



**UNIVERSIDAD DE JAÉN**  
Escuela Politécnica Superior de Linares

Trabajo Fin de Grado

# **MODELADO DE UN GEMELO DIGITAL PARA INTERNET DE LAS COSAS**

**Alumno: Salvador Navarro, Alejandro Antonio**

**Tutor:** Prof. CUEVAS MARTÍNEZ, D. JUAN CARLOS  
**Dpto.:** Ingeniería de Telecomunicación

**Tutor:** Prof. YUSTE DELGADO, D. ANTONIO JESÚS  
**Dpto.:** Ingeniería de Telecomunicación

**Septiembre, 2023**





**UNIVERSIDAD DE JAÉN**  
Escuela Politécnica Superior de Linares

---

# **MODELADO DE UN GEMELO DIGITAL PARA INTERNET DE LAS COSAS**

---

**Alumno: Salvador Navarro, Alejandro Antonio**

**Tutor:** Prof. CUEVAS MARTÍNEZ, D. JUAN CARLOS  
**Dpto.:** Ingeniería de Telecomunicación

**Tutor:** Prof. YUSTE DELGADO, D. ANTONIO JESÚS  
**Dpto.:** Ingeniería de Telecomunicación

**Septiembre, 2023**

Firma del alumno

Fdo:

Firma del tutor

Fdo:

Firma del tutor

Fdo:



## AGRADECIMIENTOS

Desde muy niño siempre he escuchado de mis mayores eso de... ***“De bien nacido es ser agradecido”***.

Yo añadiría además, que es justo mostrar agradecimiento a quienes, de una forma u otra, contribuyen desinteresadamente y con total generosidad a mejorar la vida de los demás, tanto profesional como personalmente.

Por ello, quiero darle las gracias a JUAN CARLOS y ANTONIO, profesores y tutores, por creer en este Trabajo Fin de Grado, por brindarme el privilegio de tutelarme en él, por vuestro buen saber y hacer, por vuestros consejos, por vuestras correcciones y por haber tenido la generosidad de poner vuestra experiencia y amplios conocimientos no sólo al servicio de la investigación, sino también de la docencia. Sois para mí, fuente de inspiración en ambos campos. GRACIAS por poder contar siempre con vosotros.

Gracias a la ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE LINARES por brindarme la valiosa oportunidad de disfrutar y aprender tanto a lo largo de todo este tiempo. Aquí, no solamente he adquirido conocimientos, sino que también he experimentado un agradable, cálido y continuo sentimiento de pertenencia. GRACIAS por haber sido mi segundo hogar.

Gracias a mi familia y amigos por entender mi escasa disponibilidad para ellos durante estos meses de dedicación exclusiva a este TFG y por respetar mi espacio, mis tiempos... Os agradezco vuestra comprensión y apoyo y, sobre todo, os agradezco el quererme de forma incondicional. GRACIAS.

Y como no, dar infinitas gracias a mi fiel e inseparable compañera durante todos estos meses. A mi perra Federica, por su leal y agradable compañía, por transmitirme tanta paz durante tantas y tantas horas de búsqueda, análisis y redacción de este trabajo. Como dicen en casa, ***“si no existieses, habría que inventarte”***. Yo también te quiero.



# ÍNDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>18</b>
<b>1.1. Motivación</b>	<b>19</b>
<b>1.2. Objetivos del presente Trabajo Fin de Grado</b>	<b>19</b>
<b>1.3. Alcance</b>	<b>20</b>
<b>1.4. Antecedentes</b>	<b>20</b>
<b>1.5. Estructura del Trabajo Fin de Grado</b>	<b>20</b>
<b>2. ESTADO DEL ARTE</b>	<b>23</b>
<b>3. REVISIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS IMPLICADAS</b>	<b>25</b>
<b>3.1. Internet de las Cosas</b>	<b>25</b>
3.1.1. Definición	25
3.1.2. Arquitectura y componentes	25
3.1.3. Protocolos y sensores utilizados	28
3.1.3.1. Protocolos de comunicación	28
3.1.3.2. Sensores	31
<b>3.2. Gemelos digitales</b>	<b>32</b>
3.2.1. Definición y concepto	33
3.2.2. Arquitectura	34
3.2.3. Clasificación	35
3.2.3.1. En función del dominio de aplicación	35
3.2.3.2. En función del nivel de integración	36
3.2.3.3. Características	36
3.2.4. Etapas de madurez	37
3.2.5. Aplicación y campos de actuación	38
3.2.5.1. Salud	39
3.2.5.2. Construcción	40
3.2.5.3. Aeroespacial	41
3.2.5.4. Industria	44
3.2.6. Plataformas para la creación de Gemelos digitales	45
3.2.6.1. Q Bio Gemini	45
3.2.6.2. Autodesk Tandem	46
3.2.6.3. Simulink	47
3.2.6.4. CupCarbon	48
3.2.6.5. MindSphere	48
3.2.6.6. Watson IoT Platform	49
3.2.6.7. Azure Digital Twins	49

<b>3.3. Vehículos aéreos no tripulados</b> .....	<b>50</b>
3.3.1. Contexto y motivación .....	50
3.3.2. Definición y concepto.....	51
3.3.3. Relación existente entre drones e IoT .....	52
3.3.4. Tecnologías y componentes .....	52
3.3.4.1. Estructura y diseño .....	52
3.3.4.2. Tecnologías de comunicación inalámbrica .....	55
3.3.5. Registro de vuelo.....	58
3.3.6. Normativa de drones civiles en España.....	60
<b>4. MICROSOFT AZURE</b> .....	<b>64</b>
<b>4.1. Introducción</b> .....	<b>64</b>
<b>4.2. Funcionamiento de la nube de Azure</b> .....	<b>64</b>
<b>4.3. Beneficios y criterio de selección</b> .....	<b>67</b>
<b>4.4. Azure Digital Twins</b> .....	<b>68</b>
4.4.1. Conceptos fundamentales .....	68
4.4.2. Arquitectura .....	68
4.4.3. Digital Twins Definition Language .....	70
4.4.4. Integración con servicios de Azure .....	73
<b>5. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN</b> .....	<b>78</b>
<b>5.1. Descripción del Gemelo Digital por desarrollar</b> .....	<b>78</b>
<b>5.2. Estrategia y desarrollo</b> .....	<b>79</b>
5.2.1. Arquitectura adoptada y tecnologías implicadas .....	79
5.2.2. Grupos de recursos y recursos .....	80
5.2.3. Definición de los modelos y gemelos digitales .....	81
5.2.4. Transferencia de datos a Azure IoT Hub.....	86
5.2.5. Ingesta de datos en Azure Digital Twin .....	95
5.2.6. Modelado en 3D .....	100
5.2.7. Asignación de gemelos digitales al modelo 3D .....	101
<b>6. RESULTADOS</b> .....	<b>106</b>
6.1.1. Escenario en condiciones normales de vuelo .....	106
6.1.2. Escenario en condiciones de vuelo adversas .....	109
<b>7. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE DESARROLLO</b> .....	<b>112</b>
<b>8. BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>114</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Esquema simplificado del sistema desarrollado.....	18
Figura 3.1. Interacción entre componentes del IoT [3]. .....	27
Figura 3.2. Protocolos de comunicación orientados al IoT [4]. .....	28
Figura 3.3. Tipos de sensores IoT [13]. .....	31
Figura 3.4. Arquitectura del DT [19]. .....	34
Figura 3.5. Etapas de madurez de un DT [22]. .....	38
Figura 3.6. Ejemplo de DT de imagen cerebral [24]. .....	39
Figura 3.7. DT de un corazón realizado por la empresa Philips Healthcare [25]. .....	40
Figura 3.8. Componentes esenciales para la creación de un DT orientado al sector de la construcción [27]. .....	41
Figura 3.9. DT en el marco IVHM [28]. .....	43
Figura 3.10. DT de una línea de producción realizado con el software Factory IO. ....	44
Figura 3.11. DT de un ser humano creado mediante la plataforma Q Bio Gemini. ....	45
Figura 3.12. DT de un bloque de edificios creado mediante la plataforma Autodesk Tandem [32]. .....	46
Figura 3.13. DT orientado a la industria oleícola creado mediante la plataforma Simulink [33]. .....	47
Figura 3.14. DT de un alumbrado inteligente creado mediante la plataforma CupCarbon [34]. .....	48
Figura 3.15. DT de una estación espacial creado mediante la plataforma Azure Digital Twins. ....	50
Figura 3.16. Munición merodeadora del Ejército de Tierra Español [40]. .....	51
Figura 3.17. Tipos de disposición del sistema de hélices en drones [38]. .....	53
Figura 3.18. Resumen de tecnologías inalámbricas para el despliegue de FANETs [43]. ..	56
Figura 3.19. Registro de vuelo: 09-05-2020, 15:36:27h, visualizado en la plataforma AIRDATA UAV. ....	59
Figura 3.20. Detalle de las condiciones medioambientales del registro de vuelo: 09-05-2020, 15:36:27h. ....	60
Figura 3.21. Detalle del registro de vuelo: 09-05-2020, 15:36:27h. ....	60
Figura 3.22. Mapa aéreo de Linares. ....	62
Figura 3.23. Información sobre zonas no permitidas y zonas restringidas al vuelo fotográfico en Linares. ....	62
Figura 4.1. Grupo de recursos denominado “ADT-dron” en el que se encuentran dos recursos: “ADT-dron-aasn0001” y “ADT-dron-aasn0001-IoTHub” .....	65
Figura 4.2. Nivel de abstracción conseguido en función del servicio adoptado [51]. ....	66
Figura 4.3. Arquitectura adoptada por una solución IoT en el entorno de Azure [52]. ....	69
Figura 4.4. Ejemplo de la propiedad ID, en un modelo de DTDL, de un elemento Home [57]. .....	71
Figura 4.5. Ejemplo de telemetría, en un modelo DTDL, de la temperatura de un sensor [57]. .....	71
Figura 4.6. Ejemplo de relación existente, en un modelo DTDL, entre el modelo Home conectado a el modelo Floor [57]. .....	72
Figura 4.7. Ejemplo de un componente termostato, en un modelo DTDL, utilizado por el modelo Room [57]. .....	73

Figura 4.8. Ejemplo de DT de la cadena de suministro de una fábrica con Azure Maps [22].	75
Figura 4.9. Visualización de una fábrica junto con una aplicación independiente en 3D Scenes Studio [58].	76
Figura 5.1. Arquitectura y tecnologías implicadas.	80
Figura 5.2. Creación de un nuevo grupo de recursos denominado "ADT-dron", además de un nuevo recurso de ADT llamado "ADT-dron-aasn0001".	80
Figura 5.3. Grafo obtenido en Azure Digital Twin Explorer.	83
Figura 5.4. Creación manual de un DT "Altitude".	84
Figura 5.5. Creación de DTs a partir de archivo en formato .csv.	84
Figura 5.6. Grafo de DTs generado.	85
Figura 5.7. Valor inicial de la propiedad "Altitude".	86
Figura 5.8. Creación de un nuevo recurso de Azure IoT Hub llamado "ADT-dron-aasn0001-IoTHub".	86
Figura 5.9. Niveles disponibles para el servicio Azure IoT Hub.	87
Figura 5.10. Creación del dispositivo virtual "Speed".	87
Figura 5.11. Fragmento del apartado "Dispositivos" de Azure IoT Hub.	88
Figura 5.12. Definición de la directiva de acceso compartido "iothubowner".	88
Figura 5.13. Conexión al centro de datos "ADT-dron-aasn0001-IoTHub" mediante Azure IoT Explorer.	89
Figura 5.14. Creación de una SAS para el dispositivo "Latitude".	89
Figura 5.15. Consola del cliente MQTT tras la publicación de 2 parámetros para el dispositivo "Latitude".	91
Figura 5.16. Lectura de dos eventos recibidos por el dispositivo "Latitude" a través de Azure IoT Explorer.	92
Figura 5.17. Representaciones gráficas obtenidas en el recurso "ADT-dron-aasn0001-IoTHub".	92
Figura 5.18. Mensaje enviado al dispositivo cliente "temperature".	94
Figura 5.19. Mensaje recibido en el dispositivo cliente "temperature".	94
Figura 5.20. Publicación de la función en el grupo de recursos "ADT-dron".	97
Figura 5.21. Asignación del rol "Propietario de datos de ADT" al grupo de recursos "ADT-dron".	97
Figura 5.22. Creación de una nueva configuración de aplicación "ADT_SERVICE_URL".	98
Figura 5.23. Creación de la suscripción de eventos "adt-event-subscription".	98
Figura 5.24. Referencia a la Azure Function "IOTHubtoTwins".	99
Figura 5.25. Eventos generados por el dispositivo "Latitude".	99
Figura 5.26. Supervisión de los datos enviados por la función a ADT.	99
Figura 5.27. DT "Latitude" actualizado.	100
Figura 5.28. Modelo 3D de un DJI Mavic 2 Pro facilitado por la plataforma Sketchfab.	100
Figura 5.29. Detalle del motor 3 con sus respectivos sensores.	101
Figura 5.30. Creación de un nuevo contenedor dentro de la cuenta de almacenamiento "aasn0001cloudshell".	101
Figura 5.31. Definición del contenedor "contenedoraasn0001".	102
Figura 5.32. Configuración de la nueva escena.	102
Figura 5.33. Creación de la nueva escena.	102
Figura 5.34. Vista del globo terráqueo en el que se localiza la escena "Dron".	103
Figura 5.35. Modelo en 3D que representa la escena "Dron".	103

Figura 5.36. Complementos disponibles en Azure 3D Scenes Studio. ....	104
Figura 5.37. Condición especificada en la regla visual definida en el elemento “Peso”..	105
Figura 6.1. Procedimiento seguido para actualizar el valor del DT “Temperature”.....	106
Figura 6.2. Escenario en condiciones normales de vuelo. ....	107
Figura 6.3. Estado de las propiedades en condiciones normales de vuelo. ....	108
Figura 6.4. Escenario en condiciones de vuelo adversas.....	110
Figura 6.5. Estado de las propiedades en condiciones de vuelo adversas.....	111

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Campos de una interfaz de modelo. ....	70
Tabla 2. Elementos del DT, incluyendo sus Propiedades y Datos Telemétricos asociados. .....	78
Tabla 3. Especificaciones técnicas del DJI Mavic 2 Pro. ....	79
Tabla 4. Propiedades y valores asociados en condiciones normales de vuelo. ....	107
Tabla 5. Propiedades y valores asociados en condiciones de vuelo adversas. ....	109

## ACRÓNIMOS

<b>TFG</b>	Trabajo Fin de Grado
<b>IoT</b>	Internet of Things
<b>DT</b>	Digital Twin
<b>UAV</b>	Unmanned Aerial Vehicle
<b>IIoT</b>	Industrial Internet of Things
<b>ML</b>	Machine Learning
<b>AI</b>	Artificial Intelligence
<b>DTI</b>	Digital Twin Instance
<b>DTP</b>	Digital Twin Prototype
<b>CAD</b>	Computer Aided Desings
<b>BOM</b>	Bills Of Materials
<b>PDT</b>	Performance Digital Twin
<b>M2M</b>	Machine-to-Machine
<b>TNSA</b>	Things with networked sensors and actuators
<b>RI-PD-S</b>	Raw information and processed data stores
<b>ACE</b>	Analytical and computing engines
<b>LPWAN</b>	Low Power Wide Area Network
<b>UNB</b>	Ultra Narrow Band
<b>IETF</b>	Internet Engineering Task Force
<b>IP</b>	Internet Protocol
<b>P2P</b>	Peer-to-Peer
<b>DL</b>	Deep Learning
<b>BIM</b>	Building Information Modeling
<b>WSN</b>	Wireless Sensor Network
<b>IVHM</b>	Integrated Vehicle Health Management
<b>CPS</b>	Cyber-Physical Systems
<b>ICT</b>	Information and Communication Technologies

<b>AEC</b>	Architecture, Engineering and Construction
<b>ADT</b>	Azure Digital Twins
<b>VTOL</b>	Vertical Take-Off and Landing
<b>AR</b>	Augmented Reality
<b>UAS</b>	Unmanned Aerial System
<b>IoD</b>	Internet of Drones
<b>RPA</b>	Remotely Piloted Aircraft
<b>ESC</b>	Electronic Stability Control
<b>RPM</b>	Revolutions Per Minute
<b>PWM</b>	Pulse-Width Modulation
<b>I2C</b>	Inter-Integrated Circuit
<b>FANET</b>	Flying Ad-Hoc Networks
<b>WLAN</b>	Wireless Local Area Network)
<b>QoS</b>	Quality of Service
<b>AESA</b>	Agencia Estatal de Seguridad Aérea
<b>RE</b>	Reglamento Europeo
<b>RD</b>	Real Decreto
<b>IaaS</b>	Infraestructure as a Service
<b>PaaS</b>	Platform as a Service
<b>SaaS</b>	Software as a Service
<b>VM</b>	Virtual Machine
<b>API</b>	Application Programming Interface
<b>JSON-LD</b>	JavaScript Object Notation for Linked Data
<b>DTD</b>	Digital Twins Definition Language
<b>JSON</b>	JavaScript Object Notation
<b>SDK</b>	Software Development Kit
<b>SAS</b>	Shared Access Signature
<b>C2D</b>	Cloud to Device

## RESUMEN

En este Trabajo Fin de Grado (TFG) se llevará a cabo un estudio sobre la tecnología de Gemelos Digitales (DT, del inglés *Digital Twin*), con un enfoque dirigido a su aplicación en el contexto del Internet de las Cosas (IoT, del inglés *Internet of Things*). Asimismo, se analizarán los protocolos y sensores utilizados actualmente en este ámbito para poder comprender las tecnologías subyacentes.

Además, se plantea realizar el diseño, la implementación y la evaluación de un DT orientado al IoT. En concreto, se ha optado por el desarrollo de un DT de un Vehículo Aéreo No Tripulado (UAV, del inglés *Unmanned Aerial Vehicle*). Antes de proceder con su desarrollo, se realizará una revisión de las distintas plataformas que permiten la creación de DT, permitiendo evaluar las características y capacidades de cada una de ellas con el propósito de seleccionar aquella que mejor se adecue y esté en consonancia con los objetivos y el alcance de este TFG.

## **ABSTRACT**

In this project, a study on DT technology will be conducted, with a focus on its application in the context of the IoT. Additionally, the protocols and sensors currently used in this field will be analyzed to gain an understanding of the underlying technologies.

Furthermore, the design, implementation, and evaluation of a DT oriented towards IoT will be proposed. Specifically, the development of a DT for an UAV has been chosen. Before proceeding with its development, a review of various platforms that enable the creation of DT will be conducted, allowing for the assessment of the features and capabilities of each one, being able to select the platform that best suits and aligns with the objectives and scope of this project.



# 1. INTRODUCCIÓN

En este TFG se ha investigado sobre el estado actual de conocimiento e implementación de la tecnología de DTs, centrándose específicamente en su aplicación con el IoT. Para ello, se han examinado distintos ejemplos destacados que demuestran el valor de los DTs en el panorama tecnológico actual. Además se ha realizado un estudio sobre los distintos protocolos de comunicación y sensores que actualmente son aplicados en el IoT.

Una vez que se haya profundizado sobre ambos conceptos, se propone el diseño y el desarrollo de un DT orientado al IoT. En este punto, es necesario determinar un caso práctico en el que se ponga de manifiesto las ventajas que ofrece la implementación de estos. Al abordar distintas opciones, se opta por implementar un DT para un dispositivo IoT que cuenta con sensores que permiten recopilar y transmitir datos de una maniobra realizada con un UAV.



*Figura 1.1. Esquema simplificado del sistema desarrollado.*

Con este caso, lo que se pretende es que estos DTs formen un panel de control en el que se pueda determinar si el funcionamiento del UAV es correcto o no a partir de los datos telemétricos obtenidos. De esta forma, es posible determinar y visualizar el comportamiento en tiempo real del dispositivo, velando por la salud e integridad de este.

Una vez que ha sido finalizado su desarrollo, se plantean dos escenarios en los que se evalúa si el gemelo representa fielmente a su homólogo físico. En el primer escenario, se insertan datos telemétricos en los que no se dispone de valores anómalos, aunque en el segundo sí que los hay. Es por ello que, al ejecutar el primer escenario, los datos cumplen con las especificaciones técnicas aportadas por el fabricante, mientras que en el segundo escenario, sí que se compromete la integridad del dispositivo. Los DTs permitirán visualizar qué sensores son los que están capturando valores anómalos y qué valores toman estos, facilitando por ello a la toma de decisiones.

Tras finalizar con la etapa de evaluación se determinan las conclusiones finales obtenidas a lo largo de este trabajo, ofreciendo a continuación posibles mejoras de cara a futuras implementaciones y posibles áreas de desarrollo implementando nuevas

tecnologías emergentes que enriquezcan y aumenten las capacidades de las futuras implementaciones de DTs.

A continuación, en este capítulo se expondrán las razones que han impulsado la creación de este TFG, así como sus objetivos, el alcance de este y una descripción de la estructura de la presente memoria, facilitando su lectura y comprensión.

### **1.1. Motivación**

En la actualidad, el IoT está revolucionando la forma con la que interactuamos con el mundo que nos rodea. La interconexión de dispositivos y objetos cotidianos, los cuales disponen de capacidad de comunicación y recopilación de datos, han abierto un abanico de posibilidades en diversos sectores.

La creación y aplicación de DT ha demostrado ser una tecnología revolucionaria con un impacto significativo en múltiples escenarios, yendo desde el sector industrial hasta la salud y la logística, demostrando ser una herramienta con capacidad de mejorar la eficiencia, optimizar procesos y ayudar en la toma de decisiones.

En el panorama actual, los UAV han adquirido un destacado protagonismo, impulsados por su creciente y diversificado uso en una amplia gama de sectores. Su aplicación abarca desde la agricultura y la cartografía hasta la logística, el rescate e incluso aplicaciones militares, lo cual demanda cada vez más la necesidad de asegurar su óptimo funcionamiento. En esta coyuntura, emerge la convergencia con los DTs, los cuales permiten la supervisión, gestión e incluso simulación en tiempo real de estos dispositivos, permitiendo la anticipación a posibles escenarios, la detección de fallos y la optimización de su eficiencia y durabilidad aplicando técnicas computacionales.

### **1.2. Objetivos del presente Trabajo Fin de Grado**

A continuación se presentan los objetivos que se deben cumplir con el presente trabajo fin de grado.

- Estudio de la tecnología de gemelos digitales.
- Estudio de plataformas para creación de gemelos digitales.
- Estudio de la aplicación de gemelos digitales a IoT.
- Estudio de protocolos y sensores para IoT.
- Diseño e implementación de un gemelo digital para IoT.

- Realizar pruebas de funcionamiento para evaluar el modelo.

### 1.3. Alcance

Dado que el DT propuesto es una representación virtual de un UAV, su finalidad será la de supervisar el funcionamiento de este. Esto se logra mediante el DT, que actúa como un panel de control que posibilita la visualización en tiempo real de los datos recopilados por los múltiples sensores incorporados en él.

### 1.4. Antecedentes

A pesar de que actualmente se han conseguido realizar implementaciones integrales de DTs, principalmente en el ámbito del Internet Industrial de las Cosas (IIoT, del inglés *Industrial Internet of Things*), no existen precedentes de DTs relacionados con UAVs debido a su reciente aparición. No obstante, sí que es posible encontrar numerosos artículos y publicaciones que subrayan la importancia de los DTs en este ámbito.

Entre ellos, es importante destacar que en la actualidad existen diversas iniciativas de carácter público y privado, incluso algunas con envergadura militar, inmersas en investigaciones y desarrollos de DTs específicamente diseñados para UAVs y otros dispositivos desarrollados por la industria armamentística.

### 1.5. Estructura del Trabajo Fin de Grado

En este subapartado se detallará la estructura de la presente memoria, la cual consta de un total de 8 capítulos, donde uno de los cuales incluye la bibliografía consultada. Este último tiene como objetivo brindar al lector conocimientos complementarios y la posibilidad de acceder a información adicional que contribuyó de forma positiva con la elaboración de este trabajo.

A continuación, se presenta un resumen de los contenidos que se abordarán en cada uno de los capítulos.

- **Capítulo 1:** Introducción. En este capítulo se contemplan los alicientes que han dado origen a la concepción de este trabajo, así como el objeto y el alcance de este, presentando además los antecedentes previos.
- **Capítulo 2:** Estado del arte. En este capítulo se comentan y explican algunos ejemplos de DTs existentes relacionados con el IoT en la actualidad.

- **Capítulo 3:** Revisión de las tecnologías implicadas. Bajo este capítulo se procederá a realizar una exploración de las tecnologías empleadas en este TFG. Inicialmente, se llevará a cabo un análisis del IoT comenzando por su definición, arquitectura y los protocolos y sensores usados en la actualidad.

Posteriormente, se abordarán los avances hasta la fecha en lo que respecta a DTs, junto con sus características principales. Se examinarán las etapas de madurez, su clasificación, algunas de sus aplicaciones y las plataformas disponibles para su concepción y desarrollo.

Por último, se realizará un análisis detallado de las tecnologías y componentes que forman los UAVs contemporáneos, examinando su estructura y prestando particular atención a elementos esenciales como los registros de vuelo, además de analizar la normativa vigente que regula el uso de drones civiles en España.

- **Capítulo 4:** Microsoft Azure. Capítulo en el que se profundiza información sobre la plataforma seleccionada para la creación de DTs. A su vez, se expondrán las razones que justifican su elección.

Por otra parte, se realiza un análisis del lenguaje esencial para la definición de DTs en esta plataforma, al mismo tiempo que se detallan varios de los servicios proporcionados por Microsoft Azure que contribuyen significativamente a la ampliación y enriquecimiento de la definición del modelo.

- **Capítulo 5:** Diseño e implementación. Una vez que han sido expuestos todos los conceptos esenciales, se procede a dar inicio al proceso de diseño e implementación del DT en cuestión. En primer lugar, se describen las necesidades que el DT debe satisfacer, para luego abordar su proceso de diseño e implementación.

- **Capítulo 6:** Resultados. Al finalizar el capítulo anterior, se procede a evaluar el desempeño de este, presentando los resultados obtenidos, esenciales para la elaboración del capítulo de conclusiones y líneas futuras.

- **Capítulo 7:** Conclusiones y líneas futuras de desarrollo. Para finalizar con la ejecución de este TFG, se resumen los hallazgos y resultados clave derivados de todo el proceso de análisis, diseño, implementación y evaluación del DT.

Finalmente, se trasciende hacia horizontes prospectivos al identificar áreas de mejora, sustentados en los conocimientos y resultados adquiridos. Además, se vislumbra la posibilidad de incursionar en nuevas dimensiones mediante la incorporación de tecnologías emergentes.

## 2. ESTADO DEL ARTE

En los últimos años, la tecnología de DTs ha experimentado un rápido avance y se ha convertido en una herramienta crucial en una amplia gama de sectores. En este capítulo, se explorará el estado actual de esta tecnología analizando algunas de las implementaciones realizadas hasta la fecha.

Uno de los motivos por los que los DTs han tomado relevancia y despertado gran interés es por su capacidad de adaptación ya que estos pueden ser aplicados a una amplia variedad de aplicaciones. Entre ellas, hoy en día se han conseguido implementar DTs en el sector industrial [29], en el sector sanitario [24, 25], en la construcción [27], entre otros.

En cuanto a su aplicación relacionada con el IoT, existen numerosas implementaciones en las que se utilizan DTs. A continuación se presentan algunos ejemplos destacados de implementaciones de DTs relacionados con el IoT:

- Edificios y ciudades inteligentes [23, 26]: en el ámbito de las ciudades inteligentes y la gestión de edificios, los DTs se utilizan para optimizar la eficiencia energética y mejorar la calidad de vida de los residentes. Los sensores IoT recopilan datos sobre la temperatura, la iluminación, el tráfico y otros aspectos. Estos datos se utilizan para crear DTs de edificios y de ciudades enteras, lo cual permite a los administradores urbanos simular y optimizar el uso de recursos, mejorar el tráfico y tomar decisiones informadas sobre el desarrollo urbano.
- Agricultura de precisión [28]: los sensores recopilan datos sobre el suelo, el clima y las condiciones de cultivo en el campo. Estos datos se utilizan para crear DTs de parcelas agrícolas que permiten a los agricultores optimizar la irrigación, la fertilización y el control de plagas. Esto no solo aumenta la eficiencia de la producción agrícola, sino que también reduce el consumo de recursos.
- Gestión de residuos y reciclaje [23, 29]: los sensores en los contenedores de basura recopilan datos sobre el nivel de llenado y la composición de los residuos. Los DTs de gestión de residuos permiten a las autoridades municipales planificar rutas de recolección más eficientes y optimizar los procesos de reciclaje.
- Logística y cadena de suministro [23, 26, 28, 29]: los DTs habilitados se utilizan para optimizar la planificación y el seguimiento. Los sensores en los vehículos y los almacenes recopilan datos sobre la ubicación y el estado de los productos en tránsito. Estos datos se utilizan para crear DTs de la cadena de suministro, lo cual

permite a las empresas rastrear el movimiento de productos, predecir problemas logísticos y tomar medidas correctivas.

- Minería y extracción de recursos [28]: se utilizan para monitorizar la seguridad de las operaciones y la salud de los trabajadores. Los sensores en las minas recopilan datos sobre la calidad del aire, la concentración de gases tóxicos y la ubicación de los trabajadores. Los DTs permiten a las empresas mineras tomar medidas preventivas para garantizar la seguridad de sus empleados y optimizar la producción.
- Mantenimiento de aeronaves [29, 30]: los DTs se utilizan en la aviación para el mantenimiento predictivo de aeronaves. Sensores integrados en las aeronaves recopilan datos en tiempo real sobre el rendimiento de los motores, la presión del aire, la temperatura y otros parámetros críticos. Estos datos se utilizan para crear DTs de la aeronave, lo que permite a las aerolíneas anticipar y abordar problemas mecánicos antes de que se conviertan en costosas interrupciones de vuelo. Esto mejora la seguridad y la eficiencia operativa.
- Gestión de flotas de vehículos [28]: utilizados para rastrear y optimizar la operación de vehículos comerciales. Los sensores en los vehículos proporcionan información sobre la ubicación, la velocidad, el consumo de combustible y el estado mecánico. Los DTs de flotas permiten a las empresas de transporte planificar rutas más eficientes, optimizar el mantenimiento preventivo y aumentar la seguridad de los conductores.

Estos son solo algunos de los ejemplos de la amplia variedad de DTs implementados en la actualidad, de los que a partir de estos surgen muchos otros.

## 3. REVISIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS IMPLICADAS

### 3.1. Internet de las Cosas

El término "IoT" se ha vuelto ampliamente reconocido en los últimos años, a pesar de que surgió por primera vez en 1999 [1]. Su evolución ha sido tal que actualmente se aplica en una amplia gama de áreas, desde las menos complejas hasta las más avanzadas, lo que ha llevado a un pronóstico de crecimiento significativo en la inversión en soluciones IoT durante los primeros años.

#### 3.1.1. Definición

Actualmente existen millones de dispositivos conectados a la red mundial. La necesidad de procesar y fusionar los datos generados por los dispositivos interconectados, así como su almacenamiento en una única red masiva, provocan la aparición del IoT.

IoT, es un término referido a la inmensa red interconectada de dispositivos electrónicos, como bien pueden ser sensores, que intercambian grandes cantidades de datos a gran velocidad. La interconexión entre estos dispositivos se consigue a través de la comunicación entre máquinas (M2M, del inglés *Machine-to-Machine*), siendo esta una forma estandarizada para que varias máquinas que realizan distintas operaciones puedan comunicarse e intercambiar rápidamente información a escala global. M2M actúa como un intermediario, proporcionando una capa de extremo a extremo para que las máquinas se comuniquen con una red global sin necesidad de la interacción humana [2].

#### 3.1.2. Arquitectura y componentes

En IoT, cada objeto se identifica como un nodo los cuales se conectan entre sí a través de una red. Este sistema permite compartir información, tanto enviándola como recibéndola. Los nodos están equipados con elementos de detección, microcontroladores, elementos de comunicación y recuperación de información, y un protocolo apto [3].

La arquitectura del IoT puede variar dependiendo de la aplicación específica a cubrir. No obstante, es posible explicar una arquitectura general utilizando el concepto de "bloques de construcción". Estos bloques de construcción se dividen en cuatro categorías: "Dispositivos IoT" (o "Cosas"), "Pasarelas", "Infraestructura de Red" e "Infraestructura de Nube" [3].

- **Dispositivos IoT:** elementos fundamentales en esta arquitectura, referidos a los diversos objetos, sensores o actuadores que se integran en el sistema para capturar datos del entorno o realizar acciones específicas sin la necesidad de la actuación humana. Estos dispositivos pueden estar presentes en una amplia gama de aplicaciones, desde hogares inteligentes hasta entornos industriales.
- **Pasarelas:** Actúan como intermediarios entre los dispositivos IoT y la infraestructura de red o nube. Su función principal es recopilar, procesar y transmitir los datos recolectados por los dispositivos hacia la siguiente etapa del flujo de información.
- **Infraestructura de Red:** estructura de comunicación que conecta los dispositivos IoT y las pasarelas a la nube. Esta infraestructura puede estar compuesta por tecnologías de red inalámbricas o cableadas, como Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee o redes móviles, dependiendo de los requisitos específicos de la aplicación.
- **Infraestructura de Nube:** aquí es donde se almacenan y procesan los datos recopilados por los dispositivos IoT y gestionados por las pasarelas. La nube proporciona una plataforma escalable y flexible para realizar análisis avanzados, aplicar algoritmos de aprendizaje automático y brindar servicios a los usuarios finales.

