



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



Escola Tècnica  
Superior d'Enginyeria  
Informàtica

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Informàtica  
Universitat Politècnica de València

# Aplicación del concepto de gemelo digital a un SCADA Industrial

TRABAJO FIN DE GRADO

Grado en Ingeniería Informática

*Autor:* Muñoz Alcázar, Javier

*Tutor:* Mateo Pla, Miguel Ángel  
Peñalver Herrero, Lourdes

Curso 2018-2019



# Dedicatoria

---

*A mis padres por brindarme la oportunidad que ellos no tuvieron de estudiar una carrera universitaria, apoyándome en todo momento para que siguiera con mis estudios y con lo que a mi me gustaba.*

*A mi novia Carolina por hacer que no perdiera la calma estos últimos meses con el trabajo de fin de grado, los cuales han sido infinitamente más llevaderos y agradables gracias a ella.*



# Agradecimientos

---

*A Diego por ayudarme a resolver mis dudas sobre climatización geotérmica,  
las cuales me permitieron avanzar con el trabajo de fin de grado.  
A mi tutor por guiarme a lo largo de este trabajo de fin de grado*

# Resumen

El trabajo realizado consta de un análisis sobre el concepto de gemelo digital, su estructura y su importancia. Para ello realizaremos un estudio sobre el estado del arte de los sistemas industriales que podemos encontrar actualmente en el mercado así como un análisis de su funcionamiento y posible digitalización. Estudiaremos qué alternativas hay para la digitalización de los distintos sistemas industriales, qué beneficios aporta y qué problemas surgen a la hora de llevarla a cabo.

A partir de este estudio aplicaremos el proceso de transformación digital y diseñaremos un gemelo digital partiendo de un sistema industrial el cual hace uso de un modelo SCADA. Para llevar a cabo este diseño examinaremos cuales son las necesidades del sistema físico a digitalizar y como podemos cubrir las mediante nuestro gemelo.

Finalmente concluiremos el trabajo analizando qué objetivos respecto al gemelo digital hemos podido cumplir de los propuestos al principio, qué dificultades han surgido para la consecución de estos y qué futuros proyectos pueden surgir a partir de este trabajo de fin de grado.

**Palabras clave:** Gemelo digital, Industria 4.0, SCADA, digitalización, sistemas industriales, análisis, seguridad sistemas industriales

---

# Resum

El treball realitzat consta d'una anàlisi sobre el concepte de bessó digital, la seua estructura i la seua importància. Per a això realitzarem un estudi sobre l'estat l'art dels sistemes industrials que podem trobar actualment en el mercat així com una anàlisi del seu funcionament i possible digitalització. Estudiarem que alternatives hi ha per a la digitalització dels diferents sistemes industrials, que beneficis aporta i que problemes sorgeixen a l'hora de dur-la a terme.

A partir d'aquest estudi aplicarem el procés de transformació digital i dissenyarem un bessó digital partint d'un sistema industrial el qual fa ús d'un model SCADA. Per a dur a terme aquest disseny examinarem quals són les necessitats del sistema físic a digitalitzar i com podem cobrir-les mitjançant el nostre bessó.

Finalment conclourem el treball analitzant que objectius respecte al bessó digital hem pogut complir dels proposats al principi, que dificultats han sorgit per a la consecució d'aquests i que futurs projectes poden sorgir a partir d'aquest treball de fi de grau.

**Paraules clau:** Bessó digital, Indústria 4.0, SCADA, digitalització, sistemes industrials, anàlisi, seguretat sistemes industrials

---

# Abstract

The work made consists of an analysis on the Digital Twin concept, its structure and its importance. To do this, we will conduct a study on the state of art of industrial systems, which can be found in the market, as well as an analysis of its operation and possible digitization. We will study the alternatives for the digitalization of the different industrial systems, the benefits and the problems that arise when carrying it out.

From this study we will apply the process of digital transformation and we will design a digital twin starting from an industrial system which makes use of a SCADA model. To carry out this design we will examine what the physical system needs to be digitized and how we can cover them through our twin.

Finally, we will conclude the work by analyzing which objectives regarding the digital twin we have been able to fulfill from those proposed at the beginning, what difficulties have arisen for the achievement of these and that future projects may arise from this end-of-degree project.

**Key words:** Digital Twin, Industry 4.0, SCADA, digitalization, industrial systems, analysis, security of industrial systems

---





# Índice general

---

<b>Índice general</b>	IX
<b>Índice de figuras</b>	XI
<b>Índice de tablas</b>	XI
<hr/>	
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
1.1 Motivación . . . . .	1
1.2 Objetivos . . . . .	2
1.3 Estructura de la memoria . . . . .	2
<b>2 Estado del arte</b>	<b>3</b>
2.1 La industria 4.0 . . . . .	3
2.2 Controladores lógicos programables o <i>PLC</i> . . . . .	6
2.3 Sistemas SCADA . . . . .	7
2.3.1 Requisitos de un SCADA . . . . .	8
2.3.2 Protocolos de comunicación . . . . .	10
2.3.3 Seguridad sobre protocolos . . . . .	12
2.4 Gemelo digital o <i>Digital Twin</i> . . . . .	14
2.4.1 Nivel de integración . . . . .	15
2.4.2 Tipos de gemelo digital . . . . .	17
2.4.3 Áreas enfocadas en la industria . . . . .	18
2.4.4 Componentes de un gemelo digital . . . . .	18
2.5 Crítica al estado del arte . . . . .	19
2.6 Propuesta . . . . .	20
<b>3 Caso de estudio</b>	<b>23</b>
3.1 Planteamiento del problema . . . . .	23
3.2 Componentes de la instalación geotérmica . . . . .	24
3.3 Soluciones posibles a implementar . . . . .	25
<b>4 Diseño de la solución</b>	<b>27</b>
4.1 Estructura . . . . .	27
4.2 Módulos . . . . .	29
4.2.1 Módulo de "Comportamiento autónomo" o CA . . . . .	29
4.2.2 Módulo de "Interacción con el usuario" o IU: . . . . .	34
4.2.3 Módulo de "Interacción con el sistema" o IS: . . . . .	35
<b>5 Conclusiones</b>	<b>37</b>
5.1 Limitaciones y futuros trabajos . . . . .	38
5.2 Relación del trabajo desarrollado con los estudios cursados . . . . .	38
<b>Bibliografía</b>	<b>41</b>
<hr/>	
Apéndice	
<b>A Interfaz del sistema</b>	<b>43</b>



## Índice de figuras

---

2.1	Evolución de la industria.[1]	4
2.2	Flujo de datos en un modelo digital[2]	16
2.3	Flujo de datos en una sombra digital[2]	16
2.4	Flujo de datos en un gemelo digital[2]	17
3.1	Plano de la instalación geotérmica	24
4.1	Esquema del gemelo digital	27
4.2	Sensores de temperatura en la instalación	29
4.3	Aumento de la temperatura al pasar por la bomba hidráulica	31
4.4	Estimación de los valores de temperatura	33
4.5	Predicción de temperatura gracias a la información meteorológica	33
A.1	Ventana de login	43
A.2	Ventana de visualización del sistema. Pinchando sobre los elementos de la imagen el operario puede acceder a la ventana con información específica sobre el elemento seleccionado	44
A.3	Ventana con información específica sobre elementos	44
A.4	Ventana con información general sobre el sistema	45

## Índice de tablas

---

4.1	Tabla de activación de bombas de calor	32
-----	--	----



---

---

# CAPÍTULO 1

## Introducción

---

En los últimos años, la industria ha experimentado numerosos avances debido a la llegada de las tecnologías digitales. Estas tecnologías han supuesto un aumento de la importancia de los componentes software, los cuales, junto con la alta competitividad de los mercados, donde la personalización en masa de los productos juega un papel principal, han proporcionado a la industria una serie de nuevos desafíos: la digitalización total en la industria se ve como una oportunidad para alcanzar niveles más altos de productividad al mismo tiempo que se consigue una reducción en los costes [2]

Para poder hacer frente a estos desafíos, la industria 4.0, definida más adelante en el apartado 2.1, pretende incorporar las tecnologías digitales en los procesos de fabricación, permitiendo la sencilla integración de componentes inteligentes interconectados en los diferentes procesos industriales. Estas incorporaciones son llevadas a cabo, por ejemplo, por sistemas SCADA.

Los sistemas SCADA conforman un elemento pasivo de monitorización, encargándose de la adquisición de datos y del control de supervisión de los PLC o controladores autónomos. Estas funciones permiten a los ingenieros llevar a cabo la gestión de los dispositivos en tiempo real. Sin embargo, a la hora de realizar un mantenimiento predictivo que permita simular el comportamiento del sistema bajo diversas circunstancias, y estimar los posibles valores de este, un gemelo digital o *Digital Twin* permite un mejor acercamiento a esta solución, posibilitando un funcionamiento semi-autónomo del sistema.

A día de hoy el concepto de gemelo digital esta comenzando a generar interés entre los profesionales de la industria. No obstante pocas empresas deciden apostar por este tipo de modelo ya que a gran escala puede suponer un coste elevado debido a que existen pocas soluciones en el mercado. Es por eso que con este trabajo se pretende poder acercar al publico el concepto de gemelo digital y enfocarlo desde el punto de vista de la informática, facilitando la generación de nuevas soluciones utilizando las herramientas que existen en el ámbito de las tecnologías de la información.

### 1.1 Motivación

---

La motivación para la realización de este trabajo se basa en el interés por aplicar las nuevas tecnologías y herramientas que comúnmente son empleadas en el ámbito de la informática pura sobre un ámbito más conservador como es la industria. A través de estas nuevas herramientas se pretende reemplazar a largo plazo las tecnologías obsoletas que todavía se emplean en el ámbito industrial con el objetivo de poder hacer frente a los nuevos desafíos que surgen constantemente.

## 1.2 Objetivos

---

Para poder resolver las cuestiones anteriormente planteadas se han propuesto una serie de objetivos a cumplir:

1. Realizar un estudio sobre el estado del arte de la industria 4.0, los sistemas SCADA, el gemelo digital y los diferentes elementos que podamos necesitar para realizar el gemelo.
2. Analizar las capacidades del gemelo digital en el ámbito de la industria.
3. Exponer qué problemas y desafíos puede acarrear la creación de un gemelo digital.
4. Mediante el uso de un caso de estudio aproximar el concepto de gemelo digital a la implementación de su solución.

## 1.3 Estructura de la memoria

---

Abordaremos los objetivos definidos anteriormente a lo largo de cada parte de este trabajo. La primera parte del trabajo consistirá en un estado del arte, el cual pondrá al lector en contexto sobre la situación actual de la industria, sus necesidades y como los sistemas de digitalización pueden hacerles frente. Adicionalmente el estado del arte incluirá un pequeño análisis de cuales son los problemas desde el punto de vista de la seguridad de los sistemas industriales actuales. Por último se describirá el funcionamiento de los sistemas SCADA frente al gemelo digital, cuales son sus diferencias, sus componentes y sus características.

En la segunda parte propondremos un caso de estudio en el cual un sistema industrial necesita ser digitalizado. Para poder diseñar la digitalización buscaremos cuales son las necesidades del sistema y propondremos una solución que se adapte adecuadamente a estas.

Por último en el diseño de la solución diseñaremos un gemelo digital el cual hará frente a los requisitos del sistema a digitalizar.

---

---

## CAPÍTULO 2

# Estado del arte

---

Para entender la importancia y repercusión que tiene el gemelo digital bajo el contexto industrial actual debemos ponernos a analizar su contexto previamente y comprender el funcionamiento y las necesidades de la industria 4.0, así como las tecnologías empleadas por esta. De esta forma podremos adquirir una noción del alcance y la magnitud de la industria 4.0.

A su vez, estudiaremos el funcionamiento y uso de los autómatas programables en el contexto de los sistemas industriales abarcando las diferentes formas para gestionarlos disponibles en la actualidad. Analizaremos el funcionamiento de los sistemas SCADA, los cuales forman la base funcional de gran parte de las fábricas inteligentes que existen hoy en día.

Por último, expondremos en que consiste el gemelo digital y como puede incidir directamente sobre los PLC, los sistemas SCADA y más ampliamente, sobre las necesidades de la industria 4.0.

### 2.1 La industria 4.0

---

Presentada como una nueva forma de industrialización, la industria 4.0 fue definida a través de un documento [3] emitido en 2011 por la academia nacional de ingeniería y ciencia alemana con el objetivo de proponer el desarrollo de un nuevo concepto de política económica basada en el uso de estrategias que empleen tecnología puntera.[4]

El documento define a la industria 4.0 como la siguiente fase de la revolución industrial. La primera etapa de la revolución industrial comenzó a finales del siglo XVIII con la introducción de la máquina de vapor y la mecanización de las tareas manuales para la fabricación industrial. Esta etapa fue seguida por una segunda a comienzos del siglo XX, la cual surgió gracias a la incorporación de la electricidad en la producción en masa junto con el motor de combustión interna. Esta, a su vez, fue reemplazada por la tercera revolución industrial que comenzó a principios de la década de 1970 y que ha continuado hasta finales de la primera década del siglo XXI. La tercera revolución empleó la electrónica y las tecnologías de la información para lograr una mayor automatización de los procesos de fabricación. Finalmente con la llegada del internet de las cosas se abrió una ventana a la posibilidad de crear redes que incorporaran todo el proceso de fabricación, convirtiendo de esta forma a las fábricas en entornos inteligentes.[5]

Los sistemas de producción ciberfísicos engloban a sistemas inteligentes, sistemas de almacenamiento y medios de producción que se han desarrollado digitalmente contando con una integración punto a punto basada en las tecnologías de la información, abarcando desde la logística de entrada hasta la producción, comercialización, logística de salida

y servicio. Estos sistemas surgen de dotar a los componentes físicos de una capacidad de cómputo y de comunicación, diferenciándose de esta forma de los sistemas embebidos tradicionales, ya que un sistema ciberfísico está diseñado como una red de elementos que interaccionan entre sí con entradas y salidas físicas en vez de hacerlo con dispositivos aislados.[6] Esto no solo permite configurar la producción de forma más flexible, sino que también aprovecha las oportunidades potenciales que ofrecen los procesos de control y gestión. Además de optimizar los procesos existentes basados en las tecnologías de la información, la industria 4.0 busca explotar el potencial de un seguimiento aún más diferenciado de los procesos detallados y los efectos generales a una escala global que antes era imposible de registrar.

