interfaces de usuario.

El planteamiento de seis capas de (Redelinghuys, Basson, & Kruger, 2019). Las capas son: (1) dispositivos físicos; (2) controladores locales; (3) repositorios de datos locales; (4) puerta de enlace de IoT; (5) repositorios de información basados en la nube; (6) emulación y simulación.

	(Grieves,2014)	(Stark, et. al, 2017)	(Tao, et. al, 2018)	(Ponomarev, et. al,2017)	(Redelinghuys, et. al,2019)
Capa 1	Espacio Real	Instancia única del modelo maestro	Entidad física	Capa ciberfísica	Dispositivos físicos
Capa 2	Espacio Virtual	Sombra Digital	Entidad virtual	almacenamiento de datos / procesamiento primario	Controladores locales
Capa 3	Flujo datos e información entre espacio real-virtual	Enlace Inteligente entre ambos elementos	Servicios para entidad física y virtual	Capa almacenamiento y computación distribuida	Repositorios de datos locales
Capa 4			Datos	Capa de modelos y algoritmos	Puerta de enlace de IoT
Capa 5			Conexión entre la entidad física, la virtual, los servicios y los datos	Capa de visualización e interfaces de usuario.	Repositorios de información basados en la nube
Capa 6					Emulación y simulación

Comparativa de Arquitecturas de Gemelo Digital, propuestas por distintos investigadores. Fuente: Aidimme.



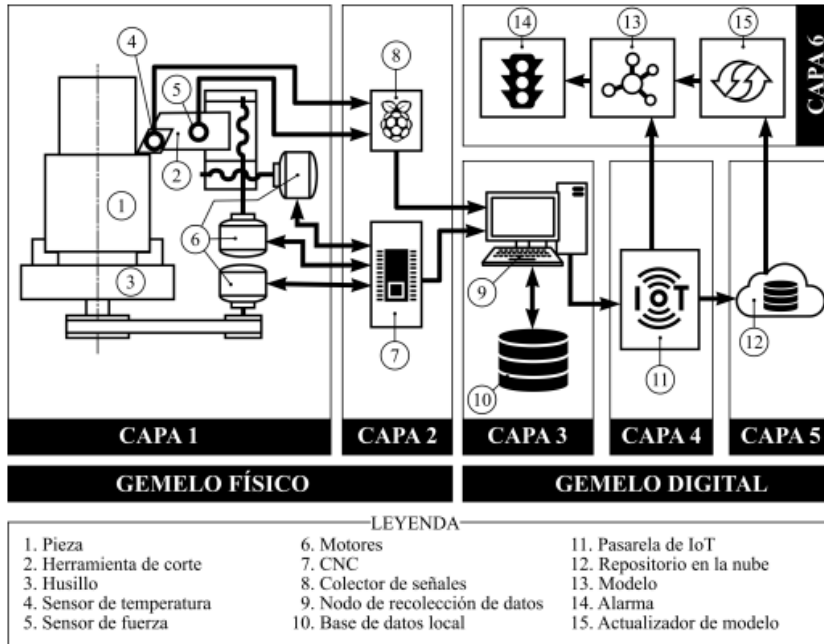
GENERALITAT VALENCIANA

IVACE
INSTITUTO VALENCIANO DE COMPETITIVIDAD EMPRESARIAL



Cofinanciado por la Unión Europea

“DIGITUIN” - Desarrollo de una infraestructura digital para la construcción de modelos de procesos mediante gemelos digitales



Gemelo digital implementado la arquitectura de 6 Capas de (Redelinghuys, Basson, & Kruger, 2019).

Otro modelo es el propuesto por (Semeraro, 2020) compuesto por las siguientes partes:

1. Contexto y aplicación
2. Ciclo de vida del producto
3. Funciones
4. Arquitectura
5. Componentes



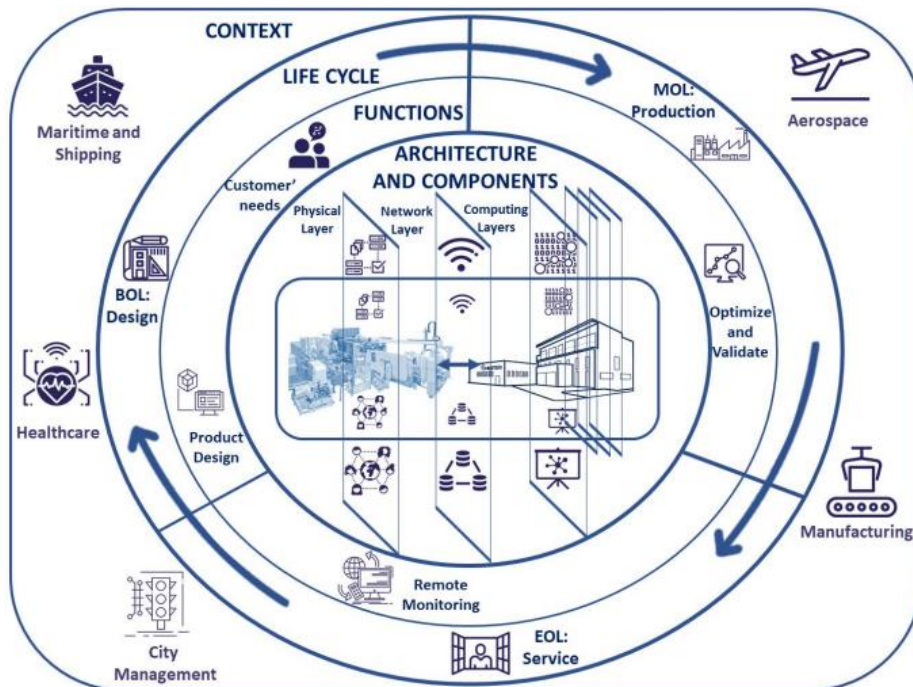
GENERALITAT
VALENCIANA

IVACE
INSTITUTO VALENCIANO DE
COMPETITIVIDAD EMPRESARIAL



Cofinanciado por
la Unión Europea

“DIGITUIN” - Desarrollo de una infraestructura digital para la construcción de modelos de procesos mediante gemelos digitales



Propuesta Modelo del gemelo digital. Fuente: (Semeraro, 2020)

Para el desarrollo de un gemelo digital, además de la arquitectura de este, hay que tener en cuenta otros factores, como el contexto de aplicación, la fase de ciclo del producto en la que se aplica (fase de diseño, de producción o servicio), la función del gemelo y los componentes. Considerando estos, la aplicación del gemelo digital variará según las diferentes necesidades.

Los principales contextos de aplicación de un gemelo digital son: la Salud; el sector Naval y transporte marítimo; los procesos de Fabricación; la Gestión de la ciudad; y el sector Aeroespacial.

El aumento del número de publicaciones relacionadas con Gemelos Digitales, mencionado en anteriores párrafos, indica también el creciente interés, como sucede con toda nueva tecnología disruptiva. Hay varias empresas que han desarrollado plataformas con herramientas para la construcción de gemelos digitales como son:

- GE Predix Platform
- SIEMENS PLM
- Microsoft Azure
- IBM Watson
- PTC Thing Worx
- Aveva
- SAP Leonardo Platform
- Twin Thread
- DNV-GL
- Dassault 3D Experience

“DIGITUIN” - Desarrollo de una infraestructura digital para la construcción de modelos de procesos mediante gemelos digitales

- Sight Machine
- Oracle Cloud

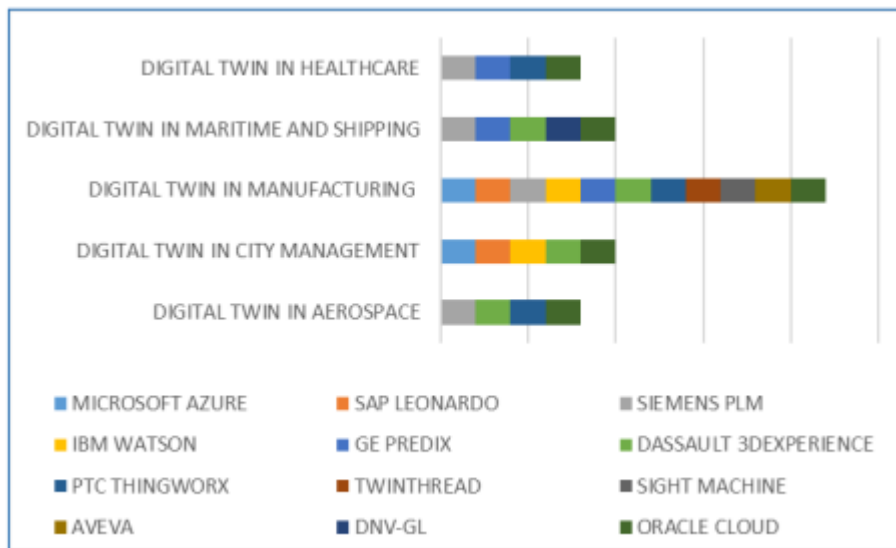
	PREDIX (Proficy C-Sense)	MINDSPHERE	THINGWORX	WATSON	DITTO	iMODEL.JS (ITWIN)
En la tabla siguiente se ha detallado las principales funcionalidades de algunas de estas plataformas.						
Extracción de datos	Incluye capa de conectividad. No se facilita interacción con los activos mediante dispositivos físicos.	Incluye una capa de conectividad con los activos y un dispositivo de conexión (MindConnect).	Incluye capa de conectividad. No se facilita interacción con los activos mediante dispositivos físicos.	Incluye capa de conectividad. No se facilita interacción con los activos mediante dispositivos físicos.	No incluye conectividad IoT ni protocolos de conexión. Actúa como un back end, incorporando APIs.	No incluye conectividad ni protocolos de conexión. Debe hacerse con aplicaciones externas.
Modelos preconfigurados	No se utilizan modelos preconfigurados de generación de GD, aunque cada usuario puede crear plantillas para activos similares.	No se utilizan modelos de gemelo digital preconfigurados. La orientación de la plataforma IoT es genérica y cada usuario debe desarrollar sus aplicaciones. Dispone de configuraciones específicas (Gestión energética, Gestión de máquinas, Gestión de movilidad, etc).	El desarrollo de gemelos digitales dispone de un entorno de programación específico, orientado a modelado de productos/procesos a partir de modelado matemático (por ejemplo utilizando software de simulación tipo ANSYS).	Existe una aplicación (IBM Digital Twin Exchange) para utilizar GD ya elaborados por otras organizaciones. No está específicamente diseñada para desarrollo de GD, aunque dispone de las capacidades para que el usuario los desarrolle.	No dispone de modelos preconfigurados. Se trata de un framework de código abierto sobre el que se pueden implementar aplicaciones de diverso tipo, incluyendo GD.	<i>iModel.js</i> permite a los profesionales crear aplicaciones inmersivas que conectan gemelos digitales de infraestructura con el resto de elementos digitales. iTwin incluye servicios para visualizar, gestionar y securizar GDs creados en otras aplicaciones.
Herramientas de usuario	Se pueden desarrollar APPs específicas para diferentes aplicaciones.	Dispone de APIs para conexión con aplicaciones externas, que cada usuario puede desarrollar.	Herramientas gráficas de visualización, embebidas en la plataforma.	Herramientas para usuarios muy expertos.	Es un “middleware” para gemelos digitales. Se pueden desarrollar APPs web para visualización.	La herramienta de usuario es iTwin, totalmente configurable.
Utilización de algoritmos ML	Utiliza IA y algoritmos de Machine.	Herramientas estadísticas clásicas y ML general.	Para gemelos digitales utiliza modelado matemático.	Dispone de una herramienta avanzada: AutoAI: - analiza.	No integra IA. Es un recurso externo.	No integra IA. Es un recurso externo.



“DIGITUIN” - Desarrollo de una infraestructura digital para la construcción de modelos de procesos mediante gemelos digitales

	Learning generales			automáticamente los datos y genera las interconexiones de modelo candidatas para resolver el problema de modelado predictivo		
Especialización	Plataforma IIoT de uso general. Muy orientado a equipamiento industrial (equipos críticos), aunque es genérico	Plataforma IIoT de uso general, orientada a la industria	Plataforma IIoT de uso general, orientada a la industria, servicios e ingeniería	Plataforma IoT de uso muy general. Proporciona soluciones para otras aplicaciones y plataformas. Muy compleja	Carácter general. Tanto Industria como Consumo.	Carácter general. Tanto Industria como Consumo.

La utilización de cada una de estas plataformas en los diferentes sectores se refleja en la ilustración siguiente.



Plataforma de gemelo digital empleada según contextos de aplicación. Fuente: (Semeraro, Lezoche, Panetto, & Dassisi, 2021)

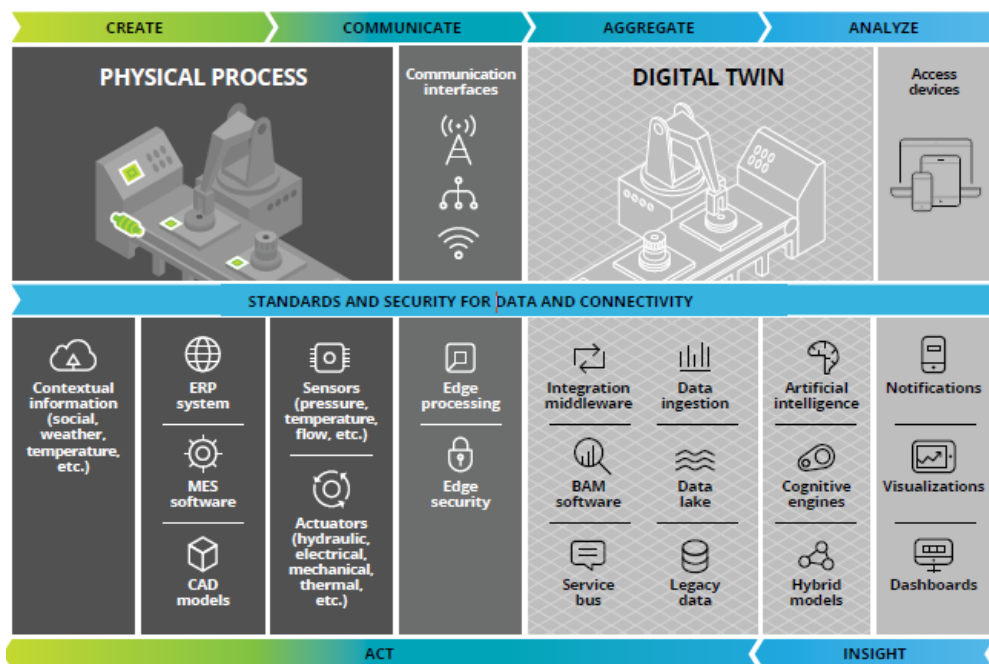
“DIGITUIN” - Desarrollo de una infraestructura digital para la construcción de modelos de procesos mediante gemelos digitales

2 Definición de la arquitectura del gemelo

Aunque existen diversas interpretaciones de las arquitecturas de un gemelo digital entre los investigadores y los profesionales de la industria, los modelos, los datos y las conexiones siempre juegan los roles más importantes en el gemelo digital. (Semeraro, 2020)

La falta de una definición concisa de gemelo digital y de una arquitectura de referencia, llevan a desarrollar soluciones de gemelo digital utilizando diferentes tecnologías, interfaces y protocolos de comunicación, modelos y datos. Deben desarrollarse soluciones estándar de gemelos digitales para proporcionar criterios y restricciones de diseño donde los aspectos arquitectónicos, el modelo de información de referencia y los protocolos de comunicación estén claramente definidos. (Semeraro, Lezoche, Panetto, & Dassisti, 2021)

Se debe explorar el principio de modularidad, para mejorar la eficiencia del modelado: esto permitiría mejorar la flexibilidad y la reutilización del gemelo digital en diferentes aplicaciones. (Semeraro, 2020)



Digital twin conceptual architecture. Fuente: Deloitte University Press

Es por esto que existe la libertad de explorar distintas opciones para encontrar la que mejor se puede adaptar al modelo completo. Para esta tarea, las herramientas de aprendizaje automático resultan un gran aliado y permiten no solo tener una tecnología que permita monitorizar, sino que también generan un sistema que permite predecir el comportamiento bajo ciertas circunstancias del dispositivo monitorizado.