Con el propósito de simplificar la comprensión de la implementación del IoT y el flujo del proceso, los mencionados cuatro bloques anteriores se reagrupan en tres componentes fundamentales [3]:

- **Cosas con Sensores y Actuadores de Red (TNSA, del inglés *Things with networked sensors and actuators*):** este componente abarca los dispositivos IoT, que incluyen una variedad de objetos equipados con sensores y actuadores conectados en red. Los sensores recopilan datos del entorno y los actuadores permiten la ejecución de acciones específicas. Estos dispositivos inteligentes pueden ser desde sensores ambientales hasta máquinas industriales, y son esenciales para capturar y transmitir información al siguiente nivel del proceso.
- **Almacenes de Información Bruta y Datos Procesados (RI-PD-S, del inglés *Raw information and processed data stores*):** componente donde se gestionan los datos recopilados por los dispositivos IoT y se almacenan tanto en su forma original como en su versión procesada. Esta componente comprende los repositorios de datos que permiten el almacenamiento seguro y eficiente de la

información, tanto en su estado crudo como después de ser sometida a procesos de análisis y transformación.

- **Motores Analíticos e Informáticos** (ACE, del inglés *Analytical and computing engines*): el último componente esencial del IoT abarca los motores analíticos e informáticos que facilitan la interacción humano-máquina. Aquí es donde se lleva a cabo el análisis y procesamiento de los datos almacenados en busca de patrones, tendencias o información relevante. Los algoritmos de aprendizaje automático (ML, del inglés *Machine Learning*) y otras técnicas analíticas se aplican para extraer conocimientos valiosos y tomar decisiones inteligentes basadas en la información recopilada.

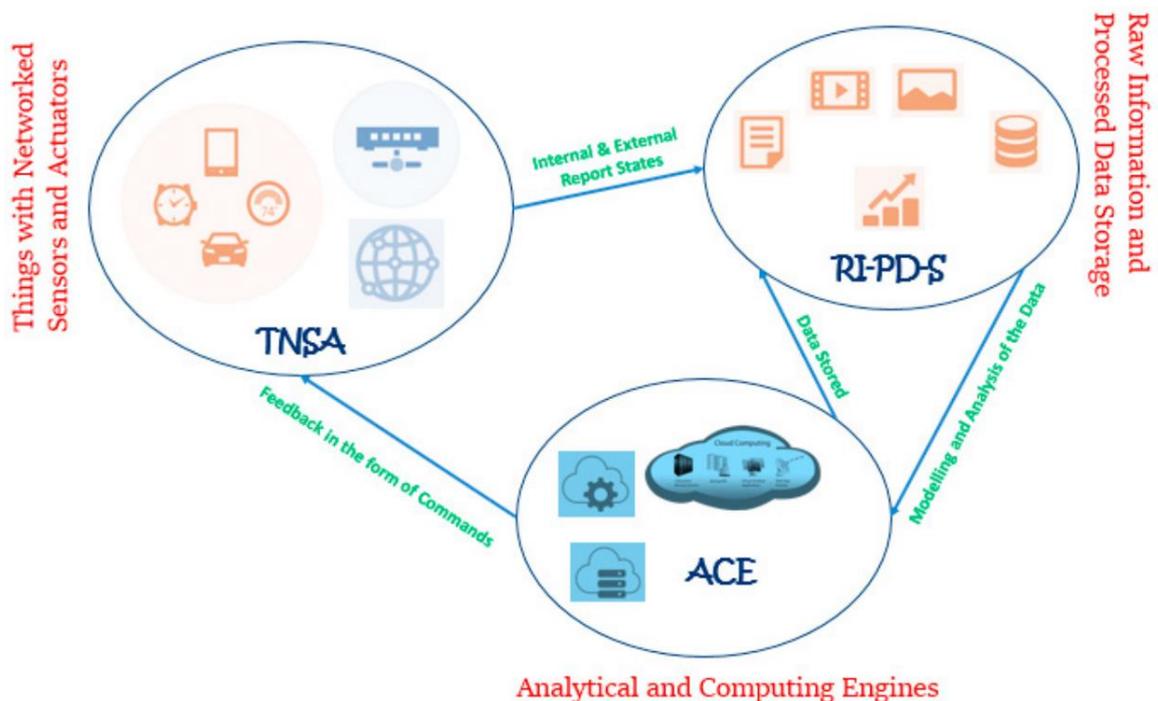


Figura 3.1. Interacción entre componentes del IoT [3].

El proceso de interacción comienza en el lado de TNSA donde se detecta información detallada de acuerdo con los requisitos del usuario. A continuación, la información detectada es almacenada en el segundo componente del IoT, el RI-PD-S. Esta interacción se logra mediante el envío de estados de informe y el almacenamiento de datos en diversos formatos, como texto, vídeos, imágenes, entre otros.

El tercer componente es el ACE, donde la información almacenada es sometida a un análisis lógico y se toman decisiones apropiadas utilizando numerosos modelos. Gracias a él es posible el aprendizaje interactivo entre humanos y máquinas, además del análisis basado en la nube y en servidores.

### 3.1.3. Protocolos y sensores utilizados

#### 3.1.3.1. Protocolos de comunicación

A continuación, se presentan algunos de los protocolos de comunicación ampliamente utilizados en la implementación de redes inalámbricas orientadas al IoT [4]. Estos protocolos pueden clasificarse en dos categorías distintas: redes de baja potencia y área extensa (LPWAN, del inglés *Low Power Wide Area Network*) y redes de corto alcance.

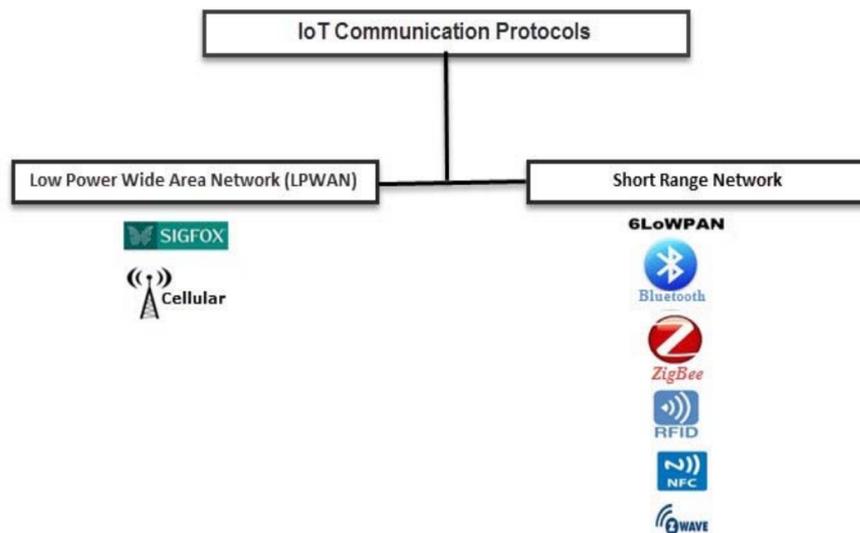


Figura 3.2. Protocolos de comunicación orientados al IoT [4].

Dentro de LPWAN se ubican los siguientes protocolos de comunicación:

- **SigFox [4, 5]:** tecnología de baja potencia para la comunicación inalámbrica de diversos objetos de baja energía, como sensores y aplicaciones M2M. Permite el transporte de pequeñas cantidades de datos en distancias de hasta 50 kilómetros. SigFox utiliza la tecnología de Banda Ultra Estrecha (UNB, del inglés *Ultra Narrow Band*). Esta tecnología está diseñada específicamente para manejar velocidades de transferencia de datos bajas, de 10 a 1.000 bits por segundo, y puede funcionar con una pequeña batería.
- **Cellular [4, 6]:** la tecnología celular es ideal para aplicaciones que requieren un alto rendimiento de datos y cuentan con una fuente de energía para la operación del IoT en distancias más largas. Puede aprovechar las capacidades de comunicación celular GSM/3G/4G para ofrecer una conectividad confiable y de alta velocidad a Internet. Sin embargo, esta tecnología conlleva un alto consumo de energía, por lo que no es adecuada para la comunicación M2M o redes locales.

Por otra parte, para redes de corto alcance:

- **6LoWPAN [4, 7]:** estándar más utilizado en protocolos de comunicación orientados al IoT puesto que se trata de un protocolo de interconexión basado en IP. Puede conectarse directamente con otra red IP sin necesidad de entidades intermedias como pasarelas de traducción o proxies. Ha sido creado por el Grupo de Trabajo de Ingeniería de Internet (IETF, del inglés *Internet Engineering Task Force*) y permite la comunicación del Protocolo de Internet (IP, del inglés *Internet Protocol*) sobre redes inalámbricas de baja potencia IEEE 802.15.4 utilizando IPv6. Además, es un protocolo de bajo consumo de energía aunque ofrece un ancho de banda reducido.
- **Zigbee [4, 8]:** protocolo de comunicación basado en el estándar de redes inalámbricas de baja potencia IEEE 802.15.4. Fue concebido para ser un estándar adecuado para protocolos de comunicación de bajo costo de alto nivel, creando redes de área personal a partir de radios digitales de bajo consumo y tamaño reducido que transmiten datos a distancias más largas.

Es utilizado en aplicaciones que requieren una velocidad de datos baja, una mayor duración de la batería y dispositivos de redes seguras. Soporta diferentes tipos de topología de red, como la topología en malla, estrella y árbol.

Actualmente es la alternativa más competitiva junto con el protocolo de comunicación 6LoWPAN.

- **BLE [4, 9]:** conocido como Bluetooth inteligente. Está diseñado y optimizado para distancias cortas, baja capacidad de ancho de banda y baja latencia en aplicaciones de IoT. Las ventajas que ofrece BLE en comparación con Bluetooth clásico incluyen un menor consumo de energía, un tiempo de configuración más reducido y la posibilidad de soportar una topología de red en estrella con un número ilimitado de nodos.
- **NFC [4, 10]:** tecnología de comunicación inalámbrica de corto alcance que permite la transmisión de datos entre dispositivos mediante el simple acto de tocarlos o acercarlos a pocos centímetros de distancia.

Cuenta con una etiqueta que puede contener una pequeña cantidad de datos. Esta etiqueta puede ser de solo lectura o puede ser reescribible y modificada posteriormente por el dispositivo, existiendo tres modos principales de operación: modo de emulación de tarjeta (modo pasivo), modo de lector/escrito (modo activo) y modo punto a punto (P2P, del inglés *Peer-to-Peer*).

- **HTTP [11]:** protocolo de mensajería web, originalmente desarrollado por Tim Berners-Lee y posteriormente por IETF y W3C de manera conjunta. Fue publicado por primera vez como un protocolo estándar en 1997 y se basa en la arquitectura de solicitud/respuesta en la web. Su uso es similar al protocolo CoAP, comentado a continuación, puesto que en lugar de temas para la comunicación como utiliza MQTT, el servidor envía datos a través de identificadores de recurso universales, recibiendo el cliente estos datos en identificadores particulares.

HTTP utiliza TCP como protocolo de transporte predeterminado y TLS/SSL para la seguridad, por lo que la comunicación entre cliente y servidor es de tipo orientada a la conexión. HTTP no define explícitamente la calidad de servicio y requiere soporte adicional para ello. Ofrece características como conexiones persistentes, canalización de solicitudes y codificación de transferencia segmentada.

Aun pudiendo hacer esta clasificación, existen protocolos que no están categorizados ni dentro de LPWAN ni dentro de redes de corto alcance. Este es el caso del protocolo de comunicación MQTT, el cual será el protocolo de comunicación utilizado en este TFG [12].

- **MQTT [12]:** protocolo de mensajería y publicación estandarizado por IBM en 1999. Su diseño está orientado a facilitar las comunicaciones entre dispositivos IoT y la nube o servidores, especialmente en situaciones donde la red puede presentar un alto retardo y un ancho de banda limitado.

La arquitectura típica de MQTT puede dividirse en dos componentes principales: el cliente y el servidor. El cliente es el responsable de establecer la conexión de red con el servidor, así como de publicar mensajes y suscribirse a los temas de interés. También puede desconectarse del servidor cuando estime que sea necesario. Por otro lado, el servidor tiene la función de controlar la distribución de la información y recibir los mensajes del cliente. Además, el servidor filtra y decide las acciones a realizar con los mensajes recibidos.

- **CoAP [11]:** protocolo ligero utilizado para el intercambio de información en el contexto de la comunicación M2M. CoAP admite tanto una arquitectura de solicitud/respuesta como la de recurso/observación, variante de la arquitectura publicación/suscripción.

A diferencia de MQTT, CoAP utiliza identificadores de recurso universal para publicar y suscribirse a recursos específicos. Utiliza UDP como protocolo de

transporte y DTLS para seguridad, por lo que la comunicación se establece a través de datagramas sin conexión, resultando en una menor fiabilidad.

### 3.1.3.2. Sensores

Los sensores son los encargados de detectar cambios físicos o químicos, y tienen la capacidad de comunicarse entre sí sin necesidad de intervención humana. En el contexto de cualquier aplicación IoT, los sensores actúan como el puente que acerca el mundo físico al mundo digital. Dado el gran número de sensores disponibles y la diversidad de aplicaciones que pueden llevarse a cabo, a continuación se presentan únicamente algunos tipos de sensores de interés para este TFG. [13]:

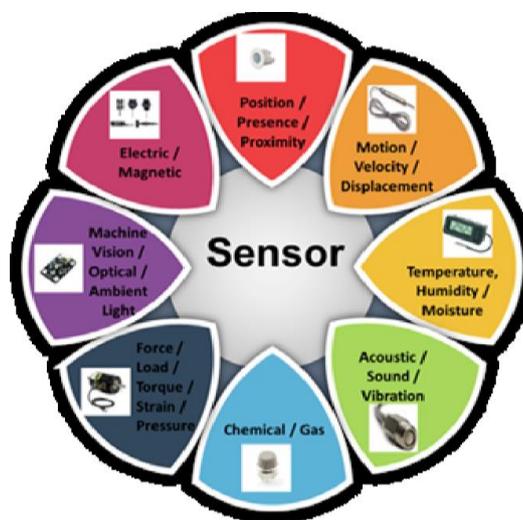


Figura 3.3. Tipos de sensores IoT [13].

- **Sensores de proximidad:** son capaces de detectar la posición de objetos cercanos sin necesidad de contacto físico. Estos sensores emiten radiación electromagnética, como infrarrojo, y detectan la presencia de un objeto al buscar cualquier variación en la señal de retorno. Existen diferentes tipos de sensores de proximidad, como inductivos, capacitivos, ultrasónicos, fotoeléctricos, magnéticos, entre otros, que se enfocan en diferentes aplicaciones.

Tienen diversas áreas de aplicación, como detección de objetos, conteo de elementos, medición de la cantidad de rotación, posicionamiento de objetos, detección de materiales, medición de dirección de movimiento, sensores de estacionamiento, etc.

- **Sensores de posición:** detecta la presencia de personas u objetos en un área específica al percibir su movimiento. Puede utilizarse en seguridad del hogar,

agricultura e incluso para supervisar la posición de pacientes, enfermeras y médicos en un hospital.

- **Sensores de velocidad:** calcula constantemente la posición de un objeto y las variaciones de esta misma en intervalos conocidos. Puede ser lineal o angular. Un sensor de velocidad lineal detecta la velocidad de un objeto a lo largo de una línea recta, mientras que un sensor de velocidad angular detecta la rapidez con la que un dispositivo rota.
- **Sensores de temperatura:** útiles para monitorizar las condiciones ambientales del entorno o detectar cambios físicos en el cuerpo humano a través de la medición de la energía térmica.
- **Sensores de humedad:** medir el contenido de humedad o humedad relativa en el aire o en un determinado ambiente.
- **Sensores de presión:** detecta la cantidad de fuerza ejercida y la convierten en una señal eléctrica que puede ser interpretada para diversos fines. Son ampliamente utilizados en la industria y el sector sanitario por su versatilidad y capacidad para proporcionar información crítica.
- **Sensores giroscópicos:** detectan cualquier inclinación o movimiento angular en un objeto al medir la velocidad angular. Son ampliamente utilizados en juegos de ratón 3D, entrenamiento de deportistas, robótica, automatización industrial y muchas otras aplicaciones.
- **Sensores ópticos:** capaces de detectar energías electromagnéticas como la luz. son adecuados para aplicaciones de IoT relacionadas con la energía, la salud, el medio ambiente, las refinerías de petróleo, la industria química, la industria aeroespacial, etc.
- **Sensores químicos:** responden al detectar cualquier reacción química, sustancia química o un conjunto de productos químicos. Utilizados para la detección de eventos ambientales, condiciones de salud, condiciones agrícolas, etc.

### 3.2. Gemelos digitales

En 1970, a cientos de miles de kilómetros de la Tierra, tres astronautas de la misión Apolo XIII son sorprendidos por una repentina sacudida. Sin posibilidades técnicas para determinar el origen del fallo, la tripulación depende de la intervención de Control de Misión a 330.000 km de distancia para poder encontrar la solución y volver a salvo.

Por aquel entonces, la NASA disponía de 15 simuladores con los que se entrenaba tanto a los astronautas como a los controladores en todas las posibles variantes de la misión [16]. Debido a la emergencia que acechaba al Apolo XIII, Control de Misión tuvo que adaptar y modificar las simulaciones para emular las condiciones reales de la nave averiada con el fin de poder determinar la estrategia necesaria para garantizar la vuelta de los astronautas.

Estos simuladores fueron el primer ejemplo de lo que se conocería más tarde como DT. Sin embargo, fue en el año 2000 cuando Michael Grieves introdujo formalmente el concepto de DT en la industria, mediante la creación de réplicas virtuales de fábricas con el propósito de supervisar procesos, predecir fallos y aumentar la productividad [14].

Esta tecnología, generó un mayor interés y magnitud al haber sido catalogada como una de las 10 principales tendencias tecnológicas en 2017 por Gartner [15], además de ser adoptado por gigantes en la industria como Siemens y General Electric [14].

### **3.2.1. Definición y concepto**

Un DT es una representación virtual precisa y en tiempo real de un producto, servicio o proceso físico, que se emplea a lo largo de todo el ciclo de vida del producto para emular, predecir y optimizar tanto el producto como el sistema de producción, con el objetivo de reducir costes en prototipos y activos físicos [16].

En esencia, un DT es una simulación digital que refleja de manera fidedigna las características y propiedades del ente al que representa, pudiendo utilizar datos recopilados de sensores en tiempo real, registros históricos y otro tipo de datos relevantes que proporcionan una visión completa y detallada de la realidad física [17].

Un DT puede adoptar diferentes niveles de complejidad, según las necesidades específicas. La precisión del modelo digital estará directamente influenciada por la cantidad de datos que sean recopilados.

Algo que une a la mayoría de las definiciones de DT, aparte de ser una representación virtual de un objeto físico, es la transferencia bidireccional o el intercambio de datos entre la contraparte física y la digital, incluyendo datos cuantitativos y cualitativos, datos históricos, datos medioambientales y datos en tiempo real. A partir de todos estos, es posible realizar las siguientes tareas [18]:

- Análisis profundo del del producto, servicio o proceso físico.

- Diseño y validación de entidades nuevos o existentes.
- Análisis y mejora de la fiabilidad del producto, servicio o proceso físico.
- Seguimiento del estado del gemelo físico a lo largo de su vida útil.
- Predicción del rendimiento del gemelo físico.
- Control en tiempo real del gemelo físico.
- Toma de decisiones en cuanto a productividad y aprovechamiento de recursos se refiere.

### 3.2.2. Arquitectura

Existe un marco general para la arquitectura del DT que se compone de tres elementos principales: el mundo físico, el mundo virtual y la conectividad entre ambos.

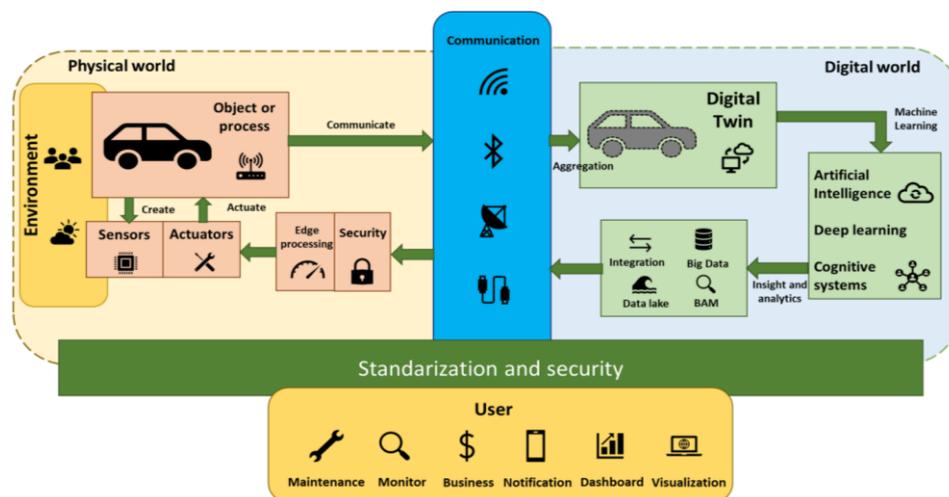


Figura 3.4. Arquitectura del DT [19].

Cada elemento integrará una serie de componentes dependientes de las necesidades y requisitos del diseñador. Sin embargo, algunos componentes básicos incluyen sensores en el mundo físico, gemelos físicos, capacidades de procesamiento de datos (habilitadas por el ML, inteligencia artificial (AI, del inglés *Artificial Intelligence*), big data, etc.), seguridad de los datos, gemelos digitales e interfaces de comunicación como Internet, Bluetooth, satélite, etc. [19].

Existe una conexión intrínseca entre el mundo digital y el mundo físico, la cual se establece mediante elementos de comunicación. En este entorno, los protocolos e interfaces juegan un papel fundamental al actuar como pasarelas, facilitando la interacción entre ambos mundos.

### 3.2.3. Clasificación

Los DT pueden ser clasificados en función del dominio de aplicación [18] y de sus niveles de integración [19]:

#### 3.2.3.1. En función del dominio de aplicación

- **Instancia de Gemelo Digital** (DTI, del inglés *Digital Twin Instance*): se define como un tipo de gemelo que representa fielmente a su contraparte física a lo largo de todo su ciclo de vida. Este concepto implica un seguimiento continuo y exhaustivo del estado del gemelo físico, donde cualquier modificación o evolución que experimente tendrá un efecto directo en el DT.

Es por ello por lo que el DTI se convierte así en un acompañante del producto o proceso desde su concepción inicial y durante toda su vida útil, en el que se realizan pruebas en diferentes escenarios de uso con el DT en vez de con el gemelo físico. Esta aplicación tiene una gran utilidad desde el punto de vista de validar el comportamiento y rendimiento de un producto, servicio o proceso físico.

- **Prototipo de Gemelo Digital** (DTP, del inglés *Digital Twin Prototype*): herramienta que recopila y almacena información relevante sobre un gemelo físico en procesos de fabricación y producción de productos. Esta información incluye datos asistidos por ordenador (CAD, del inglés *Computer Aided Desings*), listas de materiales (BOM, *Bills Of Materials*), planos y detalles relacionados con la cadena de producción.

El DTP puede simular escenarios de fabricación y realizar pruebas de validación, evaluación e incluso pruebas de control de calidad antes del proceso de fabricación del propiamente dicho, reduciendo costes de producción y tiempo operativo al poder identificar defectos o posibles riesgos del gemelo físico antes de su producción.

- **Gemelo Digital de rendimiento** (PDT, del inglés *Performance Digital Twin*): representación digital completa y continua de un producto, servicio o proceso a lo largo de su ciclo de vida útil. La monitorización continua permite monitorizar el estado en tiempo real del gemelo físico, pudiendo predecir su comportamiento a futuro.

El objetivo principal del PDT es el de mantener una sincronización constante entre el DT y su contraparte física para brindar información sobre el rendimiento y evolución del gemelo físico. La diferencia entre PDT y DTI es que este último

abarca todos los aspectos del gemelo físico, incluidos aspectos de diseño, fabricación y operación mientras que el PDT se centra principalmente en la recopilación de información del DTI enfocada a la etapa operativa, con el fin de evaluar su rendimiento.

### 3.2.3.2. En función del nivel de integración

A continuación se describen los niveles de integración dispuestos en orden ascendente, siendo los modelos digitales el menor grado de integración y los DT el nivel más alto de integración [20]:

- **Modelo digital:** no incorpora automáticamente flujos de información del mundo físico al mundo virtual. Esto implica que el mundo virtual y físico no están conectados en tiempo real, y cualquier cambio debe reflejarse mediante modificaciones manuales.
- **Sombra digital:** implica una integración unidireccional y automática de flujos de información del mundo físico al mundo virtual. Esto se logra mediante un sistema en el cual los sensores miden la información del modelo físico y transfieren las señales al modelo digital.
- **Gemelo digital:** modelo altamente integrado en el cual el mundo virtual y el mundo físico interactúan de manera bidireccional. En este escenario, la información que proviene del mundo virtual puede ser utilizada para realizar cambios en el modelo físico. Por otro lado, los datos del gemelo físico pueden influir en el gemelo virtual, de manera que este último refleje con precisión el estado actual y la evolución de su contraparte física.

### 3.2.3.3. Características

De acuerdo con el tipo de DT que se considere, es posible que posea propiedades distintivas que lo diferencien de otros; sin embargo, independientemente de estas diferencias, todos los DT comparten algunas características comunes [21]:

- **Alta fidelidad:** un DT necesita ser una copia casi idéntica de su contraparte física en términos de apariencia, contenido, funcionalidad, etc., con un grado de precisión muy alto. Este nivel de detalle permite que las herramientas de simulación y predicción del DT sean más confiables al enfrentarse a un conjunto de acciones o escenarios alternativos.

- **Dinámico:** en el mundo real un gemelo físico cambia con el tiempo. Por lo tanto, un DT también debe cambiar. Esto se logra mediante una conexión continua y un intercambio constante entre los mundos físico y virtual. Los datos intercambiados pueden ser datos dinámicos, datos históricos estáticos y datos descriptivos estáticos.
- **Identificable:** cada activo físico necesita tener su propio DT, pudiendo ser identificado de manera única en relación con su gemelo físico, o viceversa, en cualquier parte del mundo y durante toda su vida útil.
- **Multiescalar y multifísica:** el DT, al ser la réplica virtual de su homólogo físico, necesita incorporar propiedades del gemelo físico a múltiples escalas. Por lo tanto, el modelo virtual en el DT se basa en propiedades geométricas macroscópicas del gemelo físico, como forma, tamaño, tolerancia, etc., así como en propiedades microscópicas como la rugosidad de la superficie, entre otros.

Además de las propiedades geométricas, el modelo también se basa en propiedades físicas del gemelo físico, como modelos de dinámica estructural, modelos termodinámicos, modelos de análisis de esfuerzos, modelos de daño por fatiga, y propiedades materiales del gemelo físico, como rigidez, resistencia, dureza, resistencia a la fatiga, etc.

- **Multidisciplinario:** la Industria 4.0 abarca diversas disciplinas, y el DT, siendo el pilar de la Industria 4.0, implica la fusión de disciplinas como ciencias de la computación, tecnología de la información y comunicaciones; ingeniería mecánica, eléctrica, electrónica y mecatrónica; ingeniería de automatización e industrial; y física de integración de sistemas, entre otras.
- **Jerárquico:** la naturaleza jerárquica del DT proviene del hecho de que los diferentes componentes y partes que conforman el producto final tienen sus correspondientes modelos DT, por ejemplo, el DT de una aeronave está compuesto por el DT del tren de aterrizaje, el DT del sistema de control de vuelo, el DT del sistema de propulsión, etc. Por lo tanto, un DT puede considerarse como una serie de submodelos integrados.

#### 3.2.4. Etapas de madurez

El concepto de DT se consolida a medida que alcanza una o varias etapas de madurez, algunas de las cuales aún están en proceso de desarrollo. Esta evolución de la complejidad se puede dividir en 5 etapas [22]:

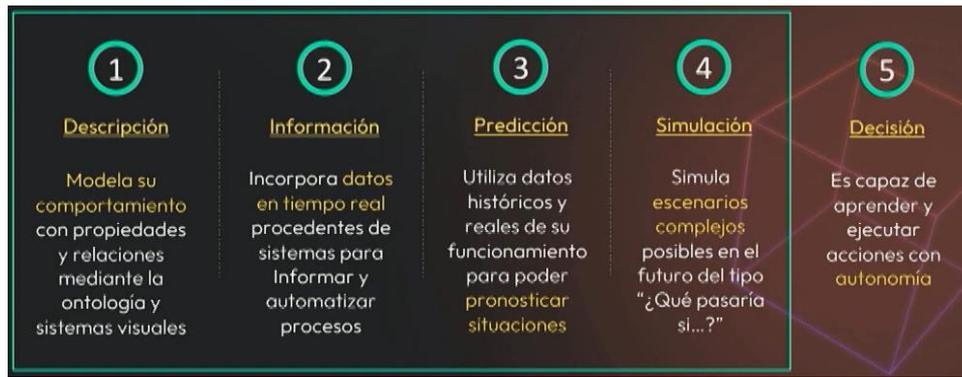


Figura 3.5. Etapas de madurez de un DT [22].

- **Descriptiva:** etapa que marca el inicio del paradigma del DT, ya que en lugar de tener un algoritmo con entradas y salidas, ahora se describe el modelo de comportamiento, las relaciones que mantiene con otros modelos y las propiedades de un producto, servicio o proceso. Esta etapa es comúnmente conocida como etapa ontológica, en la que se estudia el ente en general y sus propiedades.
- **Información:** una vez que el ente ha sido definido, se procede a incorporar datos de sensores en tiempo real, donde las propiedades previamente definidas comenzarán a tener valores concretos.
- **Predicción:** con el transcurso del tiempo y la acumulación de suficientes datos, se pueden aplicar herramientas estadísticas para simular diferentes escenarios. Es relevante destacar que esta etapa de madurez representa el estado más avanzado que puede ser conseguido actualmente, aunque aún queda un extenso trabajo de desarrollo por delante.
- **Simulación:** tras haber completado las etapas previas, se inicia la fase de simulación, en la cual se incorporan más variables al escenario haciéndolo aún más complejo.
- **Decisión:** con la aplicación de técnicas de ML y Aprendizaje Profundo (DL, del inglés *Deep Learning*), en un futuro cercano los DTs podrán tomar decisiones de forma autónoma, basándose en los resultados obtenidos en la etapa de simulación.

### 3.2.5. Aplicación y campos de actuación

A continuación, se enumeran algunos de los campos y aplicaciones en los que el DT ha supuesto un avance significativo:

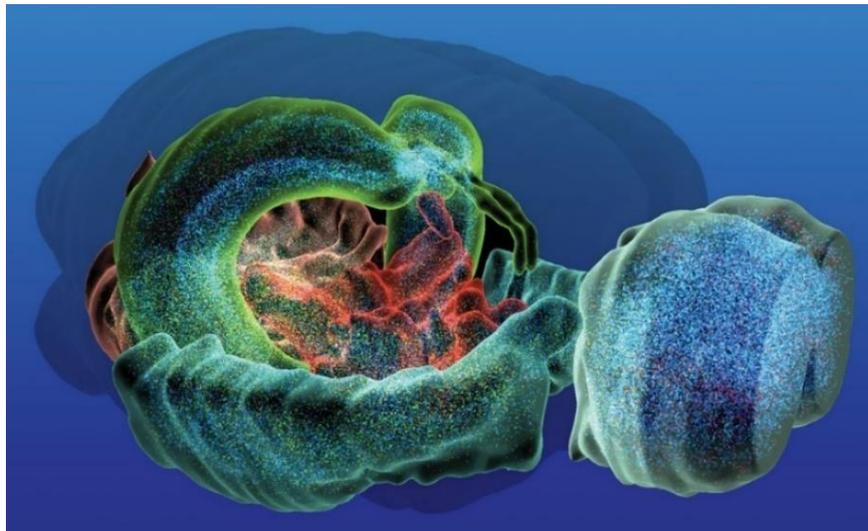
### 3.2.5.1. Salud

La reciente pandemia COVID-19 ha resaltado la importancia de la salud y los servicios de atención médica, además de incentivar el trabajo remoto y digital. Los gobiernos y organizaciones han realizado varios estudios sobre la digitalización y siguen desarrollando planes y medidas, siendo el sector de la salud el más crítico y demandante en los últimos tiempos [23].

El DT se utiliza en el campo de la salud con el propósito de mejorar, analizar y realizar predicciones para pacientes, hospitales e industria farmacéutica.

El desarrollo del DT del cuerpo humano puede considerarse similar al de otros objetos en el ámbito de la industria, pero implica procesos más avanzados y complejos. Obtener datos de individuos requiere métodos más costosos y tiempo, ya que a menudo se obtienen mediante análisis de sangre, sistemas de imágenes y exploraciones médicas.

En este contexto, ha surgido el concepto de "Paciente Digital" con el objetivo de crear el DT del cuerpo humano, que es un modelo específico del paciente para apoyar decisiones médicas [23].



*Figura 3.6. Ejemplo de DT de imagen cerebral [24].*

En Estados Unidos se iniciaron dos proyectos llamados "Iniciativa Cerebro" y "Proyecto Cerebro Humano" para resolver la estructura y conexiones del cerebro humano (figura 4.6) [24].

Philips ha desarrollado "HeartModel" [18], un DT personalizado del corazón, lo que representa un paso significativo hacia la noción del paciente digital. Esta innovación aborda la cuestión de si es posible detectar y tratar afecciones en el cuerpo humano

antes de que se manifiesten. HeartModel utiliza imágenes médicas para adaptar un modelo genérico de corazón a uno personalizado para cada individuo.

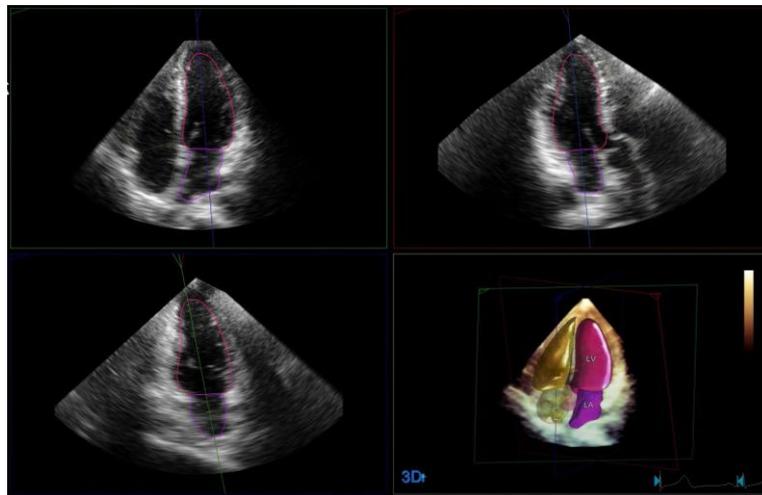


Figura 3.7. DT de un corazón realizado por la empresa Philips Healthcare [25].

