

EL GEMELO DIGITAL EN LA INGENIERÍA CIVIL

MARÍA MEGÍA CARDEÑOSO,
GRANADA, MAYO 2024



Instituto Andaluz
Interuniversitario en
Data Science and
Computational Intelligence



UNIVERSIDAD
DE GRANADA



EL GEMELO DIGITAL EN LA INGENIERÍA CIVIL



Ponente
María Megía Cardeñoso

Charla:
El gemelo digital en
ingeniería civil



SÉPTIMO MEETUP

Patrocina: Certinia

Jueves 23 Mayo



ÍNDICE

1. Introducción al Gemelo Digital

- 1.1. Definición genérica
- 1.2. Origen
- 1.3. Expectativas
- 1.4. Aplicaciones

2. Implantación del Gemelo digital en Ingeniería Civil

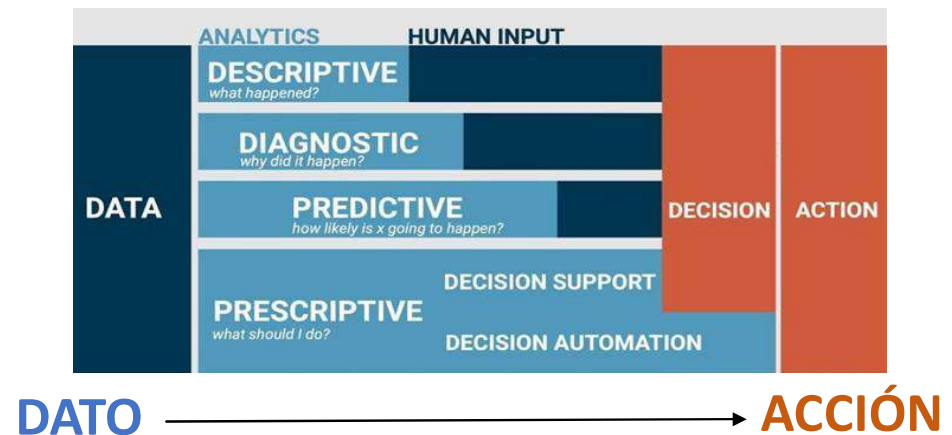
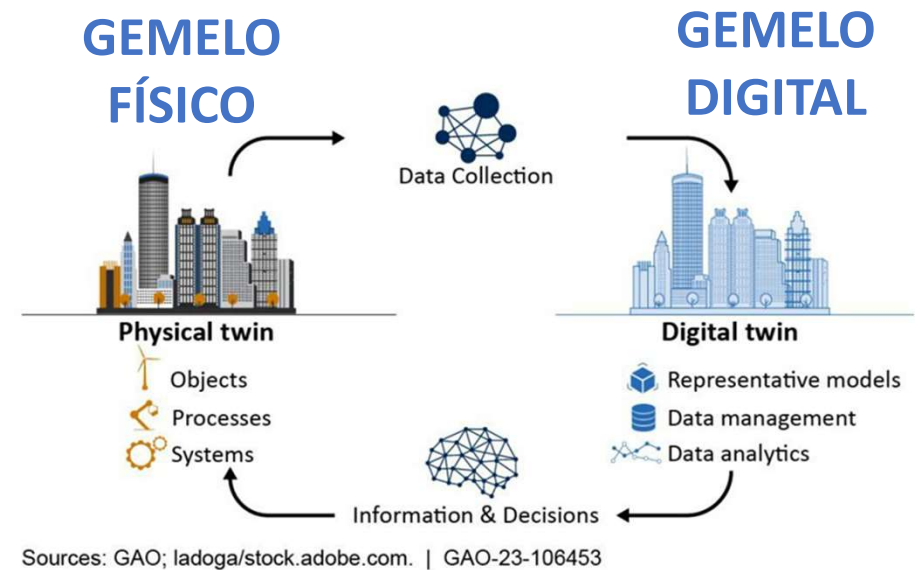
- 2.1. Problemática actual
- 2.2. Revisión del estado del arte
- 2.3. Componentes
- 2.4. Contribuciones al DT desde la ingeniería civil

3. Contribución al desafío de la escasez de datos y la dificultad de entrenamiento de los modelos del DT

1. GEMELO DIGITAL (I)

1.1. Definición genérica (Digital Twin, DT)

- El DT es una **réplica virtual** de un objeto, proceso o sistema del mundo real.
- Se crea utilizando **datos** de su contraparte física, obtenidos mediante sensores y otros medios, y **modelos**.
- Su propósito es conectar **bidireccionalmente** y en **tiempo real** el mundo físico y el virtual, haciendo posible:
 - OPTIMIZACIÓN DE PROCESOS
 - TOMA DE DECISIONES INTELIGENTE



1. GEMELO DIGITAL (II)

1.2. Origen

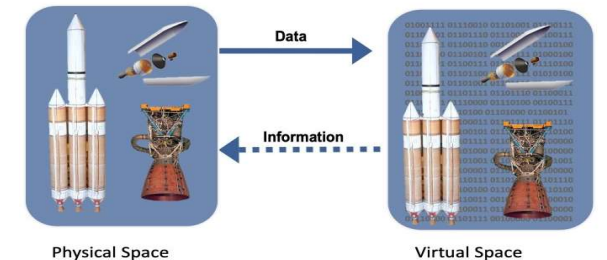
- El gemelo digital fue inicialmente concebido por **NASA en el programa Apollo (1960-70s)**, en el cual se construyó una estructura gemela a la que voló al espacio con el fin de simular las mismas condiciones y solucionar los problemas técnicos, sirviendo de aprendizaje mutuo.
- El término “Digital Twin” fue acuñado por **Michael Grieves (2002)**, ex-ingeniero de NASA, durante una conferencia en la Universidad de Michigan (USA) en el ámbito industrial.