También la disponibilidad de abundantes sistemas de monitorización, sensores y PLCs en el mercado permite la creación de una infraestructura hardware lo suficientemente solvente como para gestionar el tráfico constante de información con la que alimentar el gemelo.

“DIGITUIN” - Desarrollo de una infraestructura digital para la construcción de modelos de procesos mediante gemelos digitales

Por último, una buena infraestructura software es indispensable para que se pueda obtener, almacenar, transformar y repartir la información, permitiendo a los sistemas de ML aprender.

2.1 Arquitectura propuesta para el gemelo digital

La ventaja de una arquitectura de capas para diseñar un gemelo digital, radica en la claridad conceptual que otorga al problema de convertir un sistema físico en un modelo virtual. Independientemente del número de capas, los elementos básicos que configuran un gemelo digital son muy similares. Sin embargo, la existencia de capas permite segmentar el problema, creándose una metodología de análisis estándar aplicable a cualquier proceso que se quiera modelizar.

A partir de las propuestas disponibles en la literatura, la propuesta es construir un modelo que utilice una arquitectura de seis capas:



Seguidamente se detalla el significado de las últimas capas.

2.2 Capa de análisis

Esta capa es la más crítica en la construcción del gemelo digital, ya que permite dotarlo de funcionalidades avanzadas, disponiendo de la capacidad de simular escenarios de funcionamiento del proceso.

Seguidamente se muestra el desarrollo modelos matemáticos que permitan almacenar de manera simple el conocimiento aprendido de manera que se puedan hacer simulaciones de algunas situaciones en el gemelo y que además sea sencillo transferir este conocimiento a un gemelo nuevo que utilice elementos parecidos.



**GENERALITAT
VALENCIANA**

IVACE
INSTITUTO VALENCIANO DE
COMPETITIVIDAD EMPRESARIAL



**Cofinanciado por
la Unión Europea**

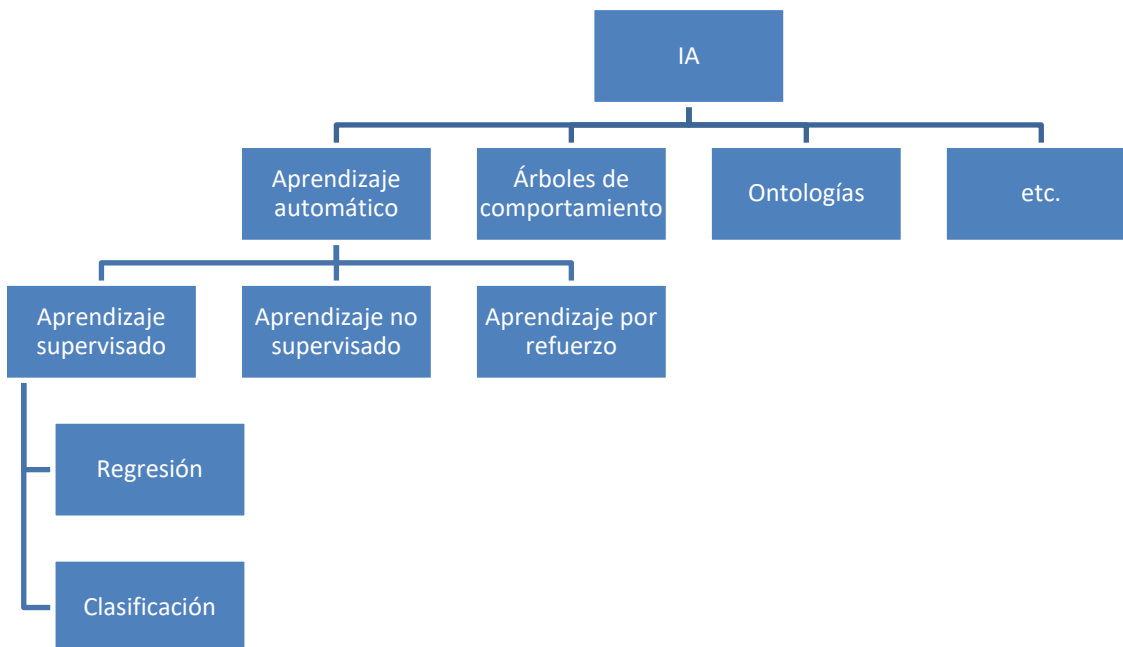
“DIGITUIN” - Desarrollo de una infraestructura digital para la construcción de modelos de procesos mediante gemelos digitales

2.2.1 Teoría sobre aprendizaje automático

El aprendizaje automático, más conocido por su nombre en inglés *Machine Learning* y por las siglas ML, es el conjunto de técnicas que permiten a los computadores extraer conocimiento de un conjunto de datos normalmente llamado *dataset*.

Excede la intención de este documento explicar en profundidad cómo funciona el campo del aprendizaje automático, así como sus técnicas y métodos. Es por esto que en las próximas líneas se desarrolla una visión general de este campo y los conocimientos específicos que van a ser utilizados.

El aprendizaje automático es un campo dentro de la rama de conocimiento de la inteligencia artificial, a su vez dentro de este campo la mayoría de la bibliografía articula 3 subcampos: el aprendizaje supervisado, el aprendizaje no supervisado y el aprendizaje por refuerzo. Tal como se muestra en la ilustración. Dentro del subcampo del aprendizaje supervisado, para este proyecto vamos a utilizar mayormente algoritmos de regresión.



Campos y subcampos de la inteligencia artificial. Fuente: Elaboración propia.

Los algoritmos de regresión son un conjunto de técnicas que tienen como objetivo estimar el valor de una o más variables de salida en base a los valores de diversas variables de entrada. Por convenio se suelen utilizar las variables x_1, x_2, \dots, x_n como variables de entrada y las variables y_1, y_2, \dots, y_n . De esta forma, un algoritmo de regresión puede ser representado mediante un diagrama de entradas y salidas como el siguiente:

“DIGITUIN” - Desarrollo de una infraestructura digital para la construcción de modelos de procesos mediante gemelos digitales

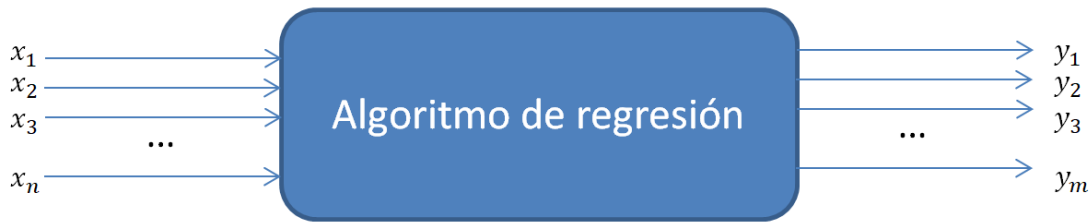
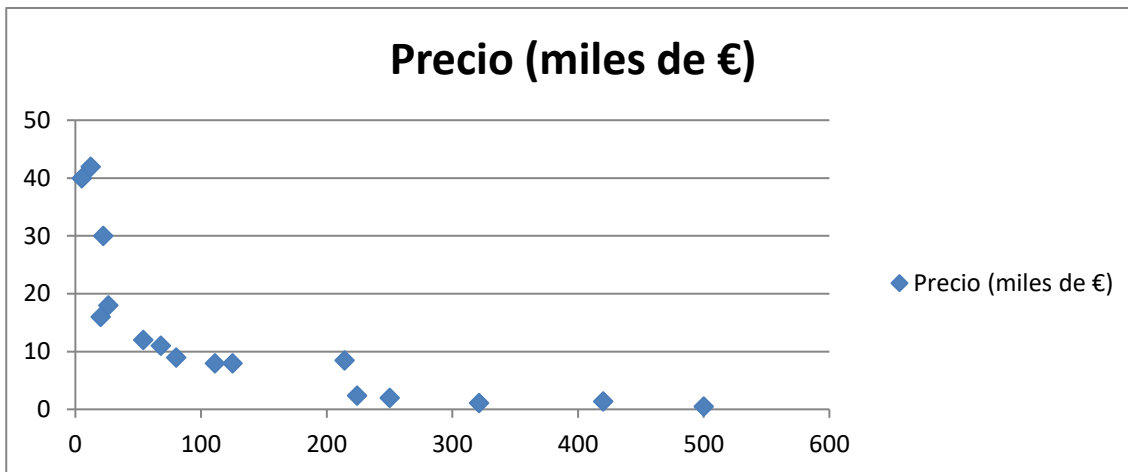


Diagrama de E/S de un algoritmo de regresión. Fuente: elaboración propia.

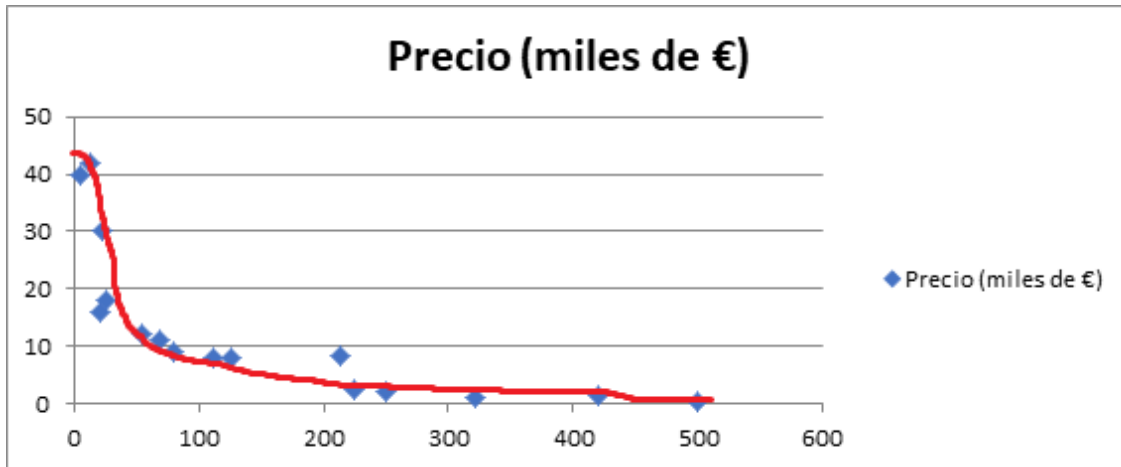
Para ilustrar el funcionamiento de este tipo de algoritmos, presentamos un ejemplo, supongamos que deseamos vender nuestro vehículo en el mercado de segunda mano. En este caso tendríamos que estimar un precio de mercado, para ello, lo normal es basarse en otras ofertas ya existentes. Si recopilamos unas cuantas muestras de los vehículos que ya están en el mercado y graficamos su precio en función del número de kilómetros que han recorrido obtendríamos una gráfica como la siguiente:



Ejemplo de datos para aplicar una regresión. Fuente: Elaboración propia.

El algoritmo de regresión nos permitirá obtener un valor de salida (precio) para cada valor de entrada (kilometraje) describiendo una curva como la que se muestra en la siguiente imagen:

“DIGITUIN” - Desarrollo de una infraestructura digital para la construcción de modelos de procesos mediante gemelos digitales



Regresión aplicada. Fuente: Elaboración propia.

Sin embargo este es un modelo muy simple en el que solamente se tiene en cuenta como variable de entrada el kilometraje y en este mismo problema hay muchas más variables a tener en cuenta, como la potencia del motor, la gama del vehículo, el color, los accesorios, etc. Esto define un problema en múltiples dimensiones que no resulta tan fácil de solucionar.

2.2.2 Redes neuronales

Existen múltiples algoritmos que solucionan la problemática de la regresión. Para mencionar algunos se muestra la siguiente lista:

- Regresión lineal
- K-Vecinos más cercanos (KNN)
- Regresión por redes neuronales
- Regresión LASSO
- Árboles de regresión
- Bosques aleatorios
- Máquinas de vectores soporte

Para este proyecto se van a utilizar redes neuronales, por lo que se procede a dar una pequeña introducción a estas.

Las redes neuronales son un algoritmo de aprendizaje automático que puede ser utilizado tanto en regresión como en clasificación. Suelen ser representadas mediante una imagen como la que se muestra a continuación.



**GENERALITAT
VALENCIANA**

IVACE
INSTITUTO VALENCIANO DE
COMPETITIVIDAD EMPRESARIAL



**Cofinanciado por
la Unión Europea**

“DIGITUIN” - Desarrollo de una infraestructura digital para la construcción de modelos de procesos mediante gemelos digitales

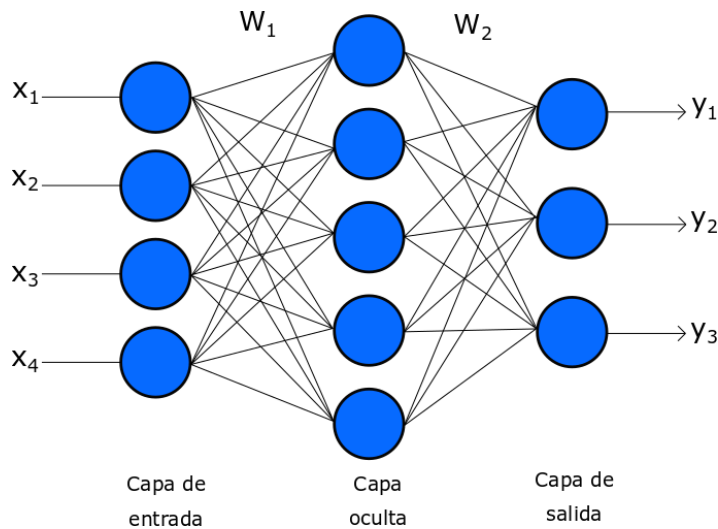


Diagrama de una red neuronal. Fuente: Elaboración propia.

Cada uno de los círculos mostrados en el diagrama representa una neurona. Y las líneas las conexiones entre ellas. Por tanto, una neurona o perceptrón puede ser representada de la siguiente manera:

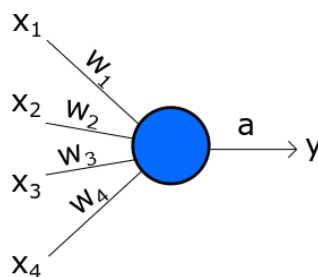


Diagrama de una neurona. Fuente: Elaboración propia.

Podemos destacar varios elementos en este diagrama:

- x_1, x_2, \dots, x_n - Son los datos de entrada
- w_1, w_2, \dots, w_n - Son valores que se conocen como pesos. Son parámetros que multiplican a los valores de entrada. El objetivo del algoritmo es encontrar los pesos que mejor se ajusten a los datos de entrada para producir el resultado de salida.
- a - Se trata de la función de activación. Esta función modifica el resultado producido por la neurona, es posible elegir entre distintas opciones como la función sigmoide, la rectificación lineal, etc.
- y - Es el resultado ofrecido por la neurona. Se obtiene realizando el cálculo de $a(\sum x_i w_i)$

Ahora podemos entender el primer diagrama, en el que se muestra una red neuronal, que no es más que una consecución de neuronas interconectadas entre sí, ofreciendo como entrada de la capa siguiente los resultados de la capa anterior.

En el caso de las redes neuronales, los pesos se agrupan en las matrices W_1, W_2, \dots, W_n y el objetivo del algoritmo es



**GENERALITAT
VALENCIANA**

IVACE
INSTITUTO VALENCIANO DE
COMPETITIVIDAD EMPRESARIAL



**Cofinanciado por
la Unión Europea**

“DIGITUIN” - Desarrollo de una infraestructura digital para la construcción de modelos de procesos mediante gemelos digitales

encontrar la configuración de estas que mejor ajuste a los datos. Para realizar esta tarea, se utiliza el método conocido como algoritmo de retropropagación, que inicia los pesos a valores aleatorios y mediante iteraciones ajusta los pesos gracias al sistema conocido como descenso de gradiente.