Otro trabajo en el campo de la salud es la creación de DT de soldados en colaboración con el Ejército de Estados Unidos y la Universidad de Nevada, utilizando diferentes técnicas de imágenes y resonancias magnéticas. De esta forma, en caso de ocurrir algún accidente, se podrán producir órganos mediante impresión 3D utilizando modelos de DT.

### 3.2.5.2. Construcción

El enfoque del DT aplicado a la construcción abarca todo el ciclo de vida del proyecto, desde la etapa de diseño hasta la construcción, el mantenimiento, la demolición y la reconstrucción [26, 27]. Este enfoque integral permite optimizar y agilizar cada fase del proceso constructivo, mejorando la eficiencia y la precisión en cada etapa del proyecto.

Al emplear el DT, se pueden realizar simulaciones y análisis detallados que facilitan la toma de decisiones informadas y contribuyen a la gestión más efectiva de recursos y costos durante toda la vida útil del proyecto de construcción.

En la elaboración de un DT enfocado a la construcción, es frecuente emplear la tecnología de Modelado de Información de Construcción (BIM, del inglés *Building Information Modeling*). Esta tecnología supera las representaciones en 2D y 3D al incorporar información adicional, como las propiedades físicas y funcionales de los elementos constructivos, componentes y sistemas que constituyen un edificio o infraestructura.

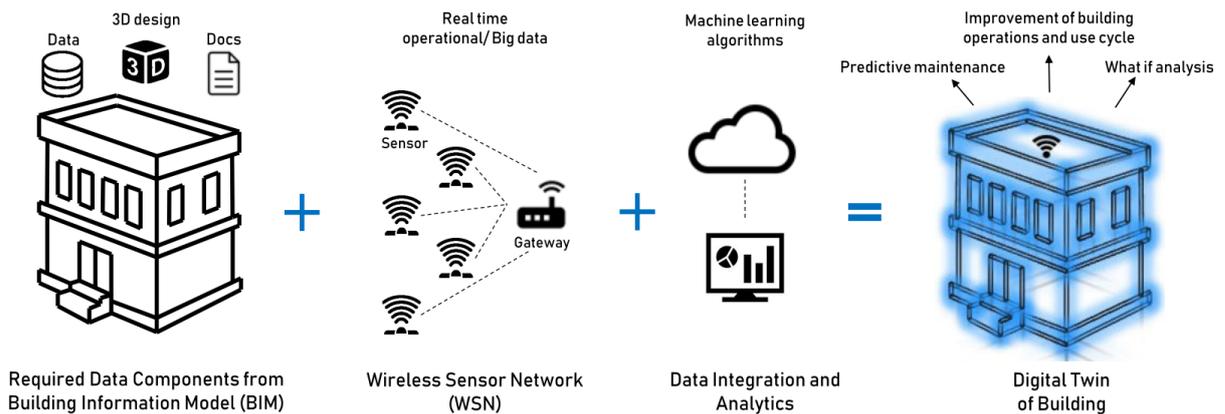


Figura 3.8. Componentes esenciales para la creación de un DT orientado al sector de la construcción [27].

Mediante la implementación de una Red de Sensores Inalámbricos (WSN, del inglés *Wireless Sensor Network*) y la aplicación de algoritmos de ML, se logra la creación de un Gemelo Digital enfocado en la construcción. Este recurso permite la exploración de escenarios hipotéticos, análisis predictivos y la identificación de mejoras en el desempeño del edificio [27].

### 3.2.5.3. Aeroespacial

El DT se aplica a lo largo de todo el ciclo de vida de las aeronaves. Es necesario un modelo de alta fidelidad y datos completos para garantizar la implementación del DT.

Su aplicación abarca cinco aspectos: diseño de optimización estructural, ensamblaje del producto, fabricación del producto, operación y mantenimiento, y otros campos relacionados con la aviación [28].

- **Diseño:** las aeronaves presentan una estructura sumamente compleja, y en su proceso de diseño persisten desafíos como el alto grado de interdependencia de variables, la limitada disponibilidad de datos y las dificultades para obtener indicadores claros.

El propósito central del DT radica en desarrollar un enfoque de seguimiento individualizado de aeronaves basado en evaluaciones de riesgo y probabilidades. Este abordaje se nutre de una amplia gama de fuentes de datos, que abarcan desde la monitorización en tiempo real de sensores hasta el análisis detallado del historial de operaciones de vuelo. A través de este conjunto de datos, es posible anticipar y responder de manera dinámica, influyendo en el comportamiento y desempeño de la aeronave a lo largo de todo su ciclo de vida.

La formación de hielo en alas, colas e instrumentos es una de las situaciones más peligrosas para las aeronaves que vuelan a diferentes altitudes. Es por ello necesario y posible, gracias a la implementación de DTs, desarrollar sistemas de descongelación de aeronaves que puedan prevenir o reducir la formación de hielo en componentes críticos para la seguridad de las aeronaves.

- **Ensamblaje:** dado que las aeronaves son vehículos complejos, sus procesos de ensamblaje son altamente complejos y necesitan de un mantenimiento frecuente, lo que conlleva a exigencias extremadamente rigurosas en el control de calidad del ensamblaje de aeronaves.

El proceso de ensamblaje se desglosa en tres etapas: programación en taller, ensamblaje en sitio y retroalimentación de problemas. La integración del DT posibilita la creación de un ciclo de información cooperativo e interconectado, denominado manufactura de ciclo cerrado. Esto permite a las compañías sincronizar y optimizar la producción entre diseño, programación de producción, manufactura, automatización y uso.

La aplicación de un modelo de coordinación de ensamblaje basado en datos de medición permite controlar la calidad del ensamblaje de aeronaves, aumentando significativamente la eficiencia del proceso de ensamblaje.

- **Fabricación:** actualmente, la tecnología del DT se encuentra en su punto más activo en la fabricación inteligente. Airbus y Boeing están construyendo aeronaves con DT, mientras que GE está desarrollando motores con esta tecnología. Esto sucede puesto que los modelos de alta fidelidad son esenciales para reducir la brecha entre el diseño y la fabricación, y para reflejar el mundo real y virtual de forma conjunta.

El DT puede reducir de manera efectiva el ciclo de desarrollo de nuevos productos en un 10-75%, y reducir el tiempo originalmente dedicado a la prueba y verificación de materiales aeroespaciales en un 80% y un 25%, respectivamente [28].

El fresado aplicado a las aspas de los motores es susceptible de sufrir deformaciones, lo cual afecta tanto a la eficiencia como a la optimización de los materiales utilizados. La tecnología del DT aplicada al proceso de fresado integra información crucial del proceso de mecanizado junto con modelos de fuerza de corte. Esto posibilita la detección inmediata de desviaciones en la trayectoria de

fresado en el mismo instante en que se producen, permitiendo así una corrección instantánea de dichas desviaciones.

- **Operación y mantenimiento:** el desarrollo del mantenimiento ha experimentado una transición desde el "mantenimiento posterior al evento" y el "mantenimiento preventivo" hacia el "mantenimiento predictivo", y la dirección futura de desarrollo es el "mantenimiento preciso".

La gestión integral de la salud de vehículos (IVHM, del inglés *Integrated Vehicle Health Management*) es un cambio de paradigma que junto con la combinación del DT, puede evaluar de manera más precisa la salud de sistemas complejos. La tecnología IVHM se basa en la interacción continua y la actualización de los datos de la nave espacial para lograr el efecto de diagnóstico, predicción y mitigación de fallas.

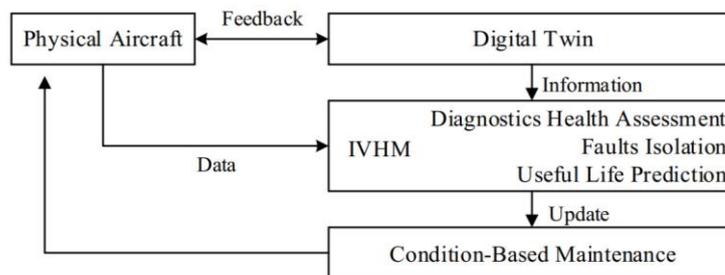


Figura 3.9. DT en el marco IVHM [28].

A continuación, se presentan varios factores críticos que pueden ser monitorizados mediante la incorporación del DT en aeronaves: detección de grietas por fatiga, distribución de la tasa de hundimiento del neumático, nivel de desgaste, ángulo de guiñada y velocidad de aterrizaje, entre otros.

Adicionalmente, con el avance de tecnologías ya existentes, como lo son los modelos 3D y la realidad aumentada (AR, del inglés *Augmented Reality*), es posible realizar un mantenimiento remoto con todos los beneficios inherentes que ello implica: mayor eficiencia en el mantenimiento, optimización de recursos, monitorización constante y segura, así como la capacidad de realizar predicciones.

- **Otros campos:** los UAV representan uno de los campos más activos en la industria de la aviación en los últimos años. Gracias a su rápido desarrollo y popularización, los UAV se han aplicado ampliamente en áreas como la protección agrícola, la planificación de tierras y recursos, el rescate en

emergencias, la prevención de incendios forestales, las ciudades inteligentes, aplicaciones militares, el turismo de ocio y otros campos.

Además de las aplicaciones mencionadas anteriormente, el DT en la aviación también está demostrando un buen desempeño en la medición en túneles de viento, la capacitación en educación de vuelo, la formación en mantenimiento de aeronaves, y otras áreas [28].

#### 3.2.5.4. Industria

La industria mundial está inmersa en una revolución digital que tuvo origen en Alemania, en 2013, con la iniciativa *Industrie 4.0*. Esta revolución, conocida como la cuarta revolución industrial, se basa en la incorporación de Sistemas Ciber-Físicos (CPS, del inglés *Cyber-Physical Systems*) y Tecnologías de la Información y Comunicación (ICT, del inglés *Information and Communication Technologies*) en la industria manufacturera, teniendo especial interés en la implementación de IA y el IoT [29].

Esta transformación digital en la industria implica una evolución del paradigma industrial actual hacia sistemas más flexibles y adaptables, capaces de aprender y tomar decisiones autónomas. Los CPS juegan un papel fundamental en la implementación de los principios de *Industria 4.0* y en el desarrollo de una red interconectada de componentes de fabricación, tanto físicos como digitales, capaces de tomar decisiones autónomas y descentralizadas.



Figura 3.10. DT de una línea de producción realizado con el software *Factory IO*.

La *Industria 4.0* abarca diversos principios clave de diseño que sirven como pautas para su implementación, entre ellos la descentralización, interoperabilidad, virtualización, capacidad en tiempo real, orientación de servicios y modularidad. El concepto de virtualización se refiere a la capacidad de los CPS para crear una réplica

virtual del sistema físico, estableciendo una conexión entre los sistemas reales y virtuales para recopilar datos que alteren la simulación de su modelo análogo. Este concepto se encuentra en continua evolución hasta lo que hoy en día se conoce como DT.

Empresas líderes en la industria están explorando y aplicando activamente la tecnología de DT, existiendo muchas aplicaciones e implementaciones a día de hoy según aparece en el artículo [30], entre las que se encuentran: Siemens, mejorando la operación de sistemas eléctricos y plantas de tratamiento de agua con DT. La corporación General Electric aplica DT en parques eólicos, ferrocarriles y atención médica. BP optimiza la producción de petróleo/gas en áreas remotas. SAP visualiza el potencial de DT para el mantenimiento submarino. IBM utiliza DT en vehículos para prevenir fallos y mejorar la eficiencia. Todas ellas resaltan la importancia de los DT en la industria actual.

### 3.2.6. Plataformas para la creación de Gemelos digitales

A continuación, se describen algunas de las plataformas que posibilitan la creación de DT orientados a campos específicos.

#### 3.2.6.1. Q Bio Gemini

La startup estadounidense Q Bio, con sede en Estados Unidos, se dedica al desarrollo de una plataforma clínica de DTs conocida como Q Bio Gemini. Esta plataforma tiene la capacidad de representar el estado fisiológico de un individuo en forma de DT, resaltando los cambios más relevantes en la fisiología mediante un estudio exhaustivo que puede ser compartido con médicos y especialistas en todo el mundo [31].

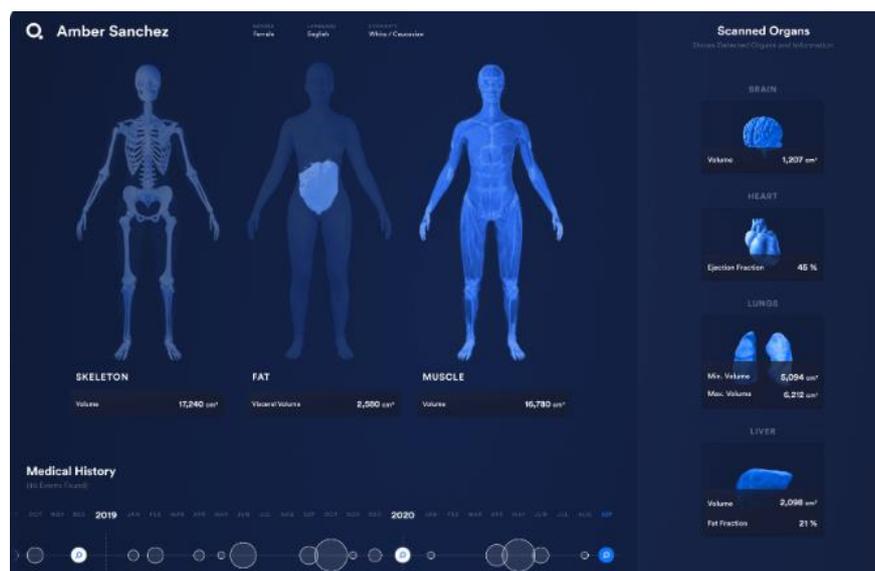


Figura 3.11. DT de un ser humano creado mediante la plataforma Q Bio Gemini.

El sistema Gemini realiza escaneos corporales utilizando el escáner Q Bio Mark I, que es el escáner más rápido y accesible desarrollado hasta la fecha, y el primero optimizado para el cuidado proactivo de la salud. El escáner Mark I recopila datos sobre la salud actual y los riesgos personales, adaptándose en tiempo real a los cambios en la anatomía y la bioquímica de cada individuo, considerando factores como el estilo de vida, historial médico y riesgos genéticos. Este escáner puede realizar un escaneo completo del cuerpo en 15 minutos o menos, sin necesidad de radiación, retención de la respiración ni generar claustrofobia. Además, brinda comodidad a los pacientes al permitirles escoger entre estar de pie, sentados o acostados en un espacio abierto [31].

La tecnología empleada por Q Bio se basa en una avanzada biofísica computacional, demostrando ser al menos 10 veces más rápida que las resonancias magnéticas convencionales, sin comprometer la calidad diagnóstica. Esta tecnología no solo posibilita la construcción de hardware más económico, sino también su implementación rápida y la reducción de costos operativos [31].

### 3.2.6.2. Autodesk Tandem

Autodesk Tandem es una plataforma desarrollada por Autodesk que posibilita la aplicación efectiva de la metodología BIM para transformar integralmente el ciclo de vida de los activos integrados en un entorno completamente digital [32].



Figura 3.12. DT de un bloque de edificios creado mediante la plataforma Autodesk Tandem [32].

Al adoptar la transición hacia la transformación digital y al hacer un uso exhaustivo de los datos generados mediante BIM a lo largo de las etapas de diseño y construcción, las entidades especializadas en Arquitectura, Ingeniería y Construcción (AEC, del inglés *Architecture, Engineering and Construction*) pueden generar y entregar un DT a sus

clientes. Autodesk Tandem tiene la capacidad de recopilar y consolidar la totalidad de la información concerniente a una estructura edificada, sus sistemas y elementos esenciales, presentando dicha información en representaciones tanto tabulares como en formato 3D [32].

Para los operadores de edificios y los gestores de instalaciones, esta plataforma constituye una herramienta valiosa al momento de abordar cuestiones operativas y garantizar un mantenimiento apropiado. La información recopilada y presentada por Autodesk Tandem permite anticipar con precisión lo que se puede esperar en la fase de mantenimiento, y al mismo tiempo, facilita la comprensión de las interrelaciones entre diversos sistemas, contribuyendo a una operación más efectiva y a la optimización de la toma de decisiones [32].

### 3.2.6.3. Simulink

Simulink, plataforma desarrollada por MathWorks, emerge como una herramienta altamente eficaz y versátil para la modelización, simulación y análisis de sistemas dinámicos en diversos ámbitos de la ingeniería, la ciencia y la tecnología. Aunque su enfoque no se limita exclusivamente a la creación de DTs, su potencial radica en la capacidad de generar y simular modelos que representen componentes, procesos o sistemas del mundo real, incluyendo la implementación de DTs [33].

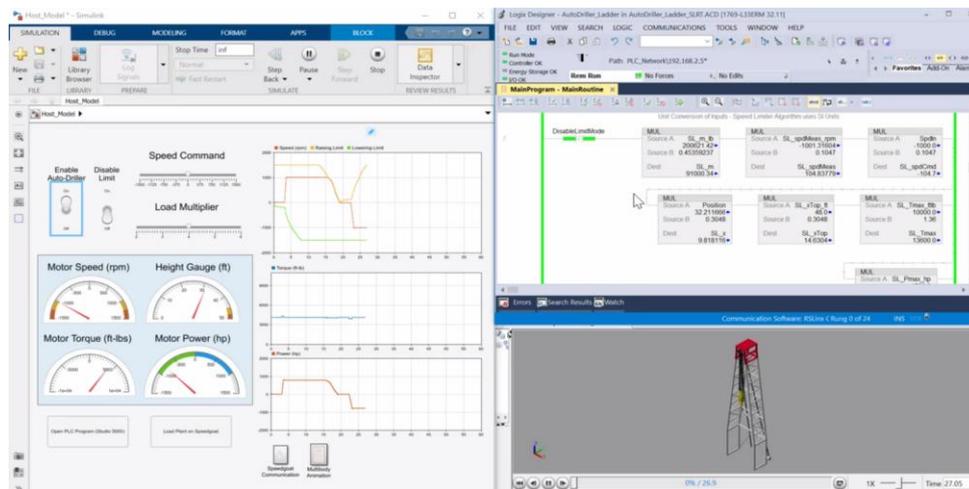


Figura 3.13. DT orientado a la industria oleícola creado mediante la plataforma Simulink [33].

Esta plataforma ofrece la posibilidad de construir modelos matemáticos y físicos que capturan la esencia de sistemas reales, abarcando sus componentes y procesos, así como las interacciones entre ellos. Un valor adicional se encuentra en su capacidad para integrarse con otras herramientas y software, como sistemas de adquisición de datos,

bases de datos y plataformas de análisis, lo cual permite una mayor cohesión y aprovechamiento de los datos disponibles [33].

#### 3.2.6.4. CupCarbon

CupCarbon representa una plataforma de simulación y modelado específicamente diseñada para abordar los desafíos inherentes al IoT. Esta herramienta capacita a los usuarios para llevar a cabo tareas de diseño, simulación y análisis de redes y aplicaciones dentro del ámbito del IoT. La singularidad de esta plataforma radica en su capacidad de proporcionar un entorno virtual propicio para la creación de escenarios auténticos que permiten la exhaustiva evaluación y optimización de dispositivos IoT, protocolos de comunicación, algoritmos y estrategias de implementación [34].

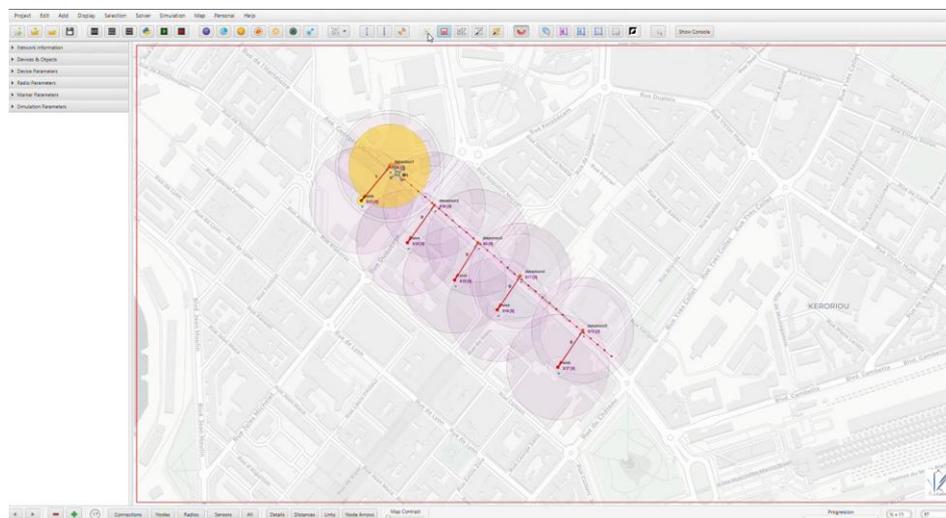


Figura 3.14. DT de un alumbrado inteligente creado mediante la plataforma CupCarbon [34].

CupCarbon IoT brinda la posibilidad de visualizar y analizar el comportamiento de los dispositivos IoT en múltiples contextos, lo cual otorga a diseñadores y desarrolladores la capacidad de evaluar de manera minuciosa aspectos cruciales como el rendimiento, la eficiencia energética, la cobertura de red y otros elementos esenciales antes de embarcarse en la implementación práctica de soluciones en entornos reales. Además, esta plataforma presenta atributos para la simulación de la comunicación entre dispositivos, la transmisión de datos y la proyección de posibles situaciones de interferencia [34].

#### 3.2.6.5. MindSphere

MindSphere es una plataforma diseñada por Siemens, enmarcada en el ámbito del IoT, con la capacidad de capturar, analizar y presentar de manera visual datos

procedentes de sensores y dispositivos conectados en diversos entornos industriales. Esta plataforma brinda a las organizaciones la capacidad de monitorizar y gestionar sus operaciones en tiempo real, llevar a cabo análisis de nivel avanzado y tomar decisiones fundamentadas, orientadas a mejorar la eficiencia, productividad y calidad en sectores como la manufactura y otros procesos industriales [35].

MindSphere puede considerarse una opción idónea para la generación de DT, ya que ofrece la infraestructura necesaria para la recopilación y análisis en tiempo real de datos provenientes de activos industriales. La plataforma se presta para el desarrollo y alojamiento de aplicaciones que dan lugar y mantienen estos, permitiendo a las empresas conceptualizar y modelar sus operaciones físicas en un entorno virtual. Sin embargo, es importante resaltar que la creación integral de Gemelos Digitales suele requerir la utilización de herramientas y tecnologías específicas de modelado y simulación, por lo que, además de la base proporcionada por la infraestructura IoT de plataformas como MindSphere, es necesario incorporar de manera complementaria otras herramientas de modelado, simulación y análisis, según las necesidades particulares de cada aplicación [35].

#### **3.2.6.6. Watson IoT Platform**

La plataforma Watson IoT es una solución desarrollada por IBM que se centra en el IoT. Está diseñada para ayudar a las organizaciones a conectar dispositivos, sensores y activos físicos, y aprovechar los datos generados por ellos para tomar decisiones informadas y mejorar la eficiencia operativa [36].

La plataforma Watson IoT ofrece capacidades de recopilación de datos, análisis y visualización que permiten a las empresas monitorizar y administrar sus activos en tiempo real. Proporciona herramientas para analizar patrones y tendencias, predecir problemas potenciales y llevar a cabo un mantenimiento predictivo. Además, Watson IoT permite la integración con otras soluciones de IBM, como es el caso de su AI [36].

Al igual que la plataforma MindSphere, ofrece la infraestructura necesaria para recopilar y analizar datos en tiempo real de activos físicos pero necesita de otras herramientas para construir un DT completo y preciso [36].

#### **3.2.6.7. Azure Digital Twins**

Azure Digital Twins (ADT, en inglés *Azure Digital Twins*) es un servicio en la nube proporcionado por Microsoft dentro de su plataforma Azure que permite crear, gestionar e interactuar con DT [37].

Permite a las organizaciones modelar sus activos físicos de manera virtual, capturando sus atributos, relaciones y comportamientos. Esto facilita la simulación, análisis y optimización de operaciones, lo que a su vez puede llevar a una toma de decisiones más informada y eficiente. Con esta plataforma, se pueden crear modelos detallados de edificios, fábricas, redes eléctricas, sistemas de transporte, etc [37].

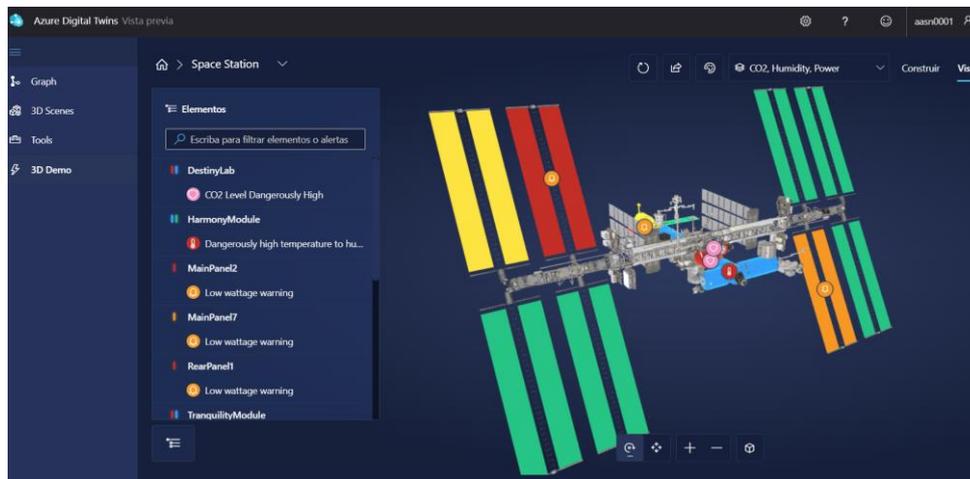


Figura 3.15. DT de una estación espacial creado mediante la plataforma Azure Digital Twins.

El servicio proporciona herramientas para interactuar con los DT y para visualizar y analizar datos en tiempo real. Además, permite la integración con otros servicios de Azure, como herramientas de análisis avanzado, IA y almacenamiento de datos, para aprovechar al máximo la información recopilada de los DT y generar conocimiento [37].

### 3.3. Vehículos aéreos no tripulados

#### 3.3.1. Contexto y motivación

La aviación no tripulada tuvo sus inicios en modelos fabricados por inventores europeos como George Cayley en 1809 y Felix du Temple en 1857 [38]. Sin embargo, el desarrollo acelerado de los drones ocurrió en el contexto de la Primera Guerra Mundial, donde tecnologías como bombas guiadas, modelos controlados por radio y aviones de reconocimiento desempeñaron un papel crucial.

El punto de inflexión en la evolución de los drones, también conocidos como UAVs, ocurrió en 1918 con el histórico vuelo del Sperry Messenger [38], el primer avión no tripulado controlado a distancia. Este biplano bombardero logró ser dirigido utilizando la velocidad propia del viento hasta la distancia del objetivo, lo cual marcó un hito significativo en la trayectoria tecnológica de los drones. La aceleración de su desarrollo se intensificó aún más durante la Segunda Guerra Mundial, con la introducción de

tecnologías de control remoto por radio e incluso, en ciertos casos, la utilización de señales multimedia para guiar a estos sistemas.

En la década de 1960, la Fuerza Aérea de los Estados Unidos lanzó el programa AQM-34, creando el dron Firebee, y en la década de 1990, la disponibilidad del GPS y los sistemas de control digital permitieron el desarrollo de modelos de aterrizaje y despegue vertical (VTOL, del inglés *Vertical Take-Off and Landing*) [38].

En la actualidad, gracias a la colaboración y a la utilización de plataformas de código abierto, como Arduino, han catalizado la creación de empresas que se dedican al diseño de sus propios drones. Estas compañías han incursionado en diversas aplicaciones que engloban la topografía, la seguridad y emergencia, la agricultura y la fotografía, entre otras disciplinas.

La convergencia de estos elementos, unida al constante avance de tecnologías como la AR y la AI, ha despertado un creciente interés en la investigación y el desarrollo en este campo específico. Esta inquietud se refleja en la exploración de nuevas soluciones y en la expansión de perspectivas, tanto a través de iniciativas provenientes del sector privado como de las esferas gubernamentales. Estas empresas y entidades se orientan hacia la generación de aplicaciones innovadoras, aprovechando las posibilidades que los drones brindan a una amplia gama de aplicaciones.

### 3.3.2. Definición y concepto

Los drones, también conocidos como UAVs o sistema aéreo no tripulado (UAS, del inglés *Unmanned Aerial System*), son aeronaves capaces de volar sin un piloto ni pasajeros a bordo [39]. El control de los drones se realiza de forma remota a través de ondas de radio o de manera autónoma, siguiendo una ruta que puede estar o no preestablecida.



Figura 3.16. Munición merodeadora del Ejército de Tierra Español [40].

Los drones no tienen un tamaño o tipo de propulsión específicos. A menudo están equipados con accesorios utilizados para la vigilancia y el monitoreo, en forma de cabezas optoelectrónicas [39].

Su característica más importante es que no requieren infraestructura adicional para registrar y monitorizar rápidamente un área u objeto designado [39]. Una ventaja significativa es el tiempo de reacción extremadamente corto en cuanto a la puesta en marcha y preparación de la unidad para el vuelo.

### 3.3.3. Relación existente entre drones e IoT

El término "IoT" hace referencia a la interconexión de dispositivos físicos, objetos y sistemas mediante internet. Esto engloba una gran variedad de dispositivos, que van desde electrodomésticos y sensores hasta vehículos y máquinas industriales.

La relación existente entre el IoT y los UAVs radica en que estos pueden ser considerados como dispositivos conectados a Internet, lo que los ubica dentro del ecosistema de dispositivos interconectados que define al IoT. Además, los UAVs están equipados con sensores y sistemas de comunicación que les posibilitan el intercambio de datos en tiempo real, lo cual da origen al término Internet de los Drones (IoD, del inglés *Internet of Drones*).

### 3.3.4. Tecnologías y componentes

#### 3.3.4.1. Estructura y diseño

Los drones están compuestos por dos sistemas principales [38]:

- **Sistema de propulsión y movimiento:** el pilar fundamental de un dron radica en su estructura, la cual debe ser meticulosamente diseñada para minimizar su peso. La clasificación de la construcción de dicha estructura se sustenta principalmente en la cantidad de brazos que se integren en su conformación.

En función del número de brazos y la disposición correspondiente de los motores, contribuyendo positivamente en la estabilidad del dron un mayor número de motores, pueden ser clasificados en las siguientes modalidades [38]:

- Monocóptero: equipado con un solo motor.
- Bicópteros: equipados con dos motores.
- Tricópteros: dotados de tres motores.

- Cuadricópteros: impulsados por cuatro motores.
- Hexacópteros: propulsados por seis motores.
- Octocópteros: potenciados por ocho motores.

Los siguientes elementos primordiales de un dron comprenden el motor y las hélices. Estos componentes constituyen el sistema de propulsión preponderante del dron y están sujetos a las cargas más sustanciales, lo que atribuye una importancia de vital relevancia a su durabilidad [41]. Las hélices transforman el par motor, generado por el motor, en una fuerza empleada para elevar el vehículo en el aire. En virtud de la disposición del sistema de hélices en relación con la dirección del vuelo, se pueden distinguir los siguientes tipos [38]:

- + : una de las hélices es la hélice principal, al menos dispone de cuatro hélices.
- X : la construcción más común, en la que dos hélices son las hélices principales. Dispone de un número par de hélices.
- Y : tres brazos dispuestos en forma de Y, donde uno o dos hélices pueden ser las hélices principales.
- V : disposición muy poco común en la que dos hélices dirigen a otros dos brazos extendidos.
- H : disposición muy poco común en la que la estructura tiene forma de H, teniendo dos hélices como principales.

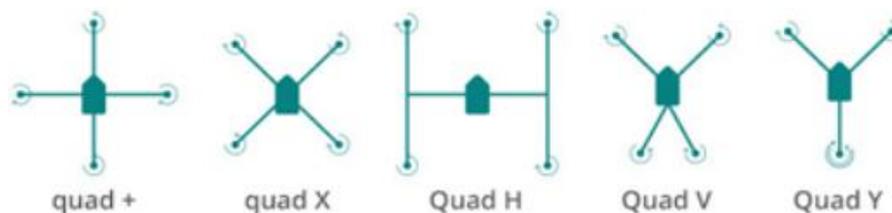


Figura 3.17. Tipos de disposición del sistema de hélices en drones [38].

En cada una de las construcciones mencionadas anteriormente, se pueden montar hélices dobles en la parte superior o inferior, lo cual aumenta significativamente la resistencia del dron y no requiere agregar otro brazo. Las hélices dobles montadas en un menor número de brazos aumentan la resistencia de un dron, permitiendo una mayor capacidad de elevación y asegurando el funcionamiento paralelo del motor en caso de falla. Así, se reduce el peso propio

del multirroto, los costos de material disminuyen y el dron puede transportar una carga más pesada. Las hélices dobles giran en direcciones opuestas, equilibrando entre sí la fuerza de inercia.

Las alas, fabricadas en fibra de carbono, plástico o aluminio, se encuentran unidas por laminación, lo cual no solo une las extremidades del dron, sino que también garantiza un equilibrio óptimo entre la resistencia total de la estructura y su durabilidad mecánica. El tamaño de las alas adquiere una importancia significativa, influyendo directamente en la dinámica del vuelo. A mayor diámetro, menor velocidad, lo que contribuye a una mayor estabilidad del dron. El aumento en la envergadura de las alas promueve una mayor generación de sustentación aerodinámica, pero conlleva también una mayor presión en el buje de la hélice, resultando en fuerzas de deformación cada vez más pronunciadas.