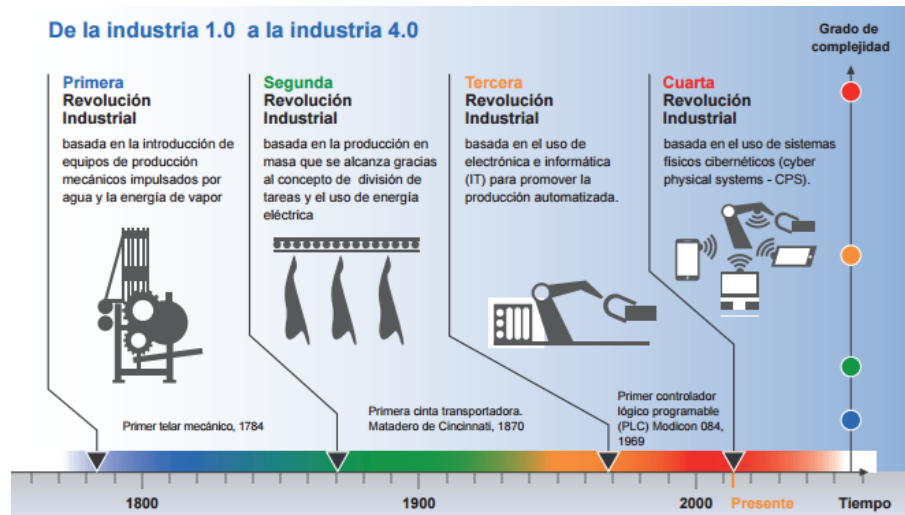


Figura 2.1: Evolución de la industria.[1]

La industria 4.0 se centra en la creación de productos, procedimientos y procesos inteligentes. Las fábricas inteligentes constituyen una parte fundamental de la industria 4.0 ya que estas son capaces de gestionar situaciones complejas, son menos propensas a las interrupciones y son capaces de ofrecer sus servicios de una manera más eficiente. En una fábrica inteligente el personal, la maquinaria y los recursos se comunican entre sí mediante una red. Gracias a esta red donde los elementos de la fábrica están en constante comunicación, las acciones llevadas a cabo por cada elemento repercuten de forma activa en el resto de elementos. Esto significa que cada acción producida por un componente (movimiento, lectura de datos, petición de conexión o desconexión...) es percibida por el resto de elementos en tiempo real, pudiendo estos analizar el impacto de esas operaciones y computar una respuesta óptima a estas. Para la realización del cómputo de estas respuestas es necesario el análisis exhaustivo de los datos recibidos para saber cuales son correlativos con las acciones del propio componente y cuales no. Se espera de estos sistemas que empleen el aprendizaje automático en pos de alcanzar autonomía a la hora de calcular y/o predecir sus acciones.

Para poder adaptar de una forma óptima los sistemas actuales a la industria 4.0 estos deben de seguir ciertas directrices de integración, las cuales son [7]:

- Integración horizontal a través de redes de valor:** La integración horizontal permite a las empresas, gracias al uso de redes de valor, intercambiarse información de interés común obtenida por los sistemas ciberfísicos cooperando de esta forma para poder desarrollar estrategias de estandarización, sostenibilidad y formación del personal clave a medio o largo plazo.



- **Ingeniería punto a punto en toda la cadena de producción:** Se deben desplegar los sistemas inteligentes necesarios para proporcionar soporte punto a punto a toda la cadena de valor, desde el desarrollo del producto hasta la ingeniería de sistemas de fabricación, la producción, el servicio y el mantenimiento.
- **Integración vertical y sistemas de fabricación en red:** En las fábricas inteligentes las estructuras de fabricación no serán fijas ni predefinidas. En su lugar, se definirá un conjunto de reglas de configuración las cuales se aplicarán caso por caso para construir automáticamente una estructura o topología específica para cada situación, incluidas todas las necesidades asociadas en términos de modelos, datos, comunicación y algoritmos. También será necesario desarrollar estrategias de modularización y reutilización para permitir la reutilización y reconfiguración de los elementos.

Siguiendo estas directrices podremos adaptar una fábrica a su versión inteligente, sin embargo, para poder alcanzar una implementación completa de la visión de fábrica inteligente es necesario poder afrontar los desafíos que surgen en el proceso de integración. Los tres retos de las fábricas inteligentes son:

- **Organización del trabajo:** Realizar un cambio en las tecnologías empleadas por una fábrica supone un reto respecto al cambio de funcionamiento de la fábrica en sí. La integración de tecnologías de la información supone un cambio en la forma de realizar ciertos procesos los cuales hicieran uso de las tecnologías anteriormente usadas por la industria. Para poder hacer uso de estas nuevas herramientas se necesitará disponer de personal cualificado cuya área de conocimiento esté centrada en estas nuevas tecnologías a la hora de realizar tareas y gestionar los nuevos procesos.
- **Disponibilidad:** Otro de los retos de la industria 4.0 es el de mantener la mayor disponibilidad del producto posible durante el cambio de tecnologías por el que deben pasar las fábricas. La actualización de las tecnologías no debe suponer un problema para la producción y mantenimiento de la fábrica en sí, y los cambios deben realizarse de forma paralela al funcionamiento diario de los componentes integrándose de forma paulatina, tratando de minimizar el posible impacto negativo que pueda tener el proceso de actualización.
- **Estandarización:** Finalmente, la estandarización se presenta como el mayor reto de entre los planteados. Si la industria 4.0 pretende habilitar las redes entre diferentes empresas e integrar redes de valor de las cuales puedan beneficiarse todas las empresas implicadas, será necesario desarrollar los estándares adecuados. Los esfuerzos de estandarización deben centrarse en estipular los mecanismos de comunicación y la información que se va a intercambiar. La descripción técnica completa y la implementación de estas disposiciones se conocen como la arquitectura de referencia.

La arquitectura de referencia es, por lo tanto, un modelo general que se aplica a los productos y servicios de todas las empresas colaboradoras. Proporciona un marco para la estructuración, desarrollo, integración y operación de los sistemas tecnológicos relevantes para la industria 4.0. El objetivo es poder llegar a un punto en común entre las empresas llegando al desarrollo y la creación de un único tipo de arquitectura, el cual sea empleado por todos los participantes. Entre los elementos a estandarizar se debe poner especial atención a los siguientes:

- El proceso de fabricación en términos de procesamiento y funciones de transporte.

- El uso de dispositivos de red específicos en un sistema de fabricación, tales como los dispositivos de automatización, dispositivos de campo (PLC), buses de campo, controladores lógicos programables, dispositivos de operación, dispositivos móviles, servidores, puestos de control, dispositivos de acceso web, etc.
- El conjunto de aplicaciones software en el entorno industrial, como podrían ser los sensores de adquisición de datos, controladores secuenciales, controladores continuos, datos operacionales, datos de los sistemas, análisis de datos, optimización de funciones, etc.

Se pretende que el resultado del proceso de estandarización industria pueda ser comparable al paradigma estandarizado que existe en las tecnologías de la información y más específicamente en Internet. El uso de sistemas operativos, herramientas de desarrollo y protocolos *Open Source* o libres permite la creación de un estándar internacional, el cual facilita el desarrollo de estas tecnologías de forma colectiva por parte de distintas entidades con el objetivo de mejorar las distintas tecnologías de una forma más rápida y económica.

Todo el conjunto de necesidades y requerimientos vistos en esta sección forman la hoja de ruta que debe seguirse para transformar la industria convencional en la industria 4.0. Sin embargo, si queremos ser más específicos en su implementación y realizar un enfoque práctico debemos estudiar cuales son los elementos principales y/o comunes de toda industria, siendo estos los controladores lógicos programables o más conocidos por sus siglas en inglés PLC (*Programmable Logic Controller*).

## 2.2 Controladores lógicos programables o PLC

---

Los controladores lógicos programables o autómatas programables son computadoras industriales utilizadas en los procesos de automatización industrial, las cuales se encargan de automatizar procesos electromecánicos, tales como la lectura de datos recogida por sensores o el control de la maquinaria de una fábrica a través de sus actuadores como podrían ser motores, válvulas, pistones, etc.

Fueron creados a finales de los años 60 por la industria con el objetivo de encontrar una solución eficiente que sustituyera los sistemas de control basados en circuitos eléctricos con relés, interruptores y otros elementos utilizados hasta el momento en el control de sistemas de lógica combinacional. En 1968, *GM Hydramatic* ( departamento de transmisión automática de *General Motors*) produjo el primer prototipo de PLC.

Los primeros PLC fueron programados en lenguaje llamado *Listado de instrucciones* con el cual las órdenes de control se le indicaban al procesador como un listado secuencial de códigos en lenguaje de máquinas. Luego para facilitar el mantenimiento de los sistemas a controlar se introdujo un lenguaje gráfico llamado lenguaje *Ladder* también conocido como diagrama de escalera.

Los PLCs modernos pueden ser programados de diversas maneras, desde diagramas de contactos, a los lenguajes de programación tales como dialectos especialmente adaptados de *BASIC* y *C*.

Hoy en día los autómatas programables son empleados en gran parte de la industria y en numerosas máquinas. A diferencia de las computadoras de propósito general, el PLC está diseñado para múltiples señales de entrada y de salida, rangos de temperatura ampliados, inmunidad al ruido eléctrico y resistencia a la vibración y al impacto. Estos controladores deben ser sistemas de tiempo real ya que los resultados de salida deben ser

producidos en respuesta a las condiciones de entrada dentro de un tiempo limitado, de lo contrario no producirá el resultado deseado.[8] Para poder obtener estos resultados en tiempo real, los PLC hacen uso de sistemas operativos simples.

Los controladores lógicos programables están formados por una serie de características que difieren de los computadores corrientes. Estas son las características que conforman su diseño[9]:

- **Alta robustez:** Los autómatas siguen un diseño orientado a trabajar en condiciones de trabajo en entornos industriales.
- **Alta disponibilidad:** Están diseñados para funcionar las 24 horas del día durante los 7 días de la semana sin interrupción.
- **Entradas y salidas físicas:** Las entradas y salidas eléctricas llevan información del mundo real al sistema, controlando dispositivos físicos basándose en esa información. Un PLC suele constar de varias entradas y salidas.
- **Sistema determinista:** El autómata procesa la información y reacciona a ella dentro de límites de tiempo definidos. Los PLC operan en una escala de tiempo de milisegundos o incluso microsegundos.
- **Modularidad:** Puede contener módulos de E / S, módulos de comunicación u otros módulos de propósito especial agregados para la expansión. Los PLC también pueden tomar la forma de una computadora o un pequeño módulo individual.
- **Uso de distintos lenguajes de programación:** Algunos de estos lenguajes permiten al programa ser cambiado mientras la máquina o el sistema controlado está en funcionamiento.
- **El software y el hardware son específicos de la plataforma:** Los componentes son diseñados normalmente de forma específica y cerrada por cada fabricante.

Un sistema industrial contiene varios controladores lógicos programables. A la hora de gestionar estos controladores lógicos programables, si se debe de gestionar más de uno, surge la necesidad de unificar sus procesos de control. Esto se debe a que muchos de esos controladores necesitan disponer de los datos recogidos por otros varios controladores y esta tarea es complicada si no se agrupan en un solo lugar todos elementos desde el cual, a modo de panel de control, poder gestionar y administrar todos los PLC. Para llevar a cabo esta tarea se han propuesto diversas soluciones a lo largo de los años como podrían ser los SCD (Sistema de Control Distribuido) o el uso de los sistemas SCADA, acrónimo de "*Supervisory Control And Data Acquisition*" (Supervisión, Control y Adquisición de Datos). En el siguiente apartado del estado del arte nos enfocaremos en los sistemas SCADA, ya que estos se fundamentan además de en el control, en la adquisición y supervisión de las variables de los procesos, permitiendo un mayor control de los PLC. Estudiaremos de qué forma los sistemas SCADA pueden satisfacer las necesidades de la industria 4.0 optimizando el uso de los PLC así como las necesidades que no pueden ser cubiertas.

## 2.3 Sistemas SCADA

---

SCADA es un acrónimo de "*Supervisory Control And Data Acquisition*", es decir: adquisición de datos y control de supervisión. Se trata de una aplicación software especialmente diseñada para funcionar sobre ordenadores en el control de producción, proporcionando comunicación con los dispositivos de campo (PLC, sensores simples, etc.)

y controlando el proceso de monitorización de forma automática desde el computador designado. Además, provee de toda la información que se genera en el proceso productivo a diversos usuarios, tanto del mismo nivel como de otros supervisores dentro de la empresa: supervisión, control de calidad, mantenimiento, etc. Los programas necesarios para llevar a cabo este proceso, y en su caso el conjunto de hardware adicional que se necesite, se denomina en general sistema SCADA.

Los sistemas SCADA permiten a los ingenieros de cualquier empresa llevar un control exhaustivo de todos los dispositivos en tiempo real y, además, crear alarmas y advertencias para corregir posibles desviaciones, gestionando la evolución de todos los procesos sin la intervención continua de un operario, reduciendo de esta forma los costes de mantenimiento. En resumen, los sistemas SCADA pueden abarcar los siguientes ámbitos [10] [11]:

1. Redes de automatización industrial y máquinas
2. Telemetría y control remoto utilizando comunicaciones continuas o ráfaga
3. Sistemas de Control de Procesos y Control de Procesos Estadísticos
4. Sistemas de Adquisición de Datos (DAQs)
5. Históricos y Servidores de almacenamiento de datos
6. Sistemas de Control Industrial utilizando PLCs y RTUs
7. Sistemas del entorno empresarial, tales como sistemas ERP y MES
8. Entorno de Computación de Nube Industrial
9. Sistemas de Seguridad y Procesos
  - Seguridad de máquina local
  - Seguridad y control de procesos
  - Conectividad empresarial o global que implica gestión de usuarios y/o accesos mediante aplicaciones tipo LDAP

### 2.3.1. Requisitos de un SCADA

Estos son algunos de los requisitos que debe tener un sistema SCADA para sacarle el máximo provecho:

- Deben ser sistemas de arquitecturas abiertas, capaces de crecer o adaptarse según las necesidades cambiantes de la empresa.
- Deben comunicarse con total facilidad y de forma transparente para el usuario con el equipo de planta (drivers ) y con el resto de la empresa (acceso a redes locales y de gestión).
- Los programas deben ser sencillos de instalar, sin excesivas exigencias, y fáciles de utilizar, con interfaces amables con el usuario (sonido, imágenes, pantallas táctiles, etc.).

Además de estos requisitos, un sistema SCADA está compuesto por un conjunto de componentes. Estos componentes son los siguientes[10]:

- **Nodo principal o MTU (*Master Terminal Unit*):** Se trata del ordenador principal, este se encarga de supervisar y recoger la información del resto de subestaciones, ya sean otros ordenadores conectados (en sistemas complejos) a los instrumentos de campo o directamente sobre dichos instrumentos. Por lo tanto un sistema SCADA sencillo contendrá un único MTU. Las funciones principales del MTU son las siguientes:
  - Comunicarse de forma periódica con los RTU y transmitirles instrucciones; siguiendo usualmente un esquema maestro-esclavo.
  - Actuar como interfaz del operador, incluyendo la presentación de información de variables en tiempo real, la administración de alarmas y la recolección y presentación de los datos generados a lo largo del tiempo.
  - Ejecutar software especializado que cumpla funciones específicas asociadas al proceso supervisado por el SCADA. Por ejemplo, software para la detección de pérdidas en un oleoducto.