Para el proyecto se van a utilizar redes neuronales debido a las diversas ventajas que ofrecen. Destacan las que se muestran a continuación:

- Versatilidad para funcionar correctamente con cualquier tarea. Esta afirmación se apoya en el teorema de aproximación universal para redes neuronales que indica que una red neuronal con al menos una capa oculta puede aproximar cualquier función.
- Facilidad de traspasar los modelos generados. El modelo resultante es el conjunto de todas las matrices de pesos, estas pueden ser fácilmente almacenadas y traspasadas a otro dispositivo. Además, muchos estudios de transferencia de aprendizaje (Transfer learning) muestran que este tipo de modelo da buenos resultados cuando se porta a un problema distinto.

2.2.3 Uso de las redes neuronales en el gemelo digital

El gemelo digital implementará redes neuronales de regresión para ser capaz de reproducir los comportamientos de las distintas variables relevantes para el proceso. Se desarrolla a continuación cómo se llevará esto a la práctica mediante el ejemplo de un motor.

Supongamos que uno de los módulos para los que se va a generar un gemelo digital es un motor eléctrico como el que se presenta en la siguiente imagen:



Motor eléctrico. Fuente: Pxhere

Y que se define que para este módulo es importante monitorizar datos de vibraciones, velocidad de rotación, corriente eléctrica y torque. En este caso se entrenarán por tanto 4 redes neuronales, cada una será capaz de predecir el valor de una de las 4 variables y tome como entrada las otras 3.



“DIGITUIN” - Desarrollo de una infraestructura digital para la construcción de modelos de procesos mediante gemelos digitales

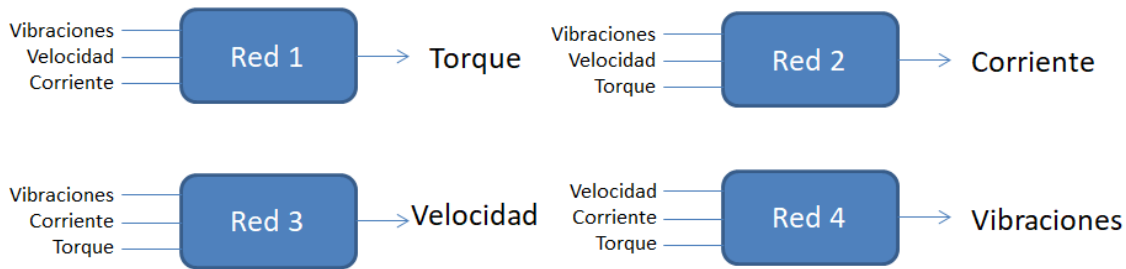


Diagrama de redes neuronales para el gemelo. Fuente: Elaboración propia.

Esta estructura de redes neuronales tiene un doble objetivo:

- **Consistencia.** El gemelo digital mediante este sistema es capaz de mantener monitorizada la consistencia existente entre las diversas variables. Si el dato leído de los sensores indican cierto valor, pero las redes neuronales indican que este valor debería ser diferente en cierta medida, será necesario revisar el funcionamiento de la máquina pues el gemelo estaría avisando de un comportamiento erróneo o en todo caso anómalo.
- **Simulación.** Gracias a los datos recogidos y los modelos entrenados, es posible que el gemelo entre en modo de simulación que permita prever qué datos obtendríamos de cierta variable dada una configuración determinada del resto de variables.

2.2.4 Análisis de datos y aprendizaje

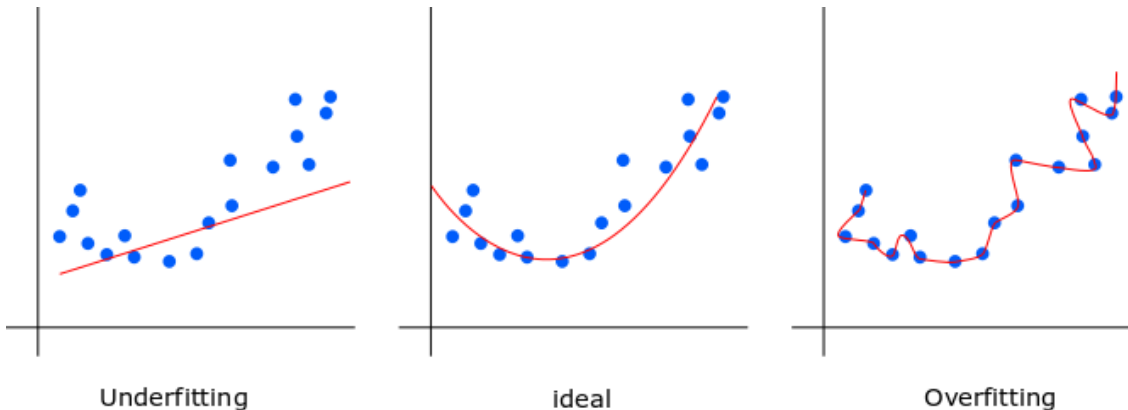
Una vez se dispone de una cantidad considerable de datos almacenados, es necesario realizar un proceso de limpieza y ajuste para asegurar que los datos tengan la calidad suficiente para que los algoritmos de aprendizaje automático puedan llevar a cabo correctamente su función. Este proceso conlleva normalmente encontrar y eliminar valores erróneos, valores nulos, además de realizar lo propio con valores que se desvíen excesivamente del conjunto de valores (estos valores son conocidos habitualmente como *outliers*). Otro proceso habitual es la reorganización, normalización o estandarización de los datos.

El último paso antes de ejecutar los algoritmos es dividir el conjunto de datos en dos: el conjunto de entrenamiento y el conjunto de test. Cada uno de estos tiene una función bien diferenciada:

- El conjunto de entrenamiento es el que se proveerá a los algoritmos para que realicen el aprendizaje y desarrollen los modelos correspondientes para realizar las simulaciones.
- El conjunto de test se utiliza para comprobar qué tal funciona el modelo sobre datos que no han sido utilizados para aprender.

Esta división se realiza para comprobar que efectivamente el modelo se comporta de manera correcta no solo en los datos que ya conoce sino que también es capaz de realizar una predicción acertada en datos nuevos. Un modelo que es capaz de predecir correctamente los datos incluidos en el conjunto de entrenamiento pero tiene un desempeño mediocre en el conjunto de test, puede haber caído en el fenómeno conocido como *overfitting*.

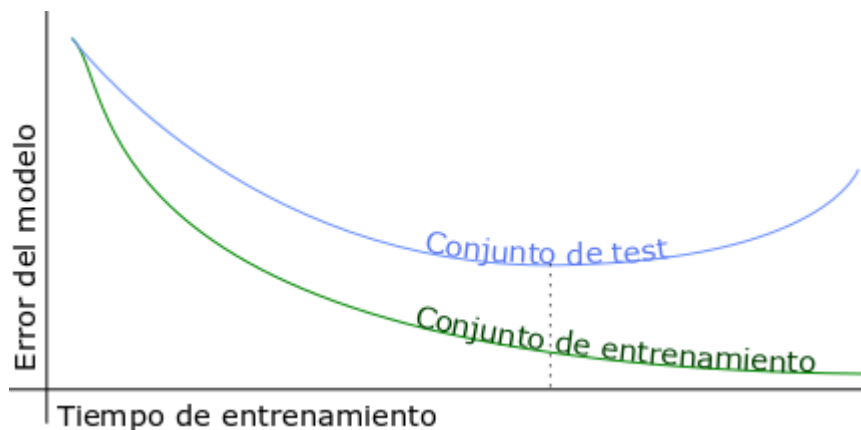
“DIGITUIN” - Desarrollo de una infraestructura digital para la construcción de modelos de procesos mediante gemelos digitales



Ejemplo underfitting y overfitting. Fuente: elaboración propia

El overfitting se produce cuando un modelo ha entrenado demasiado y se ciñe de manera excesiva a los patrones descritos por el conjunto de entrenamiento tal como se puede ver en la imagen superior. También en la imagen se puede ver un ejemplo de underfitting que se trata del fenómeno contrario, cuando el modelo no es capaz de predecir con suficiente precisión el conjunto de entrenamiento.

El conjunto de test se puede utilizar para encontrar el punto ideal entre underfitting y overfitting. Para ello se realizan mediciones sucesivas de cómo evoluciona el error cometido tanto al evaluar sobre el conjunto de entrenamiento como al evaluar sobre el conjunto de test. Sería esperable encontrar un resultado similar al que se muestra en la imagen siguiente:



Resultado esperable del entrenamiento. Fuente: elaboración propia

En la imagen apreciamos como cuanto más aumenta el tiempo de entrenamiento, el error que comete el modelo sobre el conjunto de entrenamiento tiende a decrecer. Por otra parte, el error sobre el conjunto de test comienza decreciendo pero llega un momento en el que esta tendencia se invierte, este es el punto que se encuentra marcado con puntos suspensivos y es el momento en el que se pasa de underfitting a overfitting, siendo por tanto el momento ideal para dejar de entrenar.

Teniendo estos conceptos claros, y los procesos realizados como se ha descrito anteriormente, es el momento de ejecutar los algoritmos de aprendizaje automático elegidos. Para ello, si bien es posible programarlos desde 0 en cualquier lenguaje de programación, existen distintas bibliotecas en ciertos



**GENERALITAT
VALENCIANA**

IVACE
INSTITUTO VALENCIANO DE
COMPETITIVIDAD EMPRESARIAL



**Cofinanciado por
la Unión Europea**

“DIGITUIN” - Desarrollo de una infraestructura digital para la construcción de modelos de procesos mediante gemelos digitales

lenguajes de programación que ya incluyen los algoritmos programados y por tanto facilitan enormemente el desarrollo y despliegue de este tipo de soluciones. Cabe destacar TensorFlow, Keras, ScikitLearn o Pytorch, todas librerías del lenguaje de programación Python. Se muestran a continuación los logos de estas:



Librerías de algoritmos de ML. Fuente: Google Imágenes.

2.3 Visualización e interacción

La capa de visualización e interacción permite acceder a la información manejada por el gemelo digital, y realizar las simulaciones de funcionamiento del proceso con los valores de las variables modificadas por el usuario. En principio no se considera interacción real con el proceso, es decir que no existe conexión física entre las modificaciones que el usuario hace en el modelo digital y dichas variaciones en el proceso real. Por consiguiente, no se puede manejar el proceso desde el ámbito virtual.

Sin embargo, una vez desarrollado el gemelo digital, este permite generar simulaciones de funcionamiento. Esto resulta en un aumento sin igual de la cantidad de información de la que dispone la empresa, siendo esta una de las características más atractivas del gemelo digital.

Aunque el sistema de simulación esté montado, probado y funcionando, este resulta únicamente en un montón de líneas de código solamente utilizable por programadores especializados. Es por esto que el siguiente paso debe ser integrar el sistema de simulación dentro de la interfaz gráfica de usuario (GUI por sus siglas en inglés) de modo que el usuario final pueda utilizarlo sin un entrenamiento específico.

Este paso dependerá de cómo se haya diseñado la interfaz gráfica para el gemelo digital ya que la diferencia de cómo implementarlo en un sistema de realidad virtual, en un sistema físico o en una aplicación web por ejemplo, puede ser enorme. A pesar de esto, deberíamos encontrar de una forma u otra al menos estos elementos:



**GENERALITAT
VALENCIANA**

IVACE
INSTITUTO VALENCIANO DE
COMPETITIVIDAD EMPRESARIAL



**Cofinanciado por
la Unión Europea**

“DIGITUIN” - Desarrollo de una infraestructura digital para la construcción de modelos de procesos mediante gemelos digitales

- **Cambio de modo.** Los gemelos digitales disponen de diversos modos, como se ha discutido anteriormente, por ejemplo monitorización, simulación o histórico. Debe existir un método claro que indique al usuario en qué modo se encuentra el gemelo para evitar confusiones y un control que permita elegir a qué modo se desea cambiar.
- **Selección de entradas.** Es necesario que la GUI del gemelo disponga de un método para modificar el valor de las variables de entrada que permita al usuario fácilmente seleccionar qué entradas está introduciendo.
- **Muestra de salidas.** Los resultados de la simulación deben ser visibles al usuario desde la misma pantalla en tiempo real.

Ambas funciones, visualización e interacción, pueden desarrollarse sobre distintos soportes:

- Aplicación software específica para la simulación. Esencialmente se trata de un sistema tipo SCADA, en el que se pueden visualizar todas las variables implicadas y se pueden modificar manualmente algunas de ellas, para realizar las simulaciones. Este tipo de aplicación puede utilizar en mayor o menor medida recursos gráficos para representar el proceso.
- Aplicaciones de Realidad Virtual o Realidad Aumentada. Con este tipo de aplicaciones el interfaz es más real e incluso podría ser inmersivo, pudiéndose programar la parte de simulación de forma que el usuario pueda interactuar de modo más intuitivo. Como inconveniente cabe apuntar que en entornos de fabricación reales, puede ser muy complicada la inmersión en un entorno virtual, desatendiendo todo lo que está ocurriendo en el entorno.

2.4 Tecnología Transfer Learning

Uno de los problemas con los que es fácil tropezar cuando se utilizan sistemas de aprendizaje automático en general, y redes neuronales en particular, es la lentitud en el entrenamiento de los modelos. En caso de tener una base de datos de un tamaño considerable, el tiempo de entrenamiento puede ser de semanas o incluso meses.

Una forma de aligerar este proceso es utilizar un modelo que ya esté entrenado sobre nuestros datos, saltando de esta manera el proceso de aprendizaje y ahorrando enormes cantidades de tiempo. Sin embargo, encontrar un modelo que esté entrenado con el mismo tipo de elementos que necesitamos para nuestro proyecto es prácticamente imposible. Es en este momento en el que entra en juego el *Transfer Learning*.

La transferencia de aprendizaje o *Transfer learning* es un conjunto de técnicas que nos permite adaptar los conocimientos aprendidos para realizar una tarea a otra nueva.

El desarrollo teórico de estas técnicas se basa en la capacidad que tenemos los humanos para reaprovechar lo aprendido. Por ejemplo, si un niño aprende a montar en triciclo, si en la adolescencia aprende a montar en bicicleta, el aprendizaje de este nuevo conocimiento será más rápido y fácil debido a la base de conocimiento que esta persona ya posee. Igualmente, vivirá un proceso similar en la edad adulta si decidiera aprender a montar en moto como se muestra en la siguiente ilustración.