El dimensionamiento de las palas de las hélices tiene un impacto directo en la potencia requerida del motor para contrarrestar el par necesario para impulsar las hélices en movimiento. Por ende, un motor más potente es requerido para hélices de mayor tamaño. Además, el equilibrio de cada hélice antes de su utilización es fundamental para minimizar las vibraciones resultantes de un desempeño desigual del sistema.

El tiempo de permanencia en el aire de un objeto volador depende tanto del tipo de propulsión como del tipo de fuente de energía [42]. Los drones funcionan con baterías, lo cual es su principal limitación, ya que se agotan a partir de los 15 minutos de vuelo en adelante de forma aproximada. En términos generales, las baterías están compuestas por conjuntos de dos o más celdas voltaicas del mismo tipo, proporcionando una corriente más potente que una sola celda [38]. Estas se pueden dividir en baterías desechables y acumuladores eléctricos que pueden descargarse y cargarse múltiples veces.

- **Sistema de control y comunicación:** el sistema de control se encarga de las operaciones de ascenso y descenso del dron, su rotación y su respuesta ante fuerzas emergentes, garantizando su estabilidad. La mayoría de los sistemas de control están equipados con el mismo conjunto de sensores, variando en la velocidad de cálculos y en los algoritmos utilizados. El sistema de control consta de [43]:
  - Controlador de vuelo: responsable de las capacidades de control de la máquina, los cuales garantizan el rendimiento máximo y el más alto nivel de seguridad. Además, supervisa también el estado de la batería pudiendo

disminuir la tensión cuando esta se encuentre en niveles bajos, reduciendo por ello las RPM del motor.

Para iniciar el vuelo, la unidad de control debe conocer la ubicación del dron en el espacio, facilitado por el módulo de medición compuesto por un giroscopio y un acelerómetro, que se comunica con el controlador a través del bus circuito inter-integrado (I2C, del inglés *Inter-Integrated Circuit*). El giroscopio permite seguir el vuelo del objeto y el acelerómetro permite corregir el desvío del módulo y determina el punto de referencia absoluto.

El control del dron se realiza variando la velocidad de los motores correspondientes. Para ello, es necesario el algoritmo de control para estabilizar la máquina en el aire.

- Control electrónico de estabilidad (ESC, del inglés *Electronic Stability Control*): unidad responsable del régimen de revoluciones por minuto (RPM, del inglés *Revolutions Per Minute*) del motor. Para controlar la velocidad de rotación del motor, se en este estudio [30] se utiliza la modulación por ancho de pulso (PWM, del inglés *Pulse-Width Modulation*). Usando este método, es posible obtener diferentes niveles de voltaje promedio.
- Placa de suministro: separa la alimentación para los reguladores de velocidad y los motores.
- Módulo SIM: permite la transmisión de datos de telemetría.
- Cámara de proximidad: elemento del sistema anticolidión.
- Teclado numérico: necesario para ingresar códigos PIN del cliente.

#### 3.3.4.2. Tecnologías de comunicación inalámbrica

A continuación, se presentan las características de diversas tecnologías de comunicación inalámbrica, como movilidad, velocidad de datos, alcance de comunicación, latencia y topología de red. Estas características resultan apropiadas para el despliegue confiable y flexible de redes aéreas Ad-Hoc (FANETs, del inglés *Flying Ad-Hoc Networks*) [43]. De esta forma, las tecnologías inalámbricas previamente mencionadas se agrupan en dos categorías principales: tecnologías de comunicación de largo alcance (WiMAX [44], LTE [43], 5G [47], SATCOM [43]) y tecnologías de corto alcance (Wi-Fi [44], Bluetooth [45], Zigbee [44]).

Tecnología de comunicación	Estándar IEEE	Frecuencia/Medio	Tipo de Espectro	Dispositivo de movilidad	Tasa de datos teórica	Rango Interiores - Exteriores	Topología de red	Latencia	Ventajas	Limitaciones	Cobertura celular (Km)
<b>Wi-Fi</b>	802.11	2.4GHz	Sin Licencia	SI	Hasta 2 Mbps	20 m – 100 m	Ad-hoc, estrella, malla, híbrido	< 5ms	Alta velocidad Barato	Rango limitado	<0.3
	802.11a	5 GHz	Sin Licencia	SI	Hasta 54 Mbps	35 m – 120 m	Ad-hoc, estrella, malla, híbrido	< 5ms	Alta velocidad Barato	Rango limitado	<0.3
	802.11b	2.4 GHz	Sin Licencia	SI	Hasta 11 Mbps	35 m – 140 m	Ad-hoc, estrella, malla, híbrido	< 5ms	Alta velocidad Barato	Rango limitado	<0.3
	802.11n	2.4/5 GHz	Sin Licencia	SI	Hasta 600 Mbps	70 m – 250 m	Ad-hoc, estrella, malla, híbrido	< 5ms	Alta velocidad Barato	Rango limitado	<0.3
	802.11g	2.4 GHz	Sin Licencia	SI	Hasta 54 Mbps	38 m – 140 m	Ad-hoc, estrella, malla, híbrido	< 5ms	Alta velocidad Barato	Rango limitado	<0.3
	802.11ac	5 GHz	Sin Licencia	SI	Hasta 3466 Mbps	35 m – 120 m	Ad-hoc, estrella, malla, híbrido	< 5ms	Alta velocidad Barato	Rango limitado	<0.3
<b>Bluetooth 5</b>	802.15.1	2.4 GHz	Sin Licencia	SI	Hasta 2 Mbps	40 m – 200 m	Ad-hoc, piconet	2 ms	Energía eficiente	Baja tasa de datos	-
<b>ZigBee</b>	802.15.4	2.4 GHz	Sin Licencia	SI	250 kbps	10 m – 100 m	Ad-hoc, estrella, malla, árbol, grupo	15 ms	Bajo costo	Baja tasa de datos	<0.1
<b>WiMAX</b>	802.16a	2 a 11 GHz	Licenciado	SI	Hasta 75 Mbps	Hasta 48 K m	Área amplia, Red de retorno inalámbrica	30 ms	Alto rendimiento	Problemas de interferencia	50
<b>LTE</b>	LTE	Hasta 20 MHz	Licenciado	SI	Hasta 300 Mbps	Hasta 100 Km	Plano, basado en IP	5 ms	Alto Ancho de banda	Alto costo	-
<b>5G</b>	5G (eMBB)	28GHz	Licenciado	SI	Hasta 20 Gbps	Área amplia	Basado en IP	1 ms	Alta tasa de datos	Alto costo	-
<b>SATELITE</b>	Satélite	Hasta 40 GHz	Licenciado	SI	Hasta 1 Gbps	Todo el mundo	-	550 ms	Amplia cobertura	Alto retraso Alto costo	4000
<b>Lora</b>	-	915 MHz	Sin Licencia	SI	-	15 Km	-	56-1400 ms	Bajo consumo de potencia		<15

Figura 3.18. Resumen de tecnologías inalámbricas para el despliegue de FANETs [43].

- **Wi-Fi (IEEE 802.11):** tecnología centrada en la elaboración de redes de área local inalámbricas (WLAN, del inglés *Wireless Local Area Network*). Las bandas de frecuencia primarias abarcan los 2.4 GHz, 3.6 GHz, 5 GHz y 60 GHz. Wi-Fi presenta diversas variantes (IEEE 802.11 a/b/g/n/ac) que se muestran aptas para aplicaciones de FANET, posibilitando la transmisión de datos de considerable envergadura, como imágenes y videos.

En el contexto de redes Ad-hoc, los UAV pueden establecer enlaces de transmisión con alcances de varios kilómetros. Un vínculo inalámbrico basado en IEEE 802.11a resulta aconsejable para implementar en redes que involucren UAV, así como también en las estaciones base. No obstante, se desaconseja el empleo de Wi-Fi para conexiones aire-aire debido a la alta densidad de controles remotos que operan en la misma banda de 2.4 GHz [44].

- **Bluetooth (IEEE 802.15.1):** esta tecnología se revela como una opción idónea para implementar redes FANET, destacando por su asequibilidad y eficiencia energética. Bluetooth 5 se enfoca principalmente en la mejora de la velocidad, alcanzando hasta 24 Mbps, y en un rango de transmisión de 10 a 200 metros, además de su destacada eficiencia energética y su capacidad para coexistir con otras tecnologías de corto alcance [45].
- **Zigbee (IEEE 802.15.4):** se fundamenta en un sistema de posicionamiento que resulta viable, eficiente y de sencilla implementación. Gracias a sus atributos, como el alcance que se extiende de 10 a 100 metros [44], y su espectro de frecuencia de 2.4 GHz, con una velocidad de datos de 250 Kbps, esta tecnología emerge como un candidato prometedor para aplicaciones de baja tasa de datos en el contexto de FANET.
- **WiMAX (IEEE 802.16):** el propósito primordial de esta tecnología radica en la provisión de acceso de banda ancha a distancias considerables, particularmente enfocado en redes FANET. Posee de una capacidad capaz de soportar una tasa de datos de 30 Mbps para aplicaciones móviles, siendo la tecnología idónea para sistemas de rescate basados en UAV en entornos desafiantes.

Adicionalmente, se destaca por su capacidad para determinar la posición y altitud de cada UAV, asegurando una calidad de servicio (QoS, del inglés *Quality of Service*) constante. WiMAX exhibe la capacidad de ofrecer amplias coberturas, extendiéndose hasta 50 km con una velocidad de enlace descendente de 78 Mbps y 30 Mbps para el enlace ascendente [43].

- **5G:** se distingue por su notoria rapidez en la transferencia de datos, la minimización de la latencia, la eficiencia en el consumo energético y una conectividad que abarca diversos ámbitos [46]. Estas características resultan altamente adecuadas para desempeñar una función esencial en los sistemas de comunicación de UAVs, adquiriendo una importancia central en aplicaciones innovadoras. Esta tecnología se focaliza en la prestación de servicios tales como la transmisión multimedia para labores de vigilancia [47].
- **Comunicaciones por satélite:** esta modalidad de comunicación inalámbrica se orienta hacia la emisión de señales electromagnéticas desde estaciones terrestres hasta satélites o estaciones en el espacio exterior, y viceversa. Mediante la retransmisión de datos de UAV a través de satélites, se logra una mayor superposición en el rango y una transmisión de imágenes de amplia cobertura con una resolución significativa, gracias a las especificaciones de los enlaces descendentes y a la potencia de transmisión que caracteriza al enlace ascendente de los UAV.
- **Lora:** habilita la transmisión de datos en un rango de 10 km con una potencia de transmisión de 0 dBm, lo cual constituye una tasa de transmisión energéticamente eficiente para cubrir la mencionada distancia. Lora es una tecnología caracterizada por su baja potencia y velocidad, permitiendo la comunicación entre una densidad significativa de UAV y brindando una cobertura superior en comparación con la tecnología Wi-Fi [43].

### 3.3.5. Registro de vuelo

La mayoría de los drones contemporáneos pueden generar archivos conocidos como registros de vuelo en los que se recogen diversos datos obtenidos durante el tiempo de operación del dron, gracias a una grabadora digital que graba en memoria información similar a la almacenada en la caja negra de las aeronaves:

- **Datos GPS:** posición exacta del dron en coordenadas geográficas.
- **Altitud:** altura a la que se encuentra el dron durante el vuelo.
- **Velocidad:** velocidad a la que se desplaza el dron.
- **Duración del vuelo:** tiempo que el dron permanece en el aire.
- **Distancia recorrida:** distancia total recorrida durante el vuelo.
- **Datos de la batería:** nivel de carga de la batería y consumo energético.

- **Sensores y Telemetría:** información de sensores como acelerómetros, giroscopios, condiciones medioambientales y otros parámetros técnicos del dron.
- **Comandos de Control:** acciones realizadas por el operador durante el vuelo.
- **Eventos Específicos:** cualquier otro tipo de evento relevante, como cambios de modo de vuelo, tomas de fotografías, grabación de video, entre otros.

Los registros de vuelo son valiosos para diversos propósitos, como el análisis de rendimiento del dron, la solución de problemas, la mejora de habilidades de vuelo, la documentación de operaciones y, en algunos casos, para cumplir con requisitos legales y regulaciones de aviación. Por lo tanto, es común encontrar esta función en muchos drones de diferentes fabricantes.

Los registros de vuelo se almacenan en formato .txt en el dispositivo, requiriendo su posterior interpretación. En el contexto de este TFG, se realiza un análisis específico de los registros de vuelo proporcionados por DJI habiendo utilizado un dispositivo Android. En lo que respecta a dispositivos Android, se puede acceder a los registros de vuelo conectando el dispositivo vía USB y navegando a la dirección "DJI/dji.pilot/FlightRecord". De esta forma, se podrá acceder a todos los registros almacenados hasta la fecha en formato .txt.

Estos archivos no son legibles de manera directa. En su lugar, se requiere la utilización de programas o plataformas web diseñadas para interpretar los registros de vuelo. Ejemplos notables incluyen la aplicación Flight Reader y el portal AIRDATA UAV. Ambas opciones ofrecen tanto servicios de pago como alternativas gratuitas que permiten examinar el contenido de estos registros.

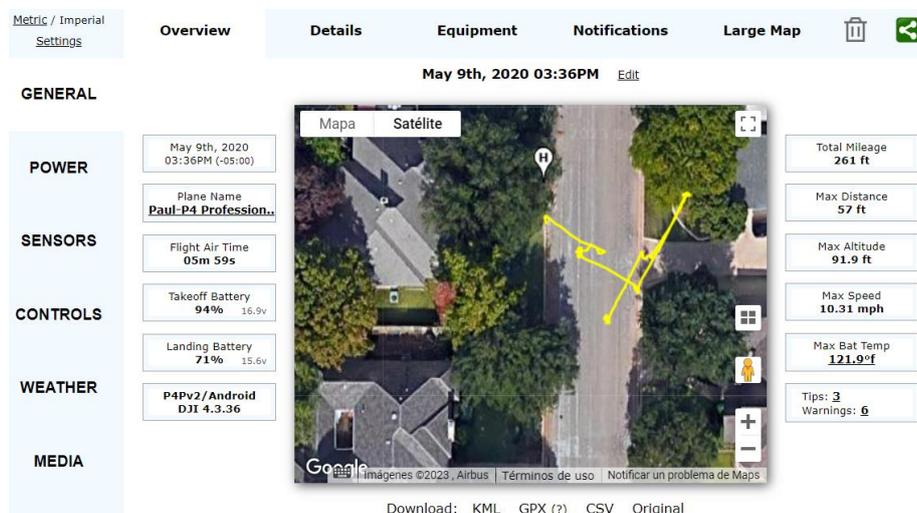


Figura 3.19. Registro de vuelo: 09-05-2020, 15:36:27h, visualizado en la plataforma AIRDATA UAV.

Una vez que los archivos en formato .txt son importados, se pueden visualizar capturas de vuelo, trazados realizados, duración de la operación, estado de la batería al despegar y aterrizar, temperatura de la batería, distancia recorrida, altitud, velocidad máxima, alertas, coordenadas geográficas, hora, fecha, controles empleados, datos de sensores, etc.

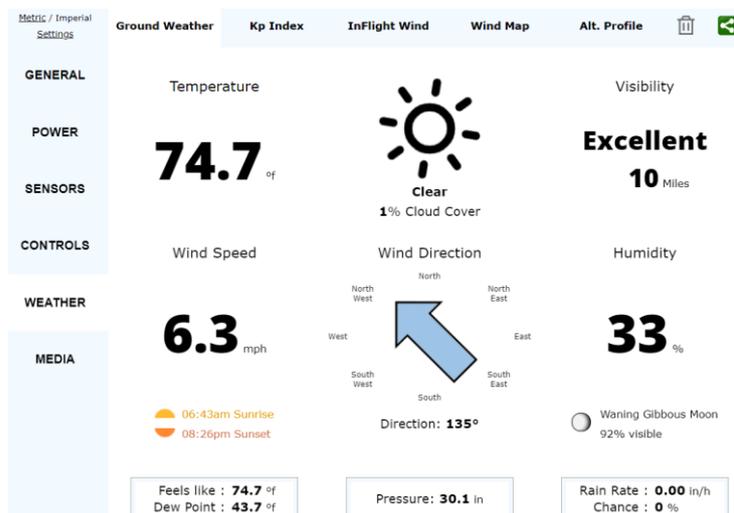


Figura 3.20. Detalle de las condiciones medioambientales del registro de vuelo: 09-05-2020, 15:36:27h.

Además de proporcionar una representación visual de los registros, es posible exportar esta información en formato .csv, permitiendo su posterior integración en distintas aplicaciones, incluida la generación de DT.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	CUSTOM.dat	CUSTOM.upd	OSD.flyTime	OSD.flyTime	OSD.latitude	OSD.longitude	OSD.height [	OSD.heightM	OSD.vpsHeig	OSD.altitude	OSD.mileage
2	09/05/2020	38:11,5 1m 43,7s	103,7	32,38216647	-99,753946	0	0	0,3	1803	0	
3	09/05/2020	38:11,6 1m 43,8s	103,8	32,38216646	-99,753946	0	0	0,3	1803	0	
4	09/05/2020	38:11,7 1m 43,9s	103,9	32,38216647	-99,7539461	0	0	0,3	1803	0	
5	09/05/2020	38:11,8 1m 44,0s	104	32,38216651	-99,7539461	0	0	0,3	1803	0	
6	09/05/2020	38:11,9 1m 44,1s	104,1	32,38216646	-99,7539461	0	0	0,3	1803	0	
7	09/05/2020	38:12,0 1m 44,2s	104,2	32,38216642	-99,7539461	0	0	0,6	1803	0	
8	09/05/2020	38:12,1 1m 44,3s	104,3	32,38216641	-99,7539461	0	0	0,6	1803	0	
9	09/05/2020	38:12,2 1m 44,4s	104,4	32,38216636	-99,7539462	0	0	0,3	1803	0	
10	09/05/2020	38:12,3 1m 44,5s	104,5	32,38216631	-99,7539462	0	0	0,6	1803	0,1	
11	09/05/2020	38:12,4 1m 44,6s	104,6	32,38216626	-99,7539462	0	0	0,6	1803	0,1	
12	09/05/2020	38:12,5 1m 44,7s	104,7	32,38216619	-99,7539462	0	0	0,6	1803	0,1	
13	09/05/2020	38:12,7 1m 44,9s	104,9	32,38216604	-99,7539461	0	0	0,6	1803	0,2	
14	09/05/2020	38:12,8 1m 45,0s	105	32,38216603	-99,7539461	0	0	0,6	1803	0,2	
15	09/05/2020	38:12,9 1m 45,1s	105,1	32,38216598	-99,7539461	0	0	0,6	1803	0,2	
16	09/05/2020	38:13,0 1m 45,2s	105,2	32,38216595	-99,7539461	0	0	0,6	1803	0,2	
17	09/05/2020	38:13,1 1m 45,3s	105,3	32,382166	-99,753946	0	0	0,6	1803	0,2	
18	09/05/2020	38:13,2 1m 45,4s	105,4	32,38216604	-99,753946	0	0	0,6	1803	0,2	
19	09/05/2020	38:13,3 1m 45,5s	105,5	32,382166	-99,7539459	0	0	0,6	1803	0,3	
20	09/05/2020	38:13,4 1m 45,6s	105,6	32,38216597	-99,7539459	0	0	0,6	1803	0,3	
21	09/05/2020	38:13,5 1m 45,7s	105,7	32,38216596	-99,7539458	0	0	0,6	1803	0,3	
22	09/05/2020	38:13,6 1m 45,8s	105,8	32,38216596	-99,7539458	0	0	0,6	1803	0,3	
23	09/05/2020	38:13,7 1m 45,9s	105,9	32,38216597	-99,7539458	0	0	0,6	1803	0,3	
24	09/05/2020	38:13,8 1m 46,0s	106	32,38216598	-99,7539458	0	0	0,3	1803	0,3	
25	09/05/2020	38:13,9 1m 46,1s	106,1	32,38216592	-99,7539459	0	0	0,3	1803	0,3	

Figura 3.21. Detalle del registro de vuelo: 09-05-2020, 15:36:27h.

### 3.3.6. Normativa de drones civiles en España

Antes de proceder con el estudio de la normativa vigente del uso de drones civiles en España, resulta necesario efectuar algunas precisiones. Cuando se hace alusión al

término dron, se está haciendo referencia a los UAVs o UASs. No obstante, en el ámbito legislativo, se utiliza el término aeronave pilotada a distancia (RPA, del inglés *Remotely Piloted Aircraft*), el cual representa un tipo concreto de dron caracterizado principalmente por su pilotaje remoto [48].

Cabe destacar que, si bien la regulación europea aborda de forma general los UAV al igual que la normativa nacional en el ámbito militar, en el ámbito civil se centra específicamente en las RPAs.

La primera disposición que estableció los requisitos mínimos para la operación de drones fue la Ley 18/2014, de 15 de octubre, la cual fue promulgada con el fin de abordar cuestiones imperativas para el crecimiento, la competitividad y la eficiencia, si bien en la actualidad ha sido revocada. La supervisión y regulación del empleo de drones en España recae en la Agencia Estatal de Seguridad Aérea (AESA), entidad que asume igualmente la jurisdicción sobre Navegación y Transporte Aéreos, así como sobre la Seguridad Aeroportuaria.

En lo que respecta a la normativa concerniente a RPAs en España, actualmente han comenzado a aplicarse el Reglamento Europeo (RE) 2019/947 y el Real Decreto (RD) 2019/945. Algunas limitaciones generales para el vuelo de RPAs en España son:

- La RPA debe permanecer siempre dentro del alcance visual del piloto.
- Está prohibido elevar la RPA a alturas superiores a 120 metros durante el vuelo.
- Se exige mantener una distancia mínima de 8 kilómetros con respecto a cualquier aeropuerto, aeródromo o espacio aéreo controlado. No está permitido realizar operaciones en parques nacionales, zonas de conservación de fauna, reservas de la biosfera, y demás espacios naturales protegidos.
- Aunque no es una obligación legal, se recomienda encarecidamente contar con un seguro de responsabilidad civil, debido a que el piloto asume la responsabilidad por cualquier daño ocasionado por la aeronave.
- La RPA debe llevar una placa identificativa ignífuga que esté firmemente fijada a la estructura, en la cual se deben incluir detalles como el nombre del fabricante, el modelo, número de serie si es aplicable y los datos de contacto del piloto.
- Se debe salvaguardar el derecho a la privacidad de las personas que puedan aparecer en las imágenes capturadas por la RPA. Se debe ejercer una especial precaución al compartir estas imágenes en público para no infringir la Ley de Protección de Datos.

Para acceder el mapa aéreo a nivel nacional en el que se detallan las zonas en las que no está permitido el uso RPAs hasta 120 metros de altura, así como información complementaria sobre helipuertos, aeródromos y zonas de fauna sensible, entre otras, se puede hacer uso de la plataforma en línea ENAIRE Drones.

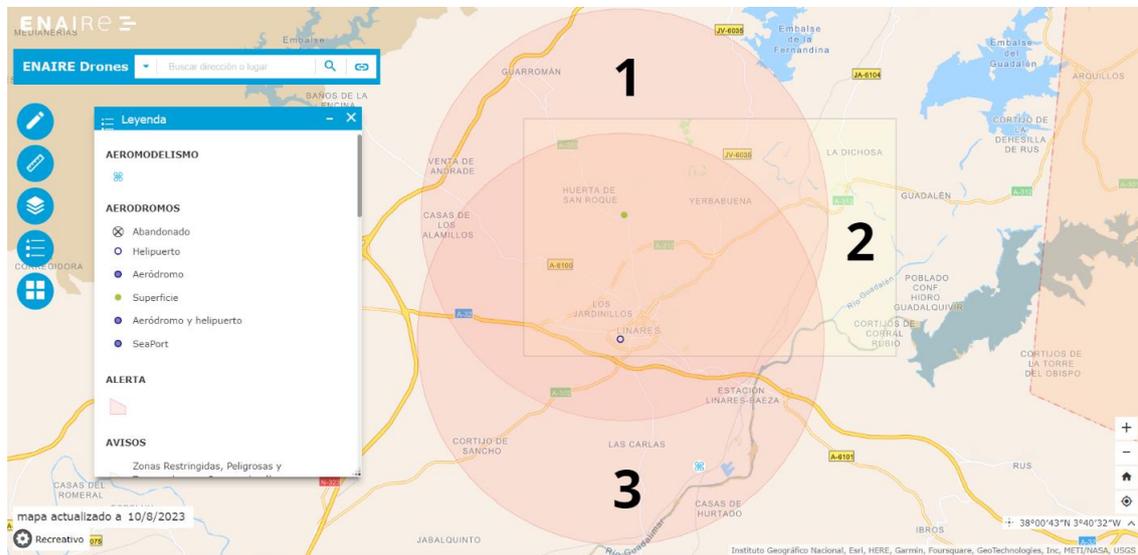


Figura 3.22. Mapa aéreo de Linares.

Asimismo, es posible adquirir detalles concernientes a las áreas designadas como zonas restringidas, peligrosas y temporalmente inseguras, así como obtener información sobre las zonas restringidas al vuelo fotográfico.

**1** Información
✖

Restricciones para su operación. Ha seleccionado: Recreativo - Vuelo fotográfico/video - VLOS

Información sobre punto de vuelo:  
 380852.434795N 0033548.026800W  
 Cálculo realizado el 10/8/2023, 12:54:04

**1** ALERTA: Se encuentra en el área de seguridad de una actividad de Ultraligero. Linares .  
**Contacto:** TEL: [+34-607 241 000](tel:+34607241000)  
 Más información en AIP ENR 5.5.

**3** ALERTA: Se encuentra en el área de seguridad del Helipuerto Hospital San Agustín de Linares  
**Datos NO AIP.**Fuente de la información: AESA. , .  
**NO permitido el vuelo a drones excepto coordinación con el Helipuerto.**  
**Contacto:** Servicio Andaluz de Salud Carlos Fajardo Fuentes Telf: 958 53 54 26; mail: cfajardo@alabeo.es

**2** AVISO: Se encuentra en una **zona restringida al vuelo fotográfico.** Nombre: Linares, Hoja: 0905-2.  
 Más información en AIP apartado AIC AIC NTL 05/20.  
 Solicite los condicionantes técnicos para cada trabajo de fotografía o captación de datos desde plataformas aéreas o aeronaves, al Centro Cartográfico y Fotográfico del Ejército del Aire (CECAF) en el email: [cecaf@ea.mde.es](mailto:cecaf@ea.mde.es)

ATENCIÓN: Solo se representa el espacio aéreo hasta 120m AGL, esta aplicación solo debe ser usada para la planificación de vuelos de drones.  
 Los horarios de los NOTAM son en UTC. Consulte Sistema de referencia temporal en la AIP, GEN 2.1, para más información.

Figura 3.23. Información sobre zonas no permitidas y zonas restringidas al vuelo fotográfico en Linares.

En función del nivel de riesgo inherente a la operación de vuelo, se establecen tres categorías operacionales el contexto de la normativa de RPAs:

- Categoría abierta: concebida para vuelos de riesgo bajo que no precisan de autorización previa.
- Categoría específica: vuelos con un riesgo moderado. En escenarios estándar no es necesario pedir autorización aunque sí lo es si no se ajusta a dichos escenarios.
- Categoría certificada: destinada a operaciones de alto riesgo, exigiendo un marco regulatorio similar al de la aviación tripulada.

En virtud de ello, resulta de obligado cumplimiento superar el examen pertinente ante la AESA para llevar a cabo vuelos con drones en la categoría abierta. Este examen puede ser de Nivel 1 o Nivel 2, en función del nivel de riesgo asociado a la operación. De igual manera, para efectuar vuelos en la categoría específica, es necesario aprobar el examen de AESA de Nivel 3.

## 4. MICROSOFT AZURE

A continuación, se ofrece un estudio de la plataforma elegida para el diseño e implementación del DT propuesto, detallando su modo de operación, las ventajas que justifican su elección y las herramientas que ofrece.

### 4.1. Introducción

Microsoft Azure es la plataforma de computación en la nube desarrollada por Microsoft, la cual habilita la aglutinación de servicios y su integración en un entorno en la nube, con la finalidad de otorgar eficacia y optimización.

Su enfoque principal recae en el logro de productividad a nivel organizativo, la provisión de un entorno flexible y de acceso abierto, así como su capacidad para operar en conjunto con las infraestructuras de centros de datos existentes mediante el concepto de nube híbrida [49], permitiendo la coexistencia de nubes privadas y públicas, realmente útil para organizaciones que precisan interactuar internamente, utilizando la nube privada, y con el exterior, a través de la nube pública [50].

Entre sus atributos destacan el modelo de pago por uso, la integridad de los datos, el respaldo global y la oferta de soluciones de computación cognitiva.

Microsoft Azure ofrece a estudiantes universitarios la posibilidad de utilizar algunos de sus servicios gratuitos con un saldo de 100\$ durante los primeros 12 meses. Para ello, es necesario acreditar tener 18 o más años y estar matriculado en una institución educativa acreditada que imparta estudios de grado a tiempo completo.

### 4.2. Funcionamiento de la nube de Azure

En la nube de Microsoft Azure, los términos “recursos” y “grupo de recursos” tienen significados específicos:

- **Recursos:** un recurso es una entidad administrada que representa algo que se puede usar, como máquinas virtuales, bases de datos, cuentas de almacenamiento, redes, aplicaciones web, etc. En otras palabras, es una representación de un servicio o componente que se crea, administra y utiliza en Azure. Cada recurso tiene sus propias propiedades, configuraciones y estados, pudiendo incluso estar asociados con otros recursos.
- **Grupo de recursos:** forma lógica de organizar y gestionar los recursos relacionados. Es un contenedor que almacena los recursos relacionados que

pertenecen a una solución específica, proyecto o aplicación de Azure. Los grupos de recursos proporcionan una forma de administrar, organizar, implementar y supervisar los recursos de manera colectiva, permitiendo incluso facilitar el control y rastreo de los costes asociados.

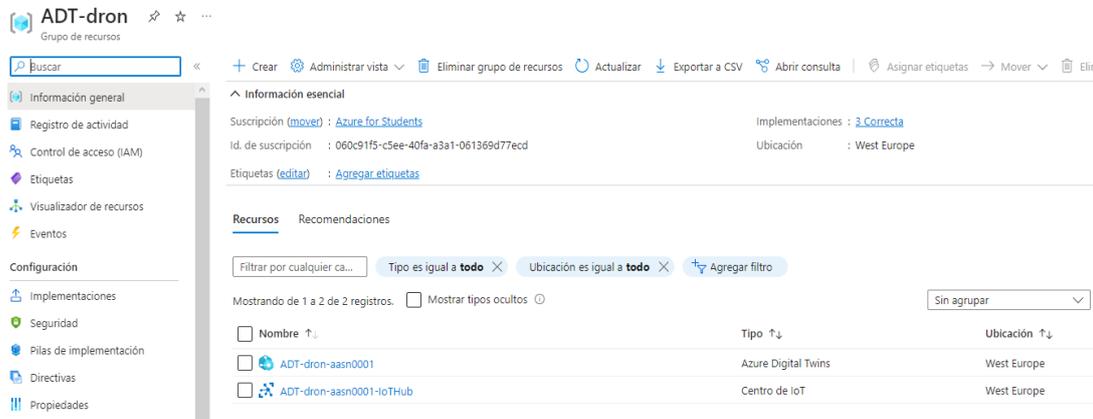


Figura 4.1. Grupo de recursos denominado “ADT-dron” en el que se encuentran dos recursos: “ADT-dron-aasn0001” y “ADT-dron-aasn0001-IoTHub”

Azure opera en una red global de centros de datos distribuidos en diferentes regiones del mundo, en la que cada región, dispone de múltiples centros que ofrecen redundancia y alta disponibilidad. Funciona como una herramienta escalable y flexible que permite a organizaciones alojar aplicaciones, almacenar y administrar datos, implementar servicios, etc., sin la necesidad de invertir en hardware físico.

Ofrece tres modelos de servicios principales en su plataforma en la nube:

- **Infraestructura como servicio** (IaaS, del inglés *Infrastructure as a Service*): Azure proporciona a sus clientes todas las necesidades de red y computación a Microsoft, tales como máquinas virtuales, contenedores, seguridad, copias de seguridad, desarrollo de aplicaciones web, almacenamiento y computación de alto rendimiento. De esta forma, son los clientes quienes configuran, instalan u operan el software que se ejecuta en esta infraestructura virtual.

Algunos de los servicios que proporciona Azure siguiendo este modelo serían las máquinas virtuales (VMs, del inglés *Virtual Machine*), Azure Virtual Network, Azure Blob Storage, entre otras.

- **Plataforma como servicio** (PaaS, del inglés *Platform as a Service*): Azure también ofrece una gama de servicios que facilitan un entorno de desarrollo y despliegue, permitiendo a los usuarios crear, implementar y gestionar aplicaciones de manera efectiva, sin inquietarse por la infraestructura subyacente.

La principal distinción con respecto a IaaS se centra en el nivel de abstracción y la carga de responsabilidad asumida por el usuario. IaaS, como servicio, confiere un mayor grado de control, es decir, menor abstracción, y por ende, conlleva mayores responsabilidades para el usuario. En contraste, en el caso de PaaS, el proveedor toma una mayor parte de las tareas de gestión, lo cual habilita al usuario a concentrarse primordialmente en el desarrollo de las aplicaciones. Algunos de los servicios que proporciona Azure siguiendo este modelo serían Azure App Service, Azure SQL Database, Azure Functions, entre otras.