Real
Apolo XIII
in the
space



Digital Twin Model



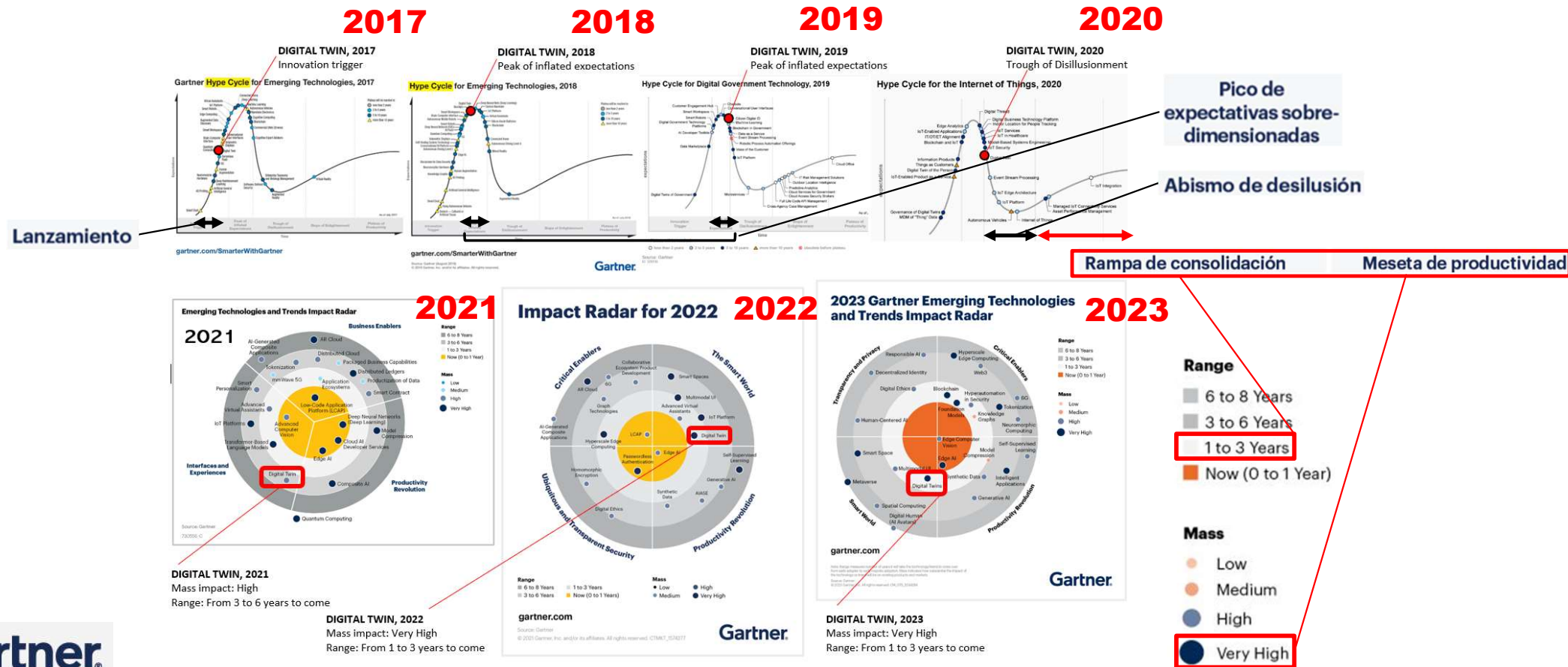
Virtual Apolo
XIII in NASA
headquarters



1. GEMELO DIGITAL (III)

1.3. Expectativas

El Gemelo Digital es una de las tecnologías emergentes con más impacto esperado

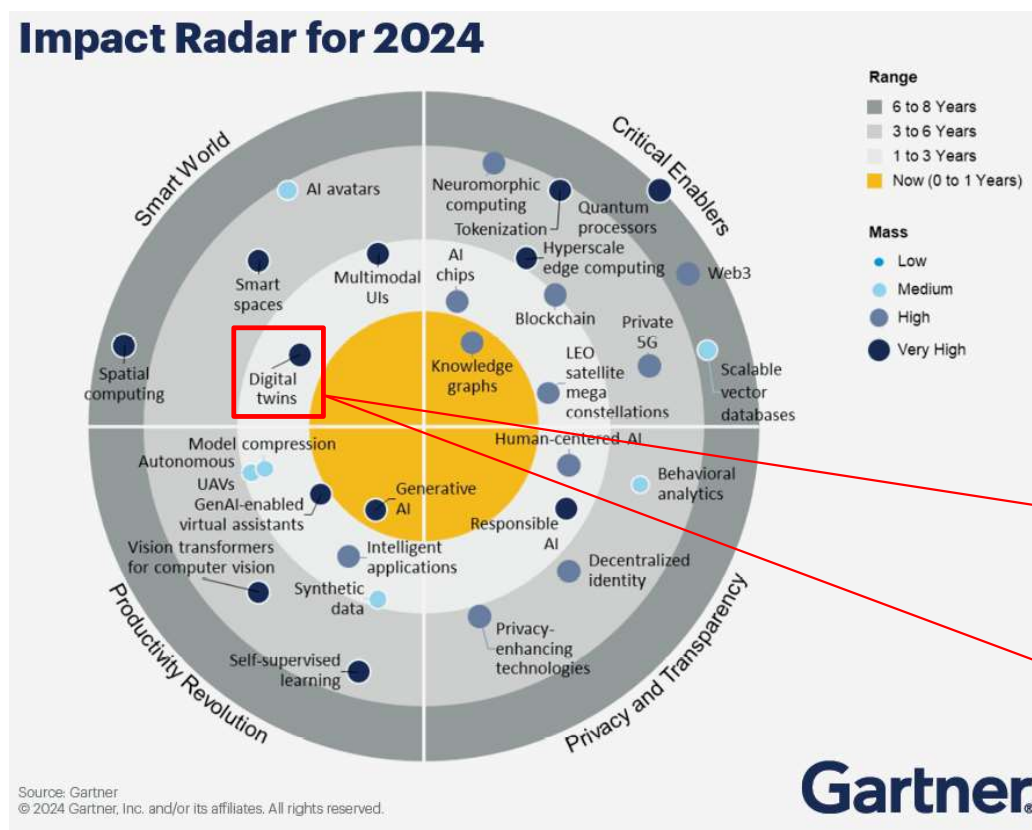


1. GEMELO DIGITAL (IV)

1.3. Expectativas

En 2024 sigue en el radar de impacto con expectativas muy altas

2024 Impact Radar for 2024

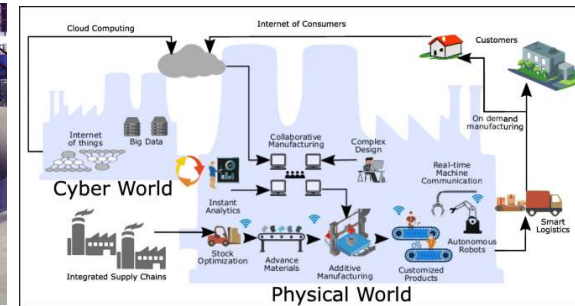