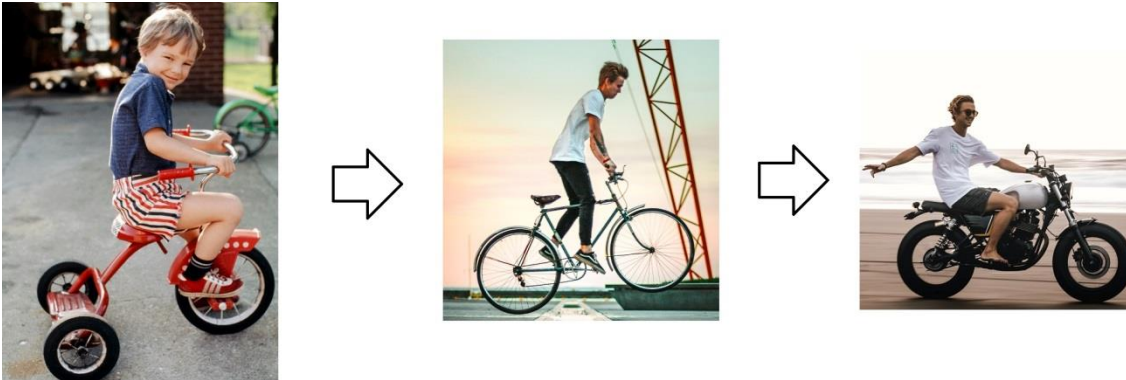
**GENERALITAT
VALENCIANA**

IVACE
INSTITUTO VALENCIANO DE
COMPETITIVIDAD EMPRESARIAL



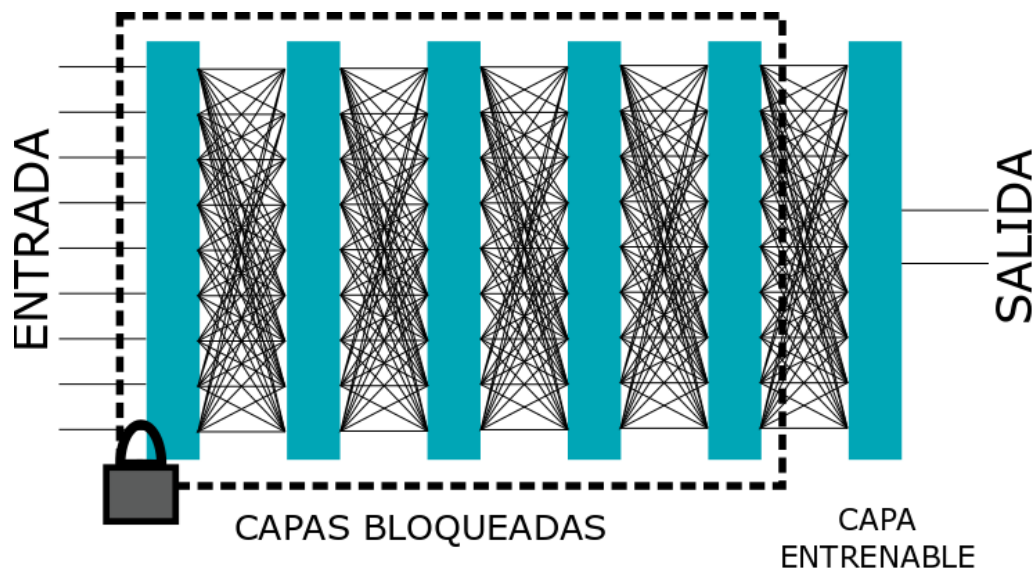
**Cofinanciado por
la Unión Europea**

“DIGITUIN” - Desarrollo de una infraestructura digital para la construcción de modelos de procesos mediante gemelos digitales



Reutilización del aprendizaje en los seres humanos. Fuentes: Unplash, Pexels

Una de las técnicas más utilizadas dentro del campo del Transfer Learning, y posiblemente la que mejor encaje tiene dentro del proyecto es el bloqueo de neuronas entrenadas. El método de funcionamiento de esta técnica es reentrenar un modelo de red neuronal ya entrenado sobre ciertos datos, sobre el conjunto de datos que necesitamos pero bloqueando los valores asociados a las neuronas que se encuentren en las capas más cercanas a la capa de entrada, permitiendo únicamente que el entrenamiento afecte a los pesos y los sesgos de las neuronas de la última o últimas capas, tal como se muestra en la siguiente ilustración:



Bloqueo de capas en redes neuronales. Fuente: elaboración propia.

La idea detrás de esta técnica es que el conocimiento más relacionado con entender los datos de entrada se mantiene mientras que se aprende conocimiento nuevo de cómo convertirlo en salidas.

El bloqueo de neuronas entrenadas supone que únicamente es necesario entrenar las últimas capas de la red, suponiendo esto un ahorro enorme en tiempo, y permite adaptar modelos muy complejos que pueden haber requerido semanas o meses para ser generados.

“DIGITUIN” - Desarrollo de una infraestructura digital para la construcción de modelos de procesos mediante gemelos digitales

Resolviendo problemas típicos del Transfer Learning

El problema más común encontrado al realizar la técnica del bloqueo de neuronas entrenadas es el sobreajuste u *overfitting* esto supone que al realizar el entrenamiento con los datos de nuevos, la red se ajusta demasiado a estos, propiciando que tenga buenos resultados con los datos de entrenamiento pero resultados mediocres o malos con datos nuevos.

Una de las formas más recurrentes para solucionar este problema en una red entrenada mediante bloqueo de neuronas es el *Dropout*, una técnica que consiste en eliminar un porcentaje de las neuronas que conforman la red así como las conexiones que mantienen con sus iguales, la selección de qué neuronas eliminar se realiza de manera aleatoria.

La motivación teórica de esta técnica es que las neuronas que son vecinas dentro de la red a menudo gestionan información muy similar entre sí, lo que puede dar lugar al sobre ajuste.

Puntualizaciones sobre Transfer Learning

Es importante notar que la metodología de Transferencia de conocimiento tiene un componente importante de incertidumbre. El modelo elegido para bloquear el conocimiento tendrá una relevancia enorme a la hora de obtener los resultados. Es fácil imaginar que el modelo de una red neuronal entrenada para identificar animales, puede ser adaptado fácilmente para discernir entre perros y gatos.

Sin embargo, se han encontrado muchos ejemplos de modelos que son fácilmente adaptables a problemas que, a priori, no tienen relación alguna. Cuando se encuentra un modelo adaptable a otro problema, se indica que tiene una transferencia positiva, mientras que si los esfuerzos por adaptarlo obtienen resultados pobres, estaremos ante una transferencia negativa.

Transfer Learning aplicado al proyecto

En el proyecto, el Transfer Learning se usa como la base teórica que permite la adaptación de los modelos generados para un gemelo digital a nuevos gemelos.

Concretando en el ejemplo de la máquina a modelizar, los modelos generados de predicción que nos permiten generar la simulación pueden ser reutilizado para generar la simulación perteneciente al gemelo digital de otra máquina similar. En este caso, los datos de salida no serán idénticos (vibrará más o menos, habrá más caudal o menos, funcionará más rápido o más despacio), pero el conocimiento fundacional de la relación entre variables seguirá latente y puede ser adaptado para crear un modelo de simulación nuevo adaptado a la nueva máquina de manera rápida con la técnica del bloqueo de neuronas entrenadas.



GENERALITAT
VALENCIANA

IVACE
INSTITUTO VALENCIANO DE
COMPETITIVIDAD EMPRESARIAL



Cofinanciado por
la Unión Europea

“DIGITUIN” - Desarrollo de una infraestructura digital para la construcción de modelos de procesos mediante gemelos digitales

3 Desarrollo del modelo del proceso

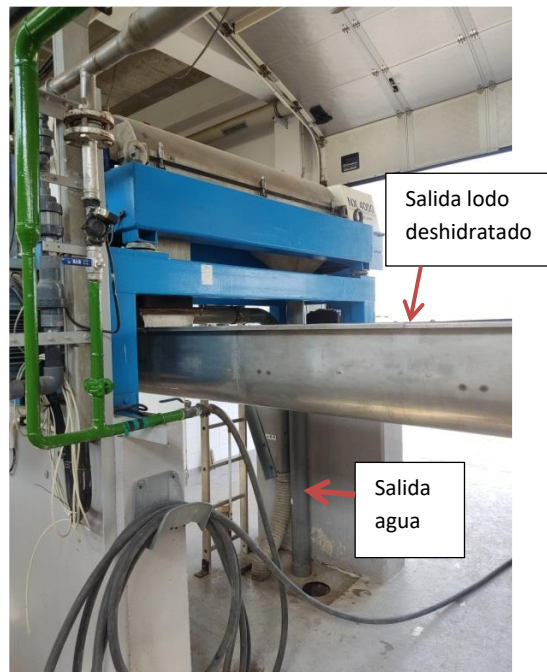
El proceso que se va a modelizar es el centrifugado de lodos en la EDAR de Algemesí-Albalat, gestionada por DAM. Previamente a realizar el proyecto piloto, se solicitó autorización a la EPSAR, la Entidad de Saneamiento de Aguas de la Generalitat Valenciana, la cual concedió dicha autorización.

3.1 Descripción del proceso

El proceso de centrifugado de lodos consiste en la separación parcial del agua y de la parte sólida que contiene el lodo. El lodo entra en la depuradora por una tubería general. La tubería llega hasta la centrífuga, introduciendo el lodo en el tambor de la máquina. Para facilitar la deshidratación se añade un compuesto, denominado polielectrolito, que favorece la aglomeración de los sólidos. Ese compuesto también se introduce en el tambor por otro conducto.

La centrífuga no permite la regulación de la velocidad, siempre gira a la misma. La velocidad diferencial es la velocidad relativa del tambor respecto al tornillo que entra el lodo en el tambor.

El resultado del proceso es lodo deshidratado (en un % variable de deshidratación, dependiendo de diversos factores) y agua con diversas sustancias, que diariamente se analiza en el laboratorio.



Imágenes de la centrífuga. Fuente: Obtención propia.

“DIGITUIN” - Desarrollo de una infraestructura digital para la construcción de modelos de procesos mediante gemelos digitales

3.2 Variables identificadas:

Variables de entrada

Este tipo de variables reflejan los valores que son conocidos antes de ejecutar el proceso de centrifugado y que pueden influir en el resultado obtenido.

Caudal de fango

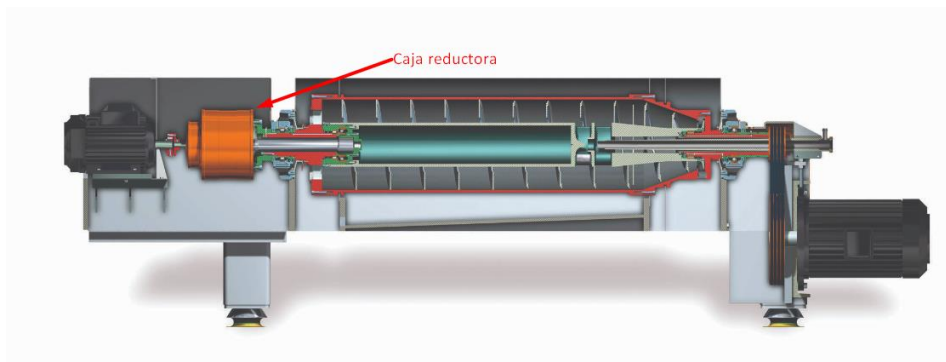
Se trata de la cantidad de fango que entra a la centrífuga por la tubería dedicada a tal efecto. Esta cantidad es regulable manualmente.

Caudal de polielectrolito

Es la contrapartida del valor anterior. En este caso, medimos la cantidad de polielectrolito que entra dentro de la centrífuga. Al igual que el caso anterior, este valor es regulable por los operarios de la planta.

Velocidad diferencial

Se conoce como velocidad diferencial al factor de diferencia que existen entre la velocidad a la que rota el bowl. Esta diferencia se consigue a través de un elemento de la centrífuga conocido como caja reductora (en naranja en la ilustración)



Corte transversal de la centrífuga. Fuente: Alfa laval

Aumentando la velocidad diferencial, se le exigirá menos a la centrífuga, por lo que el resultado que obtendremos será peor. Por el contrario, una velocidad diferencial menor conllevará un mayor esfuerzo para la máquina, consiguiendo un resultado teóricamente mejor.

Al igual que las dos anteriores variables, la velocidad diferencial puede ser seleccionada de manera electrónica.

Concentración del fango espesado

La concentración del fango espesado depende del tipo de residuo que entre en la planta depuradora. En general las plantas de depuración trabajan con un valor relativamente estable para esta variable. Sin embargo, la depuradora de Algemesí-Albalat, al recibir tanto entradas industriales como urbanas, recibe una concentración que tiene una importante variación a lo largo del día.



**GENERALITAT
VALENCIANA**

IVACE
INSTITUTO VALENCIANO DE
COMPETITIVIDAD EMPRESARIAL



**Cofinanciado por
la Unión Europea**

“DIGITUIN” - Desarrollo de una infraestructura digital para la construcción de modelos de procesos mediante gemelos digitales

VARIABLES DE FUNCIONAMIENTO

Este tipo de variable son datos que arroja el proceso durante su funcionamiento. Su conexión con las variables de entrada y salida es indirecta pero latente. Estas variables son interesantes con dos objetivos: el análisis del funcionamiento de la máquina y como datos valiosos para el sistema de simulación.

Vibraciones

Son relevantes las vibraciones que produce la máquina en los dos rodamientos que soportan el eje de la centrífuga.

Temperaturas

Temperatura de los dos rodamientos.

Consumo

Es interesante conocer el consumo eléctrico de los motores.

Par

Par del motor de la centrífuga, que indica la potencia en el eje necesaria para mover el tambor

VARIABLES DE SALIDA

Las variables de salida representan el resultado del proceso, y por tanto, miden características de los dos productos resultantes del proceso: el fango deshidratado y el agua escurrida.

Materia seca del deshidratado

Esta variable, normalmente denotada como *msdesh*, indica la concentración de masa sólida que encontramos en el fango deshidratado que se expulsa de la centrífuga por el bowl

Calidad del escurrido

Como contrapartida a la variable anterior, esta mide el resultado del otro output de la centrífuga, el agua. Normalmente denotada como *ssesc*, indica la cantidad de partículas sólidas siguen existiendo en el agua una vez ha abandonado el proceso de centrifugado, antes de pasar al proceso de tratamiento biológico.

3.3 Arquitectura y almacenamiento de datos

En las instalaciones de la planta depuradora ya existía una arquitectura de datos previa, es por esto que la arquitectura de datos del proyecto no será desarrollada desde cero sino que implicará una ampliación de la ya existente.

En la siguiente ilustración se puede ver el diagrama de la sencilla estructura de datos preexistente:



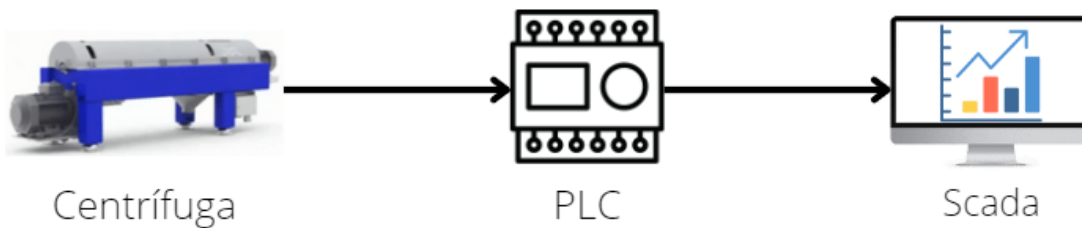
GENERALITAT
VALENCIANA

IVACE
INSTITUTO VALENCIANO DE
COMPETITIVIDAD EMPRESARIAL



Cofinanciado por
la Unión Europea

“DIGITUIN” - Desarrollo de una infraestructura digital para la construcción de modelos de procesos mediante gemelos digitales



Estructura de datos preexistente. Fuente: elaboración propia

Para el proyecto, se amplía la arquitectura para incluir lo siguiente:

3.3.1 Sensores adicionales

Es necesario instalar sensores adicionales para medir algunas de las variables relevantes.

El primer paso para desarrollar el modelo es la obtención de datos de la máquina y el envío y gestión de estos. Por una parte se disponía de datos que ya se estaban recogiendo en la instalación.

Los sensores externos que fueron instalados, una vez se dispuso de la autorización de la EPSAR, eran los necesarios para complementar los datos disponibles, y fueron los siguientes:

- Sensores de vibración para los rodamientos.
- Sensores de temperatura para ambos rodamientos.
- Analizadores de red para evaluar el consumo.
- Sonda de sólidos en suspensión, con su set de montaje y su controlador universal

En las siguientes imágenes se pueden ver los sensores de vibración, las sondas de temperatura y los analizadores de red para medición de consumos.