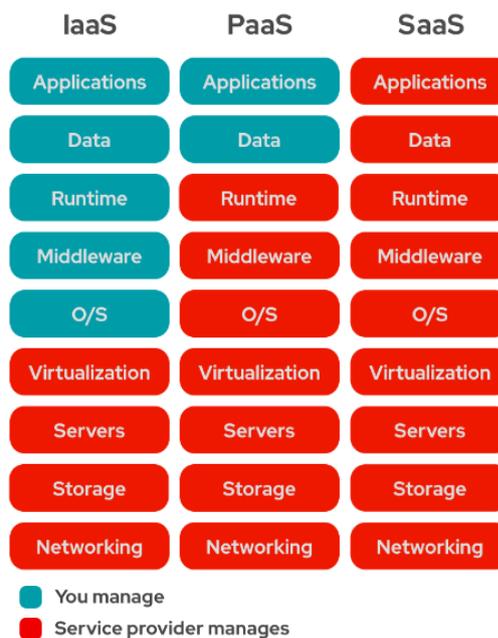


Figura 4.2. Nivel de abstracción conseguido en función del servicio adoptado [51].

- Software como servicio (SaaS, del inglés *Software as a Service*):** por último, Azure también proporciona servicios en la nube que difieren con IaaS y PaaS. SaaS, en lugar de proporcionar infraestructura o plataformas, se ofrecen aplicaciones de software directamente a los usuarios a través de Internet. Estas aplicaciones se ejecutan en la infraestructura del proveedor de servicios y los usuarios pueden acceder a ellas a través de un navegador web, sin necesidad de instalar ni mantener el software en sus propios dispositivos.

Todo ello hace que no sea necesario instalar, mantener o administrar software en el lado del usuario puesto que estos acceden a aplicaciones completamente funcionales sin preocuparse por la infraestructura subyacente, el sistema operativo o la plataforma en la que se ejecuta la aplicación. Algunos de los servicios que proporciona Azure siguiendo este modelo serían Microsoft 365, Dynamics 365, Azure DevOps, entre otras.

La selección del modelo de servicio adoptado estará sujeta a las necesidades que deban ser atendidas, el nivel de responsabilidad que se desee asumir y el grado de abstracción que se persiga.

### 4.3. Beneficios y criterio de selección

La elección de la plataforma adecuada para el desarrollo de DT depende de diversos factores. A continuación, se presentan algunas ventajas de utilizar el entorno que proporciona Microsoft Azure en comparación con otras plataformas como MindSphere, Simulink o Watson IoT Platform para el desarrollo de DT:

- **Amplia gama de servicios:** Azure ofrece una amplia variedad de servicios que abarcan desde el almacenamiento de datos hasta la AI y el ML, lo cual permite la creación de DT más sofisticados y completos.
- **Integración con herramientas externas:** la perfecta integración de Microsoft Azure con diversas herramientas y plataformas de desarrollo conlleva una serie de ventajas significativas para la creación y el despliegue de DT. Este nivel de integración se logra a través de la flexibilidad de poder elegir entre múltiples interfaces de programación de aplicaciones (API, del inglés *Application Programming Interface*), las cuales posibilitan la extracción de datos, la emisión de comandos y la sincronización de información. En el caso de los DT relacionados con dispositivos IoT, Azure IoT Hub facilita la conectividad, gestión y comunicación bidireccional con estos dispositivos, logrando una fusión entre el gemelos
- **Escalabilidad y flexibilidad:** Azure permite escalar la capacidad de los recursos de según las necesidades cambiantes del DT, lo cual permite manejar cargas de trabajo variables y procesar grandes cantidades de datos solamente cuando sea estrictamente necesario, sin desaprovechar recursos.
- **Seguridad y cumplimiento:** Azure cuenta con sólidas medidas de seguridad y cumplimiento, lo que es esencial para proteger los datos y garantizar la confidencialidad y la integridad de los DT.
- **Ecosistema de desarrollo y comunidad activa:** Microsoft Azure posee una amplia comunidad de desarrolladores y una extensa documentación, facilitando la resolución de problemas y el aprendizaje continuo.
- **Análisis avanzado y visualización de datos:** Azure ofrece capacidades avanzadas de análisis de datos y visualización que pueden mejorar la comprensión y la toma de decisiones.

- **Soporte global:** Microsoft Azure ofrece soporte global y una red de centros de datos distribuidos en todo el mundo, siendo un aspecto beneficioso para la implementación y la entrega de DTs a nivel internacional.
- **Coste por uso:** los usuario solo pagan por los recursos informáticos y servicios que realmente consumen, permitiendo que muchos de los costes que antes eran fijos, se conviertan ahora en variables. Además, Azure permite a estudiantes universitarios utilizar algunos de sus recursos de forma gratuita el primer año.

## 4.4. Azure Digital Twins

### 4.4.1. Conceptos fundamentales

Dentro del entorno de la nube de Microsoft Azure, ADT es un PaaS [52] que habilita la creación, administración y visualización de gráficos que encapsulan de manera digital entornos reales y complejos. Estos gráficos definen lo que comúnmente se conoce como DT, los cuales tienen la capacidad de representar una amplia gama de entornos, desde edificaciones y plantas industriales hasta explotaciones agrícolas, redes energéticas, sistemas ferroviarios, recintos deportivos e incluso urbes enteras. En esencia, actúan como un medio de captación de información que impulsa la mejora de productos, la optimización de operaciones, la reducción de costos y una infinidad de aplicaciones innovadoras.

ADT se presenta como una herramienta idónea para concebir la arquitectura de DTs que reflejen dispositivos tangibles del IoT, dentro de una amplia nube. Este enfoque posibilita una conexión fluida con los DTs, lo que a su vez facilita el intercambio bidireccional de datos en tiempo real.

Dentro de ADT, se definen las entidades digitales que representan productos, servicios o proceso físico mediante gemelos personalizados denominados modelos [52]. Los modelos se establecen utilizando un lenguaje similar al método de codificación de datos enlazado JavaScript Object Notation for Linked Data (JSON-LD) [53], conocido como lenguaje de definición de gemelos digitales (DTDL, del inglés *Digital Twins Definition Language*). Estos modelos describen diferentes categorías de elementos mediante sus atributos de estado, eventos de telemetría, comandos, componentes y conexiones.

### 4.4.2. Arquitectura

ADT suele ser empleado en conjunto con diversos servicios ofrecidos por Azure, formando así una parte integral de una solución de IoT de mayor envergadura. Una solución completa con ADT incluye los siguientes elementos [52]:

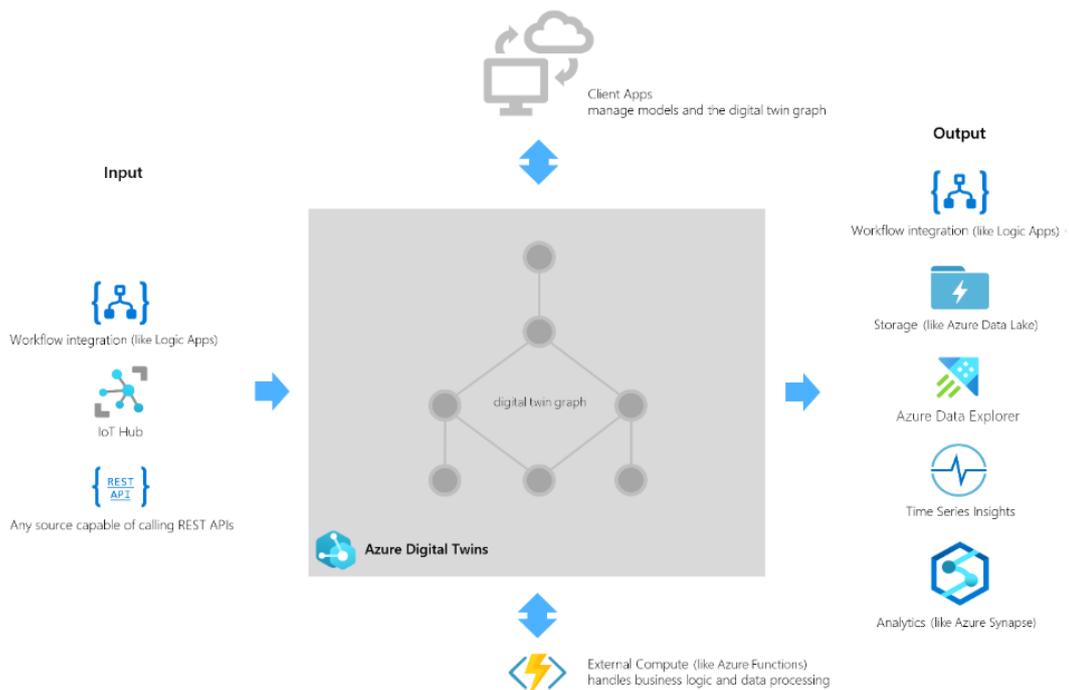


Figura 4.3. Arquitectura adoptada por una solución IoT en el entorno de Azure [52].

- **Instancia:** este elemento desempeña la función de almacenar los modelos junto con el grafo y su respectivo estado. Además, supervisa y gestiona el procesamiento de eventos asociados.
- **Aplicaciones cliente:** estas aplicaciones interactúan con la instancia de ADT, llevando a cabo tareas como la configuración de modelos, la creación de topologías y la extracción de datos desde el grafo de gemelos.
- **Recursos de procesamiento externos:** para el procesamiento de eventos, que no son más que notificaciones sobre un cambio o una acción ocurrida en un recurso, generados por ADT o fuentes de datos conectadas como dispositivos, es común contar con uno o más recursos de procesamiento. Entre las soluciones frecuentemente empleadas se encuentran las Azure Functions.
- **Instancia de IoT Hub:** para la gestión de dispositivos y el flujo de datos de IoT, se despliega una instancia de IoT Hub, la cual ofrece capacidades esenciales para dichas acometidas.
- **Servicios descendentes:** La solución se enriquece mediante servicios descendentes que proporcionan diversas funcionalidades. Estas pueden abarcar desde la integración de flujos de trabajo a través de Logic Apps, hasta el almacenamiento en frío a través de Azure Data Lake, además de herramientas de análisis mediante herramientas como Azure Data Explorer o Time Series Insights.

#### 4.4.3. Digital Twins Definition Language

Lenguaje de definición utilizado en ADT para describir la estructura, el comportamiento y las propiedades de los DTs. Proporciona una forma estandarizada y coherente de describir los aspectos clave de los DTs, facilitando su interoperabilidad y comprensión además de facilitar la reutilización de definiciones y código.

DTDL adopta la sintaxis de JavaScript Object Notation (JSON) [57], por lo que es necesario almacenar los modelos con la extensión *.json* y pudiendo ser escritos en cualquier editor de texto. Los campos de una interfaz de un modelo son [57]:

Campo	Descripción
<b>@id</b>	Identificador de modelo de gemelo digital (DTMI) para el modelo. Su formato es el siguiente: <i>dtmi:&lt;domain&gt;:&lt;unique-model-identifier&gt;;&lt;model-version-number&gt;</i>
<b>@type</b>	Identifica el tipo de información que se describe. En el caso de una Interfaz, el tipo es <i>Interface</i>
<b>@context</b>	Establece el contexto del documento JSON. Para la versión número 2 de DTDL, el contexto sería: <i>dtmi:dtdl:context;2</i>
<b>displayName</b>	Campo adicional que da la opción de definir un nombre descriptivo para el modelo.
<b>Contents</b>	Los datos restantes de la interfaz se especifican aquí, como una matriz de definiciones de atributo. Cada atributo debe especificar un valor de <i>@type</i> , entre los que se encuentran <i>Property</i> , <i>Telemetry</i> , <i>Relationship</i> y <i>Component</i> , identificando el tipo de información de la interfaz que describe y, después, un conjunto de propiedades que definen el atributo real.

Tabla 1. Campos de una interfaz de modelo.

La información principal sobre un modelo se proporciona mediante sus atributos, definidos en la sección *contents* de la interfaz del modelo. En DTDL, los atributos disponibles son los siguientes [22] [57]:

- **Propiedades:** campos de datos que representan de forma estática el estado de una entidad, de forma similar a las propiedades de muchos lenguajes de programación orientados a objetos. Estas, tienen asociada un almacenamiento de seguridad y pueden ser leídas en cualquier momento.

```

{
  "@id": "dtmi:com:adt:dtsample:home;1",
  "@type": "Interface",
  "@context": "dtmi:dtdl:context;3",
  "displayName": "Home",
  "contents": [
    {
      "@type": "Property",
      "name": "id",
      "schema": "string"
    },
    {
      "@type": "Relationship",
      "@id": "dtmi:com:adt:dtsample:home:rel_has_floors;1",
      "name": "rel_has_floors",
      "displayName": "Home has floors",
      "target": "dtmi:com:adt:dtsample:floor;1"
    }
  ]
}

```

Figura 4.4. Ejemplo de la propiedad ID, en un modelo de DTDL, de un elemento Home [57].

- **Telemetría:** los campos de telemetría representan medidas o eventos, utilizados a menudo para describir las lecturas de los sensores del dispositivo. La principal diferencia con respecto a las propiedades del modelo es que la telemetría no se almacena en el DT, es decir, son estados o eventos de datos con una duración temporal limitada.

```

{
  "@id": "dtmi:com:adt:dtsample:sensor;1",
  "@type": "Interface",
  "@context": "dtmi:dtdl:context;3",
  "displayName": "Sensor",
  "contents": [
    {
      "@type": "Telemetry",
      "name": "Temperature",
      "schema": "double"
    },
    {
      "@type": "Property",
      "name": "humidity",
      "schema": "double"
    }
  ]
}

```

Figura 4.5. Ejemplo de telemetría, en un modelo DTDL, de la temperatura de un sensor [57].

- **Relaciones:** permiten representar cómo un DT puede estar implicado con otros DTs. Las relaciones pueden representar distintos significados, como *contains*,

*cools* o *isBilledTo*. Estos atributos permiten que la solución proporcione un grafo donde las entidades estén interrelacionadas, pudiendo tener incluso propiedades propias.

```
{
  "@id": "dtmi:com:adt:dtsample:home;1",
  "@type": "Interface",
  "@context": "dtmi:dtdl:context;3",
  "displayName": "Home",
  "contents": [
    {
      "@type": "Property",
      "name": "id",
      "schema": "string"
    },
    {
      "@type": "Relationship",
      "@id": "dtmi:com:adt:dtsample:home:rel_has_floors;1",
      "name": "rel_has_floors",
      "displayName": "Home has floors",
      "target": "dtmi:com:adt:dtsample:floor;1"
    }
  ]
}
```

Figura 4.6. Ejemplo de relación existente, en un modelo DTDL, entre el modelo Home conectado a el modelo Floor [57].

- **Componentes:** atributos que permiten compilar la interfaz del modelo como un ensamblado de otras interfaces. Primero, se define una interfaz como si perteneciese a un modelo, pudiendo posteriormente hacer referencia a esta desde otros DTs.

```
[
  {
    "@id": "dtmi:com:adt:dtsample:room;1",
    "@type": "Interface",
    "@context": [
      "dtmi:dtdl:context;3",
      "dtmi:dtdl:extension:quantitativeTypes;1"
    ],
    "displayName": "Room",
    "extends": "dtmi:com:adt:dtsample:core;1",
    "contents": [
      {
        "@type": ["Property", "Humidity"],
        "name": "humidity",
        "schema": "double",
        "unit": "gramPerCubicMetre"
      },
      {
        "@type": "Component",
        "name": "thermostat",
        "schema": "dtmi:com:adt:dtsample:thermostat;1"
      }
    ]
  }
]
```

```

"@type": "Relationship",
"@id": "dtmi:com:adt:dtsample:room:rel_has_sensors;1",
"name": "rel_has_sensors",
"displayName": "Room has sensors"
}
]
},
{
"@context": [
"dtmi:dtdl:context;3",
"dtmi:dtdl:extension:quantitativeTypes;1"
],
"@id": "dtmi:com:adt:dtsample:thermostat;1",
"@type": "Interface",
"displayName": "thermostat",
"contents": [
{
"@type": ["Property", "Temperature"],
"name": "temperature",
"schema": "double",
"unit": "degreeFahrenheit"
}
]
}
]

```

Figura 4.7. Ejemplo de un componente termostato, en un modelo DTDL, utilizado por el modelo Room [57].

Además de DTDL, existen una gran variedad de lenguajes y estándares adicionales vinculados a la definición y modelado de DT en diversos contextos y aplicaciones. Algunos ejemplos son: CityGML, OGC IndoorGML y COBie, entre otros. Sin embargo, es importante destacar que ADT requiere de manera exclusiva el uso de DTDL como lenguaje de definición de DT.

Es fundamental seguir una estrategia de desarrollo ontológico al definir un DT:

- Adoptando una plantilla DTDL previamente aprobada y ampliamente reconocida en el campo de los DTs como un estándar.
- Mediante el proceso de conversión de otras definiciones ontológicas a DTDL utilizando herramientas específicamente diseñadas para esta tarea.
- Diseñando una plantilla propia desde cero que se ajuste perfectamente a las necesidades específicas del DT en cuestión.

La estrategia recomendada, y que suele brindar mejores resultados, es comenzar adoptando un modelo estándar y luego adaptarlo según las necesidades requeridas.

#### 4.4.4. Integración con servicios de Azure

A continuación, se describen algunos servicios que ofrece Microsoft Azure y que resultan útiles para desarrollar, gestionar y visualizar de forma completa DTs.

- **Azure IoT Hub**

Azure IoT Hub ofrece un back-end [54] creado específicamente para habilitar la comunicación bidireccional y la administración segura de dispositivos IoT independientemente de su ubicación geográfica. Permite conectar, monitorizar y controlar de forma eficiente una amplia variedad de dispositivos y sensores, permitiendo a las organizaciones crear soluciones de IoT robustas.

Admite varios protocolos de comunicación, en el que MQTT está incluido y es capaz de proporcionar mecanismos de seguridad robustos, como la autenticación de dispositivos basados en claves y certificados, garantizando la integridad y confidencialidad de los datos.

- **Azure Stream Analytics**

Servicio en la nube de Microsoft que permite el procesamiento y análisis en tiempo real de flujos continuos de datos. Con Stream Analytics, es posible capturar, analizar y actuar sobre datos en tiempo real provenientes de diversas fuentes, tales como sensores, dispositivos IoT, aplicaciones web y más.

Utiliza un lenguaje similar a SQL para definir consultas y transformaciones sobre datos en tiempo real, lo cual facilita su uso sin la necesidad de requerir conocimientos complejos de programación. Normalmente, Azure IoT Hub es integrado con Azure Stream Analytics puesto que ambos servicios proporcionan una plataforma íntegra para capturar, procesar y analizar información valiosa de los flujos de datos generados por dispositivos y sensores.

- **Azure Functions**

Servicio de cómputo sin servidor proporcionado por Microsoft Azure, es decir, no es necesario administrar servidores ni preocuparse por la infraestructura subyacente puesto que las funciones se ejecutan automáticamente en un entorno administrado por Azure. Este servicio es capaz de escalar automáticamente la carga de trabajo, aumentando o disminuyendo la cantidad de recursos acorde a la demanda.

Admite varios lenguajes de programación, como C#, JavaScript, Python, PowerShell, etc. Resulta también de gran utilidad integrarlo con el servicio Azure IoT Hub puesto que este genera eventos cuando los dispositivos IoT envían datos o experimentan cambios de estado. Al integrarlo con Azure Functions, se pueden

crear funciones para que de forma automática se ejecuten en respuesta a estos eventos, al igual que se pueden realizar análisis, transformaciones y cálculos directamente sobre los flujos de datos entrantes, permitiendo realizar acciones inmediatas.

- **Azure Digital Twins Explorer**

Proporciona una interfaz gráfica que se emplea para visualizar e interactuar con los datos de la instancia de ADT, incluidos los modelos y el grafo del gemelo. Permite también ver datos en tiempo real, realizar consultas, supervisar el estado, explorar y modificar las relaciones existentes del modelo [55].

Es una herramienta útil para visualizar y administrar DT, especialmente en aplicaciones de IoT. Los desarrolladores, encuentran esta herramienta especialmente útil en dos escenarios:

- Exploración: el uso de esta herramienta se centra en la obtención de información del modelo y la forma en la que representa el escenario real. Es posible importar modelos y grafos de ejemplo para familiarizarse con el servicio.
- Desarrollo: su uso se centra en validar el grafo del modelo modificando el grafo y sus datos, además de investigar sobre propiedades específicas del modelo y sus relaciones.

- **Azure Maps**

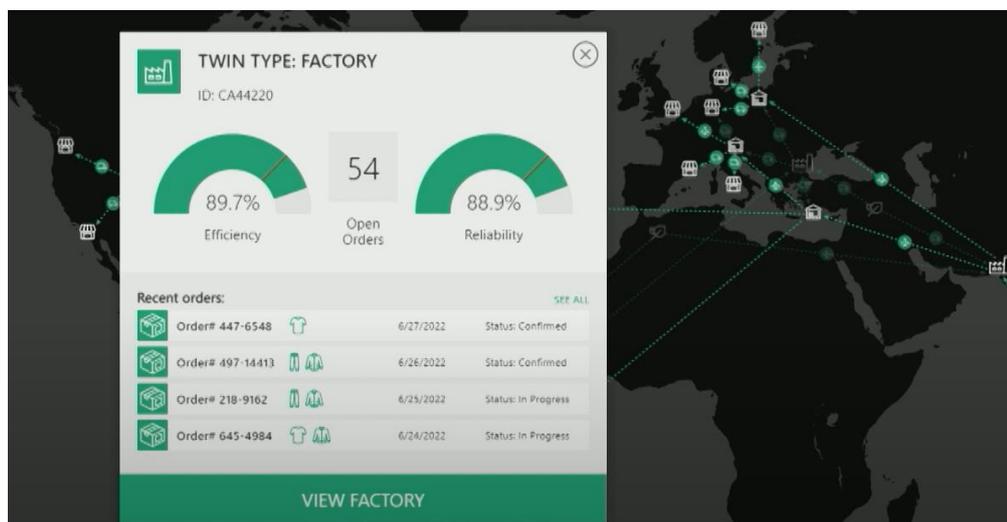


Figura 4.8. Ejemplo de DT de la cadena de suministro de una fábrica con Azure Maps [22].

Colección de servicios geoespaciales y kit de desarrollo de software (SDK, del inglés *Software Development Kit*) que emplea datos de mapas recientes para proporcionar contexto geográfico a las aplicaciones web y móviles [56]. Azure Maps permite a los desarrolladores generar mapas interactivos, información de ubicación, etc.

Dentro del contexto de DT, Azure Maps se puede integrar para proporcionar información contextual basada en la ubicación, lo cual facilita la comprensión y el análisis de cómo interactúan y se comportan los elementos del mundo real en un entorno virtual.

- **Azure 3D Scenes Studio**

Entorno 3D envolvente, donde los usuarios finales supervisan, diagnostican e investigan datos operativos con la ayuda de recursos 3D y referencias a una instancia de ADT, pudiendo tener varias escenas para una sola instancia del DT.

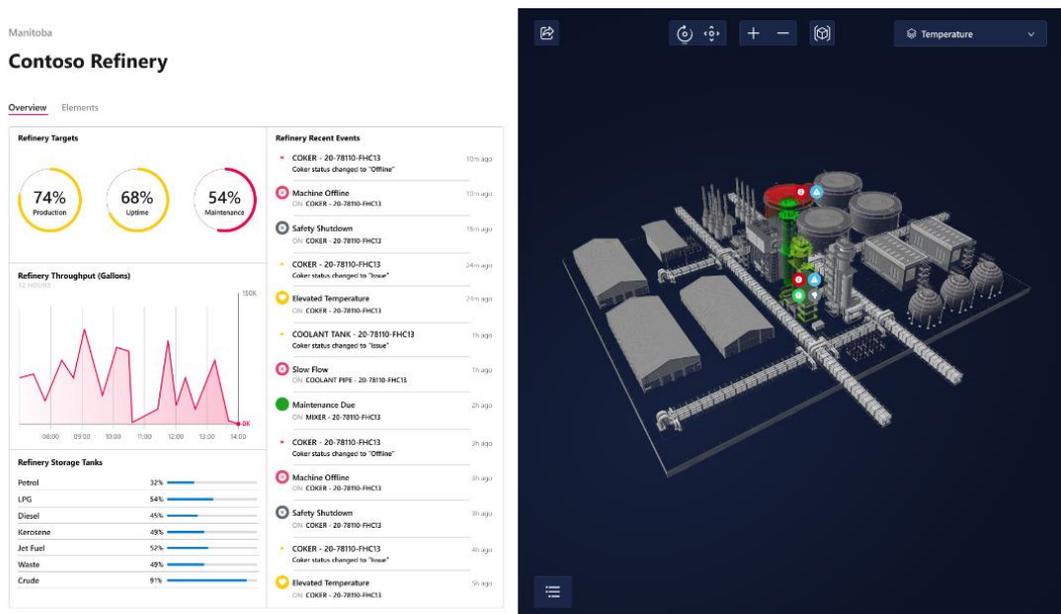


Figura 4.9. Visualización de una fábrica junto con una aplicación independiente en 3D Scenes Studio [58].

Cada escena consta de dos archivos. El primero de ellos, es el archivo 3D, el cual contiene datos del escenario y las mallas para la visualización. El segundo, es un archivo de configuración que se crea automáticamente al crear un entorno de 3D Scenes Studio. Este, contiene la definición de asignación entre el contenido 3D y ADT, así como toda la lógica subyacente definida por el usuario.

La frecuencia de actualización predeterminada es de 10 segundos aunque es posible configurarla manualmente, con el propósito de ejercer un equilibrio entre la cadencia de la extracción de datos y su influencia en el desempeño del sistema.

Igualmente, es posible definir intervalos para que se muestren advertencias cuando los elementos que componen al sistema se encuentren fuera del rango esperado.

Además, 3D Scenes Studio tiene la capacidad de ser ampliado para adaptarse a requerimientos de visualización adicionales, integrando aplicaciones personalizadas externas [58]. A continuación se presenta un ejemplo de cómo sería la visualización incrustado una aplicación independiente:

## 5. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN

### 5.1. Descripción del Gemelo Digital por desarrollar

Tal y como se ha argumentado en el Capítulo número 1 de este documento, resulta cada vez más necesario asegurar el adecuado funcionamiento de los UAVs dada la continua expansión de sus campos de aplicación y la creciente comunidad de usuarios. Por esta razón, se propone el diseño y desarrollo de un DT, de tipo DTI, de un UAV, al cual se le proporcionarán los datos recopilados de un vuelo previamente efectuado.

De esta forma, se tendrá una representación virtual de un UAV, a modo de panel de control, en el que se evalúa el funcionamiento de su homólogo físico a partir de los datos obtenidos en tiempo real de sus sensores integrados, pudiendo anticipar y prevenir situaciones en las que la integridad del dispositivo se vea comprometida, además de poder monitorizar las maniobras ejecutadas.

En calidad de fuente informativa y como cimiento para la elaboración del DT, se ha empleado un registro de vuelo de un DJI Mavic 2 Pro, en el cual se registran distintas propiedades y datos telemétricos medidos por este. Además, se ha tenido en cuenta las especificaciones técnicas aportadas por el fabricante [59] y la normativa española vigente, en las que se establecen los valores límites de funcionamiento, útiles para poder definir umbrales y tener conocimiento del buen o mal funcionamiento de este (tabla 3). Como resultado, el DT se estructura en torno a los siguientes elementos:

<b>Cámara</b>	Stream (propiedad).
<b>Caja negra</b>	Modelo, número de serie, fecha, latitud, longitud, altitud, duración, peso, velocidad, temperatura, viento y humedad (propiedad).
<b>Motor</b>	Temperatura motores, voltaje y corriente (telemetría).

Tabla 2. Elementos del DT, incluyendo sus Propiedades y Datos Telemétricos asociados.

Parámetro	Intervalo
Altura máxima	120 metros
Duración	1860 segundos (a 25km/h cte.)
Peso máximo	750 gramos
Velocidad máxima	72 km/h
Temperatura ambiente soportada	[-10°C, 40°C]

Resistencia al viento soportada	38 km/h
Humedad máxima soportada	65%
Temperatura motores	[5°C, 40°C]
Voltaje máximo soportado	17.6 V
Corriente máxima soportada	3.53 A

Tabla 3. Especificaciones técnicas del DJI Mavic 2 Pro.

Cabe destacar que al haber utilizado un registro de vuelo de un modelo específico, el diseño del DT se hará basándose en él. En concreto, el Mavic 2 Pro se presenta como un UAV cuadricóptero con una disposición en forma de X, estando compuesto por tres elementos esenciales: una cámara, una caja negra y cuatro motores.

En relación con el tipo de datos de los que se desea obtener información, se prevé que todos serán de naturaleza *double*, a excepción de "stream", "modelo", "número de serie" y "fecha", los cuales serán de tipo *string*.

## 5.2. Estrategia y desarrollo

En el marco de esta sección, se proporciona un desglose del proceso completo llevado a cabo con el objetivo de diseñar e implementar el DT propuesto.

### 5.2.1. Arquitectura adoptada y tecnologías implicadas

Partiendo de un registro de vuelo en formato .csv adquirido a través de la plataforma AIRDATA UAV, se extraen los valores medidos correspondientes a los parámetros establecidos en la *tabla 3*. Estos valores se transmiten posteriormente a la plataforma Azure IoT Hub utilizando el protocolo de comunicación MQTT.

Para que estos datos sean enviados al DT y actualicen sus valores, es necesario implementar una Azure Function en la que se ejecute un cliente HTTP en respuesta a eventos específicos originados por Azure Event Grid, siendo en este caso enrutados finalmente a ADT.

La herramienta Azure Digital Twin Explorer permite visualizar y monitorizar los modelos, propiedades y datos telemétricos de DTs creados en ADT, siendo incluso posible definir nuevos gemelos o modificar los ya existentes. Además, este explorador tiene una vinculación directa con el servicio Azure 3D Scenes Studio, el cual permite materializar la información contenida en el explorador en uno o más objetos 3D, habiendo sido almacenados antes por el servicio Azure Storage.

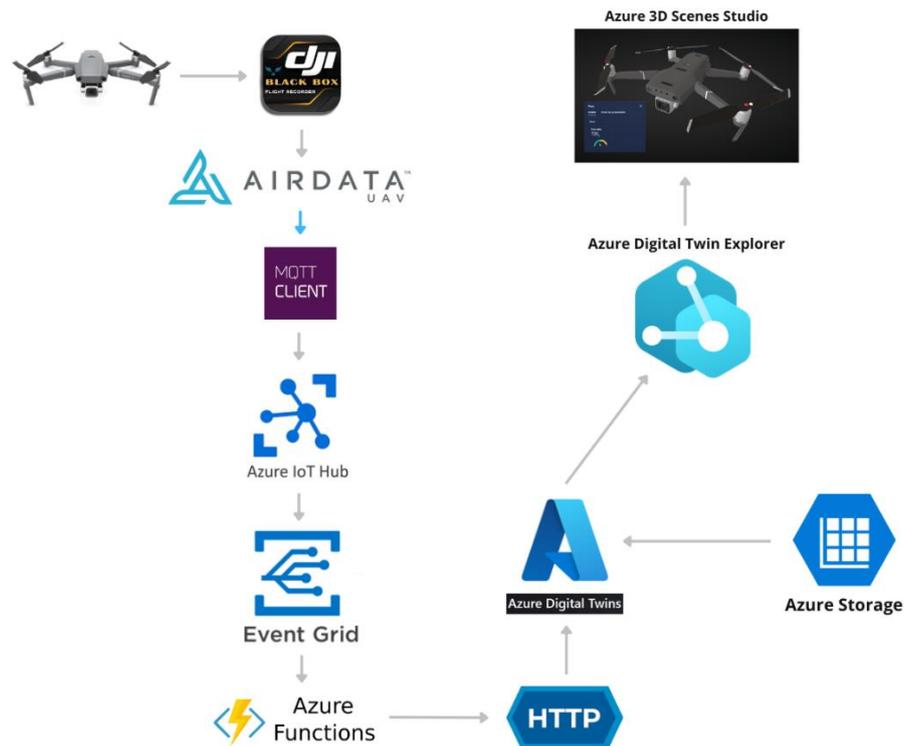


Figura 5.1. Arquitectura y tecnologías implicadas.

### 5.2.2. Grupos de recursos y recursos

Antes de comenzar con el desarrollo de los DTs, es necesario crear un grupo de recursos en los que se ubiquen todos los recursos pertenecientes a la solución. Para ello, accediendo al portal de Azure, una vez creada la cuenta de Microsoft, navegando a través del panel se debe seleccionar la opción “Crear un recurso”, aunque también es posible crear un nuevo grupo creando un recurso:

**Crear recurso** ...

Azure Digital Twins

Datos básicos | Redes | Opciones avanzadas | Etiquetas | Revisar y crear

Cree una instancia de Azure Digital Twins para empezar a compilar soluciones conectadas que modelan el mundo real. [Más información](#)

**Detalles del proyecto**

Seleccione la suscripción para administrar los recursos implementados y los costos. Use grupos de recursos, como carpetas, para organizar y administrar todos los recursos.

Suscripción \*

Grupo de recursos \*  [Crear nuevo](#)

**Detalles de la instancia**

Nombre del recurso \*

Región \*

**Conceder acceso al recurso**

Para administrar los elementos de una instancia, un usuario necesita acceso a las API de plano de datos de Azure Digital Twins. Seleccione el rol sugerido a continuación para concederse a sí mismo acceso total a las API de plano de datos. También puede usar Control de acceso (IAM) para elegir los roles adecuados más adelante. [Más información](#)

**Asignar el rol Propietario de datos de Azure Digital Twins**

Figura 5.2. Creación de un nuevo grupo de recursos denominado “ADT-dron”, además de un nuevo recurso de ADT llamado “ADT-dron-aasn0001”.

En la figura anterior, se lleva a cabo la creación de un nuevo recurso de ADT bajo la designación "ADT-dron-aasn0001". Simultáneamente, se crea un nuevo grupo de recursos, identificado como "ADT-dron". Para iniciar este proceso, se requiere haber pulsado previamente la opción "Crear nuevo".

Es de vital importancia seleccionar correctamente la región más cercana. Esta elección cobra relevancia teniendo en cuenta que la arquitectura y la naturaleza de la infraestructura en la nube de Azure, es distribuida, tomando una influencia fundamental para la reducción de la latencia, la optimización del rendimiento, el cumplimiento de la legislación y la regulación de precios.