- **Nodo remoto o RTU (*Remote Terminal Unit*):** Los ordenadores remotos se sitúan en las subestaciones de los sistemas complejos para realizar su gestión. Reciben información de los sensores de campo y los controlan gracias al software de la aplicación SCADA.

Estos nodos conforman la capa intermedia de los sistemas SCADA; en la capa superior se encuentra el MTU, encargado de recolectar los datos de los RTU y otros sensores, mientras que en la capa inferior nos encontraríamos con los instrumentos de campo. En la actualidad, los controladores lógicos programables contienen funciones de RTU gracias a un nivel de integración mayor y al uso de procesadores con mayor potencia de cálculo.

- **Red de comunicación:** Todos los elementos de un sistema SCADA deben estar conectados a una red que les permita comunicarse entre si. Estos elementos pueden utilizar diferente tipos de BUS y/o software para comunicarse, dependiendo de los tipos de BUS compatibles con el software de los instrumentos de campo instalados, ya que normalmente el software de cada fabricante no suele estar abierto a modificaciones.

más adelante en el apartado 2.3.2 analizaremos de forma más profunda los distintos protocolos disponibles en los buses de comunicación.

- **Instrumentos de campo:** Son aquellos componentes que permiten la automatización o control del sistema (PLC, controladores de procesos industriales y actuadores en general) y/o la captación de información del sistema (sensores y alarmas).

Los componentes de un sistema SCADA en un ámbito industrial suelen estar diseñados por distintos fabricantes, sin que exista en su diseño una forma implícita de coordinar-se entre si. Esto puede llevar a situaciones en las que sea necesario emplear adaptadores para implementar nuevos componentes los cuales no compartan proveedor con el resto de elementos del sistema, pudiendo aumentar el coste final de forma significativa.

Adicionalmente, un sistema SCADA debe estar configurado previamente para definir el entorno de trabajo de la aplicación. De esta forma el operador definirá la interfaz con la que desea presentar los datos y trabajar sobre ellos. Es importante que la información mostrada por pantalla sea fácil de leer y entender por el operario para evitar posibles fallos a la hora de interpretar y procesar los datos. Es necesario configurar también los *drivers* del sistema que permitirán comunicarse con los elementos de campo y la conexión a la red de los elementos.

En los sistemas SCADA es necesario llevar a cabo un seguimiento de los datos adquiridos, procesados y almacenados de forma ordenada en el sistema para posterior uso [10]. Deben poder definirse esos datos tal que si en algún momento se decide realizar un informe con dichos datos o bien almacenarlos en una base de datos no haya ningún problema.

Finalmente el ordenador principal debe disponer de un módulo de proceso el cual se encargue de ejecutar las acciones de control programadas a partir de los valores actuales de las variables leídas. La programación del módulo se puede realizar mediante lenguajes de alto nivel como podrían ser C, Basic, Python, etc.

### 2.3.2. Protocolos de comunicación

Pese a los esfuerzos en los últimos años por estandarizar los protocolos con los que comunicarlos diferentes componentes de los sistemas SCADA, actualmente se presenta una situación diversificada donde es difícil encontrar dos sistemas SCADA que utilicen los mismos protocolos de comunicación.

Nos encontramos en el ámbito industrial, donde los sistemas están implementados sobre formatos estándares de comunicaciones como podrían ser RS-232, RS-422 y RS-485, a partir de los cuales, y mediante un protocolo TCP/IP, se puede crear una red con los distintos nodos. Sin embargo, con la llegada de la industria 4.0, no solo se limita la comunicación a la utilización buses de campo industriales, también se están comenzando a emplear formas de comunicación no exclusivas al ámbito industrial como Bluetooth, microondas, infrarrojos, etc.

Las redes industriales están organizadas en una jerarquía, la cual es posible agrupar en tres categorías:

- Buses de campo
- Redes LAN
- Redes LAN-WAN

Los buses de datos que permiten la integración de equipos para la medición y control de variables de proceso, reciben la denominación genérica de buses de campo. Un bus de campo es un sistema de transmisión de información (datos) que simplifica enormemente la instalación y operación de máquinas y equipamientos industriales utilizados en procesos de producción.

Varios grupos han intentado generar e imponer una norma que permita la integración de equipos de distintos proveedores. Sin embargo, hasta la fecha no existe un bus de campo universal. Los buses de campo con mayor presencia en el área de control y automatización de procesos son los siguientes [12] [13]:

- **HART:** El protocolo HART (*Highway Addressable Remote Transducer*) fue desarrollado en la década de 1980 por Rosemount Inc. Posteriormente, sus derechos fueron liberados y desde 1993 la norma está depositada en la *HART Communication Foundation* (HCF) siendo esta de uso abierto y gratuito. En 2015, la HCF y la *Fieldbus Foundation*<sup>1</sup> se unirán para formar *FieldComm Group* que, como indica en su web<sup>2</sup>, es una organización sin ánimos de lucro cuyo objetivo es organizar a los usuarios finales, fabricantes, universidades e investigadores que trabajan conjuntamente en

<sup>1</sup>Fundación encargada del protocolo Foundation Fieldbus

<sup>2</sup><https://fieldcommgroup.org/>

el desarrollo, incorporación e implementación de los protocolos de comunicación industrial.

El protocolo HART permite la comunicación con los instrumentos de campo sobre un lazo de corriente 4-20 mA, agrupando la información digital sobre la señal analógica típica de los 4 a 20 mA en corriente continua. La señal digital usa dos frecuencias individuales de 1200 y 2200 HZ, que representan los dígitos 1 y 0 respectivamente y que en conjunto forman una onda sinusoidal.

- **Profibus:** El estándar de comunicaciones para bus de campo Profibus (*Process Field Bus*) fue desarrollado entre los años 1987 y 1990 principalmente por las empresas alemanas Bosch, Klöckner Möller y Siemens, y por otras como ABB, AEG, Honeywell, Landis & Gyr, Phoenix Contact, Rheinmetall, RMP, Sauter-cumulus y Schleicher. En 1989 la norma alemana DIN19245 adoptó el estándar Profibus. Finalmente, en 1996, Profibus fue confirmada como norma europea en 1996 como EN50170.

La arquitectura del Profibus se divide en tres tipos principales:

- **Profibus DP (*Decentralized Periphery*):** Siendo la solución de alta velocidad del Profibus, esta versión está orientada a sensores/actuadores enlazados a procesadores (PLCs) o terminales. Es utilizado en sustitución a los sistemas convencionales como podrían ser los sistemas HART. En 2003, el 90 % de las aplicaciones relativas a esclavos Profibus utilizaban el Profibus DP. Esta variedad dispone de tres versiones: DP-V0 (1993), DP-V1 (1997) e DP-V2 (2002).
  - **Profibus PA (*Process Automation*):** Solución que atiende los requisitos de la automatización de procesos, donde se tienen conexiones de sistemas de automatización y sistemas de control de procesos con equipos de campo, tales como: transmisores de presión, temperatura, convertidores, posicionadores, etc. Se puede utilizar para sustituir el estándar de 4 a 20 mA.
  - **Profibus FMS (*Fieldbus Message Specification*):** Es la solución estándar de comunicación universal usada para solucionar tareas complejas de comunicación entre PLCs y los dispositivos de control. Generalmente utilizada a nivel de control para la comunicación entre células de proceso o equipos de automatización.
- **Foundation Fieldbus:** Se trata de un sistema comunicación serial de dos vías completamente digital que sirve como la red de nivel base en el ambiente de automatización de una planta o fábrica, específicamente utilizado en aplicaciones de control distribuido. Desarrollado y administrado por el *FieldComm Group*, se trata de un sistema de arquitectura abierta.

Foundation Fieldbus fue desarrollado con la intención de poder reemplazar el estándar 4-20 mA, y hoy en día coexiste junto con otras tecnologías como pueden ser Modbus, Profibus y Ethernet Industrial<sup>3</sup>. Puede comunicar grandes volúmenes de información, siendo ideal para aplicaciones con varios lazos complejos de control de procesos y automatización.

Se han introducido dos implementaciones de Foundation Fieldbus para satisfacer las diferentes necesidades surgidas dentro del proceso de automatización. Estas dos implementaciones usan diferentes velocidades de comunicación y medios físicos, siendo las siguientes:

---

<sup>3</sup>El Ethernet Industrial consiste en el uso del Ethernet en un sistema industrial junto a protocolos que proveen cierto determinismo y control en tiempo real. Entre los protocolos que emplean el Ethernet Industrial se incluyen EtherCAT, EtherNet/IP, Profinet, POWERLINK, SERCOS III, CC-Link IE, y Modbus TCP



- **Foundation Fieldbus H1:** Opera a 31.25 Kb/s y generalmente se conecta a dispositivos de campo. Proporciona comunicación y alimentación sobre cableado estándar en par torcido. Actualmente H1 es la implementación más común.
  - **HSE (Ethernet de alta velocidad):** Trabaja a 100 Mb/s y generalmente conecta subsistemas de entrada/salida, sistemas host, dispositivos de enlace, computadoras y dispositivos de campo que usen cableado Ethernet estándar. Actualmente no proporciona alimentación sobre el cable, aunque ya se está trabajando sobre este aspecto.
- **AS-i (AS-Interface):** AS-i es un Bus de Sensores y Actuadores, estándar internacional IEC62026-2 y europeo EN 50295 para el nivel de campo más bajo desde 1999. Diseñado en 1990 e introducido al mercado en 1994 como una alternativa económica al cableado tradicional. El objetivo original fue crear una red simple para sensores y actuadores binarios, capaz de transmitir datos y alimentación a través del mismo bus, manteniendo una gran variedad de topologías que faciliten la instalación de los sensores y actuadores en cualquier punto del proceso con el menor esfuerzo posible.
- Las especificaciones de AS-i se encuentran actualmente en su versión 3.0. Estas son de carácter abierto, lo que significa que cualquier fabricante puede obtener una copia de las mismas para elaborar sus productos.
- **Modbus:** Modbus es un protocolo de transmisión para sistemas de control y supervisión de procesos (SCADA) con control centralizado, puede comunicarse con una o varias Estaciones Remotas (RTU) con la finalidad de obtener datos de campo para la supervisión y control de un proceso. Las interfaces de la capa física puede estar configuradas en RS-232, RS-422, RS-485.
- En Modbus los datos pueden intercambiarse en dos modos de transmisión:
- Modo RTU
  - Modo ASCII

### 2.3.3. Seguridad sobre protocolos

A pesar de su función crítica en los sistemas industriales, los protocolos de comunicación que hemos visto en el apartado anterior raramente incorporan mecanismos de seguridad, siendo por lo tanto uno de los elementos más vulnerables de las redes SCADA. Los protocolos están diseñados para ser deterministas y eficientes, pero no seguros. Tradicionalmente la seguridad por ocultación<sup>4</sup> ha sido su mejor protección al ser protocolos muy especializados que no abundan fuera de los sistemas industriales. Sin embargo, debido a la migración progresiva que se está realizando hacia protocolos estandarizados de código abierto por parte de las empresas, no se debe continuar con el modelo de caja negra ya que pondría en peligro la integridad del sistema.

Escasos protocolos de comunicación industriales incorporan en sus especificaciones mecanismos de seguridad. Esto conlleva a que, desde el punto de vista de la integridad, la intrusión o la confidencialidad, las redes SCADA no sean seguras por si mismas.

A esto hay que añadir que los protocolos SCADA están sujetos a los mismos tipos de técnicas de ataque que otros protocolos como pueden ser SMTP, HTTP o FTP<sup>5</sup>. Algunas

<sup>4</sup>En el ámbito informático, la seguridad por ocultación o oscuridad (también conocido como sistemas de caja negra) consiste en un principio de ingeniería de seguridad, el cual utiliza el secreto de diseño o funcionamiento para asegurar la seguridad del sistema.

<sup>5</sup>SMTP es el protocolo para transferencia simple de correo, HTTP es el protocolo de transferencia de hipertexto y FTP es el protocolo de transferencia de archivos.



de estas técnicas serían: DoS, *buffer overflows*, etc. Ningún fabricante de sistemas SCADA está exento de sufrir los mismos ataques informáticos que otras empresas de equipos y aplicaciones informáticas, como Cisco, IBM o Microsoft.

La robustez en la implementación del protocolo es esencial a la hora de implementar redes seguras, algo no siempre tenido en cuenta en el diseño de equipamiento SCADA. El tratamiento de los errores suele ser deficiente y ello deriva en reinicios o denegaciones de servicio como consecuencia de, por ejemplo de auditorías.

A continuación, estudiaremos qué medidas de seguridad se han implementado a lo largo de los años en algunos de los protocolos utilizados en los sistemas SCADA según [14]:

- **DNP3:** Es un protocolo diseñado de forma específica para funcionar en aplicaciones SCADA. Este protocolo permite a las unidades principales obtener datos de los ordenadores remotos a través de comandos de control predefinidos. El protocolo no fue diseñado teniendo en cuenta mecanismos de seguridad, por lo tanto carece de cualquier forma de autenticación o cifrado. Este protocolo puede ir encapsulado sobre TCP/IP.

Una versión del protocolo llamada DNPSec fue diseñada para incluir confidencialidad, integridad y autenticación sin realizar un gran impacto en las implementaciones DNP3 ya existentes. Para su implementación es necesario establecer, de la misma forma que con IPSec, directivas de seguridad que identifiquen algoritmos de autenticación y criptográficos, así como parámetros comunes para la comunicación entre aplicaciones.

- **ICCP (IEC 60870 - 6):** Este protocolo es uno de los más utilizados en los sistemas SCADA de compañías energéticas ya que está especialmente adaptado a las necesidades de comunicación de este tipo de compañías. Proporciona conectividad entre los ordenadores remotos y las unidades principales encargadas del control y la gestión. El intercambio de datos consiste en la monitorización en tiempo real del sistema, datos de control, valores de medida, programación, contabilidad y mensajes de operador. Tradicionalmente este protocolo ha sido vulnerable a ataques DoS debido a vulnerabilidades existentes en el código de la pila ICCP de muchos servidores. Al igual que gran parte de los protocolos actuales SCADA, también es atacable por técnicas de spoofing. Un servidor ICCP con una vulnerabilidad podría permitir a un atacante hacerse con el control del servidor de la fábrica y de todos los servidores ICCP que se comunican con el servidor vulnerable.
- **OPC (OLE for Process Control):** Es una interfaz estándar de comunicación usada en la industria de control de procesos. Está diseñada para garantizar la interoperabilidad entre los componentes de distintos fabricantes, permite la comunicación entre aplicaciones de control y de supervisión independientemente de su origen. Requiere que el uso de un driver genérico OPC proporcionado por cada fabricante de los elementos a comunicar.

Está basado en los estándares de Microsoft OLE, DCOM y RPC. El problema reside en los fallos de seguridad que se han encontrado en dichos componentes de Microsoft. Aunque el objetivo actual de estandarización de los protocolos está enfocado a la creación de protocolos basados en web e independientes del sistema operativo, la mayor parte de los protocolos ya instalados se basan en el protocolo original "OLE for Process Control" de Microsoft.