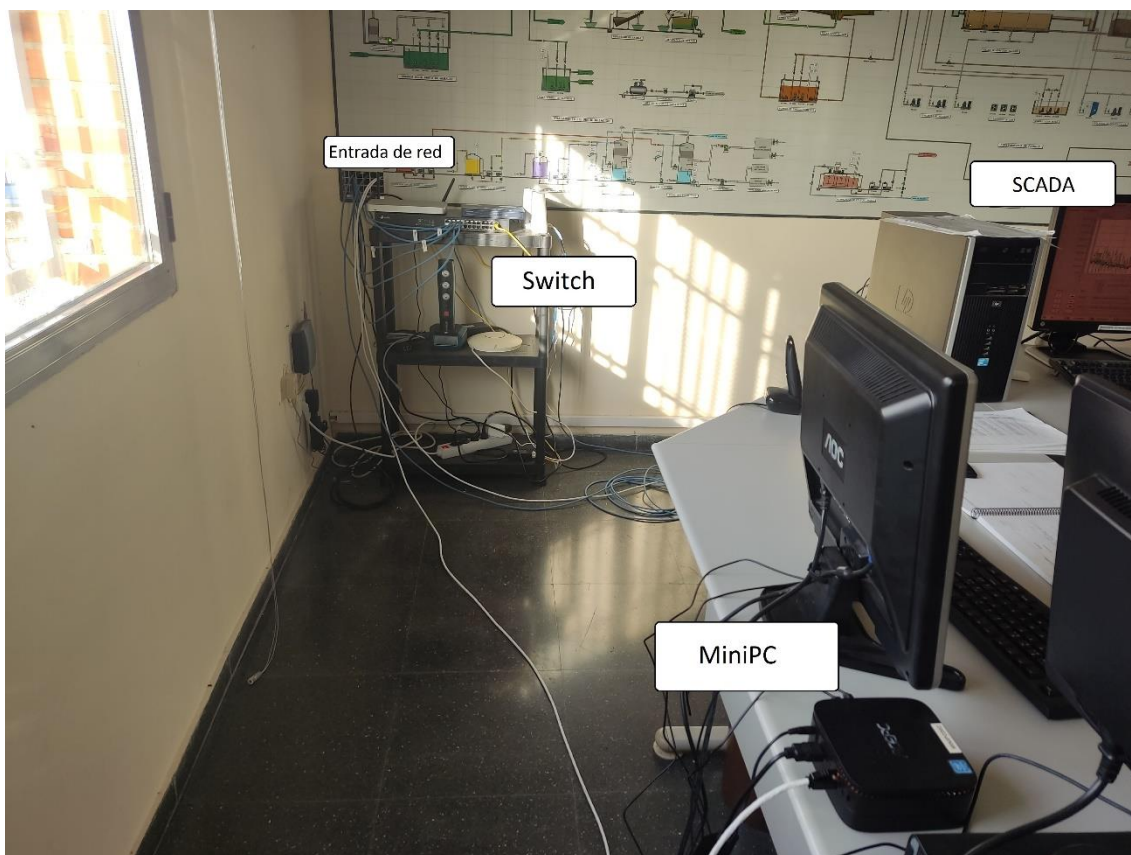


“DIGITUIN” - Desarrollo de una infraestructura digital para la construcción de modelos de procesos mediante gemelos digitales

Sonda de temperatura y sensor de vibraciones del primer y segundo rodamiento. Fuente: Obtención propia.

Estos sensores se comunicarán directamente con los PLCs de la instalación para verter los datos en la red, haciéndolos accesibles desde cualquier punto en el que sea posible el acceso a la red local interna.

En la imagen siguiente puede apreciarse la instalación realizada en el edificio principal. Aquí el miniPC se conectará a la red interna de la empresa para obtener los datos. Se ha dispuesto de pantalla y teclado para que sea posible funcionar y comprobar el estado del dispositivo directamente. Con acceso remoto, fuera de la etapa de desarrollo, este tipo de dispositivo sería prescindible.



Elementos de la toma de datos. Fuente: elaboración propia

3.3.2 Extracción de datos del PLC existente

Los PLCs utilizados en la planta depuradora son de la marca Schneider, por lo que se utiliza el protocolo MODBUS TCP. El protocolo Modbus es un medio de comunicación que permite el intercambio de datos entre los controladores lógicos programables (PLC) y los ordenadores (PC). Los dispositivos electrónicos pueden intercambiar información a través de conexiones en serie utilizando este protocolo.

“DIGITUIN” - Desarrollo de una infraestructura digital para la construcción de modelos de procesos mediante gemelos digitales

Como los valores que nos dan los sensores dependen de la resolución del convertidor analógico digital, se ha realizado una conversión de variables.

3.3.3 Recogida y almacenamiento de datos

Se almacenarán los datos en un sistema cloud para poder acceder a los resultados desde cualquier lugar con conexión a internet. Sin embargo, es necesario tener instalado algún dispositivo hardware que realice la función de recopilación y envío de los datos al servidor cloud. El dispositivo elegido para desempeñar esta tarea es un miniPC, un ordenador que incluye todo el hardware en un espacio muy reducido, como se muestra en la siguiente ilustración:

Teniendo esta la complejidad suficiente, se instalará también en el dispositivo un gestor de bases de datos MySQL que se ocupará de mantener una copia local de los datos en caso de que la conexión directa con la nube tuviera algún fallo, corte o interrupción.

3.3.4 Conexión a internet

Es indispensable para acceder a un servidor cloud una conexión estable a internet. Para proveer de este servicio se eligió un router Huawei 4g. Este tipo de dispositivo dispone de una batería que les permite funcionar de manera inalámbrica. Está conectado de manera continua y de forma que permite que la conexión siga funcionando correctamente, incluso si existe algún fallo eléctrico. En la ilustración se puede ver el modelo elegido para llevar a cabo esta función en el proyecto.

Otra ventaja para este tipo de dispositivos respecto a una elección de Router más tradicional es la independencia de una línea física de conexión, ya que se conecta a internet de manera inalámbrica utilizando 3G o 4G, al igual que un Smartphone.

3.3.5 Servidor cloud

En el caso del servidor cloud, se ha elegido un servidor propio de AIDIMME en el que se desarrolló una API de comunicación. El servidor monta un Linux Debian que gestiona las peticiones entrantes utilizando Slim, un micro framework de PHP cuya principal ventaja es la versatilidad y el bajo coste en recursos computacionales que necesita, a diferencia de otros como Laravel o Symphony.

El servidor cloud tiene la responsabilidad de realizar el tratamiento de datos e implementar los sistemas de analítica predictiva. La elección de estos sistemas ha moldeado la arquitectura de datos definitiva. Para el análisis predictivo se ha utilizado Tensorflow, una librería de Python que implementa distintos algoritmos de aprendizaje automático. Esta librería es incompatible con la versión de Debian que utiliza el servidor. Para solucionar este problema, se incluyó el sistema de predicción en un segundo servidor cloud externo. Se seleccionó la plataforma Azure para desplegar este segundo servidor de análisis.

Azure es el servicio cloud de Microsoft y cuenta con muchísimas aplicaciones y servicios bajo demanda de pago por uso. De estas, existen distintas opciones posibles para llevar a cabo el alojamiento del servicio de predicción. Para el proyecto se utilizan dos: container registry y app service.

Container Registry es el sistema de Azure de almacenamiento de contenedores. Este servicio permite subir, mantener y actualizar contenedores de aplicaciones. En particular el proyecto utiliza un

**GENERALITAT
VALENCIANA****IVACE**
INSTITUTO VALENCIANO DE
COMPETITIVIDAD EMPRESARIAL**Cofinanciado por
la Unión Europea**

“DIGITUIN” - Desarrollo de una infraestructura digital para la construcción de modelos de procesos mediante gemelos digitales

contenedor de Docker para albergar la aplicación, si bien Docker dispone de su propio sistema de almacenamiento de contenedores, Docker Hub, este no dispone de tan buena integración con el servicio de aplicaciones de Azure como el propio Container Registry.

La segunda aplicación que se utiliza es el Azure App Service. Este servicio permite el despliegue de aplicaciones web utilizando la tecnología serverless, es decir, no dispone de un servidor dedicado a la gestión de la aplicación, sino que puede utilizar más o menos recursos de Azure en dependencia de las necesidades que tiene en cada momento, minimizando así los costes y asegurando el servicio independientemente del tráfico recibido en cada momento.

Con todo esto, se puede representar ya la arquitectura de datos definitiva que se despliega para modelar el proceso.

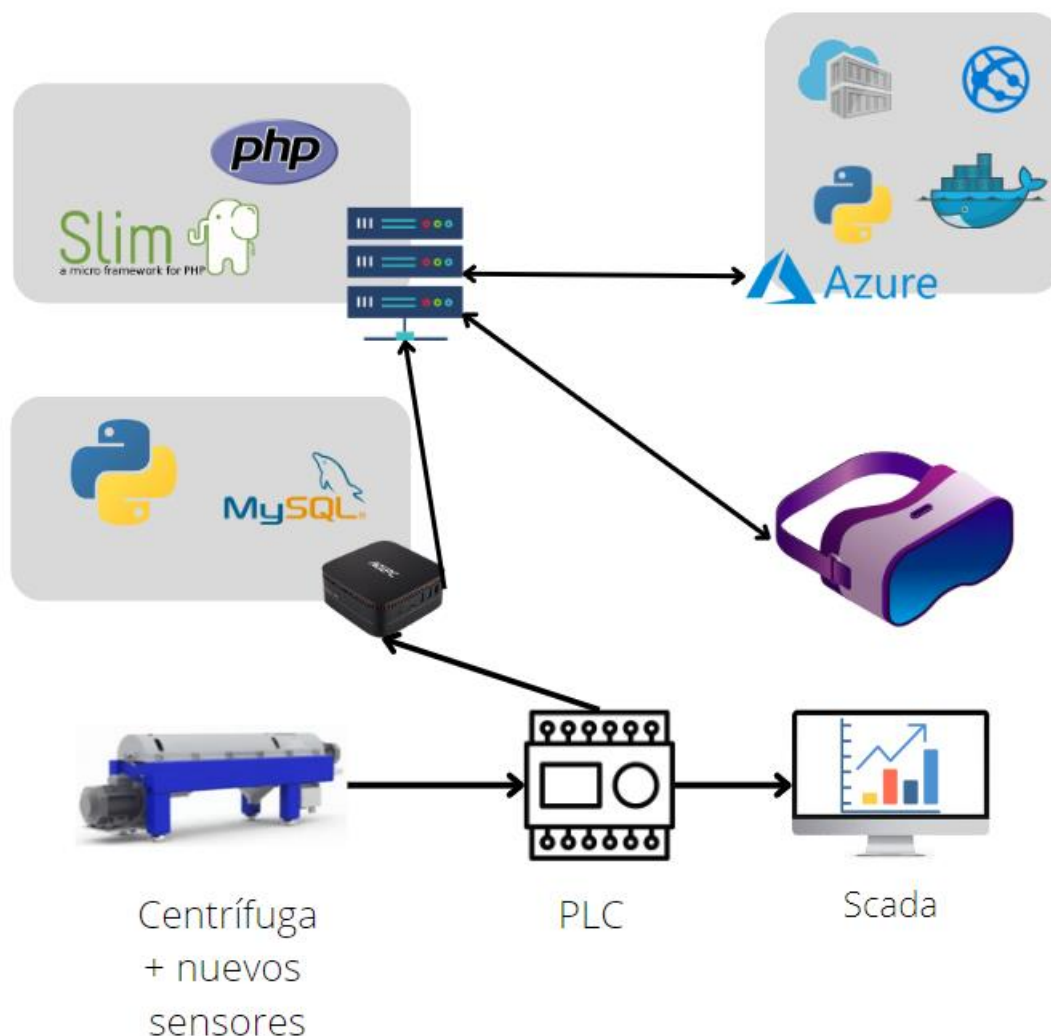


Diagrama general de la arquitectura de datos. Fuente: Elaboración propia

“DIGITUIN” - Desarrollo de una infraestructura digital para la construcción de modelos de procesos mediante gemelos digitales

Tal como se aprecia en el diagrama, el flujo de datos debe comenzar en la centrífuga. Todos los datos que se obtenga deben ser gestionados en los PLCs de la EDAR, desde donde llegan hasta el SCADA y se pueden extraer directamente del PLC mediante MODBUS. Esta extracción, como se ha indicado anteriormente, no pudo realizarse en esta tarea al no contar aún con autorización.

Se programó el miniPC utilizando Python para leer los datos del PLC. Después este los guarda en su base de datos MySQL local, a la vez que son enviados al servidor cloud de AIDIMME. Allí son recibidos por PHP y SLIM, estos se ocuparán de gestionar la API y servir los datos en tiempo real, en caso de que reciba una petición de simulación, este lanzará la petición a Azure que utilizará el App service para ejecutar los sistemas de predicción, que devolverá al servidor de AIDIMME, que es el responsable de comunicarse con el método de visualización que en este caso se trata de unas gafas de realidad virtual Oculus Quest 2.

3.4 Análisis de datos

En este apartado se indican todos los pasos que se han dado para realizar un tratamiento de datos satisfactorio, así como para desarrollar los sistemas predictivos basados en inteligencia artificial.

3.4.1 Datos en planta

Para comenzar a gestionar los datos, es necesario conectarse a la red interna de la planta y solicitar los datos utilizando el protocolo implementado. En este caso se trata de Modbus. Para desarrollar la tarea se ha elegido al lenguaje de programación Python, por diversos motivos, entre los que destaca la existencia de bibliotecas específicas para el protocolo **Modbus y el gestor de Base de datos MySQL**.

La elección del gestor de bases de datos a su vez se realiza por diversas razones. En primer lugar, se trata de un gestor de bases de datos gratuito, por lo que se puede usar sin incurrir en ningún coste. En segundo lugar, es un sistema sólido, con años de desarrollo y funcionamiento a sus espaldas. Por último, destaca la experiencia de los técnicos de AIDIMME con este sistema.

Además, MySQL dispone de una capacidad de gestión enorme en comparación con otros candidatos que puedan desempeñar la misma tarea. Esto supone, que si en un futuro se quisiera ampliar la bd e integrarla dentro de un sistema más grande, se podrían explotar todas las capacidades de una base de datos relacional. Si se hubiera elegido otro sistema más simple como Redis o Cassandra, se habría ganado en velocidad pero se habría perdido en escalabilidad, y la velocidad que ofrece MySQL ya es muy superior a lo necesario para el proyecto.

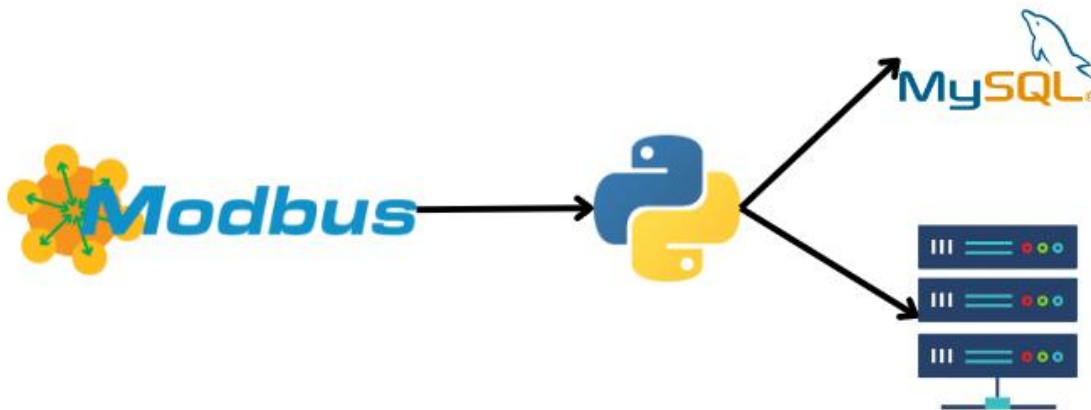
Otra ventaja de utilizar Python es que dispone a su vez de la biblioteca Requests, una biblioteca que facilita muchísimo la interoperabilidad con las API's, en este caso, únicamente debe comunicarse con el servidor propio de AIDIMME. Se puede ver en la siguiente ilustración el logo de la biblioteca recién mencionada.

La existencia de todos estos puntos de unión permite a Python ser el nexo que conecta todos los sistemas dentro y fuera de la planta de depuración, tal como ilustra la siguiente imagen:



Cofinanciado por
la Unión Europea

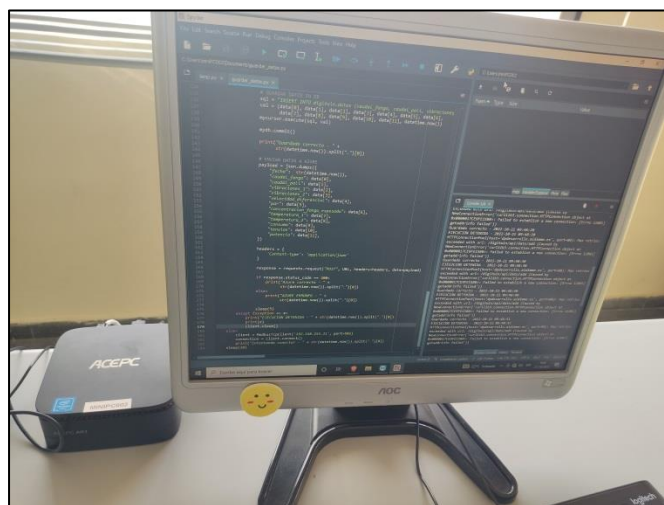
“DIGITUIN” - Desarrollo de una infraestructura digital para la construcción de modelos de procesos mediante gemelos digitales



Flujo de datos en la planta de depuración. Fuente: Elaboración propia.