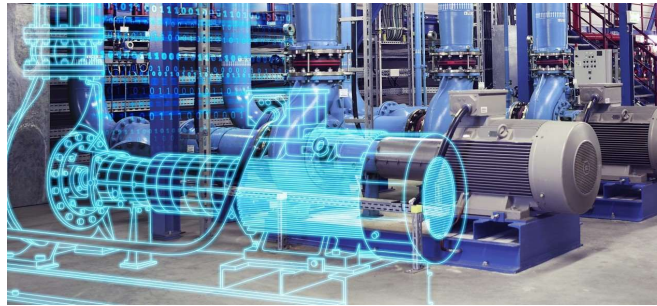


1. GEMELO DIGITAL (V)

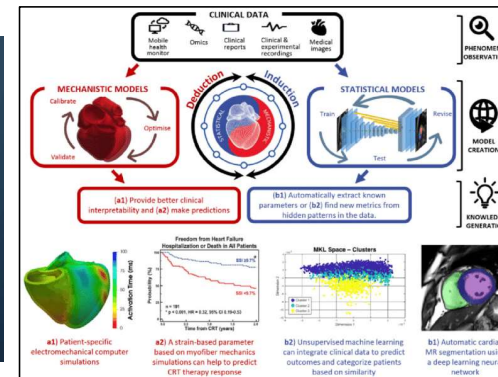
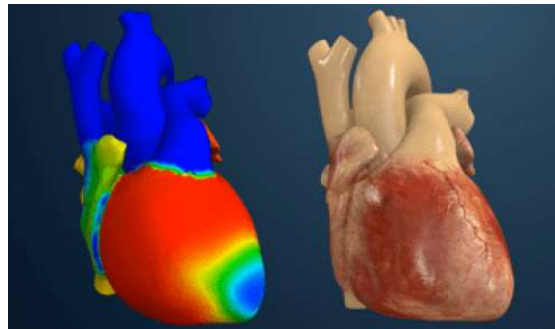
1.4. Aplicaciones

Actualmente se están desarrollando DT en muchos ámbitos, por ejemplo:

- Industria



- Medicina



- La U.E. tiene proyectos de aplicaciones de DT genéricas

<https://www.digitbrain.eu/>

<https://digitbrain.github.io/>



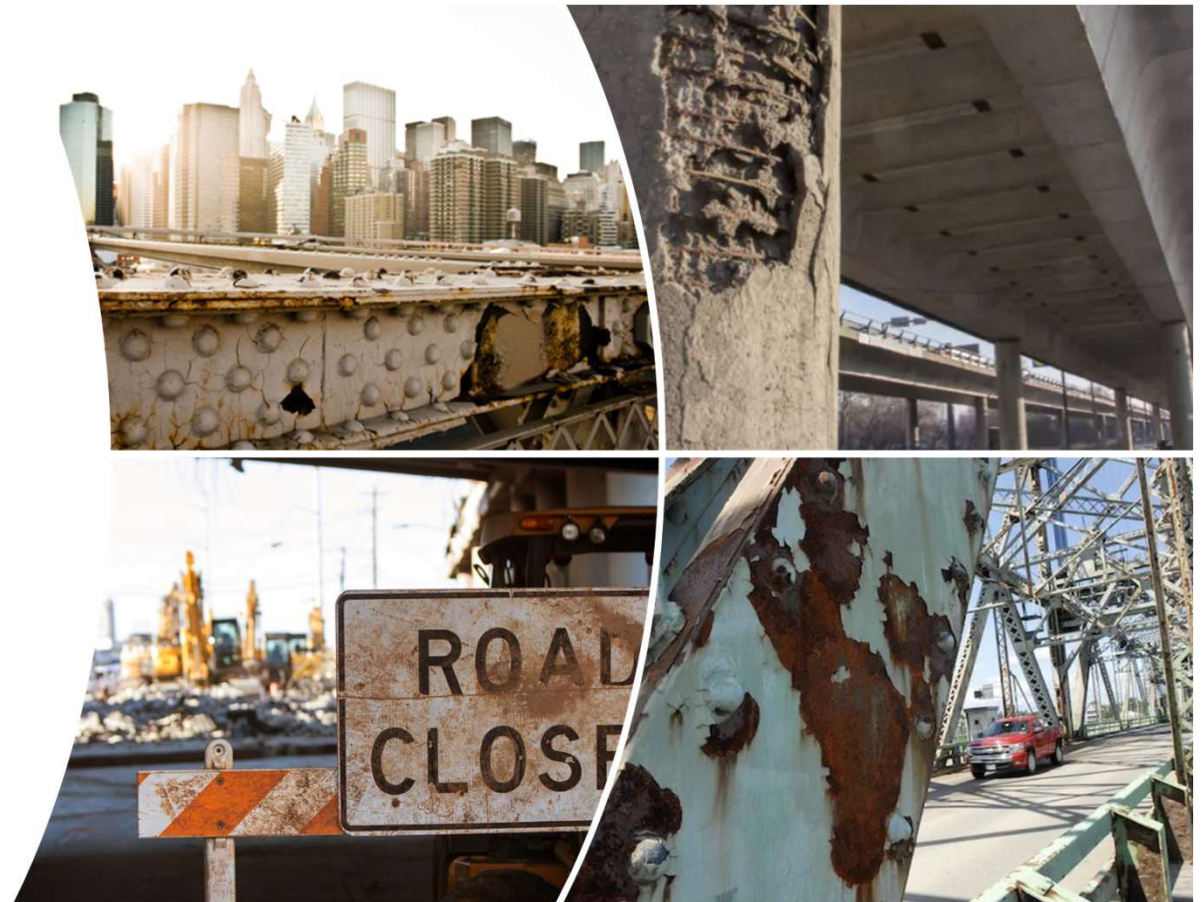
2. IMPLANTACIÓN DEL DT EN LA INGENIERÍA CIVIL(I)