Un atacante que tenga conocimiento del uso del protocolo OPC en un sistema SCADA intentará sacar ventaja de alguna de las vulnerabilidades conocidas de los ser-

vicios DCON y RPC, más aún sabiendo que los sistemas de control industrial tienen gran dificultad en implementar actualizaciones.

- **Modbus:** El protocolo Modbus anteriormente descrito ha resultado ser uno de los mayores focos de ataques informáticos a su infraestructura debido a su amplia difusión.

Para su uso en redes Ethernet existen dos posibilidades: Modbus/TCP y Modbus Plus. Resalta el módulo "*Access Control Module*" en el modelo de arquitectura Modbus/TCP, pensado para restringir el acceso a servidores desde clientes específicos en entornos críticos basándose en listas de IP.

Una vulnerabilidad aprovechada por los atacantes es la posibilidad de obtener la huella digital<sup>6</sup> del equipo a través de su puerto estándar TCP/502. Haciendo uso de la función 43 del protocolo puede leerse el registro de identificación de PLCs y conseguir información del fabricante, versión, tipo de dispositivo y otra información útil para ser utilizada en próximos ataques.

Se ha estudiado la posibilidad de implementar un cortafuegos para Modbus/TCP con el cual poder añadir un control con política de grano fino sobre los accesos que se hacen a los dispositivos mediante Modbus en redes SCADA. Buscando estas características, podemos encontrar el "*modbusfw*"<sup>7</sup>, un cortafuegos específico para Modbus/TCP con base en IpTables<sup>8</sup>. Este cortafuegos nace de la necesidad de autenticar el emisor de las peticiones llevadas a cabo en el protocolo, ya que de por sí, este no cuenta con herramientas para hacerlo.

Sin embargo, una solución de tipo cortafuegos no establece que la red de dispositivos conectados a través de Modbus sea totalmente segura. La red interna seguirá siendo un foco de vulnerabilidades ya que, cualquier dispositivo que se encuentre en esta, podrá comprometer la integridad y confidencialidad de los datos leídos por los otros dispositivos ya que, debido a la naturaleza de Modbus, no existe un mecanismo para autorizar los dispositivos de la red a operar en esta, y un cortafuegos no puede llevar a cabo eficientemente la autorización y monitorización de estos.

Debido a las vulnerabilidades sobre los protocolos que acabamos de mencionar surge la necesidad de estudiar soluciones que vayan más allá de asegurar uno a uno los protocolos de los sistemas SCADA. Una de las opciones que se proponen es el utilizar de forma general tecnologías de código abierto. Esto supondría un cambio respecto a los sistemas actuales, ya que se sustituiría el modelo actual de caja negra por uno donde las diferentes industrias colaborasen entre sí en pos de desarrollar un software y/o hardware más eficiente, con menos errores y actualizado constantemente para evitar posibles fallos de seguridad que surgen en los sistemas desactualizados.

## 2.4 Gemelo digital o *Digital Twin*

---

Con la llegada de las tecnologías digitales, se han realizado avances referentes a la integración de elementos inteligentes interconectados en la industria. Estas tecnologías permiten la detección remota, monitorización en tiempo real y control de dispositivos y elementos de producción ciberfísicos a través de las infraestructuras de red, proveyendo una integración y sincronización más directa desde el mundo físico hacia el virtual. [15] [16]

---

<sup>6</sup>Una huella digital consiste en un conjunto de información asignado a una cadena de texto cuyo tamaño es mucho más reducido en comparación a los datos originales.

<sup>7</sup>[https://bitbucket.org/rob\\_au/modbusfw/src/master/](https://bitbucket.org/rob_au/modbusfw/src/master/)

<sup>8</sup>Iptables consiste en una utilidad de línea de órdenes para configurar el cortafuegos del kernel de Linux

El uso de tecnologías de digitalización ha permitido la planificación virtual de productos y procesos. Las grandes cantidades de datos resultantes son procesadas, analizadas y evaluadas por herramientas de simulación y optimización con el objetivo de disponer de los datos para la planificación en tiempo real de tareas y cambios en el sistema.[17] Uno de los conceptos que hace uso de las herramientas de simulación y optimización con gran potencial en varios ámbitos industriales es el gemelo digital.[2]

Un gemelo digital consiste en una representación digital de un sistema físico siguiendo la máxima fidelidad posible. Puede ser utilizado con varios propósitos aprovechando la sincronización en tiempo real de los datos recolectados originados en el sistema físico, pudiendo de esta manera el gemelo digital tomar decisiones sobre un conjunto de acciones con el objetivo de estructurar y asegurar el funcionamiento del conjunto del sistema de una forma óptima. [15][18][19] La primera definición de gemelo digital surge de la mano de Michael Grieves en 2002, durante una presentación sobre la gestión del ciclo de vida del producto en la industria. El gemelo digital en su forma original fue descrito como una construcción de información digital sobre un sistema físico, creado como una entidad por sí mismo y vinculado con el sistema físico en cuestión. La representación digital debe incluir de forma óptima toda la información posible sobre el sistema físico que sea relativa a su funcionamiento y que influya en este. [20]

Stargel Glaessgen da una definición más detallada reconocida ampliamente en el campo de la investigación. Según Glaessgen (2012): "El gemelo digital es una simulación probabilística, multifísica y multiescalar sobre un producto complejo que utiliza los mejores modelos físicos disponibles, actualizaciones de sensores, etc., para reflejar de forma exacta la vida de su gemelo correspondiente." [21]

Cabe a destacar que el gemelo digital evoluciona a la vez que el objeto físico al que representa a lo largo de su vida funcional. No solo se trata de una representación fiel del comportamiento del sistema físico si no que además proporciona diversos servicios en beneficio de este, como podría ser la automatización del funcionamiento del sistema físico o su optimización gracias a sus datos recolectados y procesados en la simulación.

Debido a las múltiples soluciones y conceptos existentes sobre el gemelo digital a través de las distintas industrias existe un conocimiento diverso e incompleto sobre este concepto. Para alcanzar un conocimiento mayor sobre el gemelo digital, en las siguientes secciones se discutirá sobre su nivel de integración y los modelos de gemelo que existen.

### 2.4.1. Nivel de integración

Basándose en las múltiples definiciones atribuidas al gemelo digital, se tiende a pensar de forma equívoca que un gemelo digital consiste en tan solo una representación digital de un sistema u objeto físico. Debido a esto, los términos modelo digital, sombra digital y gemelo digital son utilizados como si fueran el mismo concepto, sin embargo, sus definiciones difieren en el nivel de integración de los datos entre el sistema físico y su réplica digital. Es por ello que podemos clasificar las réplicas digitales en tres subcategorías, dependiendo de su nivel de integración de datos [2], las cuales son:

- **Modelo digital:** Un modelo digital es una representación digital de un objeto existente o planificado la cual no usa ninguna forma de intercambio de datos automatizada entre el objeto físico y el digital. La representación digital puede incluir una descripción más o menos comprensiva del objeto físico. Entre este tipo de modelos podemos encontrar planos de fábricas, modelos matemáticos de nuevos productos o cualquier otro modelo sobre un objeto físico el cual no haga uso de ninguna forma de integración automática de datos.

Los datos digitales del sistema físico pueden ser utilizados para el desarrollo de su modelo, sin embargo, cualquier flujo de datos entre el modelo digital y el sistema físico debe hacerse de forma manual. Un cambio en el estado del sistema físico no tendría un efecto directo sobre el objeto digital y viceversa.

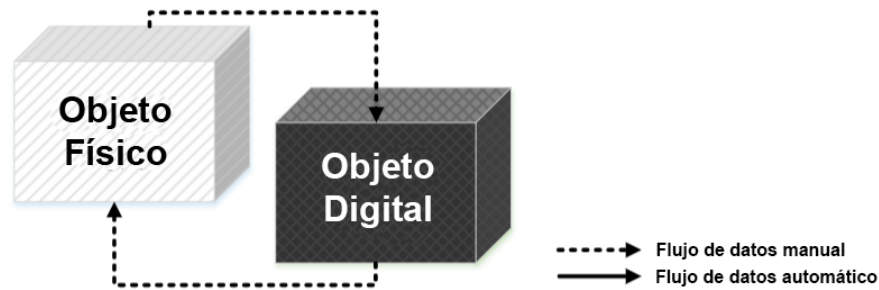


Figura 2.2: Flujo de datos en un modelo digital[2]

- Sombra digital:** Basándonos en la definición de modelo digital, si existe un flujo de datos unidireccional y automatizado entre el objeto físico y el objeto digital, nos encontraríamos ante una sombra digital. Si para la creación de un sistema SCADA se crea un modelo digital preciso del sistema físico, nos encontraríamos con que ese sistema SCADA sigue el modelo de sombra digital, ya que el sistema físico se encargaría de recolectar y enviar al modelo digital los datos recogidos por los sensores de forma automática mientras que uno o varios técnicos serían los encargados de monitorizar esos datos recogidos, comprobar los cambios que producen en el sistema y elaborar una respuesta para el sistema físico.

Un cambio en el estado del objeto físico produciría un cambio en el estado del objeto digital, pero no viceversa.

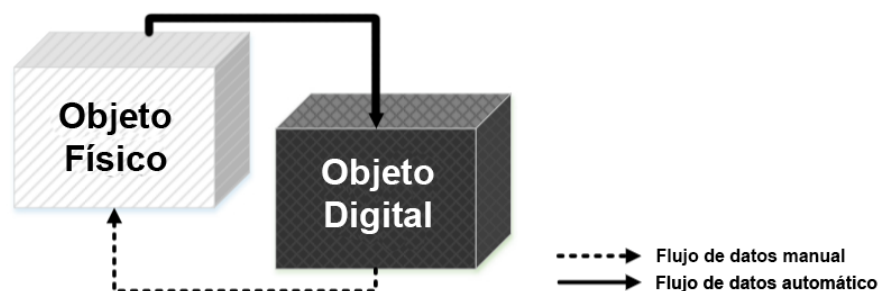


Figura 2.3: Flujo de datos en una sombra digital[2]

- Gemelo digital:** Si el flujo de datos entre un sistema físico y su reflejo digital está totalmente automatizado nos encontramos ante un gemelo digital. Con esta combinación, el objeto digital puede actuar también de controlador del sistema físico. De forma adición, pueden haber otros objetos, físicos o digitales que actúen sobre el objeto digital.

Un cambio en el estado del objeto físico produciría un cambio en el estado del objeto digital y viceversa.

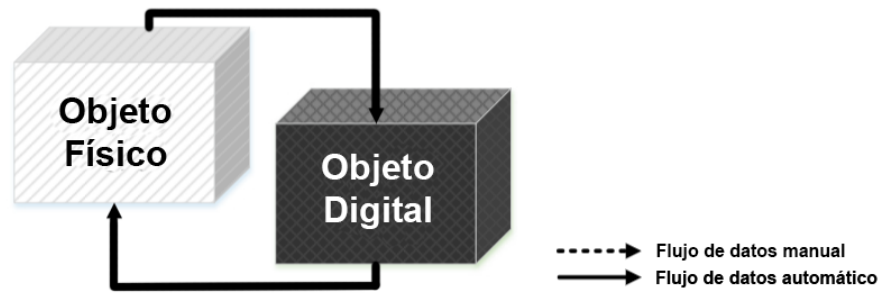


Figura 2.4: Flujo de datos en un gemelo digital[2]

### 2.4.2. Tipos de gemelo digital

A la hora de diseñar el gemelo digital, debemos tener en cuenta que datos del sistema físico necesitamos integrar en nuestra réplica digital para poder crear una representación exacta del funcionamiento del objeto a representar. No se deben emplear más datos de los necesarios, ya que el uso de grandes cantidades de datos sin relación alguna puede suponer un aumento significativo del coste de creación del gemelo digital y un aumento del tiempo necesario para la realización de las simulaciones. Al tratarse de sistemas críticos, el procesamiento de las simulaciones debe realizarse en tiempo real, evitando cualquier retraso innecesario que pudiera producirse al procesar más datos de los necesarios. Si las simulaciones fueran a ralentizar o entorpecer el intercambio de datos con el sistema físico, se debe hacer uso de ordenadores complementarios los cuales puedan soportar los cálculos pesados del sistema sin entorpecer el funcionamiento del ordenador principal.

Dependiendo de las necesidades de los gemelos digitales, podemos dividirlos en dos grandes grupos:

- **Gemelos basados en datos:** Los gemelos digitales basados en datos son aquellos que para su creación solo se han empleado los datos respectivos al funcionamiento del sistema. A partir de estos datos junto con los algoritmos correspondientes se realiza la simulación del sistema con la cual se podrá optimizar el sistema físico y controlar su funcionamiento de forma automática. Estos gemelos digitales son utilizados por ejemplo en sistemas de control climático.
- **Gemelos con representación virtual:** Los gemelos digitales basados con representación virtual son gemelos para los cuales se ha realizado adicionalmente el modelado en 3D del objeto físico y de su entorno. Estos gemelos siguen siendo creados a partir de los datos necesarios para el funcionamiento del sistema pero adicionalmente toman en consideración la interacción que realiza el sistema con el entorno físico, valiéndose de modelos en 3D los cuales representan el objeto físico junto al entorno en el que se encuentra. Gracias a estos modelos, podemos analizar la estructura física del sistema previniendo posibles fallos estructurales.

Teniendo en consideración que el procesamiento de los modelos en 3D puede suponer una carga excesiva en la simulación se debe integrar el gemelo digital de forma que no entorpezca en el funcionamiento del sistema. Estos gemelos digitales son utilizados por ejemplo en torres eólicas para maximizar la fidelidad de la representación digital.

### 2.4.3. Áreas enfocadas en la industria

El gemelo digital ofrece una oportunidad de simular y optimizar los sistemas de producción, incluyendo sus aspectos logísticos y permitiendo una visualización detallada del proceso de manufacturación. Algunas de las áreas principales las cuales se ven beneficiadas gracias al uso del gemelo digital, aumentando su competitividad, productividad y eficiencia son [2]:

- **Planificación y control de producción:** Gracias al uso del gemelo digital se podría realizar una planificación de tareas en base a supuestos estadísticos, una mejora del soporte para la toma de decisiones gracias a uso de diagnósticos detallados y la automatización de la planificación y ejecución de tareas por parte de las unidades de producción. [19]
- **Mantenimiento:** Según los autores [22], [23] y [24], el gemelo digital puede ser utilizado para realizar tareas de mantenimiento en las cuales podría identificar el impacto de los cambios de estado en los procesos de los sistemas de producción, identificar y evaluar de forma anticipada medidas de mantenimiento, evaluar la condición de las máquina y integrar, gestionar y analizar datos producidos durante las diferentes fases de el ciclo de vida de un sistema para prevenir posibles fallos.
- **Planificación de diseño:** Tal y como sugiere [18] el gemelo digital ayudará a la evaluación y planificación de sistemas de producción continuos, junto a la adquisición de datos y variables de entorno de forma automática sin necesidad de usar aplicaciones dedicadas.