El resultado de este proceso es una base de datos con una única tabla que incluye un dato cada 5 segundos. En esta tabla se encuentran tantas columnas como variables monitorizadas hay, es decir 13 incluyendo el identificador de fila y la fecha y hora de la toma de datos.

En la siguiente imagen, se puede observar también el sistema funcionando sobre el miniPC instalado en el edificio principal de la planta depuradora:



Python funcionando en el miniPC. Fuente: obtención propia

3.4.2 Servidor remoto

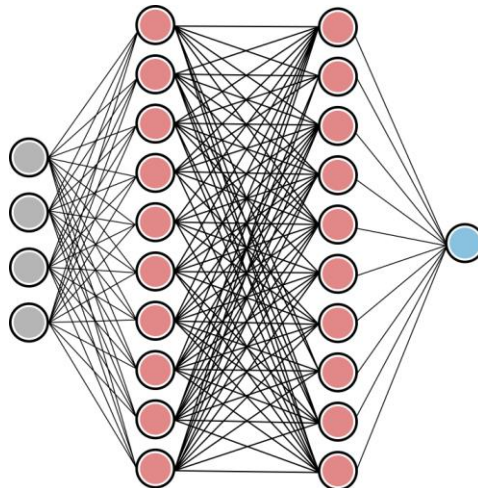
En el servidor de AIDIMME se encuentra PHP complementado por el framework SLIM. Este software tiene la responsabilidad de recolectar y gestionar todas las peticiones que lleguen al servidor de los tres sistemas que están conectados a él: el miniPC, las gafas y el servidor de Azure.

“DIGITUIN” - Desarrollo de una infraestructura digital para la construcción de modelos de procesos mediante gemelos digitales

3.4.3 Sistemas predictivos

Para realizar las simulaciones exigidas en el sistema de simulación, se debe desarrollar un sistema capaz de, a partir de los valores de las variables de entrada, obtener las variables de funcionamiento y las variables de salida, para este cometido se ha utilizado *machine learning*, o aprendizaje automático en español.

En este caso, el problema es claramente una regresión, es decir, aprendizaje supervisado. Se ha optado por utilizar los algoritmos conocidos como redes neuronales introducidos en el paquete de trabajo 4. En particular, tras realizar diversas pruebas, una de las configuraciones que mejores resultados ha dado han sido las redes neuronales con dos capas ocultas que contienen 10 neuronas cada una, por lo que esta ha sido la arquitectura elegida. Se muestra en la ilustración un diagrama de este tipo de redes neuronales, en gris se ve la capa de entrada, en salmón las capas ocultas y, por último, en azul, la capa de salida.



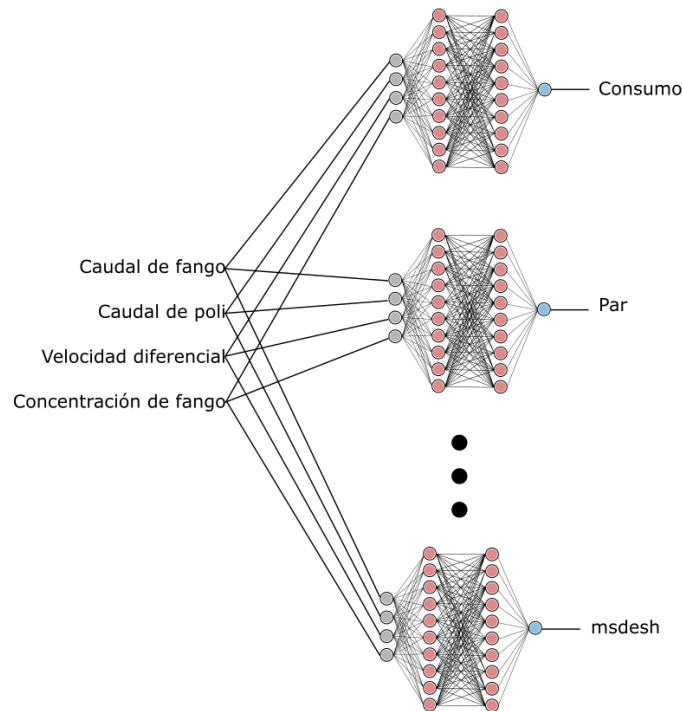
Representación de las redes neuronales utilizadas. Fuente: Elaboración propia.

El número de neuronas en las capas ocultas y el número de capas ocultas ha sido determinado por la realización de experimentos para comprobar qué resultados arrojaban. Este número ha dado buenos resultados en general en todas las variables.

Por otra parte, el número de neuronas en la capa de entrada viene determinada por el número de inputs que tiene la red, en este caso son 4 variables.

Por último, el número de neuronas en la capa de salida tiene que ver con el número de salidas. En este caso se ha optado por tener una red neuronal distinta para cada variable ya que, de esta forma, cada sistema independiente solo contiene información sobre una variable, permitiéndole así tener un mejor desempeño. El esquema final es el siguiente:

“DIGITUIN” - Desarrollo de una infraestructura digital para la construcción de modelos de procesos mediante gemelos digitales



Diseño final de redes neuronales. Fuente: elaboración propia

Para el tratamiento, limpieza y adecuación de los datos, se han utilizado las librerías de Python Pandas y Sklearn. Para desarrollar las redes neuronales se ha utilizado la biblioteca de Python Keras, que utiliza el motor Tensorflow y la librería Numpy como base.

3.4.4 Azure

Azure es la plataforma cloud de Microsoft que aglutina gran cantidad de servicios con todo tipo de naturaleza, desde *Platform as a Service (PaaS)*, *Infrastructure as a Service (IaaS)* o *Software as a Service (SaaS)*.

Tal como se ha comentado en la sección anterior, para Azure, se van a utilizar las herramientas de Container Registry y App service.

El proceso de integración con Azure comienza creando un contenedor que albergue los sistemas de redes neuronales desarrollados en la sección anterior, este contenedor se asegurará de que se incluyen todas las dependencias de librerías necesarias y en las versiones que se ha probado. Este punto ha sido crucial en el desarrollo, pues aunque es posible desplegar la aplicación directamente en App service sin un contenedor, el requerimiento de librerías se vuelve extremadamente tedioso, instalando versiones incompatibles y dificultando enormemente el normal funcionamiento de la aplicación.

“DIGITUIN” - Desarrollo de una infraestructura digital para la construcción de modelos de procesos mediante gemelos digitales

4 Desarrollo del entorno gráfico para la generación del modelo virtualizado

Para el desarrollo del entorno gráfico del gemelo virtual, se ha realizado el modelado del gemelo virtual dentro de un entorno CAD 3D, tanto de la máquina a virtualizar, una máquina centrifugadora para procesado de fangos (Alfa Laval NX4000), como del entorno donde se pretende ubicar esta máquina virtual, para generar al usuario una experiencia de inmersión en un espacio definido donde moverse e interactuar con los elementos definidos para ello.

El modelado 3D es un proceso que permite llevar a cabo la representación tridimensional de un objeto o grupo de objetos en un espacio virtual. Este modelado en un espacio 3D se desarrolla utilizando diversas técnicas y las herramientas que se encuentran dentro del software de modelado CAD 3D, en nuestro caso hemos utilizado el software de modelado SOLIDWORKS PROFESSIONAL 2022.

Partiendo de esta premisa, inicialmente se definió un espacio de similares características al real donde integrar el equipo a virtualizar. En este espacio se definió una puerta de entrada doble, y un espacio diáfano en lo que podríamos considerar el espacio donde ubicar la máquina. Se definieron una serie de ventanas por donde entrase luz natural y unas vigas con forma de perfil IPN que permitiesen identificarlo como un espacio industrial.

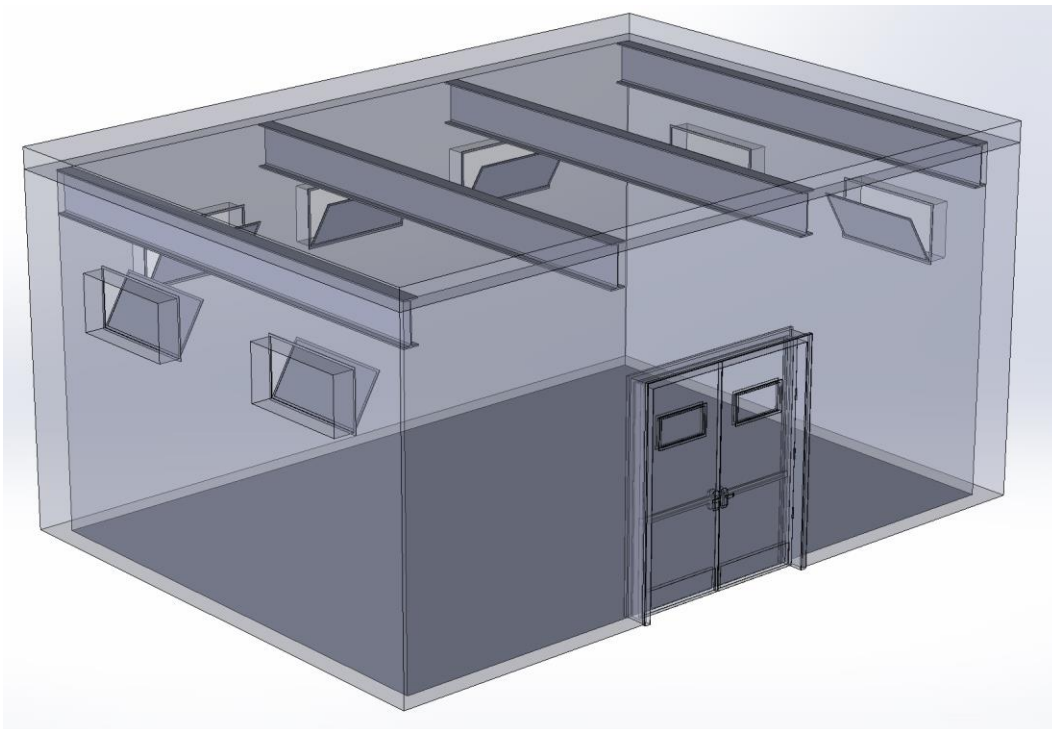


Imagen del espacio virtual en CAD 3D donde ubicar la máquina a virtualizar



**GENERALITAT
VALENCIANA**

IVACE
INSTITUTO VALENCIANO DE
COMPETITIVIDAD EMPRESARIAL



**Cofinanciado por
la Unión Europea**

“DIGITUIN” - Desarrollo de una infraestructura digital para la construcción de modelos de procesos mediante gemelos digitales

Se modeló la centrifugadora de fangos a virtualizar simplificando el modelo, de tal manera que permitiese identificar claramente los elementos de la máquina que debían ser reconocibles, y que permitiesen representar gráficamente los valores que se querían medir y controlar dentro del espacio virtual.

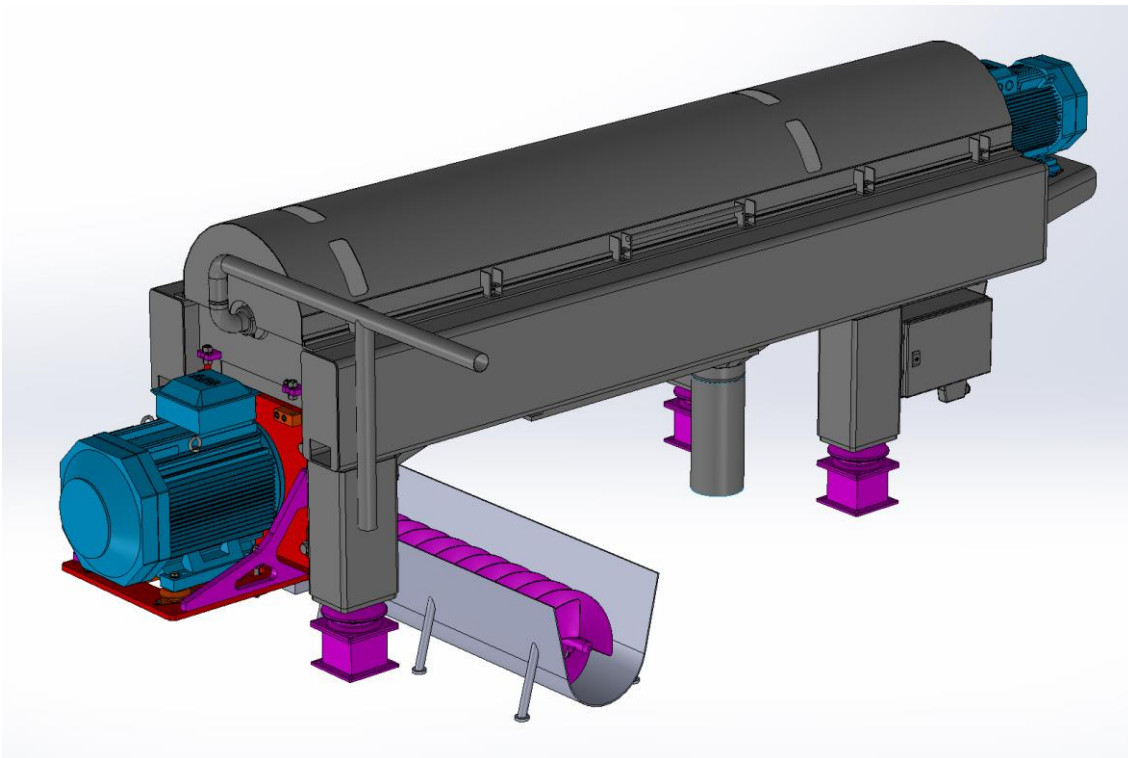


Imagen de la máquina modelada en CAD 3D

Para poder interactuar con los diferentes controles de mando que tiene la máquina, y que en la instalación real están ubicados en diferentes puntos de la nave donde se encuentra la máquina, se ha definido un panel de control que contemple todos los parámetros de control que los usuarios analizan para tomar decisiones y modificar en consecuencia. Este panel de control ha replicado de una manera simplificada los paneles y elementos de control que existen en la realidad, para poder identificar rápidamente por parte de los usuarios de manera gráfica los elementos con una serie de botones y mandos que modifican los siguientes valores:

- Botón de puesta en marcha
- Seta de parada de emergencia
- Palanca selección estado real y estado simulación
- Regulación del caudal de fango de entrada a la máquina
- Regulación del caudal de Polielectrolito de entrada a la máquina
- Regulación de la velocidad diferencial



**GENERALITAT
VALENCIANA**

IVACE
INSTITUTO VALENCIANO DE
COMPETITIVIDAD EMPRESARIAL



**Cofinanciado por
la Unión Europea**

“DIGITUIN” - Desarrollo de una infraestructura digital para la construcción de modelos de procesos mediante gemelos digitales

- Regulación del contenido en sólidos del fango de entrada

Además de las pantallas que devuelven los valores que se pueden modificar con los diferentes reguladores disponibles, existen una serie de pantallas de visualización que aportan información sobre diferentes sensores y variables que permiten tomar decisiones al respecto, estas serían las siguientes:

- Concentración de fango espesado
- Peso del residuo sólido
- Concentración del escurrido
- Temperatura del rodamiento de alimentación
- Vibración del rodamiento de alimentación
- Temperatura del rodamiento de freno
- Vibración del rodamiento de freno
- Valor medio de corriente

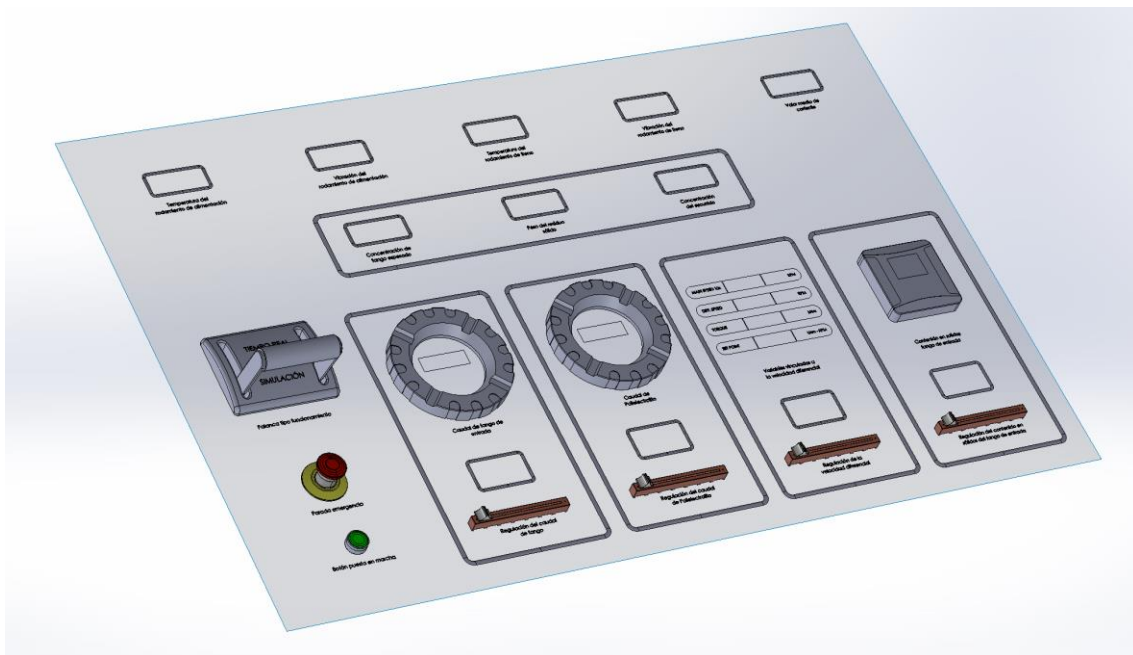


Imagen en perspectiva del Panel de control de la máquina modelada en CAD 3D

Finalmente se ha integrado la máquina y el panel de control en el entorno virtual creado para que el usuario pueda interactuar dentro de él.