### 5.2.3. Definición de los modelos y gemelos digitales

Una vez que ha sido creado el recurso, es posible acceder al explorador de Azure Digital Twins para comenzar con la definición de los modelos.

Como primer paso, hay que describir las entidades, propiedades y relaciones existentes de los modelos. Con esta premisa ha sido utilizado el editor de código Visual Studio Code, ya que dispone de una extensión de ADT que facilita la confección de los modelos. Esta etapa de definición consiste en reflejar la información contenida en la *tabla 2*, es decir, definir las propiedades, relaciones y dependencias que existen entre los modelos, habiendo siempre más de una solución posible.

En este TFG, se ha considerado que el *modelo padre*, del cual parten todos los demás modelos, es el modelo UAV. Este integra: cámara, caja negra, motor 1, motor 2, motor 3 y motor 4, que a su vez, contienen otros modelos que definen las propiedades y los datos telemétricos ofrecidos en la *tabla 2*.

- **Definición del modelo UAV:**

```
{
  "@id": "dtmi:example:UAV;1",
  "@type": "Interface",
  "displayName": "UAV",
  "@context": "dtmi:dtdl:context;2",
  "contents": [
    {
      "@type": "Relationship",
      "name": "contains_engine_1",
      "displayName": "contains_engine_1",
      "target": "dtmi:example:Engine_1;1"
    },{
      "@type": "Relationship",
```

```

    "name": "contains_engine_2",
    "displayName": "contains_engine_2",
    "target": "dtmi:example:Engine_2;1"
  },{
    "@type": "Relationship",
    "name": "contains_engine_3",
    "displayName": "contains_engine_3",
    "target": "dtmi:example:Engine_3;1"
  },{
    "@type": "Relationship",
    "name": "contains_engine_4",
    "displayName": "contains_engine_4",
    "target": "dtmi:example:Engine_4;1"
  },{
    "@type": "Relationship",
    "name": "contains_camera",
    "displayName": "contains_camera",
    "target": "dtmi:example:Camera;1"
  },{
    "@type": "Relationship",
    "name": "contains_blackbox",
    "displayName": "contains_blackbox",
    "target": "dtmi:example:BlackBox;1"
  }
]
}

```

- **Definición del modelo Weight:**

```

{
  "@id": "dtmi:example:Weight;1",
  "@type": "Interface",
  "displayName": "Weight",
  "@context": "dtmi:dtdl:context;2",
  "contents": [
    {
      "@type": "Property",
      "name": "Weight",
      "schema": "double",
      "description": "Peso soportado por el dron (g)"
    }
  ]
}

```

Una vez que todos los elementos han sido definidos, deben ser subidos al explorador de ADT. De esta forma se generará un grafo en el que se puede visualizar y comprobar que la definición cumpla con la estructura deseada:

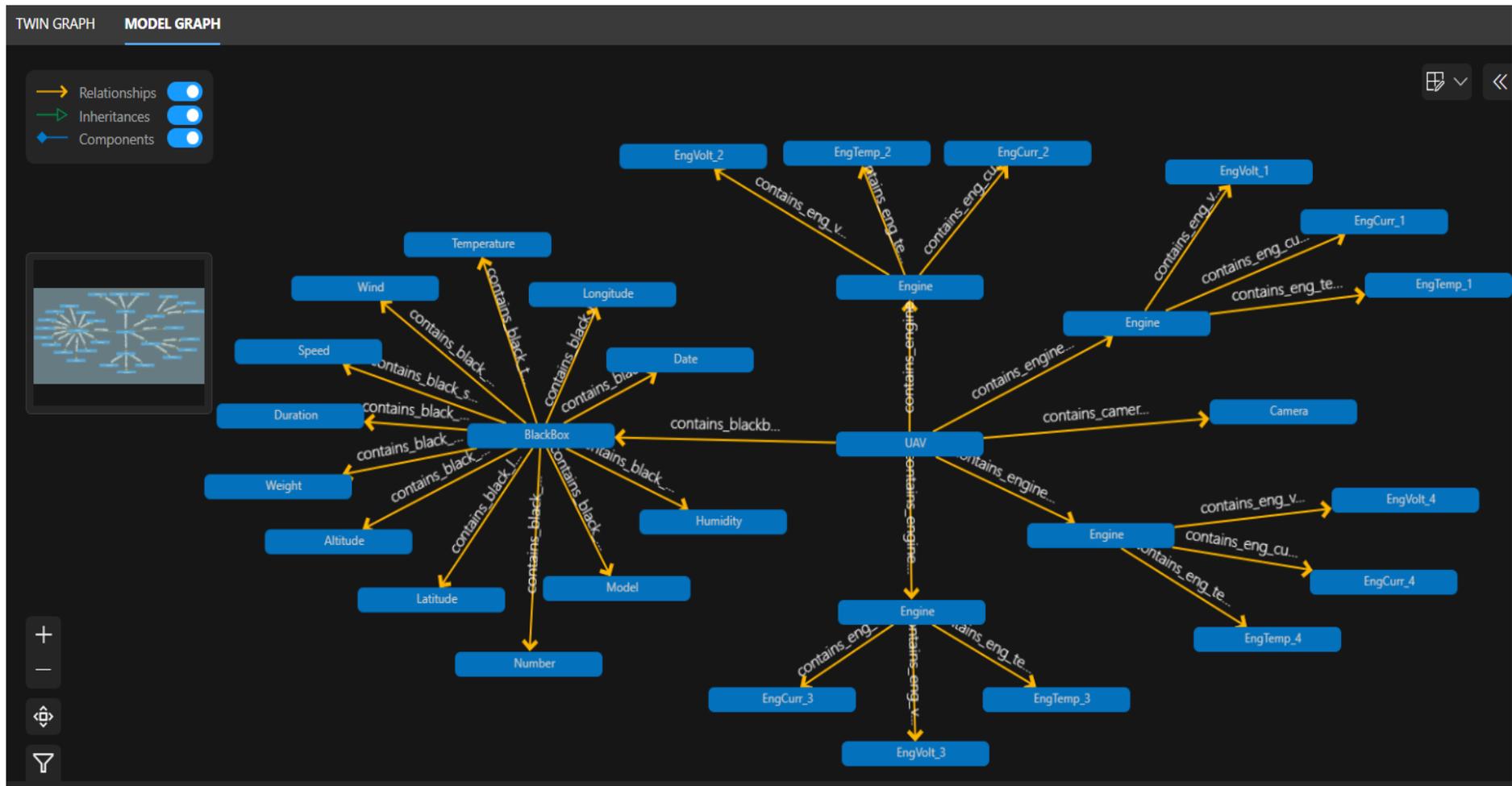


Figura 5.3. Grafo obtenido en Azure Digital Twin Explorer.

Habiendo sido importados todos los modelos, es posible comenzar a crear DTs a partir de estos. Una forma de hacerlo sería manualmente, añadiendo nuevos DTs basados en los modelos importados, tal y como se muestra a continuación:

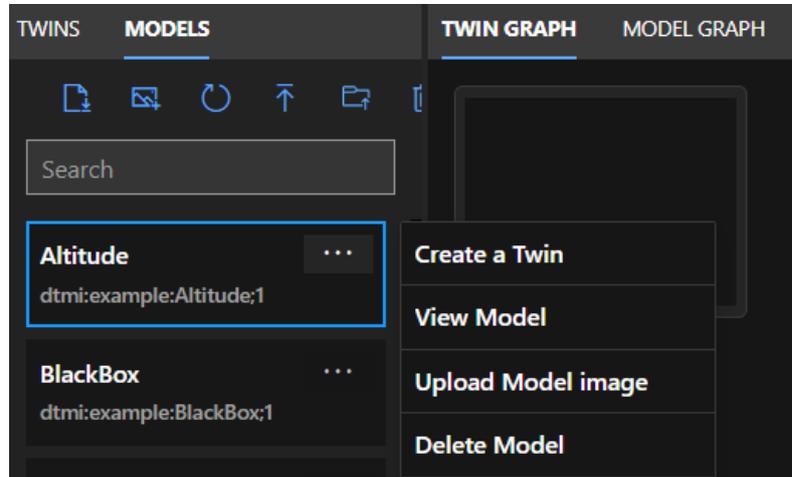


Figura 5.4. Creación manual de un DT "Altitude".

Sin embargo, es posible crear DTs leyendo la información contenida de un archivo en formato .csv, de tal forma que solo habrá que importarlo para que, comprobando que existen los modelos requeridos, genere un grafo de DTs.

A continuación se adjunta el archivo utilizado para la creación del grafo de DTs:

	A	B	C	D	E
	ModelID	ID (must be unique)	Relationship (From)	Relationship Name	Init Data
1	dtmi:example:UAV;1	UAV			
2	dtmi:example:Camera;1	Camera	UAV	contains_camera	{"Stream": "https://www.youtube.com/watch?v=qWTRgXCLaAQ"}
3	dtmi:example:BlackBox;1	Blackbox	UAV	contains_blackbox	
4	dtmi:example:Engine_1;1	Engine_1	UAV	contains_engine_1	
5	dtmi:example:Engine_2;1	Engine_2	UAV	contains_engine_2	
6	dtmi:example:Engine_3;1	Engine_3	UAV	contains_engine_3	
7	dtmi:example:Engine_4;1	Engine_4	UAV	contains_engine_4	
8	dtmi:example:Model;1	Model	Blackbox	contains_black_mod	{"Model": "DJI Mavic 2 Pro"}
9	dtmi:example:Number;1	Number	Blackbox	contains_black_num	{"Number": "1163DFAJ"}
10	dtmi:example>Date;1	Date	Blackbox	contains_black_date	{"Date": "18-08-2023"}
11	dtmi:example:Latitude;1	Latitude	Blackbox	contains_black_lat	{"Latitude": 38.08545}
12	dtmi:example:Longitude;1	Longitude	Blackbox	contains_black_long	{"Longitude": -3.64523}
13	dtmi:example:Altitude;1	Altitude	Blackbox	contains_black_alt	{"Altitude": 15}
14	dtmi:example:Duration;1	Duration	Blackbox	contains_black_dur	{"Duration": 70}
15	dtmi:example:Weight;1	Weight	Blackbox	contains_black_wei	{"Weight": 720}
16	dtmi:example:Speed;1	Speed	Blackbox	contains_black_speed	{"Speed": 8}
17	dtmi:example:Temperature;1	Temperature	Blackbox	contains_black_temp	{"Temperature": 32}
18	dtmi:example:Wind;1	Wind	Blackbox	contains_black_wind	{"Wind": 4}
19	dtmi:example:Humidity;1	Humidity	Blackbox	contains_black_humi	{"Humidity": 12}
20	dtmi:example:EngTemp_1;1	Temperature_Eng_1	Engine_1	contains_eng_temp_1	
21	dtmi:example:EngVolt_1;1	Voltage_Eng_1	Engine_1	contains_eng_volt_1	
22	dtmi:example:EngCurr_1;1	Current_Eng_1	Engine_1	contains_eng_curr_1	
23	dtmi:example:EngTemp_2;1	Temperature_Eng_2	Engine_2	contains_eng_temp_2	
24	dtmi:example:EngVolt_2;1	Voltage_Eng_2	Engine_2	contains_eng_volt_2	
25	dtmi:example:EngCurr_2;1	Current_Eng_2	Engine_2	contains_eng_curr_2	
26	dtmi:example:EngTemp_3;1	Temperature_Eng_3	Engine_3	contains_eng_temp_3	
27	dtmi:example:EngVolt_3;1	Voltage_Eng_3	Engine_3	contains_eng_volt_3	
28	dtmi:example:EngCurr_3;1	Current_Eng_3	Engine_3	contains_eng_curr_3	
29	dtmi:example:EngTemp_4;1	Temperature_Eng_4	Engine_4	contains_eng_temp_4	
30	dtmi:example:EngVolt_4;1	Voltage_Eng_4	Engine_4	contains_eng_volt_4	
31	dtmi:example:EngCurr_4;1	Current_Eng_4	Engine_4	contains_eng_curr_4	
32	dtmi:example:EngTemp_4;1	Current_Eng_4	Engine_4	contains_eng_curr_4	

Figura 5.5. Creación de DTs a partir de archivo en formato .csv.

En él se refleja a qué modelo hace referencia para su creación y se le asigna un ID que debe ser único para poder ser distinguido. También, se determina si tiene o no alguna dependencia superior con otros modelos, añadiendo el identificador de la relación existente.

Todas las propiedades definidas pueden ser inicializadas con valores, al contrario que pasa con los datos telemétricos, que ni pueden ser inicializados ni podrán ser visualizados en el explorador de ADT.

Al ser importado y guardados los gemelos, se tiene un total de 31 DTs y 30 relaciones para la realización de este TFG. Es necesario realizar una consulta al recurso para poder visualizar el grafo de DTs, teniendo el siguiente resultado:

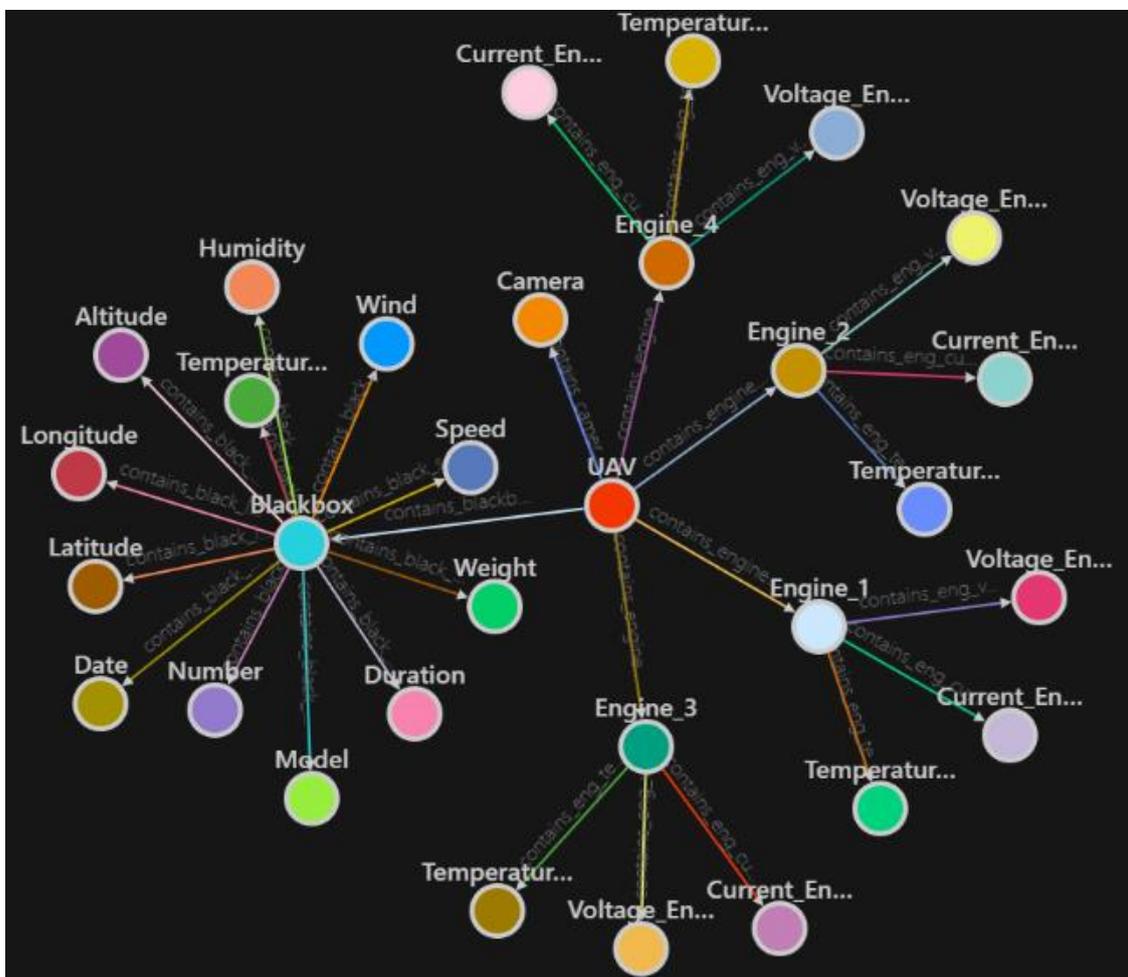


Figura 5.6. Grafo de DTs generado.

Pulsando en cualquiera de los DTs que poseen propiedades, es posible visualizar el valor inicial establecido, el cual, en el siguiente caso, ha sido actualizado por última vez el 28 de agosto de 2023 a las 18:28 horas:

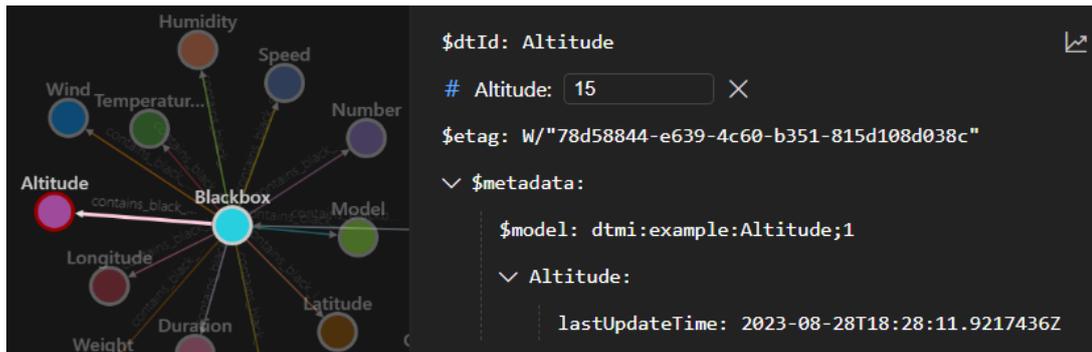


Figura 5.7. Valor inicial de la propiedad "Altitude".

Una vez finalizado este apartado, se dispone de un DT en su primera etapa de madurez, es decir, un DT descriptivo en el que se define el comportamiento y las características del UAV.

#### 5.2.4. Transferencia de datos a Azure IoT Hub

Al igual que con la creación del recurso de ADT, es necesario crear un nuevo recurso para el servicio de Azure IoT Hub dentro del grupo de recursos "ADT-dron":

The screenshot shows the 'Centro de IoT' (IoT Hub) configuration page in the Microsoft Azure portal. The page is titled 'Centro de IoT' and includes a search bar and navigation tabs for 'Aspectos básicos', 'Redes', 'Administración', 'Complementos', 'Etiquetas', and 'Revisar y crear'. The 'Detalles del proyecto' section is active, showing the following configuration options:

- Suscripción: Azure for Students
- Grupo de recursos: ADT-dron
- Nombre de IoT Hub: ADT-dron-aasn0001-IoTHub
- Región: West Europe
- Nivel: Estándar (más popular)
- Límite diario de mensajes: 400.000 (25 US\$/mes)

Figura 5.8. Creación de un nuevo recurso de Azure IoT Hub llamado "ADT-dron-aasn0001-IoTHub".

Este servicio necesita determinar un número máximo diario de mensajes, limitados por el nivel seleccionado, pudiendo elegir entre las siguientes opciones:

Nivel			
	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
	Estándar	Básico	Gratis
Mensajes del dispositivo a la nube	✓	✓	✓
Comandos de la nube al dispositivo	✓	—	✓
IoT Edge	✓	—	✓
Dispositivo gemelo	✓	—	✓
Actualizaciones de dispositivo para IoT Hub <small>COMPLEMENTO</small>	Apto	-	-
Defender para IoT <small>COMPLEMENTO</small>	Apto	-	-
Límite diario de mensajes	hasta 3 mil millones	hasta 3 mil millones	hasta 8000
Tamaño del mensaje	4 KB	4 KB	0.5 KB

Figura 5.9. Niveles disponibles para el servicio Azure IoT Hub.

Dada la magnitud del DT a implementar, en la que es necesario actualizar los dispositivos generados en IoT Hub y habilitar la interacción con DTs, se ha tomado la decisión de adoptar el nivel de servicio estándar con el mínimo número de mensajes diarios posibles, 400.000, teniendo un coste final de 25 US\$/mes.

 Crear un dispositivo ...

 Buscar dispositivos Azure Certified for IoT en el catálogo de dispositivos

Id. de dispositivo \* 

Speed

Dispositivo IoT Edge

Tipo de autenticación 

**Clave simétrica** X.509 autofirmado X.509 firmado por CA

Generar claves automáticamente 

Conectar este dispositivo a un centro de IoT 

**Habilitar** Deshabilitar

Dispositivo principal 

**No hay ningún dispositivo primario**  
[Establecer un dispositivo primario](#)

Figura 5.10. Creación del dispositivo virtual "Speed".

A continuación, deben crearse tantos dispositivos digitales como dispositivos físicos se dispongan, en este caso propiedades y fuentes de datos telemétricos. De esta forma, se establece una forma segura y estructurada de intercambio bidireccional de información entre dispositivos IoT y la nube de Azure.

Conforme vayan siendo generados, aparecerán en el apartado “Dispositivos”:

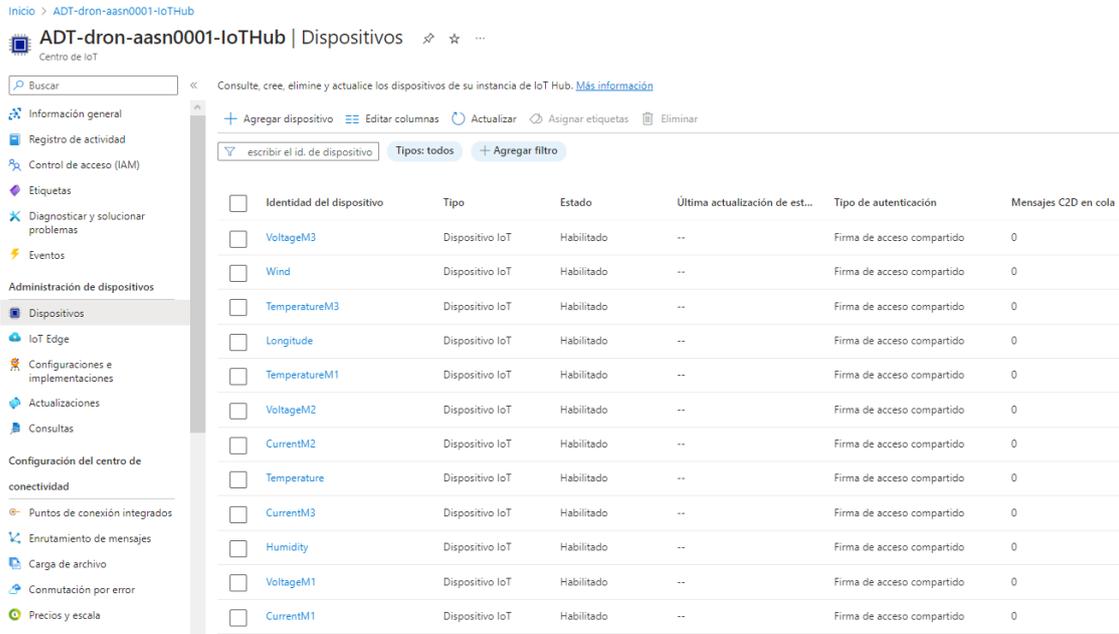


Figura 5.11. Fragmento del apartado “Dispositivos” de Azure IoT Hub.

Una vez establecidos los dispositivos digitales, se deberá crear una directiva de acceso compartido que permita la lectura y escritura de los registros, la conexión del servicio y la conexión de los dispositivos:

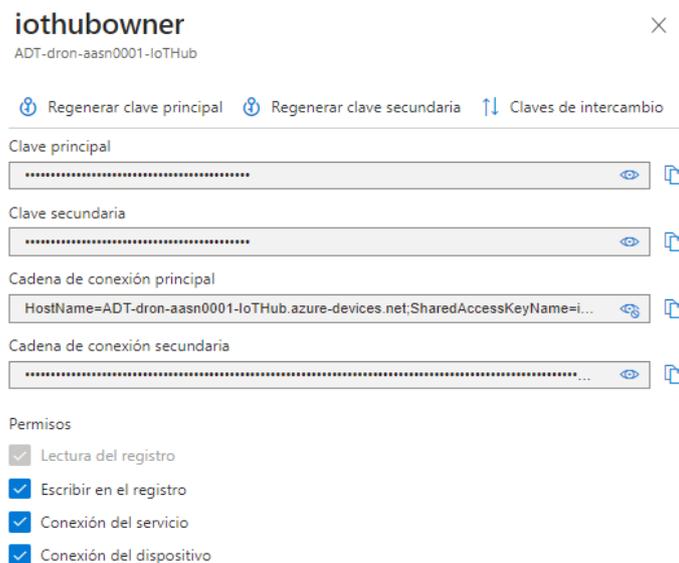


Figura 5.12. Definición de la directiva de acceso compartido “iothubowner”.

A través de la aplicación Azure IoT Explorer, introduciendo la cadena de conexión principal obtenida en la creación de la directiva de acceso compartido mostrada anteriormente, es posible acceder al centro de datos “ADT-dron-aasn0001-IoTHub”:

**Add connection string** ✕

Connection string \*

```
HostName=ADT-dron-aasn0001-IoTHub.azure-devices.net;SharedAccessKeyName=iothubowner;SharedAccessKey=iwAkNnBJ//vJdCsJxe6la/7xWmQuiSjZDAloTOsGcRc=
```

[Where do I get an IoT hub connection string?](#)  
Please do not save your hub connection string to any unsafe locations

Host name  
ADT-dron-aasn0001-IoTHub.azure-devices.net

Shared access policy name  
iothubowner

Shared access policy key  
.....

Figura 5.13. Conexión al centro de datos “ADT-dron-aasn0001-IoTHub” mediante Azure IoT Explorer.

En él se encuentran todos los dispositivos digitales definidos anteriormente, informando del estado actual, el estado de la conexión y el método seguido para su identificación. En este caso, una firma de acceso compartido (SAS, del inglés *Shared Access Signature*) es un *token* temporal que se utiliza para proporcionar acceso limitado y seguro a recursos en Azure, como dispositivos IoT, sin exponer las credenciales completas.

File Edit View Window Help  
Azure IoT Explorer (preview)

Home > ADT-dron-aasn0001-IoTHub > Devices > Latitude > Device identity

Device identity

- Device twin
- Telemetry
- Direct method
- Cloud-to-device message
- Module identities
- IoT Plug and Play components

**Device identity**

Device ID  
Latitude

Primary key  
.....

Secondary key  
.....

Primary connection string  
.....

Secondary connection string  
.....

Connection string with SAS token

Symmetric key \*  
Primary key

Expiration (minutes)  
30

SAS token connection string  
HostName=ADT-dron-aasn0001-IoTHub.azure-devices.net;DeviceId=Latitude;SharedAccessSignature=SharedAccessSignature sr=ADT-dron-aasn0001-IoTHub.a...

Figura 5.14. Creación de una SAS para el dispositivo “Latitude”.

Al acceder a los dispositivos IoT definidos, es posible generar una SAS estableciendo el tipo de clave simétrica seleccionada y la duración máxima expresada en minutos que será válido el token (figura 5.14).

Para enviar datos al dispositivo IoT digital, es necesario utilizar un protocolo de comunicación, como lo es el protocolo MQTT. A través del lenguaje de programación Python es posible definir un cliente MQTT que publique la información emitida por el sensor en la plataforma IoT. Con esta premisa, se hace necesario tener que referencia a qué dispositivo se le realiza una escritura, así como el nombre de la plataforma a la que pertenece y la SAS definida previamente.

A modo de ejemplo ilustrativo, se presenta la publicación de información para el dispositivo IoT "Latitude", en el que se emplea para ello un cliente MQTT que interactúa entre el sensor físico y la plataforma IoT "ADT-dron-aasn0001-IoTHub", teniendo que insertar la SAS generada en el paso anterior cuya duración máxima es de 30 minutos, no siendo posible establecer comunicación una vez cumplidos.

- **Publicación de información en el dispositivo "Latitude" con un cliente MQTT:**

```
from paho.mqtt import client as mqtt
import time
import datetime
import json

def on_subscribe(client, userdata, mid, granted_qos):
    print('Subscribed for m' + str(mid))

def on_connect(client, userdata, flags, rc):
    print('Connected with result code: ' + str(rc))

def on_log(client, userdata, level, buf):
    print("log: ", buf)

device_id = "Latitude"
iot_hub_name = "ADT-dron-aasn0001-IoTHub"
sas_token = "SharedAccessSignature sr=ADT-dron-aasn0001-IoTHub.azure-devices.net%2Fdevices%2FLatitude&sig=9ebF4erE9o97VxxWkZvoGnGazDowzAoSQnGXPLbPEg%3D&se=1693902827"

client = mqtt.Client(client_id=device_id, protocol=mqtt.MQTTv311,
clean_session=False)
client.on_log = on_log
client.tls_set_context(context=None)
```

```

username = "{}.azure-device.net/{}/api-version=2018-06-30".format(iot_hub_name, device_id)
client.username_pw_set(username=username, password=sas_token)

client.on_connect = on_connect
client.connect(iot_hub_name+".azure-devices.net", port=8883)
client.loop_start() # Iniciar el ciclo de eventos MQTT

data_vector = [32.38216647, 32.38216646, 32.38216647, 32.38216651,
32.38216646, 32.38216642, 32.38216641, 32.38216636, 32.38216631,
32.38216626, 32.38216619] # Vector de datos a enviar
interval_seconds = 30 # Intervalo de tiempo en segundos

for data_point in data_vector:
    exp = datetime.datetime.utcnow()
    abcstring1 = {
        "Latitude": data_point
    }
    data_out1 = json.dumps(abcstring1)

client.publish("devices/{device_id}/messages/events/".format(device_id=device_id), payload=data_out1, qos=1, retain=False)
    print("Publishing on devices/" + device_id + "/messages/events/",
data_out1)
    time.sleep(interval_seconds) # Esperar 30 segundos antes de enviar el siguiente mensaje

```

Con la anterior implementación, al ejecutar el cliente se envía la siguiente información al dispositivo IoT:

```

In [1]: runfile('C:/Users/aLeja/Documents/TFG_TELEMATICA/python/IoTtoAzure.py',
wdir='C:/Users/aLeja/Documents/TFG_TELEMATICA/python')
log: Sending CONNECT (u1, p1, wr0, wq0, wf0, c0, k60) client_id=b'Latitude'
log: Sending PUBLISH (d0, q1, r0, m1), 'b'devices/Latitude/messages/events/', ...
(25 bytes)
Publishing on devices/Latitude/messages/events/ {"Latitude": 32.38216647}
log: Received CONNACK (0, 0)
Connected with result code: 0
log: Received PUBACK (Mid: 1)
log: Sending PUBLISH (d0, q1, r0, m2), 'b'devices/Latitude/messages/events/', ...
(25 bytes)
Publishing on devices/Latitude/messages/events/ {"Latitude": 32.38216646}
log: Received PUBACK (Mid: 2)
log: Sending PINGREQ
log: Received PINGRESP

```

Figura 5.15. Consola del cliente MQTT tras la publicación de 2 parámetros para el dispositivo "Latitude".

La aplicación Azure IoT Explorer permite recibir y leer los eventos recibidos en la sección "Telemetry" del dispositivo, pudiendo comprobar que tanto la implementación del cliente como el formato de la petición se ha realizado correctamente.

- ☰
- 📄 Device identity
- 👤 Device twin
- 📄 Telemetry
- ✕ Direct method
- ✉ Cloud-to-device message
- 🔗 Module identities
- 🔧 IoT Plug and Play components

■ Stop
☐ Show system properties
🗑 Clear events
{ } Simulate a device
⤴ Customize Content Type

### Telemetry

You can monitor telemetry that the device sends to the IoT hub

Consumer group ⓘ \$Default

Specify enqueue time ⓘ

No

Use built-in event hub

Yes

🕒 Receiving events... ⓘ

---

**Tue Aug 29 2023 11:24:38 GMT+0200 (hora de verano de Europa central):**

```
{
  "body": {
    "Latitude": 32.38216646
  },
  "enqueuedTime": "Tue Aug 29 2023 11:24:38 GMT+0200 (hora de verano de Europa central)"
}
```

---

**Tue Aug 29 2023 11:24:13 GMT+0200 (hora de verano de Europa central):**

```
{
  "body": {
    "Latitude": 32.38216647
  },
  "enqueuedTime": "Tue Aug 29 2023 11:24:13 GMT+0200 (hora de verano de Europa central)"
}
```

Figura 5.16. Lectura de dos eventos recibidos por el dispositivo "Latitude" a través de Azure IoT Explorer.

En el recurso definido en la plataforma Azure, se obtienen distintas representaciones gráficas que confirman las publicaciones realizadas a la vez que se muestra información de los mensajes diarios utilizados, el límite establecido y el número de dispositivos IoT implementados:

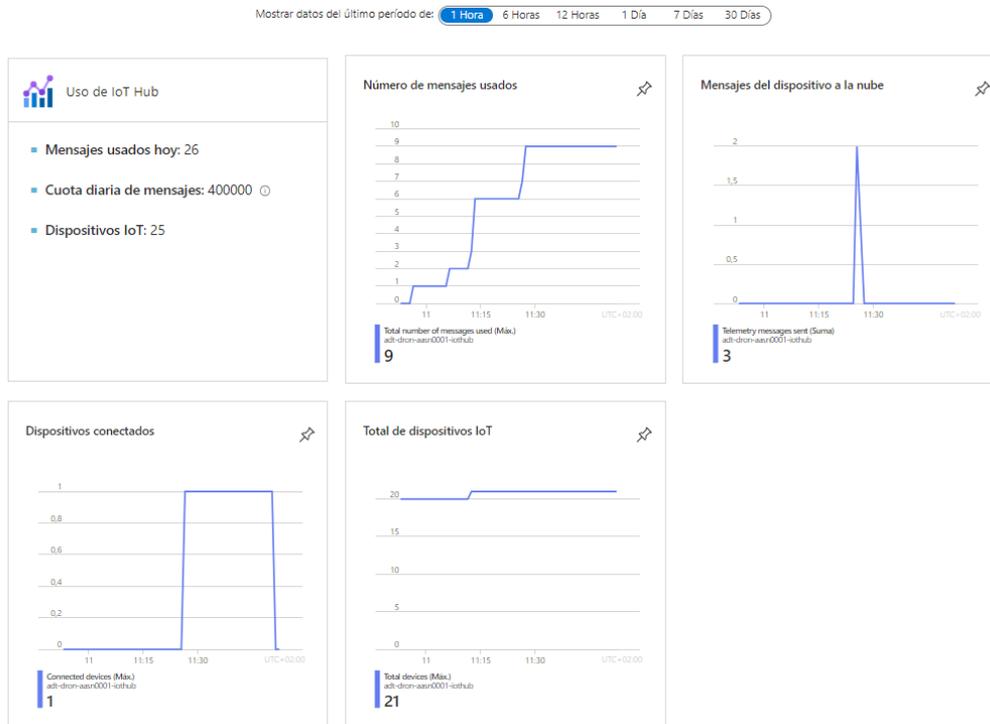


Figura 5.17. Representaciones gráficas obtenidas en el recurso "ADT-dron-aasn0001-IoTHub".