2.1. Problemática actual

Planteamiento del problema en **O&M** en la ingeniería civil

INGENIERÍA CIVIL		
DISEÑO	CONSTRUCCIÓN	OPERACIONES Y MANTENIMIENTO

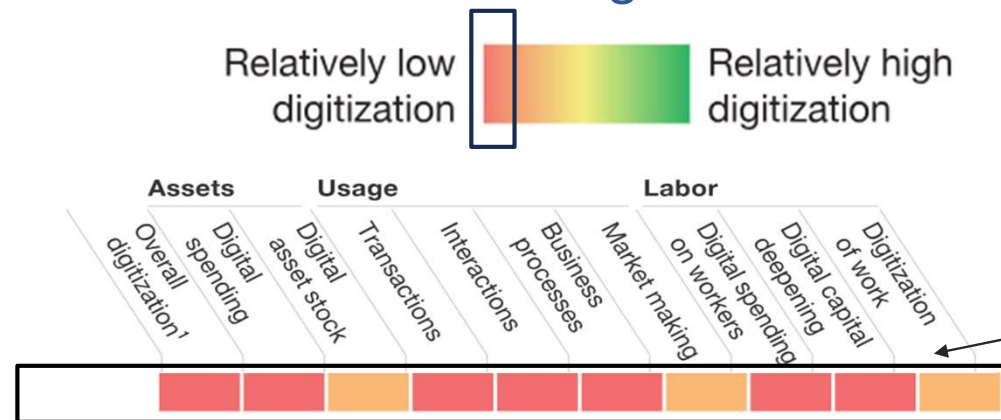
- **OBSOLESCENCIA:** Las grandes infraestructuras que datan de principios del siglo XIX están llegando al fin de su vida útil, diseñada para 100 años.
- **CAMBIO EN LAS CONDICIONES DE TRABAJO:** Las cargas y tráfico han aumentado y también han variado las condiciones ambientales.
- **SISTEMA ACTUAL NO EFICIENTE:** Se destinan más de 12.000M € al año en España, lo que supone una cantidad mayor que Sanidad y Educación juntas.



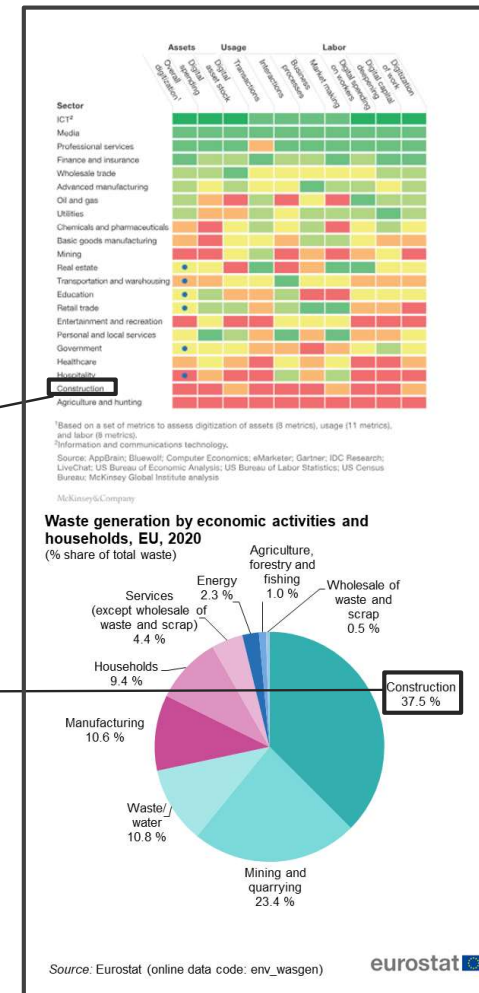
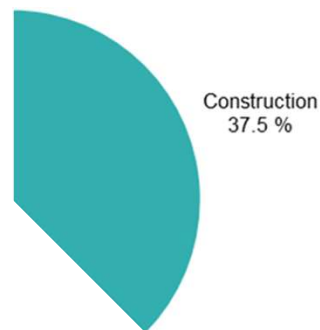
2. IMPLANTACIÓN DEL DT EN LA INGENIERÍA CIVIL(II)

2.1. Problemática actual

- Es uno de los sectores menos digitalizados¹



- Es uno de los sectores que más residuos produce²



- NU ODS y Agenda 2030 de la UE

ODS 9: Construcción de infraestructuras resilientes, promoción de la industrialización sostenible y fomento de la innovación.



ODS 11: Edificaciones, urbanización y transporte sostenibles.