### 2.4.4. Componentes de un gemelo digital

Los componentes de un gemelo digital no son del todo exactos, ya que dependiendo del escenario donde se plantee su implementación cambiará el conjunto de componentes empleados. El gemelo digital y los sistemas SCADA comparten gran parte de los componentes necesarios para su funcionamiento, debido a la similitud de ambos conceptos. Desde un punto de vista no específico, los componentes que forman un gemelo digital son los siguientes.

- **Nodo principal:** De manera similar a los sistemas SCADA, el gemelo digital está formado por un ordenador principal desde el cual se llevarán a cabo los cálculos básicos sobre el modelo generado y desde donde se generarán las respuestas de control automáticas dirigidas al sistema físico. Este ordenador estará conectado con los instrumentos de campo, con el sistema de almacenamiento y con los ordenadores de apoyo si hicieran falta. El sistema principal debe permitir realizar cambios sobre el sistema de forma manual, en caso de que fuera necesario.
- **Nodos de apoyo computacional:** En ocasiones, el gemelo digital generado resulta excesivamente complejo y el cálculo de las simulaciones consume tal cantidad de tiempo que demora la elaboración de los resultados necesarios para el desarrollo de las respuestas del gemelo. Con el objetivo de reducir el tiempo de cálculo en modelos complejos, se propone incorporar al sistema nodos que compartan carga computacional. De esta forma los cálculos a realizar por el modelo se distribuirían a través de los distintos nodos, reuniendo los resultados y generando las respuestas en el nodo principal.
- **Sistema de almacenamiento:** Es aconsejable disponer de un sistema de almacenamiento independiente del sistema, el cual almacene los registros de actividad gene-



rados por el ordenador principal. Si se necesitase acceder a los datos de la actividad del gemelo, se puede acceder al sistema de almacenamiento sin tener que disponer del nodo principal, lo cual puede resultar necesario en caso de que falle el sistema.

- **Red de comunicación:** Todos los elementos del gemelo digital deben estar conectados a una red que les permita comunicarse entre si.
- **Instrumentos de campo:** El conjunto de instrumentos de campo está formado por los sensores y controladores que obtienen los datos del sistema físico y los envían al ordenador principal para ser integrados en el gemelo. Por otra parte también se encarga de implementar las ordenes recibidas por el ordenador principal en el sistema físico.

Adicionalmente, el gemelo digital debe estar configurado en función del sistema físico al que se desea replicar. Para ello, se debe definir que datos se mostrarán en la interfaz, que acciones podrá realizar el operador sobre el sistema y finalmente como se creará el módulo de simulación. Es importante que la información mostrada por pantalla sea fácil de leer y entender por el operario para evitar posibles fallos a la hora de interpretar y procesar los datos. Es necesario configurar también los *drivers* del sistema que permitirán comunicarse con los elementos de campo y la conexión a la red de los elementos.

Para crear el módulo de simulación se deben definir que algoritmos están relacionados con los datos del sistema físico y resultan útiles a la hora de replicar el comportamiento del sistema físico. A partir de los datos y los algoritmos podemos simular el comportamiento del sistema y aplicar las relaciones entre los datos reales y los teóricos de nuestro gemelo digital, generando respuestas automatizadas para el sistema físico en función de su comportamiento.

Finalmente debe configurarse el ordenador principal para que almacene de forma automática los datos generados por el sistema y su gemelo digital. Estos datos pueden almacenarse de forma cruda o mediante la generación de un archivo formateado en el propio nodo principal o en un sistema de almacenamiento independiente.

## 2.5 Crítica al estado del arte

---

A partir de las tecnologías estudiadas en el estado del arte podemos, no solo hacernos una idea del funcionamiento de los sistemas industriales actuales si no también de los aspectos a mejorar en estos entornos.

Los sistemas SCADA pueden ser configurados para generar alertas basadas en reglas simples, es decir, cuando un valor supera cierto límite predefinido por una regla el sistema generará una alerta, gracias a la cual, de forma autónoma o mediante la actuación del operario encargado del sistema SCADA se realizarán los cambios en el necesarios en el sistema monitorizado para que el valor vuelva a la normalidad. Este sistema basado en reglas tiene varios inconvenientes.

El primero de los inconvenientes consiste en el uso de reglas estáticas ya que no permite al sistema generar una alarma o respuesta hasta haber alcanzado el límite de una regla. Este comportamiento puede llevar a situaciones desde las cuales el sistema no pueda recuperar su funcionamiento correcto o simplemente tarde más de lo esperado en hacerlo.

El segundo problema es la actuación necesaria de los operarios sobre el sistema. Los operarios que interactúan con el sistema SCADA para monitorizar, realizar cambios y solventar alertas generadas por el sistema industrial no están exentos de cometer fallos

humanos. Un valor pasado por alto o fuera de contexto puede causar la actuación errónea por parte del operario sobre el sistema. Es por ello que hay que evitar la actuación de las personas sobre el sistema de control en la medida de lo posible para minimizar fallos potenciales.

Cabe destacar que los sistemas SCADA no realizan uso de los datos del sistema físico recolectados más allá de asegurar el funcionamiento de este. El análisis de los datos para la optimización del sistema físico se realiza de manera manual a través de los operarios, de manera independiente al sistema SCADA. Esto provoca que la optimización del sistema se demore.

Otro de los problemas de los sistemas SCADA es la falta de estandarización sobre estos. El uso de diversos protocolos de comunicación en un sistema SCADA puede llevar a que su implementación sea complicada y costosa, necesitando más elementos de los necesarios para instalar el sistema. Por otra parte, la seguridad de los protocolos utilizados suele recaer en el principio de seguridad por ocultación y en el aislamiento de los sistemas hacia el exterior. Esto puede acarrear graves problemas ya que los sistemas operan sin tener en cuenta las posibles vulnerabilidades que puedan contener, exponiendo el sistema a ataques por parte de piratas informáticos, empleados descontentos, organizaciones criminales, etc.

Un ejemplo de ataque informático sobre sistemas SCADA es el ocurrido en 2010 en la planta nuclear de Natanz, Irán, cuando fue objetivo del ataque del gusano Stuxnet. Este virus entró en el sistema mediante una memoria USB infectada de un operario. El virus se propagó a través de los ordenadores de la planta nuclear por la red interna, llegando a dañar hasta 1000 máquinas encargadas de la centrifugación de los elementos radioactivos. El gusano solo tomaba el control del sistema si se trataba de un PLC y modificaba su comportamiento variando la velocidad de la centrifugadora periódicamente para evitar ser detectado y así aumentar su impacto. Debido a este ataque alrededor del 20 por ciento de las centrifugadoras quedaron fuera de servicio.

Los principales problemas del gemelo digital son la potencia de cálculo necesaria para procesar la información y elaborar una respuesta bajo un tiempo admisible en un sistema crítico y la complejidad para la creación del gemelo en sí.

Los gemelos digitales implementados en sistemas complejos analizan y procesan una gran cantidad de datos por segundo para poder generar las respuestas que actuarán sobre el sistema físico. Esto puede llevar a que las respuestas sean generadas con cierta demora, afectando al funcionamiento correcto del sistema.

Por otra parte, la complejidad de un gemelo digital implica la necesidad de disponer de un equipo multidisciplinar para la creación de este. El equipo debe ser capaz de entender el funcionamiento del sistema físico a replicar, configurar su versión digital a partir de los algoritmos y los datos recogidos de este, realizar un modelo 3D en caso de que fuera necesario el cual cubriese todas las características físicas del modelo y finalmente crear una interfaz desde la cual un operario pueda comprobar el estado del gemelo y el sistema físico, pudiendo realizar tareas de control sobre ambos. Por lo tanto, es necesaria la colaboración entre diversos profesionales de distintos ámbitos para poder abarcar todas las áreas necesarias para la creación del gemelo.

## 2.6 Propuesta

---

Tras analizar los problemas de las tecnologías expuestas en el estado del arte este trabajo propone el implementar el concepto de gemelo digital sobre sistemas de uso industrial los cuales puedan contener o no un modelo SCADA anteriormente. De esta forma



podremos definir rutinas de comportamiento que optimicen el funcionamiento del sistema, basándonos en el comportamiento del reflejo digital del sistema físico en vez de en reglas estáticas. También se reducirá de esta forma parte de la carga de trabajo a la hora de monitorizar el sistema por parte de los operarios, facilitándoles el trabajo. Gracias a la implementación del gemelo digital también podremos aprovechar en mayor medida de los datos recolectados por los sensores del sistema, optimizando este mediante la simulación.

Se recomienda integrar el gemelo digital siguiendo la metodología *“open Source”*, la cual promueve y facilite la estandarización de las tecnologías empleadas a la hora de crear el gemelo digital. Pese a que la propia creación de gemelo digital no implique que tenga que hacer uso de tecnologías de código abierto es recomendable hacer uso de estas con el objetivo de mejorar, no solo la funcionalidad del propio gemelo, si no también la seguridad de este gracias a las mejoras que puedan aportar a la arquitectura del gemelo las diversas empresas u personas colaboradoras que hagan uso del gemelo digital.

Respecto al gemelo en si, se debe diseñar de forma que cubra las necesidades básicas del sistema, ya que un gemelo demasiado extenso puede provocar que sea necesario el uso de equipos más potentes y la necesidad de más personal para su creación, aumentando el coste del proyecto.



---

---

## CAPÍTULO 3

# Caso de estudio

---

Procederemos a proponer un caso de estudio en el cual podremos aplicar las medidas propuestas en el apartado anterior para mejorar el funcionamiento un sistema industrial.

### 3.1 Planteamiento del problema

---

Nuestro caso de estudio consistirá en una instalación la cual contendrá dos sistemas de climatización; uno consistirá en un sistema de climatización geotérmico vertical y el otro en un sistema de climatización común para la regulación de la temperatura. Ambos sistemas trabajan de forma independiente en áreas separadas de un mismo edificio y están controlados por equipos SCADA independientes.

El sistema de climatización geotérmica consiste en un sistema cerrado de tuberías, parte de las cuales están enterradas a gran profundidad. El agua circula a través de las tuberías para regular su temperatura respecto a la temperatura de la tierra. Este sistema sirve tanto para dar calor al edificio en invierno como para enfriarlo en verano.

Por ejemplo en verano, el agua se calienta al refrigerar el edificio, absorbiendo el calor de este. Una vez el agua haya absorbido parte del calor de la instalación, la bomba transporta esta a través de unas sondas geotérmicas enterradas de forma vertical bajo tierra a gran profundidad. Esto permite al agua disipar el calor absorbido en el edificio por las tuberías y regular en cierta parte su temperatura con la temperatura del suelo. Al estar las sondas enterradas a una gran cantidad profundidad (entre 25 y 150 metros) la temperatura de la tierra suele oscilar entre los 5 y 25 grados, dependiendo del tipo de terreno, profundidad, zona y estación. Por otra parte en invierno, la temperatura ambiente enfría el líquido de las tuberías, el cual al pasar bajo tierra se calienta al estar el terreno más caliente que el líquido en sí.

Aunque bombear el fluido requiere electricidad, la climatización geotérmica es más eficiente que ninguna otra alternativa de climatización. De hecho, los sistemas actuales geotérmicos pueden producir hasta 4 Kw de calor por cada 1 Kw de electricidad generada. Esto es porque no hay que generar el calor, sino traerlo de la tierra.[25]

La empresa encargada de la instalación desea modificar el sistema de climatización geotérmico para que pueda funcionar de forma parcialmente autónoma, reduciendo en la medida de lo posible la intervención de un operario. El sistema debe registrar los datos sobre el funcionamiento de sus distintos elementos, emitirlos por pantalla y facilitar la creación de un informe a partir de estos. Otro de los requisitos solicitados por la empresa es optimización de los procesos del sistema en tiempo real, evitando detener su funcionamiento para aplicar cambios. Finalmente se compararán los datos obtenidos por el sistema geotérmico con los datos obtenidos del sistema de climatización común, con el

objetivo de comparar la eficiencia de ambos sistemas, su consumo eléctrico, temperaturas alcanzadas, etc.

Es importante entender lo máximo posible el funcionamiento del sistema del cual partirá solución ya que cuanto mejor entendamos el funcionamiento del sistema mayor será la calidad de esta. En la siguiente sección podremos ver que componentes componen el sistema geotérmico en detalle.

### 3.2 Componentes de la instalación geotérmica

A continuación se describirá cada elemento del sistema a digitalizar. Los componentes se encuentran representados en el siguiente plano.

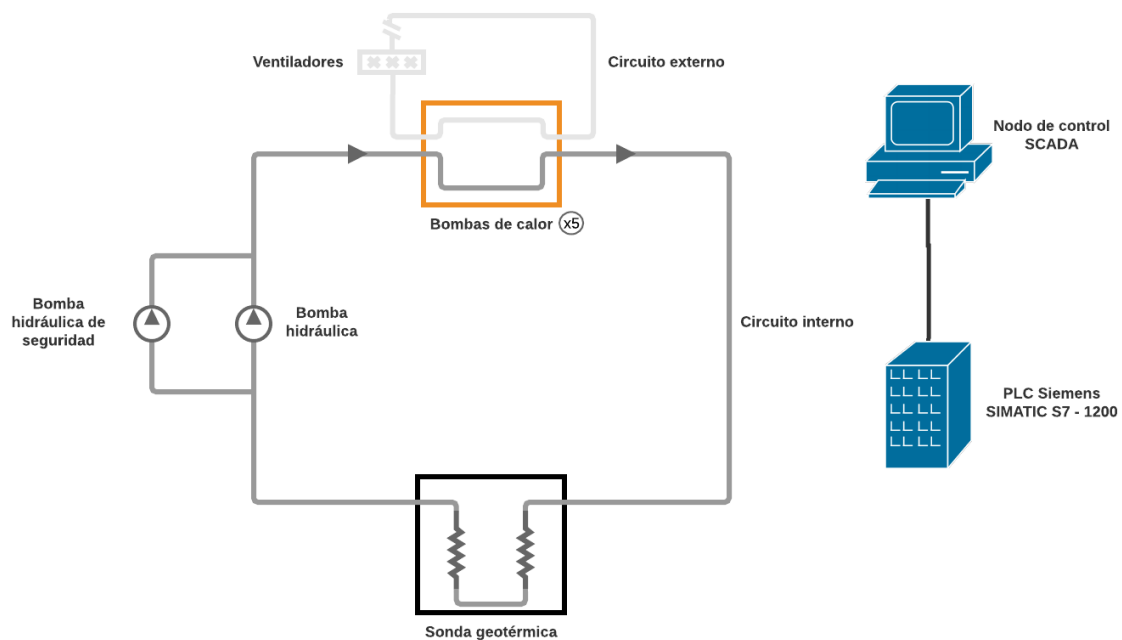


Figura 3.1: Plano de la instalación geotérmica

- Bombas de calor:** La instalación cuenta con un sistema de cinco bombas de calor agua-agua instaladas en paralelo, las cuales realizan la climatización del edificio.