Para poder considerado debidamente que se trata de un gemelo de tipo DTI, es necesario que haya una comunicación bidireccional entre homólogos. Python permite crear un dispositivo cliente que se comunique con el servicio IoT Hub de Azure a partir de una cadena de conexión, la cual se utiliza para autenticar y autorizar la comunicación y el envío de mensajes de nube a dispositivo (C2D, del inglés *Cloud to Device*).

- **Dispositivo cliente utilizado para la comunicación C2D con dispositivo “temperature”:**

```
import time
from azure.iot.device import IoTHubDeviceClient

RECEIVED_MESSAGES = 0

CONNECTION_STRING = "HostName=ADT-dron-aasn0001-IoTHub.azure-
devices.net;DeviceId=temperature;SharedAccessKey=CAw133k3Fv3xq3662wcg19k0Q76
BYjH5fZC6pm0aKkI="

def message_handler(message):
    global RECEIVED_MESSAGES
    RECEIVED_MESSAGES += 1
    print("")
    print("Message received:")

    # print data from both system and application (custom) properties
    for property in vars(message).items():
        print ("    {}".format(property))

    print("Total calls received: {}".format(RECEIVED_MESSAGES))

def main():
    print ("Starting the Python IoT Hub C2D Messaging device sample...")

    # Instantiate the client
    client =
IoTHubDeviceClient.create_from_connection_string(CONNECTION_STRING)

    print ("Waiting for C2D messages, press Ctrl-C to exit")
    try:
        # Attach the handler to the client
        client.on_message_received = message_handler

        while True:
            time.sleep(1000)
    except KeyboardInterrupt:
```

```

    print("IoT Hub C2D Messaging device sample stopped")
finally:
    # Graceful exit
    print("Shutting down IoT Hub Client")
    client.shutdown()

if __name__ == '__main__':
    main()

```

Desde el centro IoT de Azure es posible enviar mensajes directamente al dispositivo cliente, accediendo al dispositivo definido en la plataforma y pulsando en la sección “Mensaje al dispositivo”:



Figura 5.18. Mensaje enviado al dispositivo cliente “temperature”.

Habiendo ejecutado previamente el script por consola, se obtiene la siguiente respuesta:

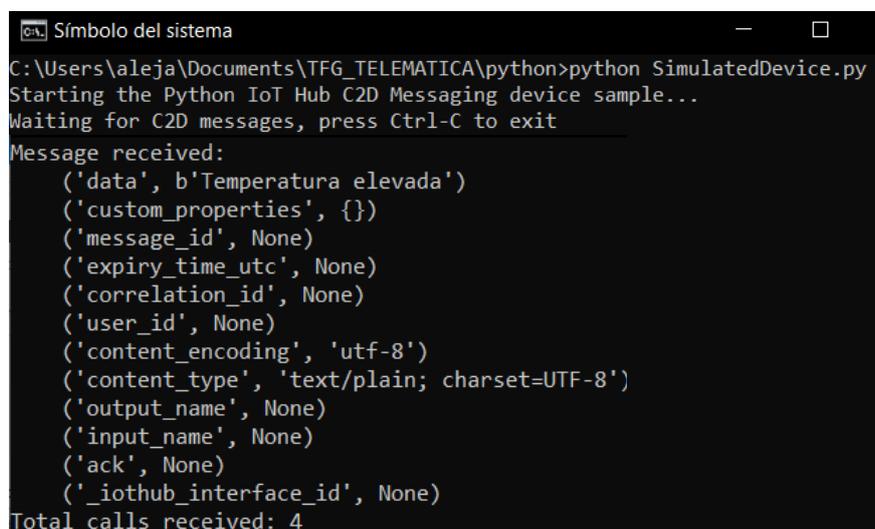


Figura 5.19. Mensaje recibido en el dispositivo cliente “temperature”.

### 5.2.5. Ingesta de datos en Azure Digital Twin

Una vez que se dispone de información en el centro IoT, es imprescindible enviar esta a los DTs para actualizar sus valores. Para ello es imprescindible definir una función de Azure que permita ejecutar un *script* en respuesta a eventos entrantes.

- **Función de Azure para la ingesta de datos del DT “Latitude”:**

```
// Default URL for triggering event grid function in the local environment.
http://localhost:7071/runtime/webhooks/EventGrid?functionName={functionname}

using System;
using Microsoft.Azure.WebJobs;
using Microsoft.Azure.WebJobs.Host;
using Microsoft.Azure.WebJobs.Extensions.EventGrid;
using Microsoft.Extensions.Logging;
using Azure.Messaging.EventGrid;
using Azure.DigitalTwins.Core;
using Azure.Identity;
using System.Net.Http;
using Azure.Core.Pipeline;
using Newtonsoft.Json.Linq;
using Newtonsoft.Json;
using Azure;
using System.Xml.Linq;
using System.Text;

namespace drontwiningestfunction
{
    public static class Function1
    {
        private static readonly string adtInstanceUrl =
Environment.GetEnvironmentVariable("ADT_SERVICE_URL");
        private static readonly HttpClient singletonHttpClientInstance = new
HttpClient();

        [FunctionName("IOTHubtoTwins")]
        public static void Run([EventGridTrigger] EventGridEvent
eventGridEvent, ILogger log)
        {
            if (adtInstanceUrl == null) log.LogError("Application setting
\"ADT_SERVICE_URL\" not set");

            try
            {
                var cred = new
ManagedIdentityCredential("https://digitaltwins.azure.net");
```



y en función de estos, interactuará con el servicio ADT para actualizar los datos de los DTs correspondientes.

Para el transporte de la información, se envían solicitudes HTTP al servicio ADT. En esencia, la instancia HttpClient personalizada al cliente “DigitalTwinsClient” permite que este último envíe datos a través de solicitudes HTTP hasta llegar a ADT:

Una vez creada la aplicación, debe ser publicada en el grupo de recursos utilizado hasta el momento. Con su publicación, se crearán nuevos recursos asociados a este, así como se debe establecer cuál será el servicio de almacenamiento que contenga a esta:

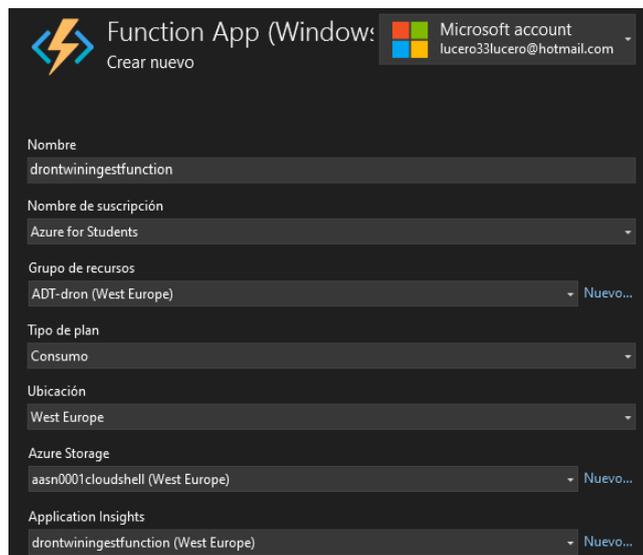


Figura 5.20. Publicación de la función en el grupo de recursos "ADT-dron".

Habiendo publicado la función, habrá ahora que configurar el acceso a la función para otorgar permiso a los servicios contenidos en el grupo de recursos sin la necesidad de utilizar credenciales. Para ello, se usan las identidades administradas por el sistema, en las que se establecen asignaciones o roles a determinados recursos, suscripciones o grupos de recursos. Entre los roles permitidos, al propietario de datos de ADT se le permite definir, crear, modificar y actualizar los DTs.

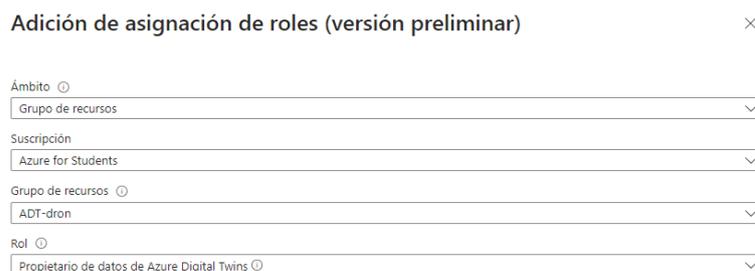


Figura 5.21. Asignación del rol "Propietario de datos de ADT" al grupo de recursos "ADT-dron".

Para que la función pueda acceder a ADT, es imprescindible agregar una ruta al recurso que contiene a los gemelos. Habiendo copiado antes el nombre del host del recurso ADT y habiéndole agregado ahora un `https://` delante, se navega ahora a la configuración de la aplicación donde se inserta este para añadir una nueva configuración de aplicación con el nombre que había sido especificado en la función de Azure:

Agregar o editar la configuración de la aplicación

Nombre	<input type="text" value="ADT_SERVICE_URL"/>
Valor	<input type="text" value="ADT-dron-aasn0001.api.weu.digitaltwins.azure.net"/>
<input type="checkbox"/>	Configuración de ranura de implementación

Figura 5.22. Creación de una nueva configuración de aplicación "ADT\_SERVICE\_URL".

En el recurso de IoT Hub, en la sección "Eventos", debe crearse un Event Grid en la que se referencia a la función de Azure ya implementada:

 **Crear suscripción de eventos** ...  
Cuadrícula de eventos

Datos básicos | Filtros | Características adicionales | Propiedades de entrega | Editor avanzado

Las suscripciones de eventos escuchan eventos que emite el recurso de tema y los envían al recurso de punto de conexión. [Más información](#)

**DETALLES DE SUSCRIPCIONES DE EVENTOS**

Nombre *	<input type="text" value="adt-event-subscription"/> ✓
Esquema de eventos	<input type="text" value="Esquema de Event Grid"/> ▼

**DETALLES DEL TEMA**

Seleccione un recurso de tema para el que se deban insertar eventos a su destino. [Más información](#)

Tipo de tema	<input checked="" type="radio"/> Grupo de recursos
Recurso de origen	<input type="text" value="ADT-dron"/>
Nombre del tema del sistema * ⓘ	<input type="text" value="adt-system-topic"/> ✓

**TIPOS DE EVENTO**

Seleccione qué tipos de eventos se insertarán en su destino. [Más información](#)

Filtro para tipos de evento *	<input type="text" value="9 seleccionados"/> ▼
-------------------------------	--

**DETALLES DE PUNTO DE CONEXIÓN**

Elija un controlador de eventos para recibir los eventos. [Más información](#)

Tipo de extremo *	<input checked="" type="radio"/> Función de Azure (cambiar)
Extremo *	<a href="#">Seleccionar un extremo</a> <input checked="" type="radio"/> Seleccione un punto de conexión.

Figura 5.23. Creación de la suscripción de eventos "adt-event-subscription".

## Seleccionar la función de Azure

Cuadrícula de eventos

Suscripción  
Azure for Students

Grupo de recursos  
ADT-dron

Aplicación de funciones \*  
drontwiningestfunction

Ranura \* ⓘ  
Production

Función \* ⓘ  
IOTHubtoTwins

Figura 5.24. Referencia a la Azure Function "IOTHubtoTwins".

De esta forma, al activar la fuente de datos que cuantifica la latitud en la que se encuentra el UAV cada 30 segundos, se obtienen 2 eventos:

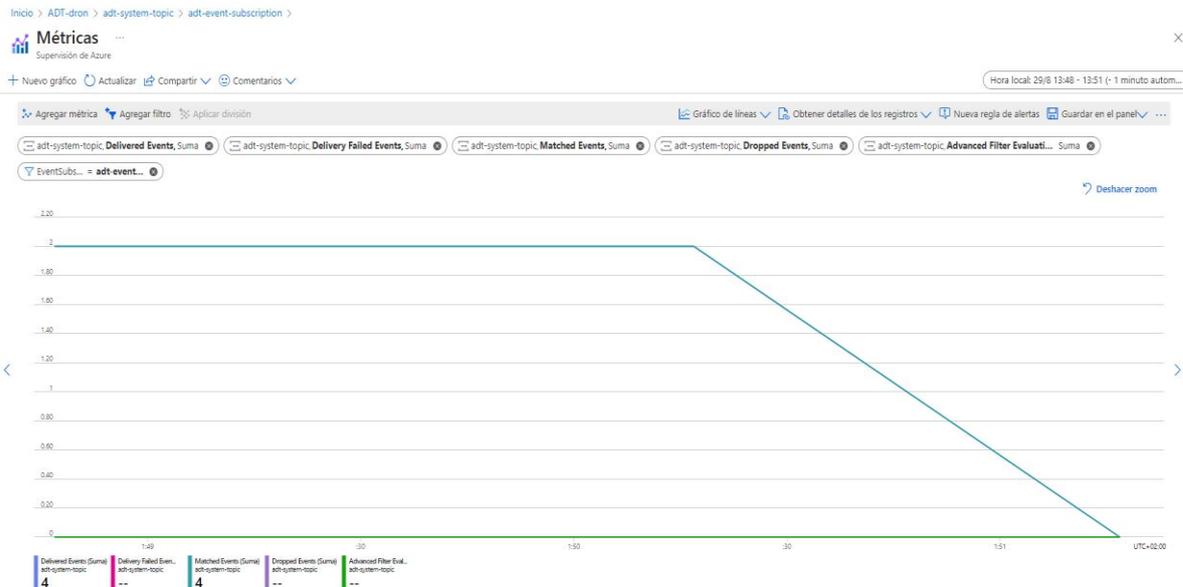


Figura 5.25. Eventos generados por el dispositivo "Latitude".

Además, es posible visualizar la información que le llega a la función a través de la supervisión de la función:

La imagen muestra la interfaz de supervisión de la función "IOTHubtoTwins". En la parte superior, se indica "IOTHubtoTwins | Supervisión" y "Función". Hay un campo de búsqueda y pestañas para "Invocaciones" y "Registros".

El panel de "Registros" muestra los siguientes mensajes de log:

```
2023-08-29T11:59:15Z [Information] Executing 'IOTHubtoTwins' (Reason='EventGrid trigger fired at 2023-08-29T11:59:14.7777271+00:00', Id=8113962f-bc80-419c-bcb6-573378d1b0c9)
2023-08-29T11:59:15Z [Information] ADT service client connection created.
2023-08-29T11:59:15Z [Information] Device:latitude Latitude is: 32.38216647
2023-08-29T11:59:15Z [Information] Executed 'IOTHubtoTwins' (Succeeded, Id=8113962f-bc80-419c-bcb6-573378d1b0c9, Duration=1ms)
2023-08-29T11:59:44Z [Information] Executing 'IOTHubtoTwins' (Reason='EventGrid trigger fired at 2023-08-29T11:59:44.4225800+00:00', Id=4e77f22c-45b3-4536-8539-a1d859cc7b7b)
2023-08-29T11:59:44Z [Information] ADT service client connection created.
2023-08-29T11:59:44Z [Information] Device:latitude Latitude is: 32.38216646
2023-08-29T11:59:44Z [Information] Executed 'IOTHubtoTwins' (Succeeded, Id=4e77f22c-45b3-4536-8539-a1d859cc7b7b, Duration=1ms)
```

Figura 5.26. Supervisión de los datos enviados por la función a ADT.

Teniendo en el DT "Latitude", el último valor que ha sido ingestado:

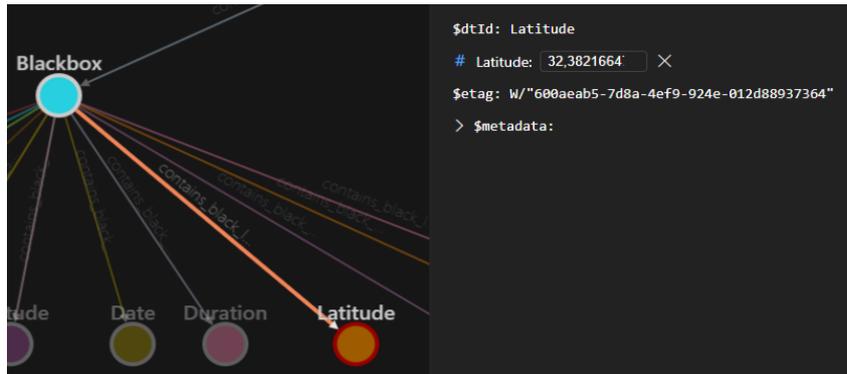


Figura 5.27. DT "Latitude" actualizado.

Una vez que ha sido finalizado este apartado, se dispone de un DT en su segunda etapa de madurez, es decir, un DT informativo al que se le incorporan datos en tiempo real procedentes de sistemas físicos.

### 5.2.6. Modelado en 3D

En la actualidad, existen múltiples plataformas que brindan la opción de descargar modelos en 3D, ya sea de forma gratuita o de pago. Con el objetivo de lograr que el DT sea una réplica fiel de su contraparte física, se ha tratado buscar un modelo en 3D que se corresponda aun DJI Mavic 2 Pro.

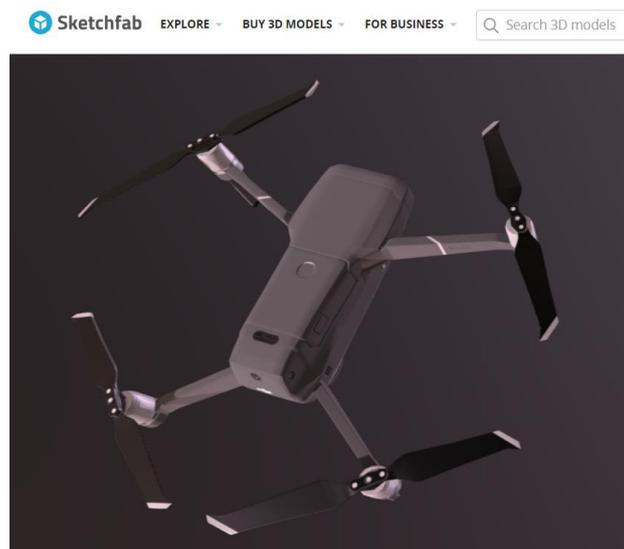


Figura 5.28. Modelo 3D de un DJI Mavic 2 Pro facilitado por la plataforma Sketchfab.

En la búsqueda del modelo digital, un particular compartió una réplica exacta del modelo DJI Mavic 2 Pro en la plataforma Sketchfab, el cual podía descargarse de forma

gratuita en formato *.fbx*, *.USDZ*, *.glTF* y en formato *.glb*. Dado que Azure 3D Scenes Studio permite únicamente archivos en formato *.fbx* y *.glb* como se detallará en el siguiente subapartado, el modelo tridimensional será descargado en este último formato con la resolución máxima posible: 4K.

El modelo se comporta como un único elemento, por lo que no será posible asignarle más de un DT de no ser que este sea modificado añadiendo nuevos elementos. Utilizando la herramienta Blender, es posible añadir nuevas figuras geométricas a las que poder asignarles DTs, tal y como se muestra a continuación:



Figura 5.29. Detalle del motor 3 con sus respectivos sensores.

### 5.2.7. Asignación de gemelos digitales al modelo 3D

A través del menú desplegable en la interfaz del explorador de ADT, es posible acceder al servicio 3D Scenes. En este, es factible crear escenarios que reflejen entornos virtuales tridimensionales. Estos entornos incorporan modelos, objetos e interacciones que permiten una exploración y manipulación interactiva.

Antes de comenzar con la creación de la escena, es necesario crear una cuenta de almacenamiento en la que se almacene un contenedor que contenga la escena:

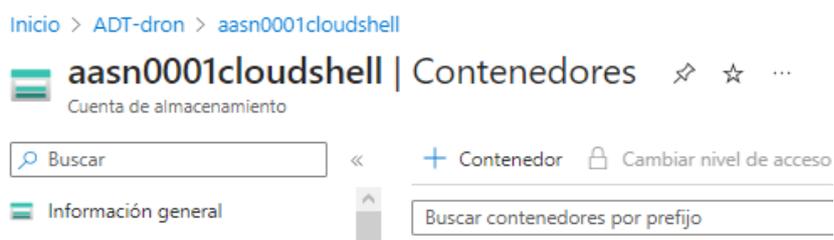


Figura 5.30. Creación de un nuevo contenedor dentro de la cuenta de almacenamiento "aasn0001cloudshell".

## Nuevo contenedor

Nombre \*  
contenedoraasn0001 ✓

Nivel de acceso público ⓘ  
Privada (sin acceso anónimo) ▾

Figura 5.31. Definición del contenedor “contenedoraasn0001”.

Creado el contenedor, es posible configurar el entorno de una nueva escena que esté vinculada a la instancia de ADT y que esté contenida en el contenedor creado anteriormente:

### Configurar el entorno de escenas 3D

Vincule la instancia de Azure Digital Twins y el contenedor de almacenamiento para comenzar a crear escenas 3D. Los datos de configuración se guardan en el almacenamiento local.

Dirección URL de instancia de Azure Digital Twins  
https://ADT-dron-aasn0001.api.weu.digitaltwins.azure.net/ ✕ ▾

Dirección URL de la cuenta de Almacenamiento de Azure  
https://aasn0001cloudshell.blob.core.windows.net/ ✕ ▾

Nombre del contenedor de Almacenamiento de Azure  
contenedoraasn0001 ✕ ▾

[Aprende más](#) Cancelar Salvar

Figura 5.32. Configuración de la nueva escena.

Al pulsar la tecla “Salvar” se accede a la creación de la nueva escena, a la que se le puede asignar un nombre y una descripción, situarla en el globo terráqueo y subir el modelo 3D en formato *.glb*.

### Crear nueva escena

Apunte a un archivo 3D existente a través de url o cargue un nuevo archivo directamente en su contenedor

Nombre \*  
Dron

Descripción  
DJI Mavic 2 Pro

Mostrar en el mundo  On

Latitud \*  
38.08545

Longitud \*  
-3.64523

Enlace archivo 3D ⓘ  
Elegir archivo Subir archivo

 dji\_mavic\_2\_pro.glb  
16.7 MB ✕

Figura 5.33. Creación de la nueva escena.

Tras haber creado las escenas se accede a un panel de navegación en el que se muestran todas las escenas creadas hasta la fecha. Además, cabe la opción de visualizar estas situándolas en las coordenadas geográficas insertadas en su creación, pudiendo localizarlas en la vista del globo terráqueo:

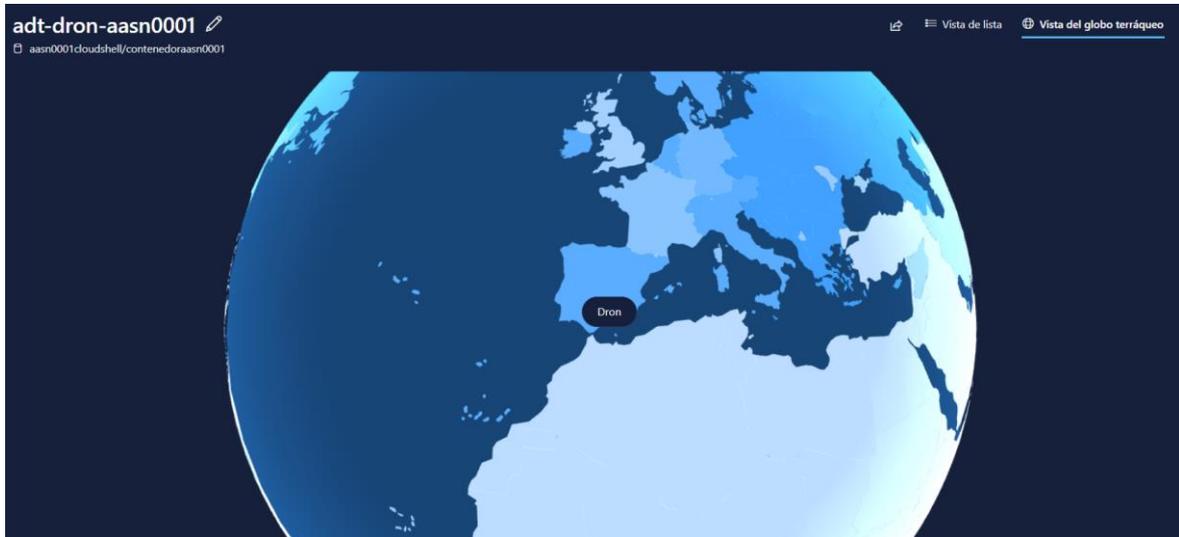


Figura 5.34. Vista del globo terráqueo en el que se localiza la escena “Dron”.

Tras seleccionar la escena “Dron”, situada en las instalaciones de la EPSL, se ingresa en el siguiente escenario, en el que ya puede ser visualizado el modelo tridimensional del UAV:



Figura 5.35. Modelo en 3D que representa la escena “Dron”.

Dentro de la interfaz de 3D Scenes Studio, en la sección “Construir”, se permite establecer conexiones entre DTs y componentes específicos del modelo tridimensional.

Por ejemplo, al seleccionar el componente identificado como "Cámara" en el modelo y establecer un vínculo con el DT denominado "Camera", se logra una vinculación, denominada elemento, en las que se heredan todas las propiedades y datos telemétricos que han sido previamente definidos en dicho DT. Para este caso en particular, el componente "Cámara" ahora dispondría de una propiedad denominada "Stream".

En este proceso, pueden verse involucrados uno o más DTs para uno o más componentes del modelo, es decir, además de vincular el componente "Voltaje motor 1" con el DT "Voltage\_Eng\_1", este puede ser agrupado también con los DTs "Temperature\_Eng\_1" y "Current\_Eng\_1" para formar un nuevo elemento conocido como "Motor 1".

Al definir todos los elementos existentes, pueden ser creados los comportamientos de actualización. Estos permiten que bajo ciertas condiciones, ocurran ciertas señales visuales que permitan determinar el comportamiento y el estado de los elementos. A estos comportamientos pueden agregarse complementos o *widgets* que permitan representar de forma visual las propiedades existentes, pero no los datos telemétricos.

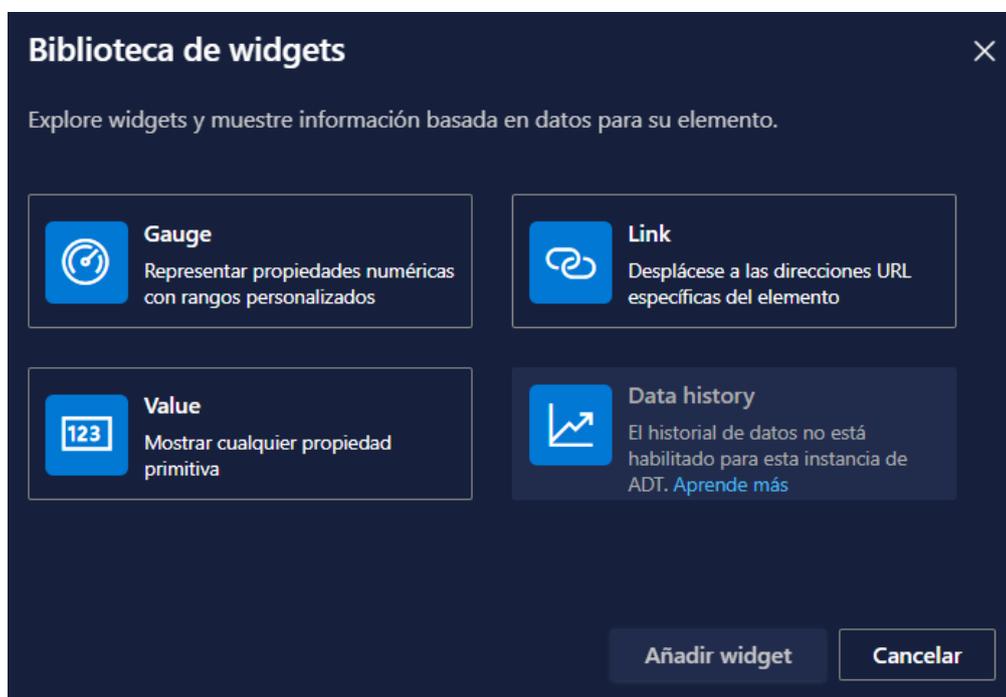


Figura 5.36. Complementos disponibles en Azure 3D Scenes Studio.

Con el propósito de agilizar la identificación de comportamientos inusuales, se implementan lo que se denominan "Reglas visuales". Estas reglas definen rangos de

operación, cuya falta de cumplimiento generará alertas visuales, manifestadas a través de iconos, permitiendo la localización precisa de la fuente que ha detectado la anomalía.

A continuación se define una nueva regla visual denominada como “Peso excesivo”. Para ello es necesario vincularla con el elemento y la capa de la escena a la que hace referencia, o lo que es lo mismo, asociando esta regla visual al elemento “Peso”, lo que se realiza es una monitorización visual del DT “Weight” el cual posee la propiedad “Weight”.

Cuando esta sea superior a 750 gramos, que es el peso máximo capaz de soportar el UAV según las estipulaciones del fabricante, se mostrará un icono de color rojo en el elemento en el que ha sido detectada la anomalía. En este caso, el elemento “Peso”.

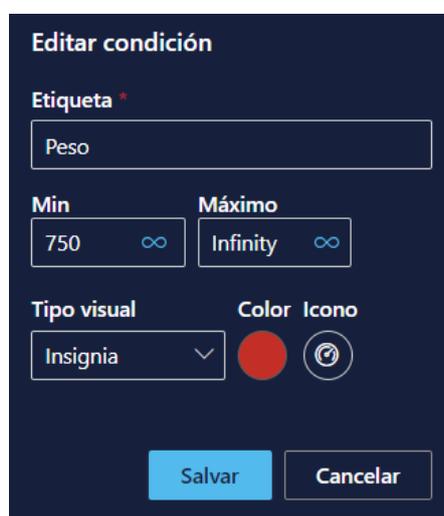


Figura 5.37. Condición especificada en la regla visual definida en el elemento “Peso”.

Al concluir esta última etapa, sería correcto afirmar que ahora se cuenta con un DT en su tercera fase de madurez. Esto se debe a que utilizando datos telemétricos en tiempo real, se puede evaluar su funcionamiento actual del UAV y se pueden anticipar posibles escenarios futuros.

## 6. RESULTADOS

A continuación se presenta a modo de ejemplo una simulación del sistema en la que el sensor de temperatura incorporado en el UAV actualiza el valor del DT “Temperature”, utilizando los DTs para formar un panel de control de la aeronave.

En este ejemplo el sensor mide la temperatura del entorno en el que se encuentra el UAV. Los datos obtenidos son considerados como datos telemétricos, los cuales son enviados a la plataforma Azure IoT Hub a través del protocolo MQTT. Una vez que estos se encuentran en la plataforma IoT, estos pueden ser enviados a ADT utilizando una función de Azure en la que clientes HTTP respondan ante eventos entrantes. La interacción entre ADT, ADT Explorer y Azure 3D Scenes Studio es directa, por lo que una vez que estos datos son recibidos en ADT, los valores de los DTs que lo sustentan serán actualizados, donde en este caso se actualizará el DT “Temperature”.

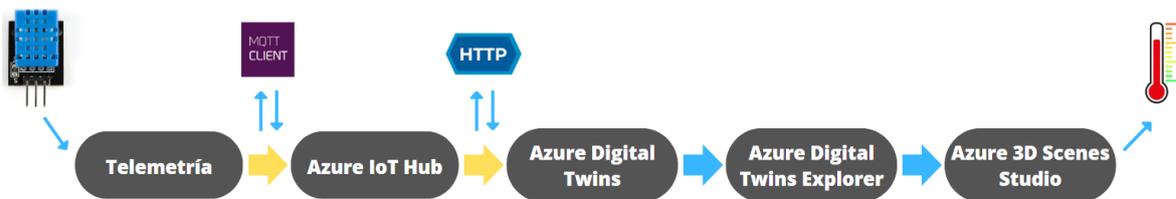


Figura 6.1. Procedimiento seguido para actualizar el valor del DT “Temperature”.

En esta etapa de obtención de resultados se tratará de examinar el funcionamiento y la veracidad del modelo diseñado e implementado en dos escenarios distintos. En el primero, se monitorizará el funcionamiento del UAV en condiciones normales de operación, atendiendo a los datos capturados en el registro de vuelo adquirido. En el siguiente, se monitorizará el funcionamiento del UAV en condiciones adversas, introduciendo algunos valores anómalos no deseados.

### 6.1.1. Escenario en condiciones normales de vuelo

A continuación, se exponen todos los valores que serán introducidos para cada propiedad (Tabla 4). Estos valores se transmitirán en intervalos regulares de 30 segundos, asegurando una constante actualización de la información a la vez que se mantiene un equilibrio para tratar de sobrepasar las capacidades de los servicios.

Cabe destacar que algunas propiedades anteriores (Tabla 4), siguiendo estrictamente la definición de propiedad y dato telemétrico en el entorno de Azure, deberían haber sido definidas como datos telemétricos en lugar de propiedades, ya que no representan valores estáticos, sino valores dinámicos medidos en pequeños intervalos

periódicos de tiempo. El haber optado por su definición como propiedad radica en el hecho de que de haber sido definidos como datos telemétricos, estos no habrían podido ser almacenados y representados en los DTs que componen la escena.