“DIGITUIN” - Desarrollo de una infraestructura digital para la construcción de modelos de procesos mediante gemelos digitales

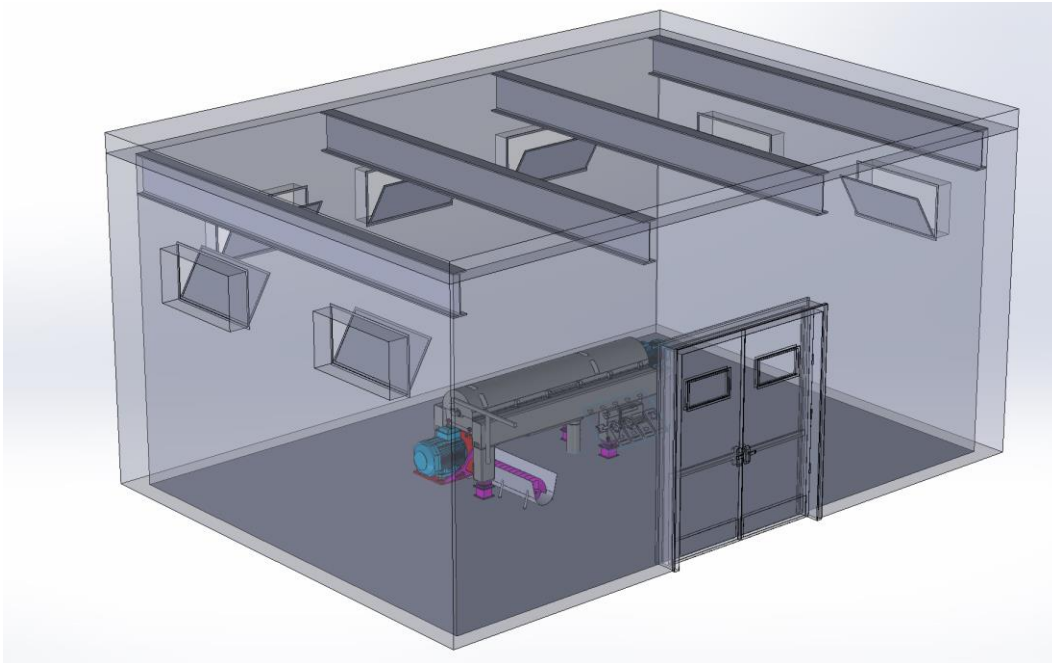


Imagen del espacio virtual en CAD 3D donde se aprecia en su interior la máquina virtual y el panel de control

Una vez generado este espacio en CAD 3D, se realiza el tratamiento necesario para definir el mallado de los elementos, a un nivel de detalle suficiente que permita identificarlos adecuadamente, y a la vez ser procesado por el entorno de realidad virtual con la agilidad suficiente para que el usuario tenga una experiencia adecuada.

5 Desarrollo del sistema de interacción con el gemelo digital

5.1 Desarrollo del gemelo

Para desarrollar el gemelo, primero es necesario crear un modelado 3D de la centrífuga, para esto, se ha utilizado una de las herramientas de modelado 3D más conocidas y utilizadas en el mundo: Blender

Blender es un programa de edición gratuito que permite una gran cantidad de opciones para crear modelos tridimensionales de alta calidad que se usa en toda variedad de proyecto, desde los pequeños hasta las grandes producciones. En este Programa se ha creado una copia de la centrífuga como se muestra a continuación:



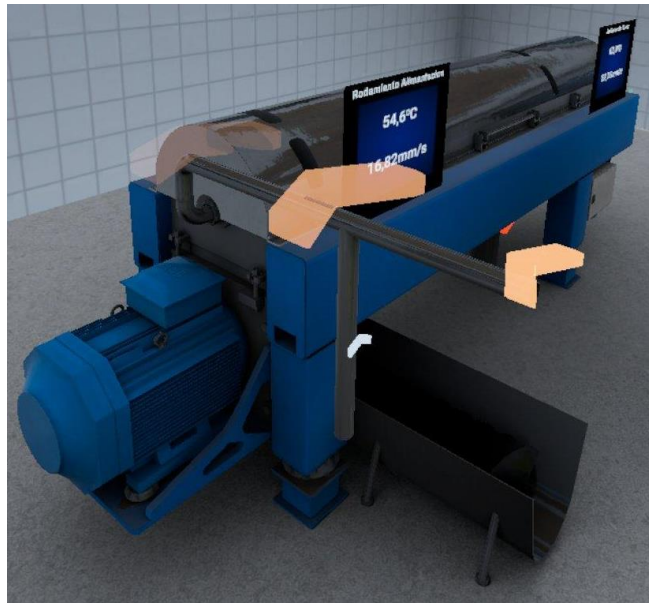
**GENERALITAT
VALENCIANA**

IVACE
INSTITUTO VALENCIANO DE
COMPETITIVIDAD EMPRESARIAL



**Cofinanciado por
la Unión Europea**

“DIGITUIN” - Desarrollo de una infraestructura digital para la construcción de modelos de procesos mediante gemelos digitales



Modelo 3D de la centrífuga. Fuente: elaboración propia.

Es necesario a continuación diseñar cómo se va a interactuar con el gemelo para poder llevar estas interacciones a programación. El gemelo debe ser capaz de funcionar en modo tiempo real, en el que se conecta a ver los datos en directo y el modo simulación que solicita una entrada de valores y devuelve la predicción del resto. Esto se puede conseguir mediante un interruptor dentro del modelo que permita cambiar entre ambos modos. Se muestra este interruptor, accionado por una palanca en la ilustración. Es necesario por supuesto algún método para mostrar al usuario en qué modo está funcionando actualmente el gemelo digital, para eso se ha habilitado una pantalla flotante en la que se puede ver en todo momento esta información.



Palanca cambio de modo.
Fuente: elaboración propia

Se deben incluir también otras pantallas que permitan visualizar el resto de valores de las variables. En particular, se ha creado una pantalla para visualizar las variables de entrada, una para las variables de funcionamiento, una para las variables de salida y dos más para mostrar los valores (temperatura y vibraciones) de los rodamientos, se pueden ver en la siguiente ilustración todas las pantallas y su disposición dentro del entorno 3D.



**GENERALITAT
VALENCIANA**

IVACE
INSTITUTO VALENCIANO DE
COMPETITIVIDAD EMPRESARIAL



**Cofinanciado por
la Unión Europea**

“DIGITUIN” - Desarrollo de una infraestructura digital para la construcción de modelos de procesos mediante gemelos digitales

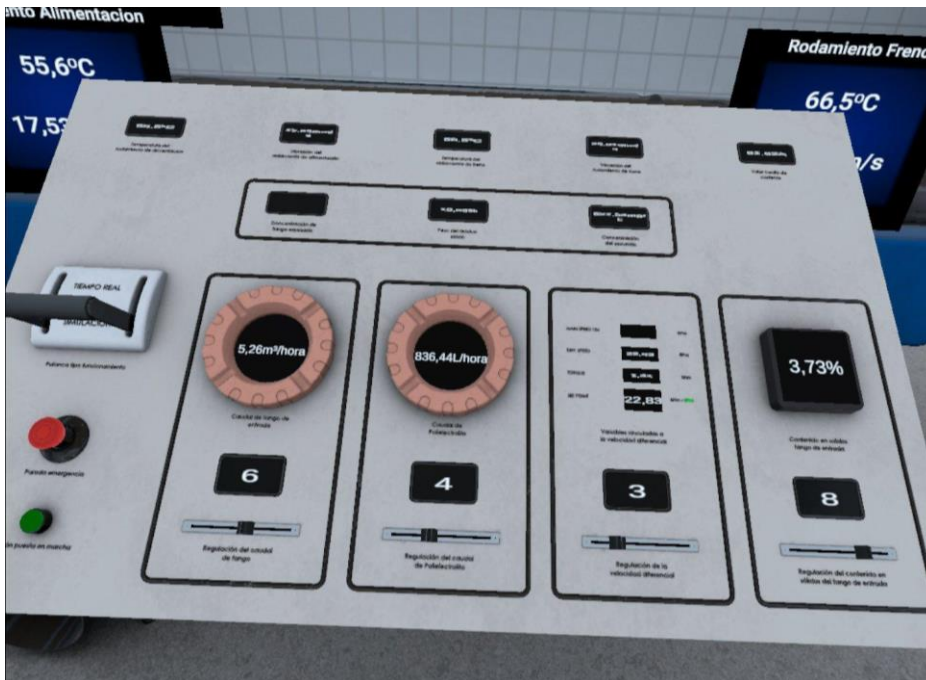


Pantallas de visualización de variables y su posición. Fuente: elaboración propia.

En el caso del control, de la simulación, es necesario proporcionar como input las 4 variables de entrada: caudal de fango, caudal de poli, concentración del fango y velocidad diferencial. Para esta tarea se ha diseñado un panel de mando interactivo que permite la introducción de estos datos, así como encender y apagar la máquina, el apagado de emergencia, el cambio de modo de funcionamiento así como la visualización de las variables de forma resumida.

Se puede ver el panel de mando en la siguiente ilustración. En ella podemos observar en la parte inferior izquierda el botón de encendido y apagado (verde) y la seta de emergencia (rojo) y justo arriba de esta la palanca de cambio de modo. A su derecha, 4 paneles para la introducción de las 4 variables de entrada mediante un control deslizante que simplifica el control para tenerlo unificado en todas las variables. Cada variable mostrará además su valor en los paneles superiores dentro de su recuadro.

“DIGITUIN” - Desarrollo de una infraestructura digital para la construcción de modelos de procesos mediante gemelos digitales



Panel de mando. Fuente: elaboración propia.

Otro elemento que es necesario es tener una visualización real de lo que está ocurriendo en la máquina, de forma que si por ejemplo aumenta el caudal del fango, el de poli, la velocidad o las salidas de material, debe suponer un cambio en el modelo mismo, sin embargo, la mayoría de fluidos fluyen dentro de una tubería opaca que impide la visualización de estas variables. Para solucionar esto, se han incorporado en las entradas y salidas de la máquina un flujo continuo de flechas de distintos colores que indican la existencia de un flujo. En caso de tener un flujo mayor, el número de flechas aumentará, mientras que un número de flechas menor indicará una disminución en el flujo, se encuentran 4 flujos: entrada de poli, entrada de fango, salida de escurrido, salida del deshidratado. Se muestran en las siguientes ilustraciones.



Flechas en los flujos de salida. Fuente: elaboración propia.



**GENERALITAT
VALENCIANA**

IVACE
INSTITUTO VALENCIANO DE
COMPETITIVIDAD EMPRESARIAL



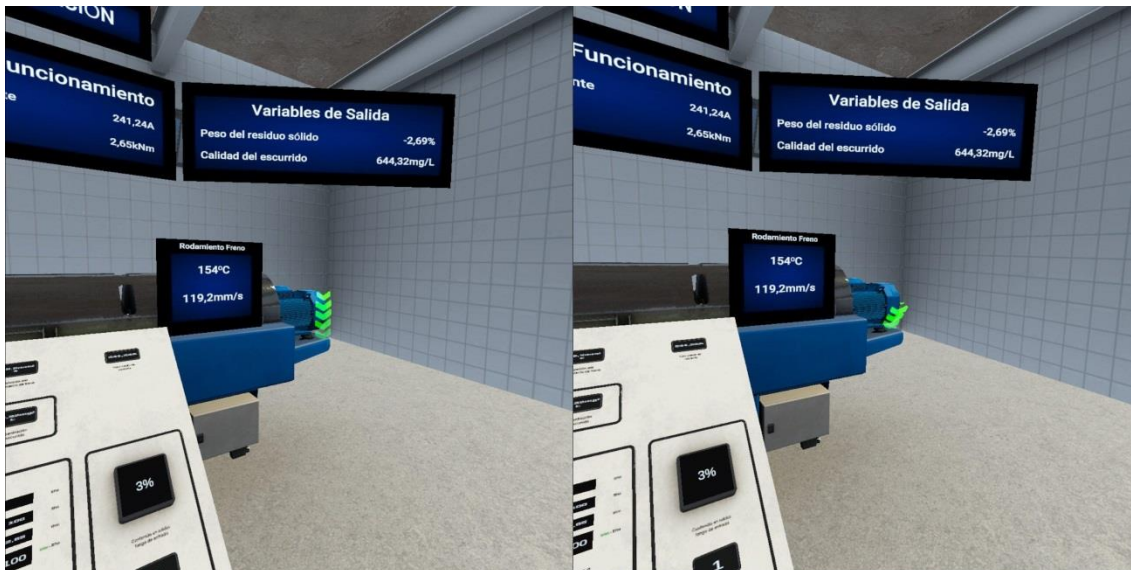
**Cofinanciado por
la Unión Europea**

“DIGITUIN” - Desarrollo de una infraestructura digital para la construcción de modelos de procesos mediante gemelos digitales



Flujos de entrada a la máquina. Fuente: elaboración propia.

Por último, también es posible visualizar la variación diferencial de igual manera mediante flechas en el motor de la centrífuga, tal como se muestra en la ilustración. En este caso, las flechas no fluyen sino que giran constantemente alrededor del motor.



Flechas rotando alrededor del motor. Fuente: elaboración propia.

Para desarrollar todas las interacciones mostradas en este documento, se ha importado el modelo generado en Blender a Unity, un software de desarrollo y motor gráfico muy utilizado a nivel mundial, es una de las herramientas más potentes y populares para este tipo de cometido junto a su competidor Unreal Engine.

“DIGITUIN” - Desarrollo de una infraestructura digital para la construcción de modelos de procesos mediante gemelos digitales

Unity permite la creación de entornos y elementos 3d, el desarrollo de funcionalidades, interacciones, colisiones, y otro tipo de funcionalidades para desarrollar distintos tipos de productos como entornos de realidad virtual como es nuestro caso, aunque también es posible la creación de sistemas de realidad aumentada, aplicaciones para Android, para IOS, para ordenador, etc.

5.2 Sistemas de interacción con el gemelo digital

Seguidamente se indica cómo se desarrollaron los elementos software y de comunicación que permiten la interacción del usuario con el gemelo digital.