El funcionamiento de las bombas es el siguiente: las bombas captan el calor de un circuito y lo liberan en el otro. De esta forma enfrían un lado a costa de calentar el otro, intercambiando parte de su calor. El número de bombas trabajando depende de la cantidad de carga de trabajo, es decir, si se desea realizar un cambio de temperatura mayor es necesario aumentar el número de bombas trabajando. El sistema de climatización geotérmico tiene dos modos de funcionamiento en función de la temperatura deseada.

Si se desea descender la temperatura de la instalación la bomba de calor enfriará el agua de la parte del circuito externo, calentando el agua del circuito interno. El agua calentada descenderá su temperatura al pasar por la sonda geotérmica, haciendo posible que pueda volver a absorber calor del circuito externo cuando pase por la bomba de calor.

Por otro lado, si se desea calentar el edificio, la bomba de calor calentará el agua de la parte del circuito externo, absorbiendo el calor del agua del circuito interno.

El agua del circuito interno ganará temperatura al atravesar la sonda geotérmica, absorbiendo el calor del suelo.

El conjunto de bombas tiene 4 sensores térmicos, dos de ellos encargados de medir la temperatura de entrada y salida del agua que fluye en la parte del circuito interno, mientras que los otros dos son los encargados de realizar lo mismo por la parte que está conectada al circuito externo. También contiene un controlador que permite realizar el control del funcionamiento de la bomba.

- **Bomba hidráulica:** Bomba encargada de hacer circular el agua a través del circuito cerrado. Al ser un circuito tan extenso es necesario hacer uso de una bomba hidráulica ya que la bomba de calor no tiene potencia suficiente para hacer circular el agua a través del circuito el solo.

La bomba cuenta con dos sensores térmicos los cuales miden la temperatura de entrada y salida del agua a través de la bomba, un manómetro encargado de medir la presión del agua y un caudalímetro para medir el caudal de la tubería. Junto a estos sensores se encuentra un controlador que permite realizar el control del funcionamiento de la bomba.

- **Bomba hidráulica de seguridad:** Existe una bomba de seguridad colocada en paralelo la cual es activada por el operador en caso de mal funcionamiento de la bomba principal. Esta bomba cuenta con idénticos atributos que la primera. Solo puede haber una bomba hidráulica funcionando a la vez.
- **Sonda geotérmica:** La sonda geotérmica instalada se encarga de regular la temperatura del agua que pasa a través de la sonda. La sonda recibe de la bomba de calor el agua una vez ha intercambiado su calor. El agua fluye a través de la sonda, la cual está enterrada de forma vertical a lo largo de una profundidad de 100 metros. De esta forma, el agua regula su temperatura con la temperatura del suelo.

Nuestra sonda geotérmica contiene tres sensores térmicos, dos de ellos encargados de medir la temperatura de entrada y salida del agua que fluye a través de la sonda y el tercero encargado de medir la temperatura media del suelo.

- **Ventiladores:** Conjunto de ventiladores los cuales se encuentran en el circuito externo. Son los encargados de climatizar el edificio haciendo uso del agua que reciben a través de las tuberías.
- **PLC Siemens SIMATIC S7 - 1200:** El sistema cuenta con un PLC Siemens el cual está conectado a todos los elementos del sistema. Para conectarse a los diferentes elementos hace uso tanto del estándar Profibus como del estándar de Ethernet industrial.

El PLC se encarga de recibir y registrar los datos emitidos por los sensores y de enviar las señales de control a los distintos elementos.

- **Nodo de control SCADA:** El PLC incluye un software el cual permite instalar de forma sencilla un sistema SCADA en un ordenador, el cual está conectado al PLC mediante Ethernet. Desde este ordenador se podrán consultar los datos del PLC, modificar los valores de los controladores y generar alarmas. Sin embargo, el código fuente del sistema SCADA no se puede modificar.

### 3.3 Soluciones posibles a implementar

---

Para poder cumplir con los requisitos propuestos en el caso de estudio se propone implementar un gemelo digital el cual pueda automatizar el funcionamiento del sistema

descrito mediante el uso de reglas dinámicas. A su vez, procesaría los datos obtenidos por los sensores para generar informes, monitorizar el sistema en tiempo real y comparar el rendimiento entre las distintas bombas del recinto.

Antes de realizar la implementación se debe tener en cuenta el sistema SCADA previamente instalado, el cual se puede aprovechar y optimizar para que llegue a ser un gemelo digital completo sin tener que crearlo desde cero. No obstante, la mayor parte de las veces los sistemas SCADA son sistemas de código cerrado, es decir, solo el fabricante tiene acceso al código fuente de este, dificultando el poder crear soluciones complementarias e imposibilitando el acceso o la modificación de su código.

Si el sistema SCADA fuera de código abierto podría modificarse para que incluyera las características del gemelo digital. Actualmente el sistema SCADA instalado permite la monitorización del sistema de refrigeración, la generación de alarmas estáticas y el control de las diferentes máquinas por parte del operario. Al añadir las funcionalidades del gemelo digital el sistema sería de forma adicional capaz de generar alarmas dinámicas de automáticamente para facilitar el control del sistema, almacenar los datos obtenidos para procesarlos posteriormente, mejorar el funcionamiento del sistema y, finalmente, comparar estos datos con los datos del sistema con la bomba de calor común.

Sin embargo, el sistema SCADA de nuestro caso de estudio es de código cerrado. De esta manera el enfoque de la solución recae en la creación de un gemelo digital completo desde cero el cual pueda hacerse cargo de las necesidades propuestas en el caso de estudio. Esta solución, además de implementar nuevas funcionalidades, ha de poder sustituir las funciones de control llevadas a cargo por el sistema SCADA previamente instalado.

---

## CAPÍTULO 4

# Diseño de la solución

---

En este capítulo se diseñará la solución escogida, en nuestro caso consistirá en la elaboración del gemelo digital el cual pueda dar servicio a la instalación geotérmica del caso de estudio.

Se propone que el diseño del gemelo digital siga los principios de programación modular. Esto se debe a que resulta más sencillo dividir el gemelo por sus distintas funciones, dotándolas de la capacidad para interactuar entre si. De esta forma al estar compuesto por módulos, si deseásemos añadir o modificar un módulo más adelante (por ejemplo si se tuviese que añadir algún sensor nuevo), no haría falta rehacer todo el programa.

En la siguiente sección plantearemos la estructura modular de la solución.

### 4.1 Estructura

---

La estructura que presenta nuestra solución es la siguiente:

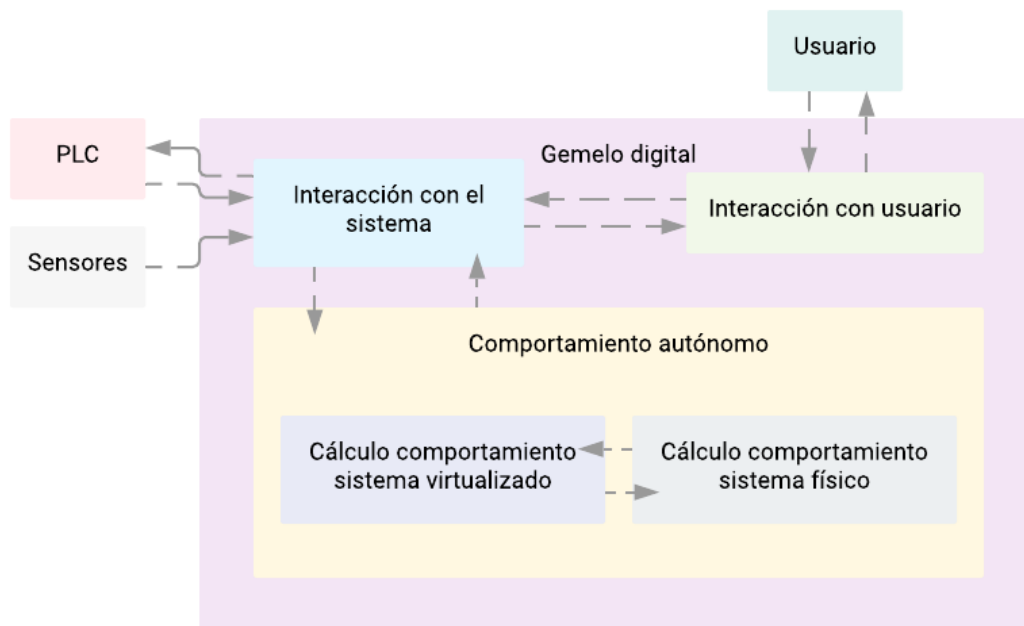


Figura 4.1: Esquema del gemelo digital

Nuestro gemelo está formado por tres módulos principales los cuales son los siguientes:

- **Módulo de "Comportamiento autónomo" o CA:** El módulo de comportamiento autónomo conforma el módulo principal de nuestro gemelo digital. Gracias a este módulo podemos establecer el funcionamiento autónomo del gemelo sobre el sistema. Para realizar su función, este módulo está compuesto a su vez por dos submódulos, uno para el cálculo del comportamiento del sistema virtualizado y el otro para el cálculo del comportamiento del sistema físico.

El módulo de CA obtiene del módulo de interacción con el sistema los datos del sistema físico. Una vez obtenidos los transfiere a los dos submódulos. El submódulo de cálculo de comportamiento del sistema físico procesa los datos recibidos comprobando si el funcionamiento del sistema en el momento actual es el correcto. Una vez comprueba si el sistema está en el estado deseado o no, elabora una respuesta a modo de instrucción la cual será llevada a cabo por los controladores, y transmitida a estos a través del módulo de interacción con el sistema.

Para elaborar la respuesta el módulo de comportamiento del sistema físico tiene en cuenta los resultados obtenidos por el módulo de comportamiento del sistema virtualizado. Este último calcula una estimación de los valores que se obtendrán en cierto intervalo de tiempo por el sistema. Si estos difieren en gran medida se deberán realizar correcciones en los cálculos que realiza a cabo el modelo de comportamiento del sistema físico.

- **Módulo de "Interacción con el usuario" o IU:** Este módulo es el encargado de interactuar con el usuario. Gracias a la interacción con el módulo de interacción con el sistema obtiene los datos sobre el funcionamiento de este, mostrándolos en pantalla al operario. Adicionalmente el módulo de IU permite al usuario generar informes del sistema.

Este módulo también permite al operario interactuar con el sistema mediante un panel de control de este. Al insertar las modificaciones a llevar a cabo estas son enviadas al módulo de interacción con el sistema el cual se encarga de ejecutarlas sobre la instalación física.

- **Módulo de "Interacción con el sistema" o IS:** Este módulo es el encargado de interactuar con el sistema físico, más en concreto con el PLC y con los sensores, permitiendo al gemelo obtener los datos de estos y ejecutar ordenes sobre los controladores conectados al PLC.

Una vez ha recogido los datos los transmitirá al módulo de comportamiento autónomo para que sean procesados y al módulo de interacción con el usuario para que el operario tenga constancia del estado del sistema.

Tanto el módulo de comportamiento autónomo como el módulo de IU pueden comunicarle al módulo de IS las acciones que quieren llevar a cabo sobre los controladores. El módulo IS realizará la comunicación correspondiente con el PLC para llevar a cabo los cambios en los controladores.

En el siguiente apartado analizaremos el funcionamiento en profundidad de cada módulo, así como las necesidades que serán cubiertas por nuestro sistema.



## 4.2 Módulos

Comenzaremos el análisis de los módulos por el módulo principal, es decir, el módulo de comportamiento autónomo.

### 4.2.1. Módulo de "Comportamiento autónomo" o CA

La función principal de este módulo es procurar el funcionamiento autónomo del sistema, así como asegurar que el sistema está funcionando correctamente. Para poder llevar a cabo esta función el módulo hace uso tanto de reglas dinámicas como de reglas estáticas. Estas varían en función de si queremos refrigerar la instalación o calentarla.

El módulo de CA cuenta a su vez con dos submódulos. El submódulo de "Cálculo comportamiento sistema físico" se encarga de comprobar el funcionamiento del sistema y emitir las ordenes basándose en los datos recibidos en el momento en que se registran por los sensores. Por otro lado, el submódulo de "Cálculo comportamiento sistema virtualizado" es el encargado de estimar cuales serán los valores del sistema en un futuro próximo. Gracias al trabajo conjunto de ambos módulos, podemos asegurar el funcionamiento correcto del sistema y prever el funcionamiento incorrecto de este.

El submódulo de "Cálculo comportamiento sistema físico" realiza las siguientes comprobaciones:

- **Temperatura del circuito:** Disponemos de múltiples sensores térmicos en nuestro sistema, tal como se indica en la siguiente imagen:

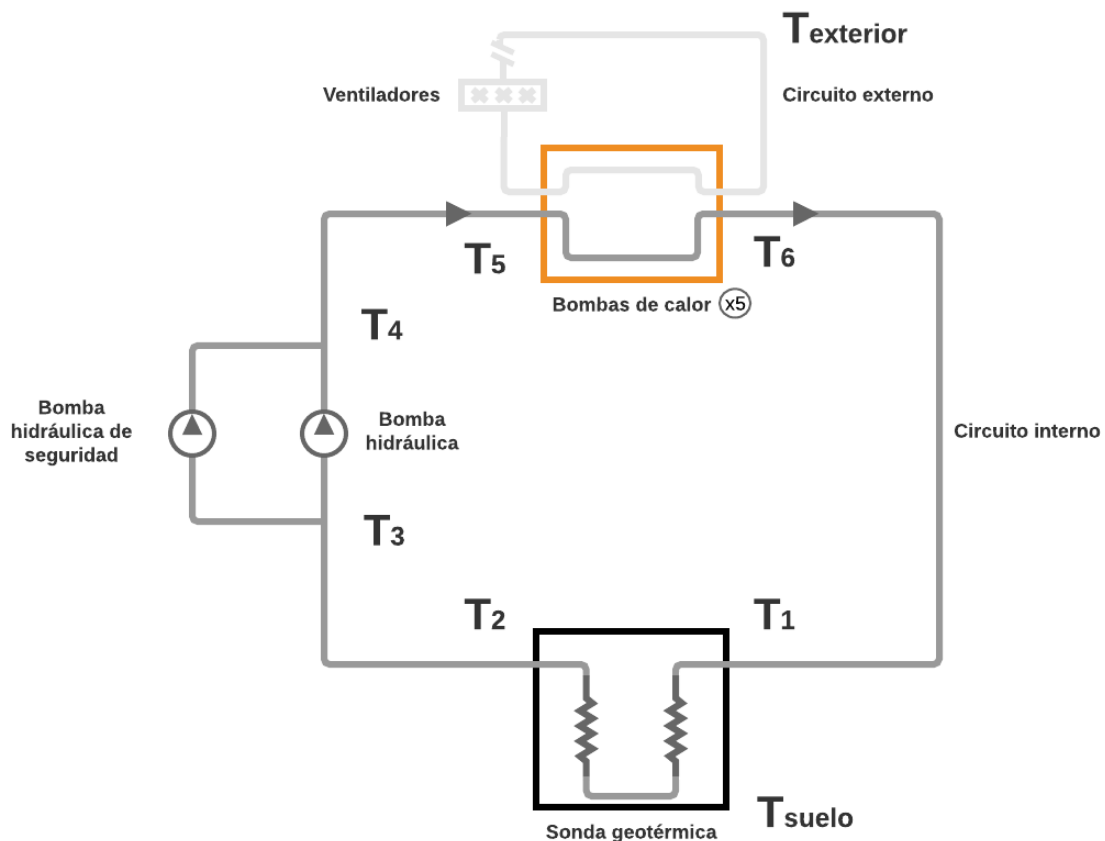


Figura 4.2: Sensores de temperatura en la instalación

Estos sensores son los encargados de indicarnos la temperatura del agua en cada punto vital del sistema, la temperatura del terreno y la temperatura exterior. Gracias a estas mediciones podemos determinar como debe ser el funcionamiento del sistema y si este está funcionando de forma correcta.