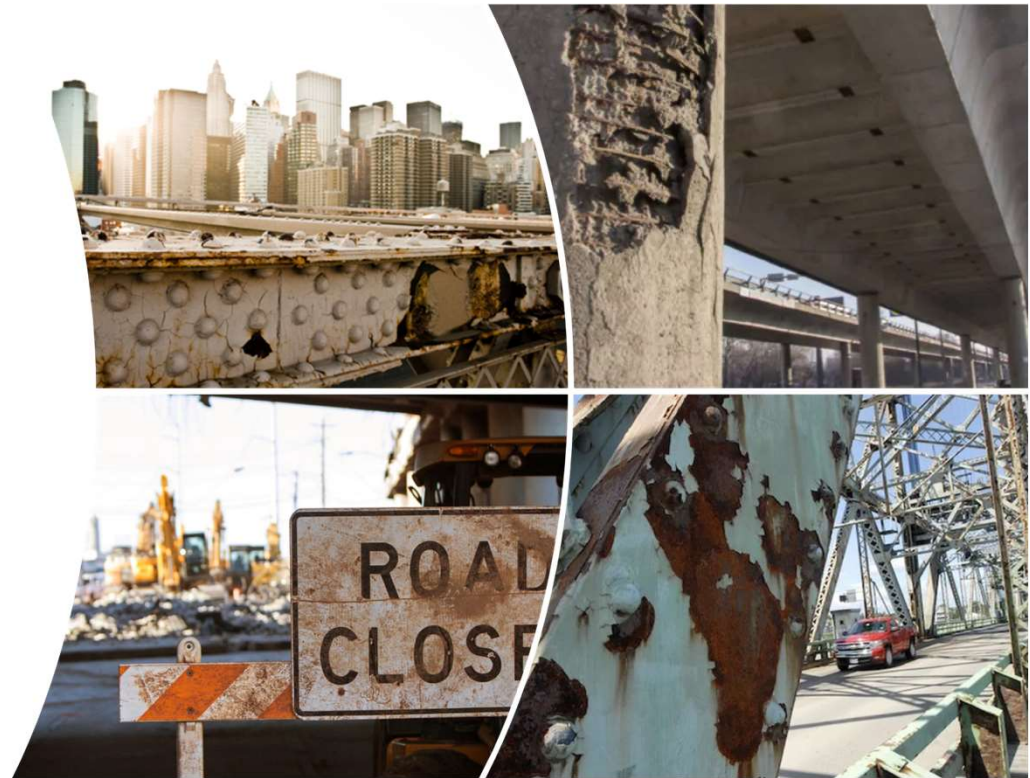
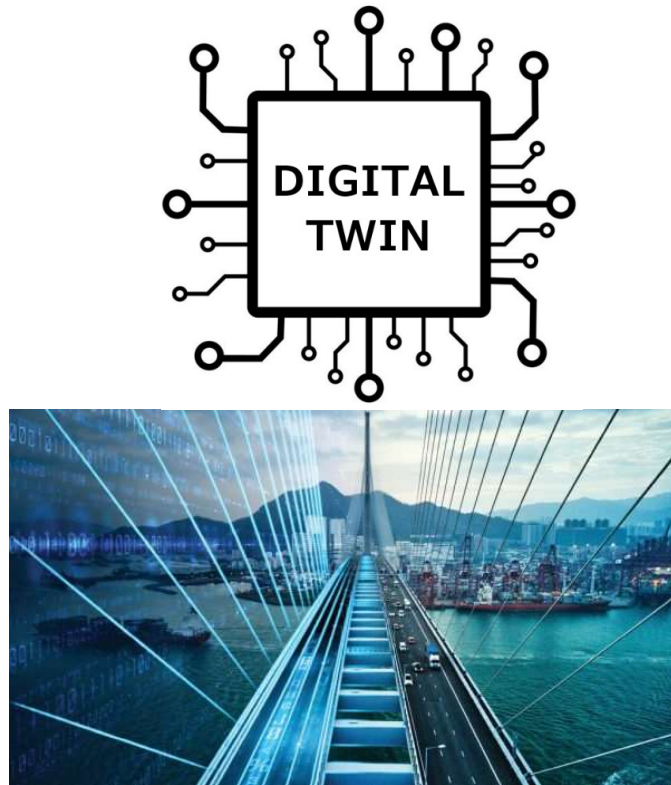
¹ <https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/imagining-constructions-digital-future>

² <https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/SEPDF/cache/1183.pdf>

2. IMPLANTACIÓN DEL DT EN LA INGENIERÍA CIVIL (III)

2.1. Problemática actual

¿CÓMO PUEDE AYUDAR EL DT ANTE ESTE ESCENARIO?



2. IMPLANTACIÓN DEL DT EN INGENIERÍA CIVIL (IV)

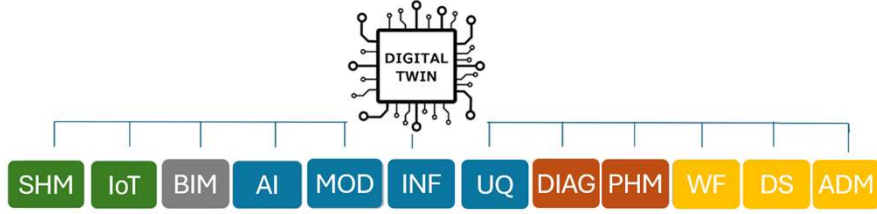
2.2. Componentes del DT

■ Revisión del estado del arte (2018-2024).

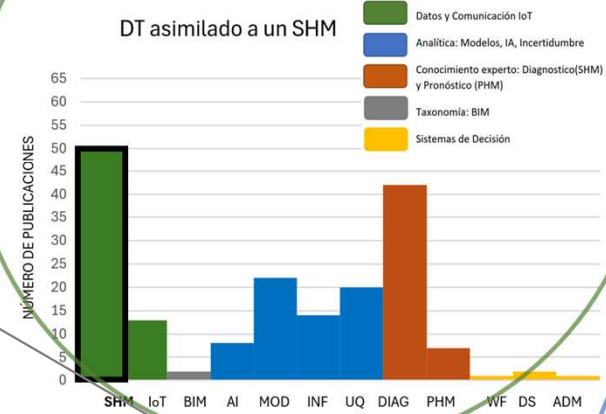
Ref.	Year	Field	SHM	IoT	BIM	AI	MOD	INF	DIAG	PHM	UQ	WF	DS	ADMT
[27]	2018	Bridge O&M												
[16]	2019	Offshore assessment												
[28]	2019	Bridge assessment												
[29]	2019	Bridge assessment												
[30]	2019	Bridge assessment												
[31]	2019	Bridge assessment												
[32]	2019	Bridge O&M												
[33]	2019	Building monitoring												
[34]	2019	Bridge monitoring												
[22]	2020	Structural assessment												
[35]	2020	Eng. Systems degradation												
[36]	2020	Structural assessment												
[37]	2020	Building assessment												
[38]	2020	Bridge assessment												
[39]	2020	Building O&M												
[26]	2021	Structural assessment												
[40]	2021	Structural assessment												
[41]	2021	Structural assessment												
[42]	2021	Offshore assessment												
[43]	2021	Bridge assessment												
[44]	2021	Bridge assessment												
[45]	2021	Hydraulic eng. assessment												
[35]	2022	Bridge O&M												
[46]	2022	Structural assessment												
[47]	2022	Structural assessment												
[48]	2022	Bridge O&M												
[49]	2022	Structural assessment												
[50]	2022	Structural O&M												
[51]	2022	Bridge assessment												
[52]	2022	Bridge assessment												
[53]	2022	Bridge assessment												
[54]	2022	Construction & maint.												
[55]	2022	Bridge assessment												
[56]	2022	Structural assessment												
[57]	2022	Bridge assessment												
[58]	2022	Building assessment												
[59]	2022	Head assessment												
[60]	2022	Bridge assessment												
[61]	2022	Bridge assessment												
[62]	2022	Building assessment												
[63]	2022	Building assessment												
[64]	2022	Structural assessment												
[65]	2022	Structural assessment												
[66]	2022	Building assessment												
[67]	2022	Structure assessment												
[68]	2022	Bridge assessment												
[69]	2022	Building assessment												
[70]	2022	Building assessment												
[71]	2022	Bridge assessment												
[72]	2022	Bridge assessment												
[73]	2022	Building assessment												
[74]	2022	Structural assessment												
[75]	2022	Structural assessment												
[76]	2022	Structural assessment												
[77]	2022	Offshore assessment												
[78]	2022	Structural assessment												
[79]	2022	Structural assessment												
[80]	2022	Structural assessment												
[81]	2022	Bridge assessment												
[82]	2024	Railway str. assessment												
[83]	2024	Structural assessment												
[84]	2024	Building construction												
[85]	2024	Structural assessment												