Se parte de los siguientes elementos:

- **E1:** Sensores y dispositivo de captura de datos, que estarán situados en la misma localización que la centrifugadora. Los sensores de encargarán de recoger en tiempo real los datos de funcionamiento de la centrifugadora. El dispositivo, junto con el modem 3G, se encargará de procesar estos datos y enviarlo a un servidor en la nube, utilizando un API desarrollada en este servidor.
- **E2:** Aplicación de IA desarrollada para simular el comportamiento de la centrifugadora a partir de los datos recogidos en ese momento a partir de unas determinadas variables de entrada. Esta aplicación será interrogada, vía API desde el Servidor en la nube.
- **E3:** Servidor en la nube, que se encargará de:
 - Almacenar los datos que se envíen en tiempo real desde el dispositivo IOT que hay en la centrifugadora.
 - Comunicarse con los servicios de la aplicación de simulación de la centrifugadora, de IA, que está corriendo en Azure, vía su API; y, en base a unos parámetros de entrada
 - Publicar un API para que desde el dispositivo IOT se puedan enviar los datos de la centrifugadora en tiempo real.
 - Publicar un API para que, desde la aplicación de gemelo virtual que se encuentre corriendo en el dispositivo de Realidad Virtual, se pueda acceder a los datos en tiempo real y se pueda simular el funcionamiento de la centrifugadora, si así se requiere.
- **E4:** Gemelo digital: se trata de una aplicación desarrollada en Unity y que corre en gafas de Realidad Virtual Oculus. Esta aplicación podrá visualizar en tiempo real el comportamiento, los datos y el comportamiento de la centrifugadora. También podrá comprobar y simular el comportamiento de la misma variando unas variables de entrada. Para acceder a los datos en tiempo real de la centrifugadora y a los datos de la simulación de la misma, se accederá al API del servidor de la nube.



**GENERALITAT
VALENCIANA**

IVACE
INSTITUTO VALENCIANO DE
COMPETITIVIDAD EMPRESARIAL



**Cofinanciado por
la Unión Europea**

“DIGITUIN” - Desarrollo de una infraestructura digital para la construcción de modelos de procesos mediante gemelos digitales

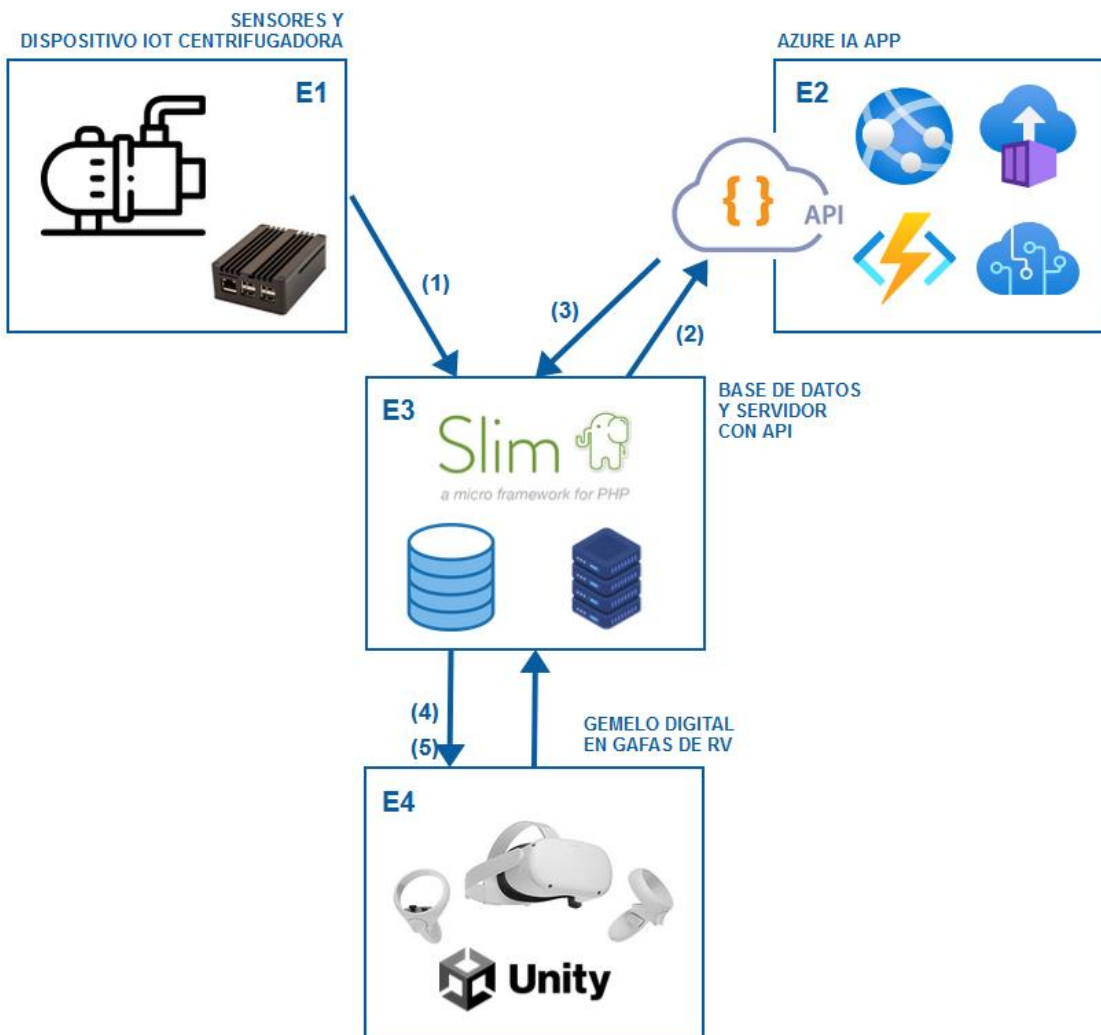


Ilustración 1 - Esquema de interacciones entre los distintos elementos que componen el sistema

Las comunicaciones entre los distintos elementos se realizan mediante estos endpoints /API tanto del Servidor de datos, como de la App de IA almacenada en Azure.

6 Pruebas

Una vez finalizó la instalación en la planta y se desarrollaron los algoritmos predictivos, tras el oportuno entrenamiento de las redes neuronales, se procedió a realizar pruebas de funcionamiento en la propia planta de depuración, de manera que los técnicos de DAM pudieran visualizar el resultado y sugerir posibles modificaciones.

“DIGITUIN” - Desarrollo de una infraestructura digital para la construcción de modelos de procesos mediante gemelos digitales



Realización de pruebas en la planta depuradora. Fuente: elaboración propia.

La visualización a través de las gafas de RV puede realizarse de los valores de las variables en tiempo real, de forma similar a como se muestra en un sistema SCADA, o se puede utilizar el modo SIMULACION del gemelo para predecir cómo variarán los resultados del proceso cuando se varía alguno de los parámetros de entrada.

Además, se desarrolló un programa para demostrar cómo variaban las predicciones en los resultados al modificar algunas de las variables de entrada. Este programa genera unos datos numéricos y unas gráficas a partir de los valores medios de las variables de entrada, generando datos a intervalos regulares hacia arriba y hacia abajo de dichos valores, hasta abarcar dos desviaciones típicas.

En conjunto las predicciones se muestran acordes con los resultados experimentales, según indicó el personal técnico de la depuradora, excepto en el caso de la calidad del escurrido (SSEC) cuando se aumenta el caudal de polielectrolito. En este caso la calidad debería aumentar, es decir que la curva debería tener pendiente negativa. Sin embargo, con los datos recogidos y analizados, el algoritmo daba resultados con una fiabilidad muy elevada. Es un tema que debe analizarse con más detenimiento para tratar de encontrar si existe un error de análisis, de entrenamiento o de falta de datos.



“DIGITUIN” - Desarrollo de una infraestructura digital para la construcción de modelos de procesos mediante gemelos digitales

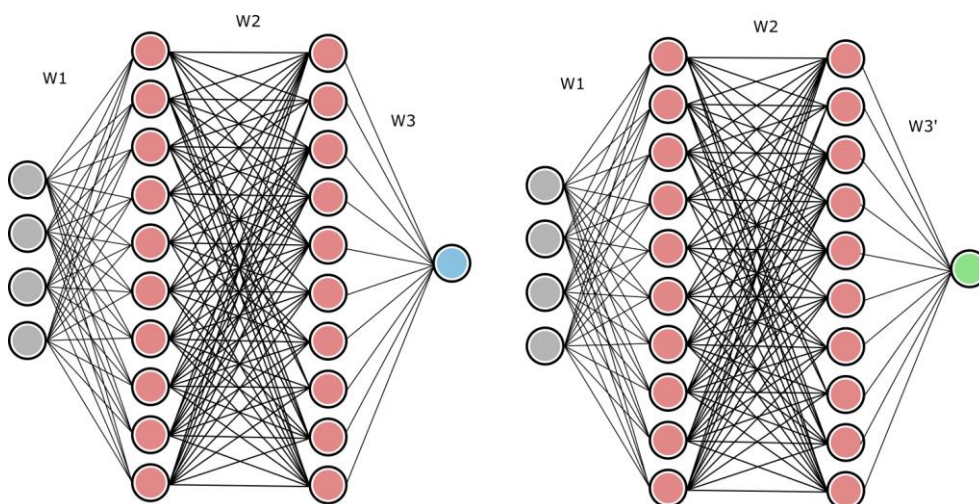
Cabe anotar un problema que no es trivial, y es el referente a los datos de salida. De forma habitual se recogen dos muestras diarias para analizar en laboratorio las dos variables de salida (MSDESH y SSESC). Sin embargo el resto de datos se recogen en automático, existiendo un dato cada cinco segundos aproximadamente. Pese a que se realizaron tomas adicionales de muestras para tratar de completar el conjunto de datos de salida, registrando la hora de recogida, al final se disponía de unos 40 datos de salida frente a varios miles de entrada y de funcionamiento. Es muy probable que las desviaciones observadas tengan su origen en esta desproporción de datos.

Otro problema es el funcionamiento del gemelo “en los bordes”, es decir fuera de los rangos de funcionamiento normal de la máquina. Habitualmente las variables de entrada se mueven en unos intervalos bastante delimitados, lo cual es bueno porque indica que no hay graves alteraciones ni en los fangos ni en el funcionamiento del proceso. Sin embargo, si no se dispone de datos fuera de esos rangos normales, no se puede predecir qué pasará cuando haya alguna variable de entrada que adopte un valor extremo. Esto se puede solucionar realizando experimentos adicionales, pero implica que las condiciones de funcionamiento serán forzadas, lo cual supone que hay que aumentar artificialmente los sólidos en el fango de entrada, y además la máquina debe trabajar en unas condiciones forzadas, obteniéndose un resultado incierto.

7 Verificación de la tecnología Transfer Learning

Seguidamente se utiliza la técnica de transfer learning para verificar hasta qué punto se puede reutilizar el conocimiento ya adquirido por los algoritmos desarrollados y aprovecharlo en desarrollos futuros.

Para realizar esta técnica, se va a “bloquear” el conocimiento aprendido en las 2 capas ocultas de los algoritmos desarrollados para generar el gemelo digital de la máquina centrífuga. Este conocimiento viene definido por las matrices de pesos $W1$ y $W2$, tal como se puede ver en la siguiente ilustración:



Redes neuronales y matrices de pesos. Fuente: Elaboración propia.

“DIGITUIN” - Desarrollo de una infraestructura digital para la construcción de modelos de procesos mediante gemelos digitales

Es decir, dados unos nuevos datos, solamente se va a reentrenar la matriz de pesos W_3 de forma que para un problema nuevo, obtengamos W_3' , una nueva matriz de pesos para la última capa.

Una vez creada la primera parte de la red neuronal, es necesario incluir un nuevo modelo que implemente la capa final, la de salida, en nuestro caso, esta se compone únicamente de una neurona, ya que la prueba se realiza únicamente para una variable.

Esta última red se entrena utilizando como conjunto de entrenamiento la salida de la red anterior, de esta forma obtenemos los pesos y sesgos que podremos mezclar con los primeros para crear la nueva red neuronal.

En el caso del funcionamiento tradicional, entrenar uno de los modelos conlleva 232.76 segundos, casi 4 minutos, al tener 9 variables que entrenar, esto significa un tiempo de entrenamiento de, aproximadamente 36 minutos.

```
Epoch 100/100
1139/1139 [=====] - 1s 896us/step - loss: 1.8775 - mse: 1.8775
Elapsed time: 199.90761137008667
Score: [1.6366608142852783, 1.6366608142852783]
Column: vibraciones_1
```

Resultados de entrenamiento en otro dataset con transfer learning. Fuente: elaboración propia.

En la última ilustración, se puede ver el resultado de ejecutar el entrenamiento sobre el mismo conjunto, pero con una variación de dimensión y orden. En este caso se utiliza el Transfer Learning para entrenar el modelo, en lugar de ejecutar el análisis desde 0.

Se puede observar que los resultados son muy parecidos a nivel de precisión y error mínimo cuadrado, pero se consigue una reducción en tiempo de entrenamiento de 33 segundos por red neuronal, obteniendo una mejora de velocidad del 15% y necesitando un total de 29 minutos para el entrenamiento total.

8 Conclusiones

Tras el desarrollo completo del proyecto, se puede extraer las siguientes conclusiones:

1. El gemelo digital es una herramienta útil que aporta valor de distintas formas dependiendo de los modos de funcionamiento de los que disponga. En el caso del piloto, el modo de tiempo real permite tener una imagen fiel e instantánea de la máquina desde cualquier lugar del mundo con una conexión a internet. Por su parte, el modo de simulación permite obtener los resultados del proceso con determinadas variables sin tener que llevarlo efectivamente a cabo.



**GENERALITAT
VALENCIANA**

IVACE
INSTITUTO VALENCIANO DE
COMPETITIVIDAD EMPRESARIAL



**Cofinanciado por
la Unión Europea**

“DIGITUIN” - Desarrollo de una infraestructura digital para la construcción de modelos de procesos mediante gemelos digitales

2. Los sistemas de predicción deben considerar no sólo los eventos que ocurren durante el rango de funcionamiento “normal” del proceso, ya que entonces las únicas predicciones fiables son las que se muestran dentro de ese rango de funcionamiento. Es necesario diseñar y realizar experimentos que permitan obtener valores de entrada, funcionamiento y salida, fuera de los rangos normales, y de esta forma se podrían predecir comportamientos del sistema cuando las variables de entrada adoptan valores extremos.
3. Para desarrollar los sistemas predictivos, aquellos valores medidos mediante sensores son mucho más fáciles de predecir que aquellos tomados a mano, ya que la diferencia de frecuencia de toma de datos hace que haya que realizar un estudio durante un largo periodo de tiempo para tener una base de conocimiento suficiente como para que los sistemas predictivos tengan una precisión suficiente.
4. Una vez montada la infraestructura de datos, gracias a las APIs, es posible integrar la visualización con cualquier tipo de sistema de visualización, en el caso del piloto se ha desarrollado utilizando realidad virtual, pero gracias a la versatilidad del sistema, se podría desplegar en cualquier otro tipo de visualización como una aplicación web por ejemplo.
5. Plataformas cloud como Azure permiten un desarrollo y despliegue rápido de las aplicaciones en entornos online, así como proporciona una gran variedad de herramientas para todo tipo de cometido. Por otra parte, la oferta de servicios es tan amplia que a menudo requiere de personal especializado únicamente para poder llevar a cabo tareas sencillas.
6. Aunque el sistema esté conectado a servicios cloud de manera continua, es de gran utilidad tener una copia de datos local ya que en caso de cualquier interrupción en el servicio de datos o de internet, especialmente común en instalaciones industriales que suelen estar ubicadas lejos de los centros urbanos, se puede mantener la toma de datos y reincorporar los datos al servidor posteriormente.
7. La tecnología de transfer learning se puede aplicar para tratar de reducir periodos de aprendizaje en procesos similares. Dependiendo de la complejidad del proceso, la utilidad de la tecnología se puede considerar adecuada. A mayor complejidad, y por tanto más tiempo de entrenamiento requerido, mayor utilidad.

**GENERALITAT
VALENCIANA****IVACE**
INSTITUTO VALENCIANO DE
COMPETITIVIDAD EMPRESARIAL**Cofinanciado por
la Unión Europea**