Disponemos de los sensores  $T_1$ ,  $T_2$  y  $T_{suelo}$  los cuales pertenecen a la sonda geotérmica instalada en el circuito e indican la temperatura de entrada y salida del agua a la sonda, así como la temperatura del terreno donde están enterradas las sondas.

El siguiente conjunto de sensores son  $T_3$  y  $T_4$ . Esta pareja de sensores pertenecen a la bomba hidráulica e indican la temperatura de entrada y de salida del agua en la bomba hidráulica.

Finalmente tenemos los sensores  $T_5$ ,  $T_6$  y  $T_{exterior}$  los cuales forman parte del sistema de bombas de calor. Estos sensores recogen la temperatura del agua antes y después de atravesar las bombas donde se hace el intercambio de calor. Adicionalmente un sensor indica la temperatura de la instalación la cual deseamos climatizar.

Dependiendo de si deseamos que reducir la temperatura del edificio o aumentarla el sistema tendrá unas reglas u otras. Si deseamos enfriar el edificio aplicaremos las reglas de refrigeración, mientras que si deseamos calentar el edificio aplicaremos las reglas de calefacción. El objetivo es que  $T_{exterior}$  sea igual a  $T_{suelo}$ , ya que el valor de esta suele oscilar entre 21 y 24 °C, temperatura la cual consideramos como temperatura ideal o objetivo. Las reglas son las siguientes:

- **Reglas de refrigeración:** En el caso de que queramos que nuestro sistema enfríe, debemos encontrarnos con los siguientes conjuntos de valores en los sensores para que el sistema funcione correctamente.

Si  $T_{exterior}$  es mayor que  $T_{suelo}$  entonces:

$$T_1 > T_2$$

Esto se debe a que la temperatura del agua antes de atravesar la sonda geotérmica es mayor que al salir de la sonda, ya que el agua se enfría al atravesarla. En cuanto a  $T_2$ , esta cumplirá lo siguiente:

$$T_2 \geq T_{suelo}$$

El agua al atravesar la sonda podrá enfriarse como máximo hasta igualar la temperatura del suelo, por lo tanto el agua que sale de la sonda nunca podrá estar a menor temperatura que la temperatura del suelo durante la refrigeración.

Con los valores de los sensores térmicos de las bombas de calor nos encontramos con la siguiente regla:

$$T_5 > T_6$$

Esta regla indica que la bomba de calor logra enfriar de forma correcta el agua del circuito externo y absorbe el calor de este, calentando el agua del circuito interno. Es por ello que la temperatura del agua de entrada a la bomba ( $T_5$ ) debe ser menos que la temperatura de salida de esta ( $T_6$ ).

- **Reglas de calefacción:** Si deseamos que nuestro sistema caliente debemos encontrarnos con los siguientes conjuntos de valores en los sensores para que el sistema funcione correctamente. En este caso si  $T_{exterior}$  es menor que  $T_{suelo}$ :

$$T_1 < T_2$$

Al contrario que cuando deseamos refrigerar, al calentar el agua esta saldrá de la sonda geotérmica más caliente que como llegó. Adicionalmente:

$$T_2 \leq T_{suelo}$$

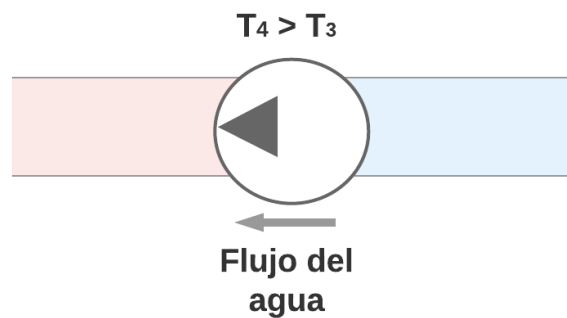
De la misma manera, el agua calentada no puede superar en temperatura al terreno donde es calentada.

Finalmente para las bombas de calor seguimos la siguiente regla:

$$T_5 > T_6$$

Cuando el agua atraviesa las bombas de calor para calentar el edificio esta pierde calor, calor que gana el circuito externo.

- **Reglas de independientes:** Adicionalmente existen un conjunto de reglas las cuales se aplican independientemente de si se desea enfriar o calentar el agua. La primera de estas reglas está relacionada con el paso del agua por la bomba hidráulica. Al mover el agua, la bomba se calienta alcanzando temperaturas altas, provocando que el agua a su paso se caliente, independientemente de si está refrigerando el sistema o calentando, por lo tanto:



**Figura 4.3:** Aumento de la temperatura al pasar por la bomba hidráulica

Sin embargo, el aumento de temperatura no debe superar los  $0,5^{\circ}\text{C}$ . Si lo supera, significaría que la bomba se estaría sobrecalentando, siendo necesario el activar la bomba hidráulica de seguridad desviando el flujo de agua a través de esta. Por otra parte, si la temperatura no aumenta o disminuye nos indicaría que la bomba no está funcionando correctamente o directamente no funciona. En este caso también sería necesario activar la bomba hidráulica.

Las bombas de calor también contienen una regla la cual se aplica independientemente de su función. Esta regla implica que dependiendo de la diferencia de temperatura entre  $T_{exterior}$  y  $T_{suelo}$ , el número de bombas de calor activas variará. En la tabla de la siguiente página se ilustra la cantidad de bombas utilizadas dependiendo de la cantidad de grados de diferencia.

Grados de diferencia (x)	Bombas activas
$x \leq 2$	1
$2 < x \leq 4$	2
$4 < x \leq 6$	3
$6 < x \leq 8$	4
$x \geq 8$	5

**Tabla 4.1:** Tabla de activación de bombas de calor

Gracias a estas reglas podemos regular el número de bombas activas dependiendo de la carga de trabajo que tengamos, evitando así sobrecargar una sola bomba o utilizar más bombas de las necesarias aumentando el coste energético.

- **Presión del circuito:** A través del manómetro instalado en la bomba hidráulica podemos medir la presión del circuito. Una presión del agua inadecuada puede provocar bloqueos o averías en el circuito. Para asegurar el correcto funcionamiento de este la presión puede oscilar entre +/- 25 %. Si supera el 25 % de diferencia el sistema actuará de la siguiente forma:
  - **Presión >25 % de diferencia:** En el caso de que la presión aumentase más de un 25 % se activaría una válvula de seguridad la cual permitiría liberar parte de dicha presión. Adicionalmente una alarma aparecería en la interfaz del operario para informarle de dicha situación.
  - **Presión <25 % de diferencia:** En el caso de que la presión disminuyese más de un 25 % el sistema se detendría por completo para evitar que las bombas pudiesen estropearse. Adicionalmente una alarma aparecería en la interfaz del operario para informarle de dicha situación. Una vez recuperase la presión indicada después de las reparaciones necesarias, el sistema recuperaría su funcionamiento.

Por otra parte, el submódulo de "Cálculo comportamiento sistema virtual" se encarga de estimar cuales serán las medidas correctas a realizar de cara al comportamiento del sistema en el futuro próximo. Estas estimaciones están centradas principalmente en la temperatura del sistema.

Los sensores térmicos tienen una tasa de refresco de 3 minutos, es por eso que para optimizar el funcionamiento del sistema, es necesario realizar en ocasiones predicciones sobre el comportamiento de este.

Para realizar las predicciones se hace uso de dos elementos:

- **Utilización de datos anteriores:** El submódulo hace uso del conjunto de datos obtenidos previamente para predecir el comportamiento del sistema. De esta forma podemos estimar si se está realizando una subida o bajada de temperatura y el tiempo que tardará en alcanzar la temperatura ideal.

Gracias a estas estimaciones podemos poner en funcionamiento el sistema antes de que el edificio se abra al público, estableciendo una temperatura adecuada durante el uso del mismo. En el siguiente gráfico podemos ver como el sistema recoge la información sobre la temperatura cada 3 minutos, y como, a partir de los datos recogidos estima como será la progresión de esta.

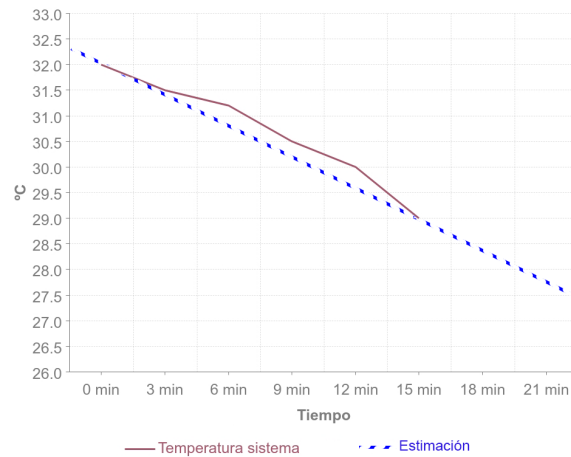


Figura 4.4: Estimación de los valores de temperatura

- Utilización de información meteorológica:** Existe otro factor que influye directamente sobre la temperatura del edificio, y es los propios cambios de temperatura que ocurren a lo largo del día. Es por ello que disponer de información sobre los cambios de temperatura que ocurrirán a lo largo del día es vital. Para poder llevar a cabo esta función, el submódulo hace uso de API de *Yahoo Weather*.<sup>1</sup>

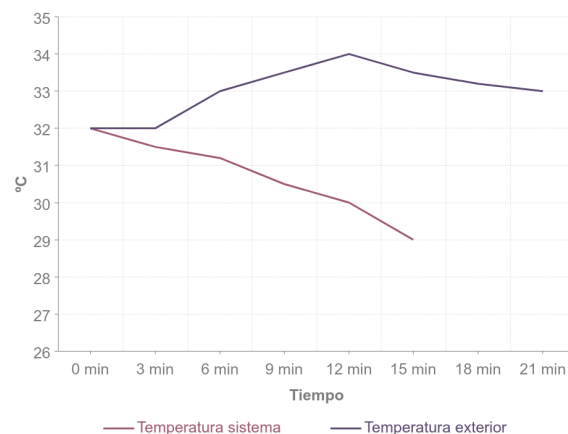


Figura 4.5: Predicción de temperatura gracias a la información meteorológica

Gracias al uso de la API, podemos estimar en que momentos del día aumentará la temperatura exterior.

Unificando la información recogida por ambos submódulos podemos crear un modelo el cual facilite y optimice el funcionamiento del sistema. Combinando todas las partes de los submódulos podemos ser capaces de aumentar o disminuir el número de bombas en función de las necesidades de este, no solo en el instante actual si no en los momentos próximos.

Por ejemplo, si la diferencia de temperatura actual entre el suelo y el edificio es de 5 grados pero se prevé que esta fuera a aumentar conforme se acerca el mediodía hasta los 8 grados podríamos aumentar la cantidad de bombas en funcionamiento y activar 4 en vez de 3. De esta forma la temperatura del edificio no aumentaría con el cambio de temperatura, manteniendo una temperatura agradable. Por otro lado, si la temperatura no fuera a aumentar y adicionalmente estimásemos que la temperatura del sistema se

<sup>1</sup>Página oficial de la API: <https://developer.yahoo.com/weather>

esta reduciendo de forma constante podríamos reducir el número de bombas activas en el sistema.

#### 4.2.2. Módulo de "Interacción con el usuario" o IU:

El módulo de IU es el encargado de mostrarle al usuario, en este caso al operario, la información sobre el estado del sistema a través de una interfaz gráfica. Esta interfaz también permite el control sobre el sistema, funcionando a modo de panel de control. Adicionalmente el sistema almacena los datos recogidos en una base de datos. La interfaz se divide en cuatro partes principales:

- **Login:** El gemelo cuenta con un login el cual permitirá validar al operario, evitando que alguien ajeno a la instalación pueda realizar cambios en esta.
- **Información general:** Una vez realizada la validación en el login, la aplicación mostrará la ventana de información general. Esta ventana contendrá información sobre el SPF de la instalación en los últimos 3 años y su media, el COP, la temperatura exterior, la temperatura del edificio y una tabla donde mostrará el ahorro respecto al sistema de climatización no geotérmico.

El SPF corresponde al rendimiento medio estacional, en inglés *Seasonal Performance Factor*. El SPF mide la eficiencia de la bomba de calor al operar durante un año. Entendemos el SPF como el cociente entre la energía calorífica producida por año y la energía eléctrica empleada en climatizar por año también. Dependiendo de si el sistema produce calor o frío, obtenemos un SPF diferente ( $SPF_R$  cuando el sistema enfría y  $SPF_C$  cuando el sistema produce calor). Estos datos los obtiene de los datos almacenados en la base de datos.

$$SPF = \frac{\text{Total de energía calorífica producida por año (kWh)}}{\text{Total de energía eléctrica empleada por año (kWh)}}$$

El COP corresponde al coeficiente de rendimiento, en inglés *Coefficient Of Performance*. Este coeficiente indica el rendimiento de las bombas de calor. Cuando más alto esté, mayor es el rendimiento de estas. Para obtener el COP debemos calcular el cociente entre el calor total transmitido por las bombas de calor ( $Q$ ) y el total de potencia suministrado a las bombas ( $W$ ).

$$COP = \frac{|Q|}{W}$$

Finalmente cabe destacar la tabla donde se mostrará el ahorro del sistema geotérmico respecto al sistema convencional junto a la comparación de emisiones de CO<sub>2</sub>. Para calcular el gasto eléctrico tomaremos como referencia el precio medio del kWh, el cual corresponde a 0.1350€. Por otro lado, para calcular el total de emisiones de CO<sub>2</sub> tomaremos como referencia los valores establecidos por ceroCO<sub>2</sub> [26], los cuales corresponden a 370g CO<sub>2</sub>/kWh.