Ref.: Reference; SHM: Data obtained by SHM techniques; IoT: Use IoT; BIM: Use Building Information Modeling; AI: Use Artificial Intelligence; MOD: Use models; INF: Make Inference; DIAG: Make Diagnosis; PHM: Make Prognosis; UQ: Provide Uncertainty Quantification; WF: Includes a workflow model; DS: Provides decision support; ADM: Makes Autonomous decisions

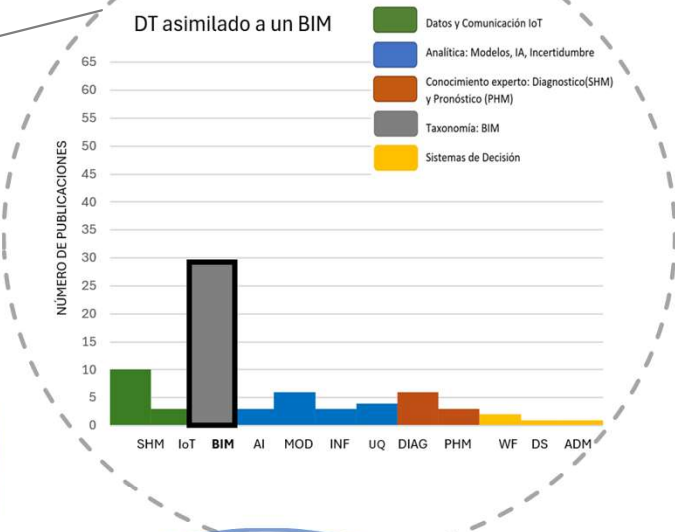
COMPONENTES RECOPIRADOS:



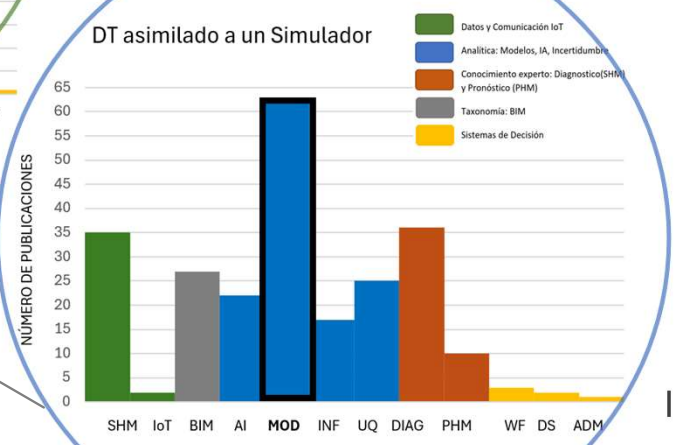
2 DT como un Monitorizador: alarmas y analítica básica en tiempo real



1 DT como un BIM: Base de datos de información estática

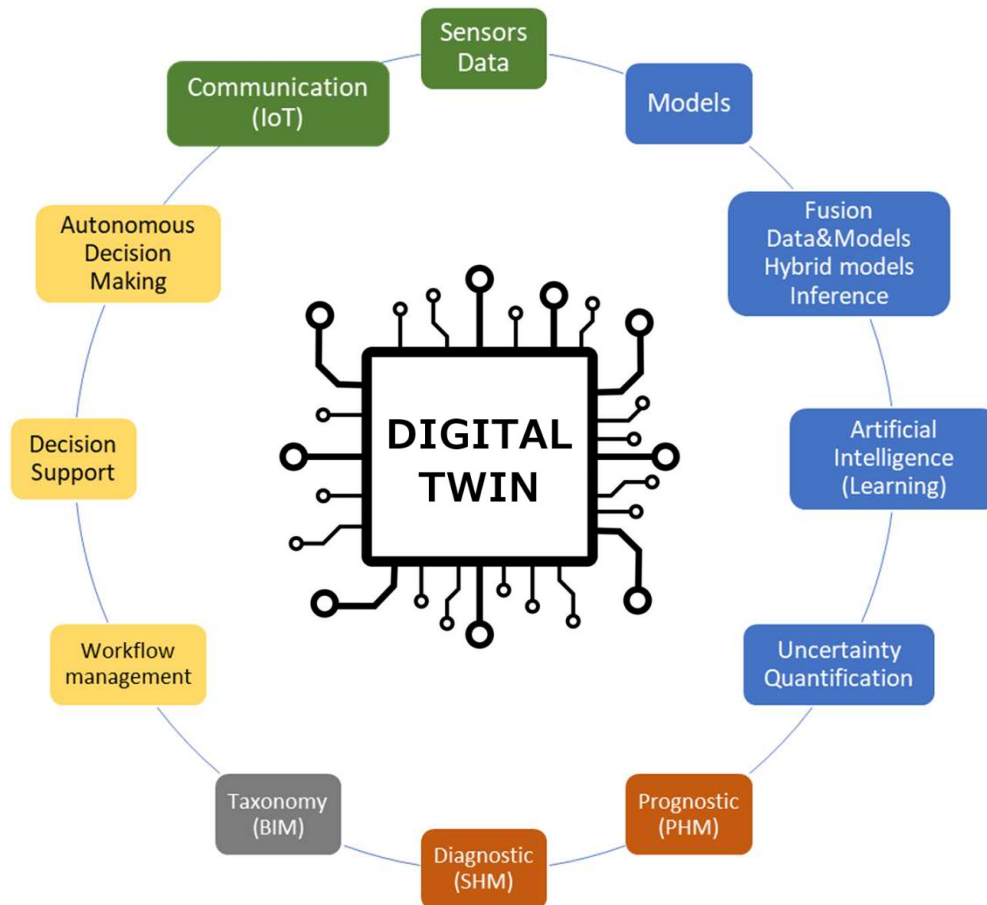


3 DT como un Simulador offline




2. IMPLANTACIÓN DEL DT EN INGENIERÍA CIVIL (V)

2.2. Componentes del DT




- Trabajando de manera coordinada y creando sinergia

 Data and Communication (IoT)