Propiedad	Valor
Model	DJI Mavic 2 Pro
Number	163DFAJ
Date	09/05/2020
Latitude	32.38216647, 32.38216646, 32.38216647
Longitude	-99.75394602, -99.75394602, -99.75394606
Altitude (m)	15.23, 15.24, 15.23
Duration (s)	30, 60, 90
Weight (g)	285.43, 283.32, 284.18
Speed (km/h)	0.06, 0.15, 0.11
Temperature (°C)	34.94, 34.94, 34.94
Wind (km/h)	2.45, 2.72, 2.65
Humidity (%)	21, 21, 20
Stream	<a href="https://www.youtube.com/watch?v=qWTRgXCLaAQ">https://www.youtube.com/watch?v=qWTRgXCLaAQ</a>

Tabla 4. Propiedades y valores asociados en condiciones normales de vuelo.

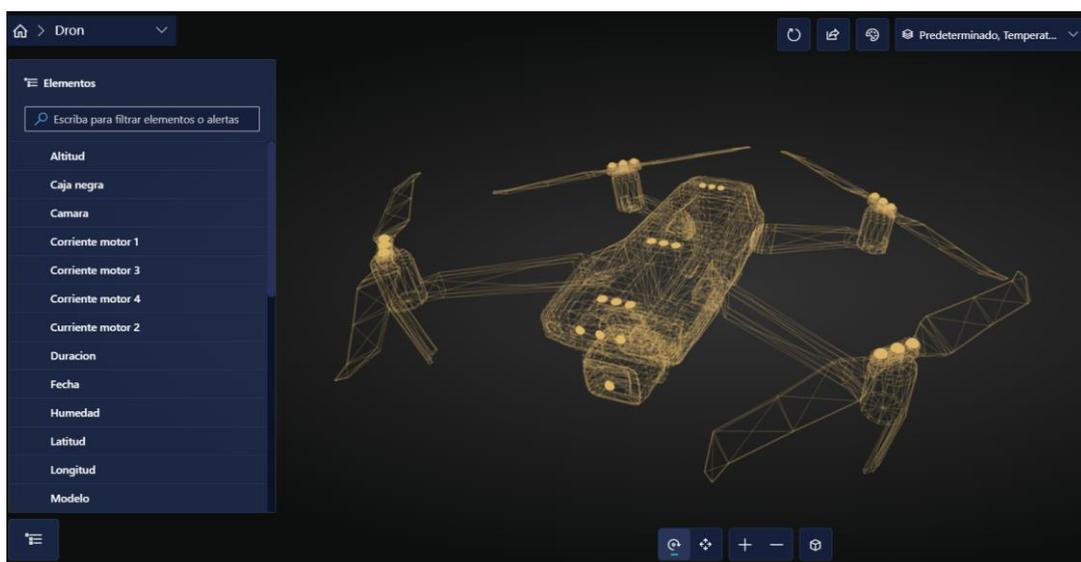


Figura 6.2. Escenario en condiciones normales de vuelo.

Al llevar a cabo la actualización del escenario en Azure 3D durante la tercera y última interacción, se materializa el siguiente resultado (figura 6.2), haciéndose patente la evolución y la transformación que ha tenido lugar en la representación virtual.

Aparentemente ningún valor se encuentra por encima o por debajo de los intervalos de funcionamiento especificados por el fabricante. No obstante, se procede a revisar cada una de las propiedades para comprobar el correcto funcionamiento del sistema implementado:

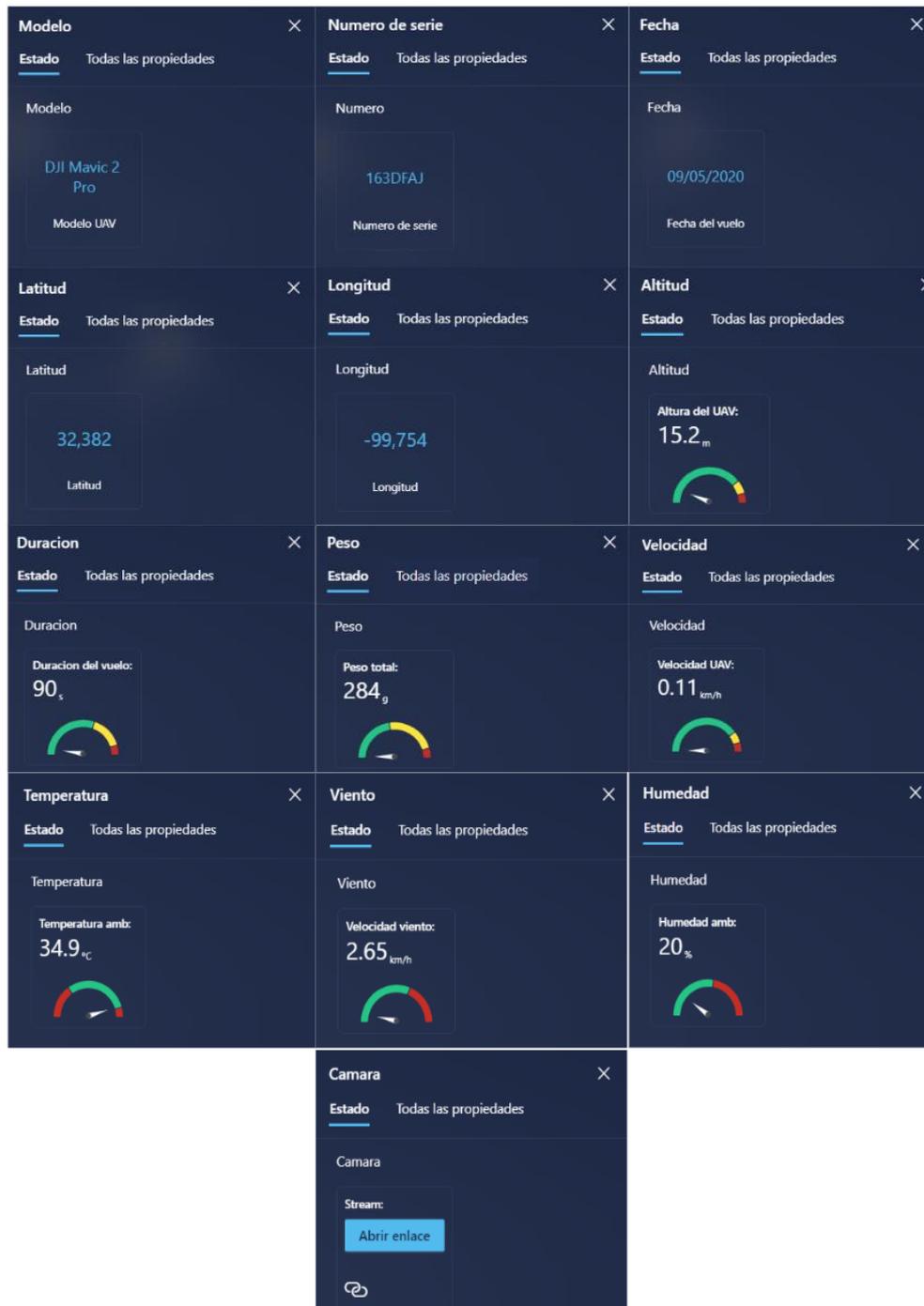


Figura 6.3. Estado de las propiedades en condiciones normales de vuelo.

Al examinar los resultados obtenidos en esta primera evaluación, se observa que ninguna de las propiedades monitorizadas excede los valores proporcionados por el fabricante. Sin embargo, es importante destacar que la temperatura se encuentra próxima al valor máximo permitido.

### 6.1.2. Escenario en condiciones de vuelo adversas

En esta ocasión, se presentan los siguientes valores ficticios que simulan un escenario no aconsejable para llevar a cabo una maniobra aérea con un UAV:

Propiedad	Valor
Model	DJI Mavic 2 Pro
Number	163DFAJ
Date	09/05/2020
Latitude	32.38216647, 32.38216646, 32.38216647
Longitude	-99.75394602, -99.75394602, -99.75394606
Altitude (m)	117, 128, 134
Duration (s)	30, 60, 90
Weight (g)	740.4, 742.32, 741.7
Speed (km/h)	0.06, 0.15, 0.11
Temperature (°C)	37.55, 37.54, 37.55
Wind (km/h)	24.34, 25.17, 25.34
Humidity (%)	60, 62, 63
Stream	<a href="https://www.youtube.com/watch?v=qWTRgXCLaAQ">https://www.youtube.com/watch?v=qWTRgXCLaAQ</a>

Tabla 5. Propiedades y valores asociados en condiciones de vuelo adversas.

Al llevar a cabo la actualización del escenario en Azure 3D durante la tercera y última interacción, se obtiene el siguiente resultado (figura 6.4), haciéndose patente la evolución y la transformación que ha tenido lugar en la representación virtual.

Tal y como era de esperar, en esta situación, las reglas visuales se activan debido a que se registran valores que se encuentran fuera del rango especificado por el fabricante, comprometiendo la integridad del UAV. Concretamente, las propiedades que registran valores atípicos son: altitud, humedad, temperatura y viento. Estas propiedades

se encuentran reflejadas en el panel "Elementos" y representadas por medio de un icono en el escenario.

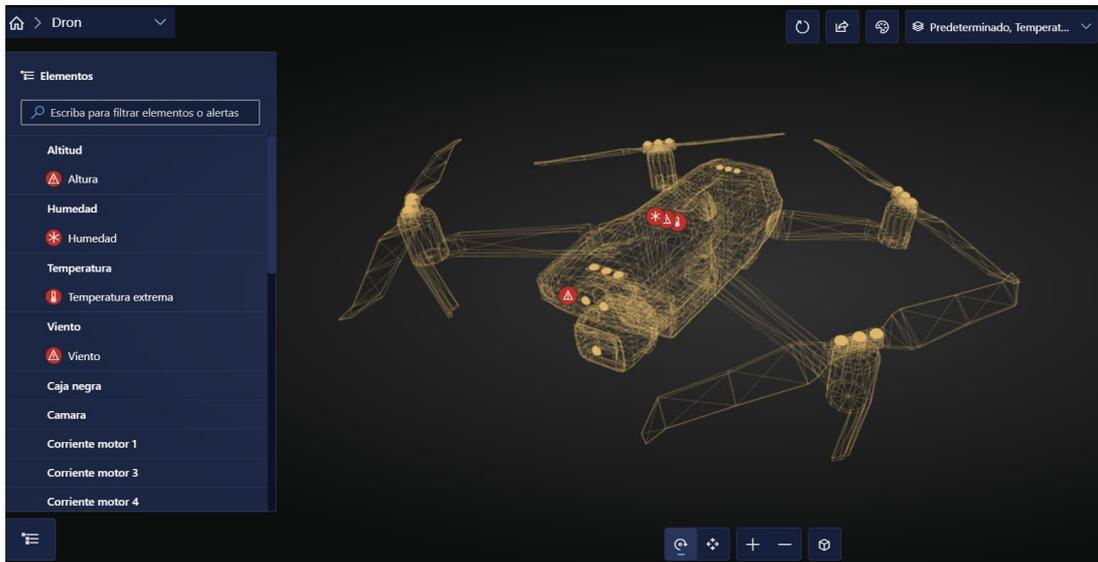
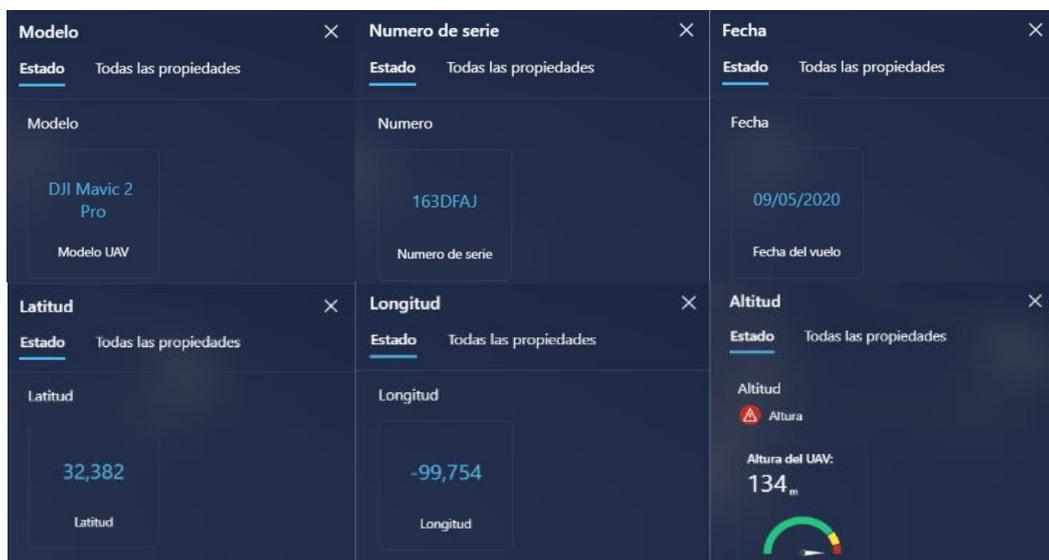


Figura 6.4. Escenario en condiciones de vuelo adversas.

Tal y como era de esperar, en esta situación, las reglas visuales se activan debido a que se registran valores que se encuentran fuera del rango especificado por el fabricante, comprometiendo la integridad del UAV. Concretamente, las propiedades que registran valores atípicos son: altitud, humedad, temperatura y viento. Estas propiedades se encuentran reflejadas en el panel "Elementos" y representadas por medio de un icono en el escenario.

Igual que se hizo en el caso anterior, se procede a continuación a revisar cada una de las propiedades monitorizadas:



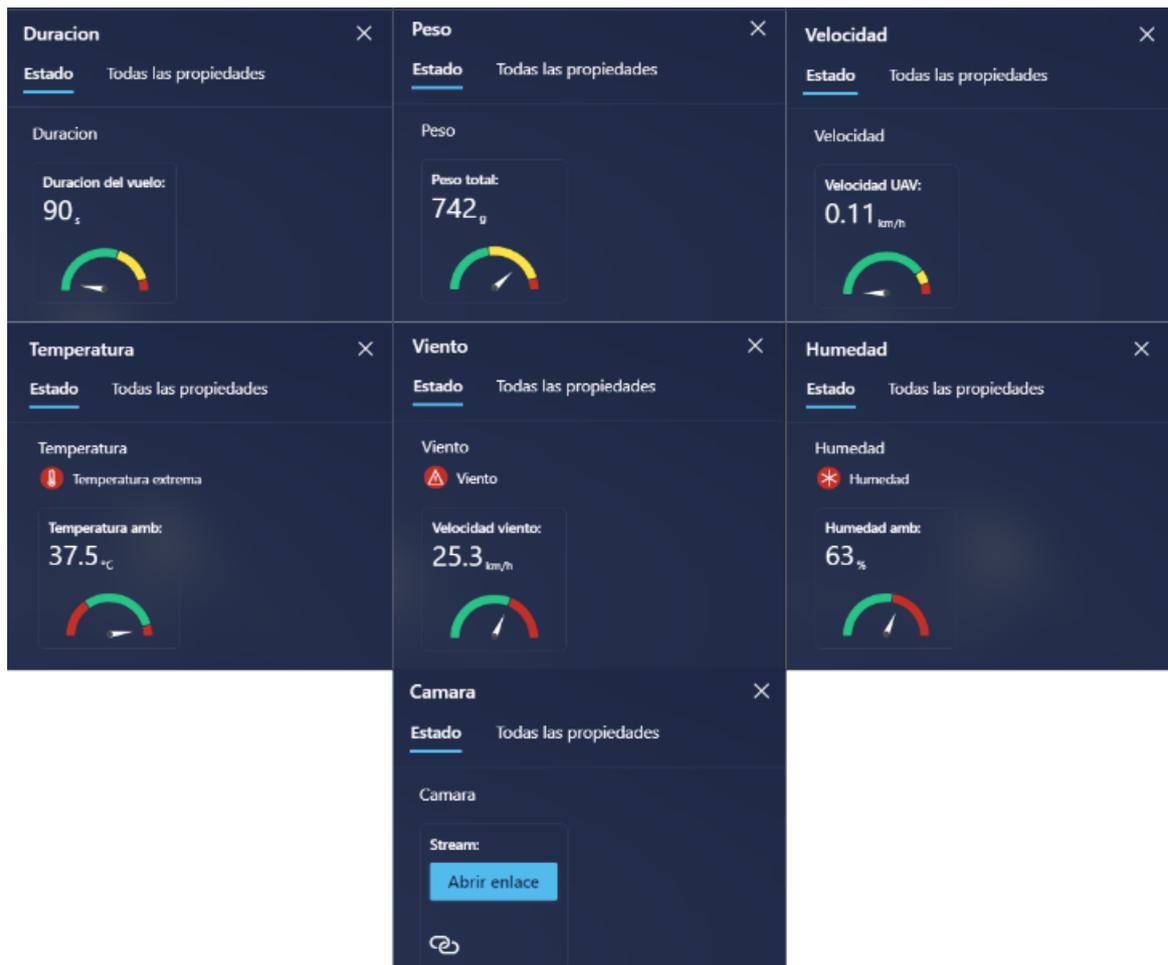


Figura 6.5. Estado de las propiedades en condiciones de vuelo adversas.

Los resultados obtenidos dejan en evidencia que las condiciones climáticas no son adecuadas para llevar a cabo maniobras con UAVs. Además, estos resultados revelan un incumplimiento de la altura máxima permitida para RPAs en España, la cual está establecida en 120 metros de altitud.

## 7. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE DESARROLLO

En este capítulo se procederá a evaluar si el presente trabajo logra satisfacer los objetivos establecidos, utilizando como base los resultados obtenidos y los conocimientos adquiridos a lo largo de su desarrollo. Además de esta evaluación, se presentarán sugerencias para mejoras a futuro y se explorarán posibles líneas de desarrollo, contemplando incluso la integración de tecnologías emergentes en el proceso.

- Tras la revisión de las tecnologías relacionadas con el IoT y los DTs, se ha conseguido elaborar un estudio completo que contextualiza el estado actual de ambas tecnologías. Este enfoque no solo permite entender su modo de operación, sino que también resalta el creciente interés que estas tecnologías suscitan en el panorama actual.
- El estudio comparativo entre diversas plataformas que posibilitan el diseño e implementación de DTs, junto con la justificación de la plataforma seleccionada, permite comprender el funcionamiento y para qué están concebidas. Estas consideraciones no solo enriquecen el entendimiento de las tecnologías involucradas, sino que también proporcionan una base sólida para la toma de decisiones de futuros proyectos relacionados con DTs u otros campos afines.
- Finalmente, después de llevar a cabo el diseño, la implementación y la evaluación de los DTs propuestos, se llega a la conclusión de que la plataforma seleccionada ha logrado cumplir de manera satisfactoria con todos los requisitos iniciales. Los DTs desarrollados consiguen reflejar las características de sus contrapartes físicas, llegando de forma exitosa hasta la tercera etapa de madurez.

No obstante, aunque los resultados obtenidos muestran en gran medida el potencial de los DTs, aún quedan por investigar y desarrollar nuevos horizontes que permitan implementar estos en todas sus etapas de madurez, así como la adición de nuevos servicios o funcionalidades en las plataformas existentes y la mejora de la información disponible para facilitar tanto su comprensión como su desarrollo.

A continuación, se especifican algunas de las mejoras y líneas de desarrollo que podrían ser aplicadas de cara a futuros trabajos:

- Hasta ahora puede representarse en los DTs datos en tiempo real que provienen de entidades físicas, pero no pueden ser representados datos históricos obtenidos. Microsoft Azure permite realizar esta función a través de su servicio de clústeres, pero este servicio demanda un coste elevado, siendo no viable de utilizar la licencia educativa utilizada.
- Resulta interesante explorar la aplicación de la AI y el ML en consonancia con los DTs. Esta sinergia podría traducirse en una mejora sustancial de la precisión y la habilidad predictiva de los gemelos, dado que posibilita el análisis y la adaptación constante en función de los flujos de datos entrantes en tiempo real.
- En consonancia con lo mencionado en el punto anterior, la sinergia entre DTs y la AR podría aumentar también el potencial de estos brindando experiencias sumamente inmersivas y facilitando la visualización y simulación de sistemas en entornos virtuales.
- La impresión 3D y la fabricación aditiva podrían permitir la creación de modelos físicos basados en DTs, lo cual facilitaría la prototipación y la producción personalizada.
- Aplicar tecnologías de nube y Edge Computing permitiría procesar y almacenar grandes cantidades de datos necesarios para los DTs más complejos, tanto en centros de datos como en dispositivos locales, optimizando la eficiencia y la respuesta en tiempo real.
- Si bien aún se encuentra en sus primeras etapas, la computación cuántica podría ofrecer un enorme potencial para manejar problemas complejos de una forma más eficiente, siendo beneficioso para la simulación y optimización de DTs.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

- [1]. K. Ashton, "That 'Internet of Things' Thing," RFID Journal, Jun. 22, 2009.
- [2]. Gazis, A. (2021). What is iot? the internet of things explained. Academia Letters, 2.
- [3]. Kumar, N. M., & Mallick, P. K. (2018). The Internet of Things: Insights into the building blocks, component interactions, and architecture layers. *Procedia computer science*, 132, 109-117.
- [4]. Al-Sarawi, S., Anbar, M., Alieyan, K., & Alzubaidi, M. (2017, May). Internet of Things (IoT) communication protocols. In *2017 8th International conference on information technology (ICIT)* (pp. 685-690). IEEE.
- [5]. Lavric, A., Petrariu, A. I., & Popa, V. (2019, August). Sigfox communication protocol: The new era of iot?. In *2019 international conference on sensing and instrumentation in IoT Era (ISSI)* (pp. 1-4). IEEE.
- [6]. Al Homssi, B., Al-Hourani, A., Chandrasekharan, S., Gomez, K. M., & Kandeepan, S. (2019). On the bound of energy consumption in cellular IoT networks. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 4(2), 355-364.
- [7]. Mulligan, G. (2007, June). The 6LoWPAN architecture. In *Proceedings of the 4th workshop on Embedded networked sensors* (pp. 78-82).
- [8]. Ramya, C. M., Shanmugaraj, M., & Prabakaran, R. (2011, April). Study on ZigBee technology. In *2011 3rd international conference on electronics computer technology* (Vol. 6, pp. 297-301). IEEE.
- [9]. Bansal, N., Jayant, K. P., Singh, P., & Pandey, S. (2021, June). Intelligent extension with smart connections using Bluetooth with IoT. In *2021 5th International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICOEI)* (pp. 435-439). IEEE.
- [10]. Vagdevi, P., Nagaraj, D., & Prasad, G. V. (2017, February). Home: IOT based home automation using NFC. In *2017 international conference on I-SMAC (IoT in social, mobile, analytics and cloud)(I-SMAC)* (pp. 861-865). IEEE.

- [11]. Naik, N. (2017, October). Choice of effective messaging protocols for IoT systems: MQTT, CoAP, AMQP and HTTP. In 2017 IEEE international systems engineering symposium (ISSE) (pp. 1-7). IEEE.
- [12]. Soni, D., & Makwana, A. (2017, April). A survey on mqtt: a protocol of internet of things (iot). In International conference on telecommunication, power analysis and computing techniques (ICTPACT-2017) (Vol. 20, pp. 173-177).
- [13]. Sehrawat, D., & Gill, N. S. (2019, April). Smart sensors: Analysis of different types of IoT sensors. In 2019 3rd International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICOEI) (pp. 523-528). IEEE.
- [14]. Mashaly, M. (2021). Connecting the twins: A review on digital twin technology & its networking requirements. *Procedia Computer Science*, 184, 299-305.
- [15]. B. Burke, M. Walker, D. Cearley, "Top 10 Strategic Technology Trends for 2017", 14th October 2016, Gartner Inc.
- [16]. Alfonso, M. J. (2018). ¿Qué es un Digital Twin o gemelo digital y de dónde vienen?. *Byte España*, (266), 58-58.
- [17]. Sjarov, M., Lechler, T., Fuchs, J., Brossog, M., Selmaier, A., Faltus, F., ... & Franke, J. (2020, September). The digital twin concept in industry—a review and systematization. In 2020 25th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA) (Vol. 1, pp. 1789-1796). IEEE.
- [18]. Singh, M., Fuenmayor, E., Hinchy, E. P., Qiao, Y., Murray, N., & Devine, D. (2021). Digital twin: Origin to future. *Applied System Innovation*, 4(2), 36.
- [19]. Botín-Sanabria, D. M., Mihaita, A. S., Peimbert-García, R. E., Ramírez-Moreno, M. A., Ramírez-Mendoza, R. A., & Lozoya-Santos, J. D. J. (2022). Digital twin technology challenges and applications: A comprehensive review. *Remote Sensing*, 14(6), 1335.
- [20]. Sharma, A., Kosasih, E., Zhang, J., Brintrup, A., & Calinescu, A. (2022). Digital twins: State of the art theory and practice, challenges, and open research questions. *Journal of Industrial Information Integration*, 100383.

- [21]. VanDerHorn, E., & Mahadevan, S. (2021). Digital Twin: Generalization, characterization and implementation. *Decision support systems*, 145, 113524.
- [22]. Giménez, A., García, G., Plain Concepts (2022). “dotNET 2022 | Gemelos digitales con Azure Digital Twins - Comunidad Dotnetters”. Youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=x30BQWkhgEY>
- [23]. Erol, T., Mendi, A. F., & Doğan, D. (2020, October). The digital twin revolution in healthcare. In 2020 4th international symposium on multidisciplinary studies and innovative technologies (ISMSIT) (pp. 1-7). IEEE.
- [24]. Williams, T. J., Balakrishnan, R., Delalondre, F., Schuermann, F., Muller, E., & Gewaltig, M. O. (2018). Large-Scale Simulation of Brain Tissue, Blue Brain Project, EPFL (No. ANL/ALCF/ESP-17/3). Argonne National Lab.(ANL), Argonne, IL (United States).
- [25]. Philips Healthcare. (2015). “Philips HeartModelAI”. YouTube. [https://www.youtube.com/watch?time\\_continue=34&v=Nx24-L6-K4&feature=emb\\_logo](https://www.youtube.com/watch?time_continue=34&v=Nx24-L6-K4&feature=emb_logo)
- [26]. Opoku, D. G. J., Perera, S., Osei-Kyei, R., & Rashidi, M. (2021). Digital twin application in the construction industry: A literature review. *Journal of Building Engineering*, 40, 102726.
- [27]. Khajavi, S. H., Motlagh, N. H., Jaribion, A., Werner, L. C., & Holmström, J. (2019). Digital twin: vision, benefits, boundaries, and creation for buildings. *IEEE access*, 7.
- [28]. Xiong, M., & Wang, H. (2022). Digital twin applications in aviation industry: A review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 121(9-10), 5677-5692.
- [29]. Pires, F., Cachada, A., Barbosa, J., Moreira, A. P., & Leitão, P. (2019, July). Digital twin in industry 4.0: Technologies, applications and challenges. In 2019 IEEE 17th International Conference on Industrial Informatics (INDIN) (Vol. 1, pp. 721-726). IEEE.
- [30]. Tao, F., Zhang, H., Liu, A., & Nee, A. Y. (2018). Digital twin in industry: State-of-the-art. *IEEE Transactions on industrial informatics*, 15(4), 2405-2415.

- [31]. (s.f.). Get ready to meet you Digital Twin. Q-bio. Recuperado de: <https://q.bio/>. [Último acceso: 09-08-2023].
- [32]. Autodesk. (2023). "Autodesk Tandem's Facility Monitoring Capabilities (Beta)". YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=d3eRnQILrk4>
- [33]. Introduction to digital twins | Drilling Systems Modeling & Automation, Part 1 (s.f.). MathWorks: <https://es.mathworks.com/videos/drilling-systems-modeling-automation-part-1-introduction-to-digital-twins-1593690546722.html>
- [34]. IT\_BE\_13\_\_Adnan Ansari (2021). "Smart Street Light System Simulation | CupCarbon | WN MINI PROJECT". YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=NILJ>
- [35]. (s.f.). ¿Qué es MindSphere?. SIEMENS. Recuperado de: <https://www.siemens.com/es/es/productos/software/mindsphere.html> [Último acceso: 09-08-2023].
- [36]. (s.f.). Watson IoT Platform. IBM. Recuperado de: <https://www.ibm.com/es-es/cloud/watson-iot-platform/details>. [Último acceso: 10-08-2023].
- [37]. (s.f.). ¿Qué es Azure Digital Twins? [Artículo]. Microsoft. Recuperado de: <https://learn.microsoft.com/es-es/azure/digital-twins/overview>. [Último acceso: 10-08-2023].
- [38]. Pinzón, B. F. S., Ortega, J. R. T., & Rosa, P. (2016). Drones: General aspects and social applications. *Visión electrónica*, 10(2), 11.
- [39]. Kardasz, P., Doskocz, J., Hejduk, M., Wiejkut, P., & Zarzycki, H. (2016). Drones and possibilities of their using. *J. Civ. Environ. Eng*, 6(3), 1-7.
- [40]. Delgado, J. A. M. (2022). Drones: Cazadores de blindados. *Ejército: de tierra español*, (979), 44-52.
- [41]. Piotrowski, P., Witkowski, T., & Piotrowski, R. (2015). Bezzałogowa zdalnie sterowana jednostka latająca. *Pomiary Automatyka Robotyka*, 49-55.

- [42]. Bogusz, P., Korkosz, M., Wygonik, P., Dudek, M., & Lis, B. (2015). Analiza wpływu źródła zasilającego na właściwości bezszczotkowego silnika prądu stałego z magnesami trwałymi przeznaczonego do napędu bezzałogowego aparatu latającego. *energia*, 2(2), 2.
- [43]. Hejduk, M. (2015). The use of unmanned aerial vehicles-drones supply courier. Thesis Inzynierska. Wroclaw.
- [43]. Andrade Gutiérrez, E. A. (2022). Comunicaciones habilitadas por drones: requisitos, tecnologías y automatización: análisis de tecnologías y plataformas para proveer sistemas de comunicaciones habilitado por drones (Bachelor's thesis, Quito: EPN, 2022.).
- [44]. Baltaci, A., Dinc, E., Ozger, M., Alabbasi, A., Cavdar, C., & Schupke, D. (2021). A survey of wireless networks for future aerial communications (FACOM). *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 23(4), 2833-2884.
- [45]. Khan, M. A., Qureshi, I. M., & Khanzada, F. (2019). A hybrid communication scheme for efficient and low-cost deployment of future flying ad-hoc network (FANET). *Drones*, 3(1), 16.
- [46]. Sanchez-Aguero, V., Vidal, I., Valera, F., Nogales, B., Mendes, L. L., Damascena Dias, W., & Carvalho Ferreira, A. (2021). Deploying an NFV-based experimentation scenario for 5G solutions in underserved areas. *Sensors*, 21(5), 1897.
- [47]. Chen, X., Ng, D. W. K., Yu, W., Larsson, E. G., Al-Dhahir, N., & Schober, R. (2020). Massive access for 5G and beyond. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 39(3), 615-637.
- [48]. Esteve, J. S. (2016). El régimen jurídico de la utilización de drones en España. Working Paper del Seminari de la Facultat de Dret de València.
- [49]. Meza, E. R., & Imbachi, D. R. V. Las ventajas de la utilización de Microsoft Azure en proyectos Open Source. Algunas estrategias para mejorar la competitividad, 6.
- [50]. Wankhede, P., Talati, M., & Chinchamatpure, R. (2020). Comparative study of cloud platforms-microsoft azure, google cloud platform and amazon EC2. *J. Res. Eng. Appl. Sci*, 5(02), 60-64.

- [51]. (2023). Diferencias entre IaaS, PaaS y SaaS. [Artículo]. Red Hat. Recuperado de: <https://www.redhat.com/es/topics/cloud-computing/iaas-vs-paas-vs-saas>. [Último acceso: 04-08-2023].
- [52]. (2023). ¿Qué es Azure Digital Twins?. [Artículo]. Microsoft Azure. Recuperado de: <https://learn.microsoft.com/es-es/azure/digital-twins/overview>. [Último acceso: 07-08-2023].
- [53]. (s.f). Inicio rápido: introducción a un escenario de ejemplo de Azure Digital Twins Explorer. [Artículo]. Microsoft Azure. Recuperado de: <https://learn.microsoft.com/es-es/azure/digital-twins/quickstart-azure-digital-twins-explorer>. [Último acceso: 08-08-2023].
- [54]. (s.f). Azure IoT Hub. [Artículo]. Microsoft Azure. Recuperado de: <https://azure.microsoft.com/es-es/products/iot-hub>. [Último acceso: 09-08-2023].
- [55]. (2023). Azure Digital Twins Explorer (versión preliminar). [Artículo]. Microsoft Azure. Recuperado de: <https://learn.microsoft.com/es-es/azure/digital-twins/concepts-azure-digital-twins-explorer>. [Último acceso: 11-08-2023].
- [56]. (2023). ¿Qué es Azure Maps?. [Artículo]. Microsoft Azure. Recuperado de: <https://learn.microsoft.com/es-es/azure/azure-maps/about-azure-maps>. [Último acceso: 11-08-2023].
- [57]. (2023). Información sobre los modelos gemelos y su definición en Azure Digital Twins [Artículo]. Microsoft Azure. Recuperado de: <https://learn.microsoft.com/es-es/azure/azure-maps/about-azure-maps>: [Último acceso: 13-08-2023].
- [58]. (2022). 3D Scenes Studio (preview) for Azure Digital Twins [Artículo]. Microsoft Azure. Recuperado de: <https://learn.microsoft.com/en-us/azure/digital-twins/concepts-3d-scenes-studio>. [Último acceso: 14-08-2023].
- [59]. (s.f). MAVIC 2 Especificaciones. DJI. Recuperado de: <https://www.dji.com/es/mavic-2/info>. [Último acceso: 15-08-2023].