 Analytics: Models, IA, Uncertainty

Expert Knowledge: Diagnosis (SHM) and Prognosis (PHM)

Taxonomy: BIM

 Workflow management, Decision making

2. IMPLANTACIÓN DEL DT EN INGENIERÍA CIVIL (VI)

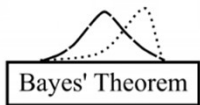
2.3. Contribuciones al DT desde la ingeniería civil

CONTRIBUCIONES



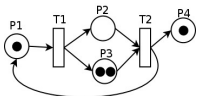
1

Definición matemática y computacional del DT, **componentes**, y 2 aplicaciones prácticas en **casos de estudio**



2

Incorporación al DT del **método Bayesiano** para la **cuantificación de incertidumbre** e **inferencia** de parámetros desconocidos



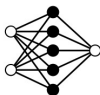
3

Implementación de las **redes de Petri** como gestor del **flujo de trabajo (workflow)** del DT, integrado en una plataforma web junto al sistema de monitorización, la anática y la visualización



4

Desarrollo de un **modelo generativo** para facilitar el **model-assisted training** de los **modelos predictivos** del DT, proporcionándoles datos y arquitectura



5

Proveer al DT de un pipeline de **modelos predictivos** eficientes para la evaluación del daño estructural (conocimiento experto) que funcionen en **tiempo real**

3. CONTRIBUCIONES AL DESAFIO DE DATOS Y ENTRENAMIENTO (I)

3.1. Contribución al desafío de la escasez de datos y dificultad de entrenamiento

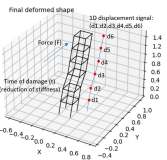
Objetivo

- 4 Proveer con **datos** en calidad y cantidad suficiente para entrenar los modelos del DT así como de una **arquitectura**
- 5 Proporcionar al DT un pipeline de **modelos predictivos** eficientes que funcionen en tiempo real

Marco Teórico

Aplicación de IA via NNs para el desarrollo de modelos **generativos**

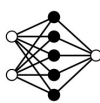
Model Assisted Training : Entrenamiento de los modelos **predictivos** con los datos y la arquitectura heredada de los modelos **generativos**



MODELOS BASADOS EN FÍSICA:

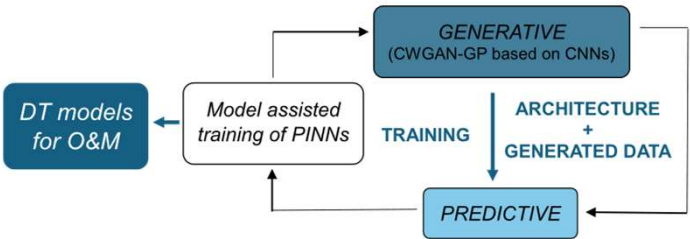
- Modelos numéricos de simulación física basados en Elementos Finitos (FEM)

MODELOS SURROGADOS Ó METAMODELOS



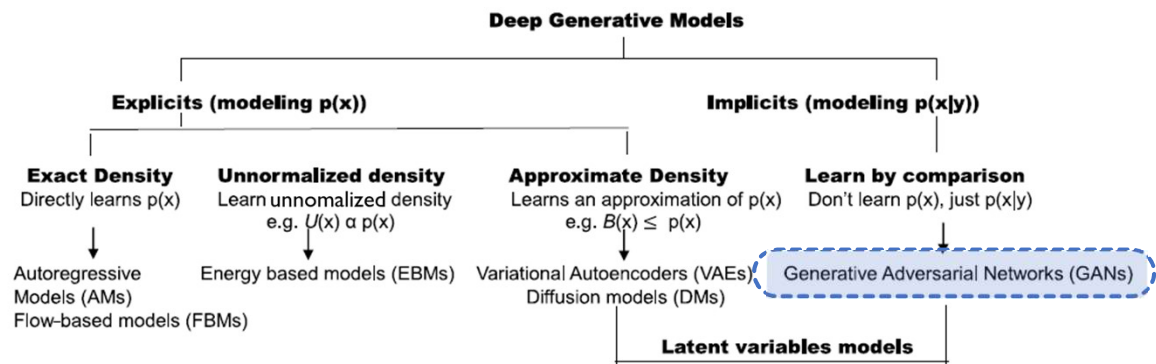
MODELOS BASADOS EN DATOS: Physics Informed Neural Networks (PINNs)

- Generativos:** CWGAN-GP basados en CNNs
- Predictivos:** de regresión y clasificación para evaluar el daño y su evolución en estructuras, con arquitectura heredada del modelo generativo basada en CNNs



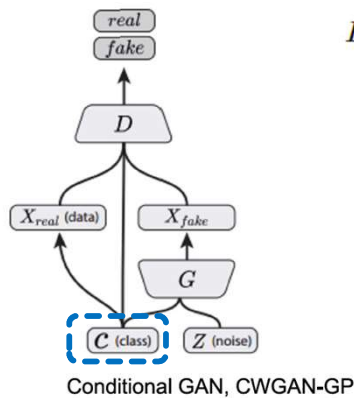
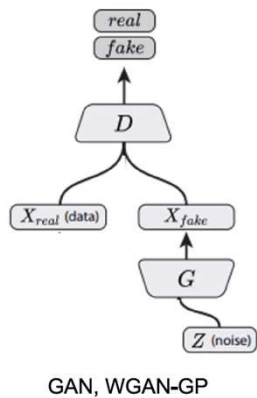
3. CONTRIBUCIONES AL DESAFIO DE DATOS Y ENTRENAMIENTO (I)

Modelo Generativo: CWGAN-GP



Generator	Discriminator (Critic)
Input (latent space, condition)	Input (d1,d2,d3,d4,d5,d6,F,t,condition)
CNN 1D (ReLU, 32 , 3)	CNN 1D (LeakyReLU, 32 , 3)
BatchNormalization / Maxpooling	BatchNormalization / Dropout
CNN 1D (ReLU, 32 , 3)	CNN 1D (LeakyReLU, 32 , 3)
BatchNormalization / Maxpooling	CNN 1D (LeakyReLU, 32 , 2)
CNN 1D (ReLU, 32 , 2)	
BatchNormalization / Maxpooling	
Flatten()	Flatten()
Dense (ReLU, 64)	Dense (1, 1)
Dense (ReLU, 32)	
Dense (Tanh, 1)	
Output (d1,d2,d3,d4,d5,d6,F,t, condition)	Output (Critic's value)

WGAN-GP: Gulrajani et al., 2017

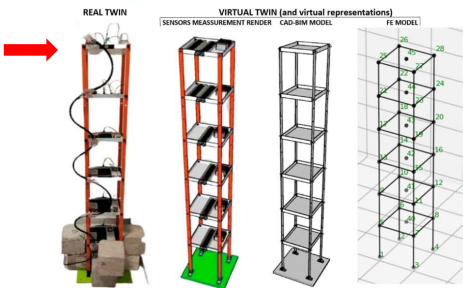


Conditional WGAN-GP:

$$L_{CWGAN-GP} = \mathbb{E}_{\pi_g} [D(\tilde{x}|c)] - \mathbb{E}_{\pi_r} [D(x|c)] + \lambda \mathbb{E}_{\pi_g} \left[(||\nabla_{\tilde{x}} D(\tilde{x}|c)||_2 - 1)^2 \right]$$

La condición (c):

- Garantiza el equilibrio de **clases**
- Proporciona conciencia del **contexto**

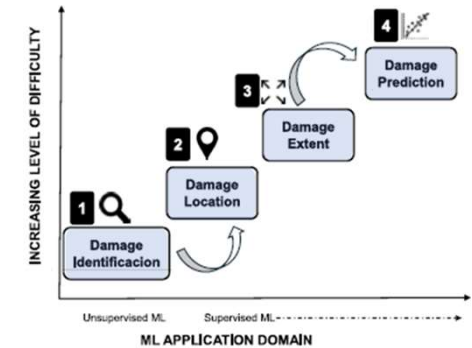


3. CONTRIBUCIONES AL DESAFIO DE DATOS Y ENTRENAMIENTO (I)

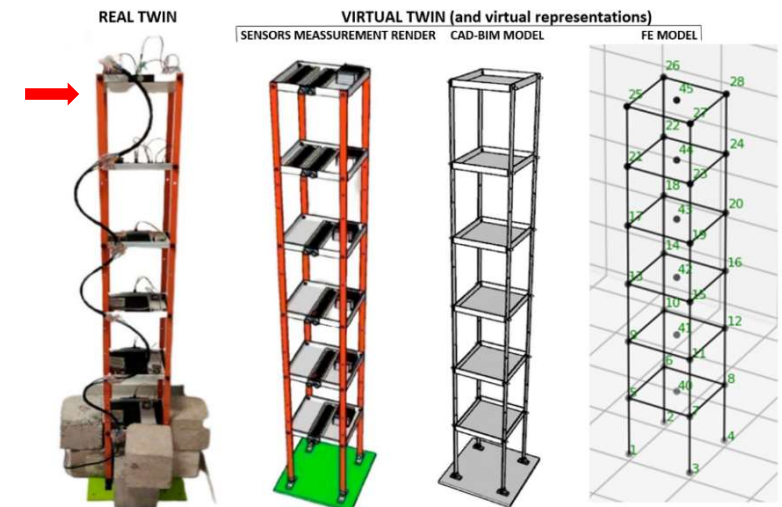
Modelos Predictivos: clasificadores y regresores basados en CNNs

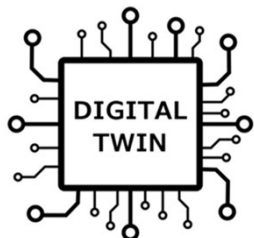
	1	2	3	4
	Level 1: Detection	Level 2: Localization	Level 3: Quantification	Level 4: Prediction
Algorithmic task:	Binary classification	Multiclass classification	Regression	Regression
Last activation function:	Sigmoid	Softmax	-	-
Inputs:	Monitored data	Monitored data	Monitored data	Monitored data
Outputs:	Binary label	Binary label per monitored point	t (to calculate SDI)	t (to calculate RUL)
Loss function:	Binary Cross Entropy	Categorical Cross Entropy	MSE	MSE

SDI: Structural Damage Index, RUL: Remaining Useful Life, MSE: Mean Squared Error



1 - 2	3 - 4
Damage detection and location (Levels 1 and 2)	Prediction of damage extent and RUL (Levels 3 and 4)
Input (d1,d2,d3,d4,d5,d6,F)	Input (d1,d2,d3,d4,d5,d6,F)
CNN 1D (ReLU, 32 , 3) - CNN 1D (ReLU, 128 , 3)	CNN 1D (ReLU, 32 , 3)
CNN 1D (ReLU, 32 , 3) - CNN 1D (ReLU, 64 , 3)	CNN 1D (ReLU, 32 , 3)
CNN 1D (ReLU, 32 , 2) -	CNN 1D (ReLU, 32 , 3)
Flatten ()	Flatten ()
Dense(ReLU,64)	Dense(ReLU,64)
Dense(ReLU,32)	Dense(ReLU,32)
Dropout (0.3)	
Dense (Activation function)	Dense (-)
Output (label - labels)	Output (t)





Instituto Andaluz
Interuniversitario en
Data Science and
Computational Intelligence



UNIVERSIDAD
DE GRANADA

GRACIAS POR SU ATENCIÓN

¿ALGUNA PREGUNTA?

mmegia@ugr.es

<https://github.com/mmmmaria/Digital-twin.git>