- **Visualización del sistema:** Esta ventana ofrece al operario una visión del sistema monitorizado. El operario podrá comprobar a simple vista los valores que tiene cada elemento del sistema y detectar si ha saltado alguna alarma. Por otra parte, si el operario desea ver al detalle un elemento o realizar modificaciones en el sistema de forma manual dispone de una vista de información específica.

- **Información específica:** La vista de información específica o vista de elemento permite al operario poder modificar el comportamiento del elemento en sí, junto con la posibilidad de poder leer todos los datos del elemento.

En el apéndice A se encuentran las imágenes del diseño de las interfaces previamente expuestas.

### 4.2.3. Módulo de "Interacción con el sistema" o IS:

La función principal de este módulo es la de poder interactuar con el sistema físico, obteniendo los datos de los sensores, los datos del PLC y enviando las instrucciones a los controladores a través del PLC.

Para llevar a cabo esta tarea, el ordenador donde estará ejecutándose el gemelo contará con una tarjeta de interfaz de Ethernet. Esto se debe a que el PLC Siemens SIMATIC S7 - 1200 contiene una interfaz Ethernet la cual permite que sea controlado por un ordenador a través de Ethernet. Sin embargo, el software que incluye el PLC no permite integrar su control en el gemelo, ya que el software está pensado para la creación de un sistema SCADA propio de Siemens (TIA Portal).

Por lo tanto, para poder acceder al PLC e integrar su funcionalidad haremos uso de la librería *Python-Snap7*<sup>2</sup> la cual consiste en una librería que hace de envoltorio en python para la librería *Snap7*<sup>3</sup>. Ambas librerías son de código abierto.

La librería *Snap7* consiste en un paquete de comunicación Ethernet el cual permite comunicarse de forma nativa con el PLC Siemens S7. De esta forma podemos comunicarnos, mediante llamadas a la librería, con el PLC, intercambiando información con este. La librería permite obtener datos del PLC de forma no solicitada, es decir, si el PLC genera una señal de alarma propia, o registra algún evento no esperado podemos crear una rutina que sea capaz de recoger estos eventos y avisar de ellos al operario. Por otra parte la librería no requiere de instalación, facilitando su uso en la aplicación.

El objetivo es que a través de la librería obtengamos los datos de los sensores térmicos recogidos por el PLC cada 3 minutos, los cuales serán utilizados por los módulos de CA y IU. De estos módulos obtendremos instrucciones que deberá llevar a cabo el PLC sobre los controladores de cada elemento del sistema. Estas instrucciones serán enviadas al PLC mediante el uso de la librería.

Por otra parte existen sensores los cuales no están comunicados con el PLC. Estos sensores cuentan con una interfaz de comunicación Modbus por lo tanto para poder comunicarnos con ellos nuestro ordenador deberá de contener también una tarjeta de interfaz Modbus. Sin embargo con la tarjeta de interfaz Modbus no es suficiente. Para poder llevar a cabo la comunicación necesitaremos hacer uso de la librería *Pymodbus*<sup>4</sup> de código abierto. Esta librería se encarga de modificar la señal TCP a Modbus, permitiendo el uso de interfaces Modbus en ordenadores sin la esa capacidad nativa.

Los sensores que no están comunicados con el PLC corresponden al manómetro y el caudalímetro de la bomba hidráulica. Adicionalmente por normativa de la compañía también se realiza una lectura cada 15 minutos de los contadores eléctricos del sistema.

Escogimos python para implementar las anteriores funciones ya que la mayor parte de herramientas de código abierto para la comunicación con sistemas industriales se encuentran desarrolladas para este lenguaje.

<sup>2</sup>Página oficial del proyecto: <https://python-snap7.readthedocs.io/>

<sup>3</sup>Página oficial del proyecto: <http://snap7.sourceforge.net/>

<sup>4</sup>Página oficial del proyecto: <https://pymodbus.readthedocs.io/>





---

---

## CAPÍTULO 5

# Conclusiones

---

Al principio del trabajo se estableció como objetivo el realizar un estudio sobre el estado del arte de la industria 4.0, los sistemas SCADA, el gemelo digital y los diferentes elementos para la creación del gemelo. Este estudio se ha llevado a cabo en el apartado del estado del arte, partiendo desde la puesta en contexto de la importancia de industria 4.0 en los últimos años. A partir de este contexto se han estudiado cuales son los elementos básicos de los sistemas industriales actuales, su funcionamiento y como, gracias a los sistemas SCADA, estos son integrados en las fábricas. Se ha explicado cuál es la utilidad de los sistemas SCADA, que requisitos satisface y cuáles no y que elementos componen estos sistemas, haciendo especial hincapié en los protocolos que componen este tipo de sistemas los cuales pueden ser un elemento vulnerable desde el punto de vista de la seguridad del sistema.

Finalizando el apartado del estado del arte y cumpliendo con los objetivos 2 y 3 del trabajo describimos cómo los gemelos digitales pueden significar un cambio significativo en el paradigma industrial, mejorando la funcionalidad de los sistemas SCADA actuales. Se analizaron los requisitos del gemelo digital, su capacidad, sus ventajas e inconvenientes y finalmente cuál era la diferencia entre el gemelo digital y los sistemas SCADA respecto a la digitalización de los sistemas industriales.

El último objetivo a cumplir, el cual consiste en aplicar el gemelo digital en un caso de estudio se ha llevado a cabo en los apartados 3 y 4 correspondientes al planteamiento del caso de estudio y al diseño de la solución. Mediante la propuesta de un caso de estudio sobre una instalación de climatización geotérmica hemos podido plantear un problema sobre el cual poder trabajar, analizándolo para obtener las necesidades de este y así poder elaborar una solución óptima la cual implicase el uso del gemelo digital. En el desarrollo de la solución se ha podido mostrar cuál es el proceso de aplicación de un gemelo digital básico, así como los componentes que lo conforman.

Considero que se han podido cubrir los objetivos planteados al principio del trabajo de forma óptima. Gracias al trabajo se han adquirido conocimientos sobre el funcionamiento de los sistemas industriales, el cual es diferente al funcionamiento de los sistemas informáticos convencionales. También cuáles son los procesos de digitalización de los sistemas industriales, su implementación mediante los sistemas SCADA o los gemelos digitales, sus características y su funcionamiento. Para poder implementar el gemelo digital sobre el caso de estudio, se tuvieron que adquirir nociones de geotermia debido a que no se contaban con integrantes en el trabajo los cuales pudieran hacerse cargo de ese apartado.

## 5.1 Limitaciones y futuros trabajos

---

A lo largo de la creación de este trabajo se han encontrado diversos factores que han podido dificultar o limitar la realización de este. Uno de los principales problemas fue la obtención de información sobre los gemelos digitales. Actualmente los gemelos digitales son puestos en práctica por un grupo limitado de empresas y/o entidades las cuales no publican información sobre los métodos o herramientas que utilizan para crear los gemelos. Esto dificulta la posibilidad de obtener información de primera mano por parte de las empresas que aplican el concepto de gemelo a sistemas industriales, teniéndose que limitar a la obtención de información por parte de investigadores o docentes. Esta información resulta de gran utilidad, sin embargo se echa en falta el poder hacer uso de recursos prácticos.

El siguiente inconveniente para la realización del trabajo fue la posibilidad de trabajar sobre un sistema industrial real sobre el que poder aplicar el gemelo digital. Para la realización del trabajo se puso en contacto con una entidad la cual contenía un sistema de climatización similar al empleado en el caso de estudio, siendo esta ideal ya que suponía un sistema rico en sensores del que se podría extraer gran cantidad de datos. La entidad inicialmente se mostró colaborativa y permitió el acceso a las instalaciones para la observación de su sistema de climatización. Se empezó a enfocar el trabajo sobre la instalación de la entidad, sin embargo, a la hora de solicitar información sobre los elementos del sistema necesarios para diseñar el gemelo comenzaron a surgir los problemas. La comunicación con la entidad fue volviéndose lenta e infructuosa, ya que la entidad no pudo facilitar esta información, y adicionalmente no confirmó si daba el visto bueno para poder realizar las pruebas del gemelo digital sobre su sistema. Esta situación obligó a modificar el rumbo del trabajo y condujo a que el caso de estudio fuera teórico en vez de real.

Por último, la poca familiaridad con la energía geotérmica provocó que se emplease una parte del tiempo en adquirir conocimientos sobre esta, para poder desarrollar un gemelo digital óptimo basado en ese tipo de energía. En proyectos profesionales la presencia de un especialista en el sistema industrial facilita la labor al grupo de informáticos encargados de elaborar el gemelo, sin embargo esto no se tuvo previsto al iniciar el trabajo de fin de grado.

Se propone como futuros proyectos:

- La implementación del gemelo digital sobre un sistema industrial real.
- La aplicación de técnicas de aprendizaje automático (*machine learning*) para la elaboración del gemelo digital. Para poder aplicarlas es necesario contar con un sistema rico en datos sobre los cuales se pueda trabajar.

## 5.2 Relación del trabajo desarrollado con los estudios cursados

---

A lo largo del grado se ha adquirido una serie de conocimientos y competencias que se han aplicado en este trabajo. Para la creación de este trabajo cabe destacar las competencias adquiridas en las asignaturas de Diseño, Configuración y Evaluación de los Sistemas Informáticos y Tecnología de Sistemas de Información en la Red para comprensión del funcionamiento de los sistemas de digitalización industriales. Por otra parte los conocimientos adquiridos en las asignaturas de Ingeniería del Software y Sistemas Inteligentes han sido de utilidad a la hora de diseñar el gemelo digital. Para la creación de la interfaz se ha aprovechado el material docente impartido en las asignaturas de Interfaces

---

Persona-Computador y Diseño Centrado en el Usuario. Para la comprensión y análisis de la seguridad de los protocolos empleados en los sistemas industriales se han aprovechado los conocimientos de la asignatura de seguridad en redes y sistemas informáticos. Por último cabe destacar la capacidad de analizar problemas sobre sistemas no familiares y adaptarse a ellos transmitida en forma de competencia transversal a lo largo de la carrera.



# Bibliografía

---

- [1] “La Industria 4.0.” <https://www.evaluandosoftware.com/la-industria-4-0/>. Último acceso 30-05-2019.
- [2] W. Kritzinger, M. Karner, G. Traar, J. Henjes, and W. Sihn, “Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, pp. 1016–1022, 1 2018.
- [3] Industrie 4.0 Working Group, “Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0 April 2013 Securing the future of German manufacturing industry Final report of the Industrie 4.0 Working Group,” tech. rep., 2013.
- [4] V. Roblek, M. Meško, and A. Krapež, “A Complex View of Industry 4.0,” *SAGE Open*, 2016.
- [5] “La revolución industrial.” <https://profeenhistoria.com/revolucion-industrial/>. Último acceso 07-01-2019.
- [6] L. Edward A., “Cyber Physical Systems: Design Challenges | EECS at UC Berkeley,” tech. rep., Univerity of California, California, 2008.
- [7] S. Wang, J. Wan, D. Li, and C. Zhang, “Implementing Smart Factory of Industrie 4.0: An Outlook,” 2016.
- [8] “What IS a PLC?.” <http://www.machine-information-systems.com/PLC.html>. Último acceso 30-03-2019.
- [9] F. Lamb, “The Difference Between PLCs and Computers.” <http://automationprimer.com/2017/01/28/the-difference-between-plcs-and-computers/>. Último acceso 06-05-2019.
- [10] E. Pérez-López, “Los sistemas SCADA en la automatización industrial,” *Revista Tecnología en Marcha*, vol. 28, p. 3, 12 2015.
- [11] MCorley, “¿Cuál es la diferencia entre SCADA y HMI? | InduSoft,” 2013.
- [12] R. Briceño, “Sistemas de control de procesos,” 2015. Material docente, Universidad Alonso de Ojeda.
- [13] C. E. Canto Quintal M.I., B. A. Aguilar Gaytan, C. Cano Espinoza, N. E. Lopez Palau, and J. F. Martinez Escobar, “Protocolos de Comunicaciones Industriales,” tech. rep., 2006.
- [14] C. Fernández Lorenzana, “CRYPTEX - Seguridad de la Información: Protocolos SCADA y seguridad.” <http://seguridad-informacion.blogspot.com/2008/12/protocolos-scada-y-seguridad.html?cv=1>. Último acceso 25-05-2019.

- [15] E. Negri, L. Fumagalli, and M. Macchi, "A Review of the Roles of Digital Twin in CPS-based Production Systems," *Procedia Manufacturing*, vol. 11, pp. 939–948, 1 2017.
- [16] J. Lee, B. Bagheri, and H.-A. Kao, "A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems," 2015.
- [17] S. Boschert and R. Rosen, "Digital Twin—The Simulation Aspect," in *Mechatronic Futures*, pp. 59–74, Cham: Springer International Publishing, 2016.
- [18] T. H.-J. Uhlemann, C. Schock, C. Lehmann, S. Freiburger, and R. Steinhilper, "The Digital Twin: Demonstrating the Potential of Real Time Data Acquisition in Production Systems," *Procedia Manufacturing*, vol. 9, pp. 113–120, 2017.
- [19] R. Rosen, G. von Wichert, G. Lo, and K. D. Bettenhausen, "About The Importance of Autonomy and Digital Twins for the Future of Manufacturing," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 48, pp. 567–572, 1 2015.
- [20] M. Grieves and J. Vickers, "Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems," in *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*, pp. 85–113, Cham: Springer International Publishing, 2017.
- [21] E. H. Glaessgen and D. S. Stargel, "The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles," 4 2012. Traducción propia.
- [22] D. M. D'Addona, A. M. M. S. Ullah, and D. Matarazzo, "Tool-wear prediction and pattern-recognition using artificial neural network and DNA-based computing," *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 28, pp. 1285–1301, 8 2017.
- [23] G. A. Susto, A. Schirru, S. Pampuri, S. McLoone, and A. Beghi, "Machine Learning for Predictive Maintenance: A Multiple Classifier Approach," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 11, pp. 812–820, 6 2015.
- [24] J. Lee, E. Lapira, B. Bagheri, and H.-a. Kao, "Recent advances and trends in predictive manufacturing systems in big data environment," *Manufacturing Letters*, vol. 1, pp. 38–41, 10 2013.
- [25] "Bomba de calor geotérmica - Funcionamiento e instalación." <https://www.caloryfrio.com/energias-renovables/geotermia/bomba-de-calor-geotermica-funcionamiento-instalacion.html>, Último acceso 25-05-2019.
- [26] "Cálculo de emisiones de CO2," 2019. [ceroco2.org](http://ceroco2.org), Último acceso 25-05-2019.

---

## APÉNDICE A

# Interfaz del sistema

---

A continuación se presentará el conjunto de ventanas que componen la interfaz de la solución diseñada. Los valores representados en estas son solamente ilustrativos, no corresponden a los valores reales del sistema.

### Gemelo Digital del sistema climatizador

Iniciar sesión

  
  
 Recordar credenciales





Figura A.1: Ventana de login

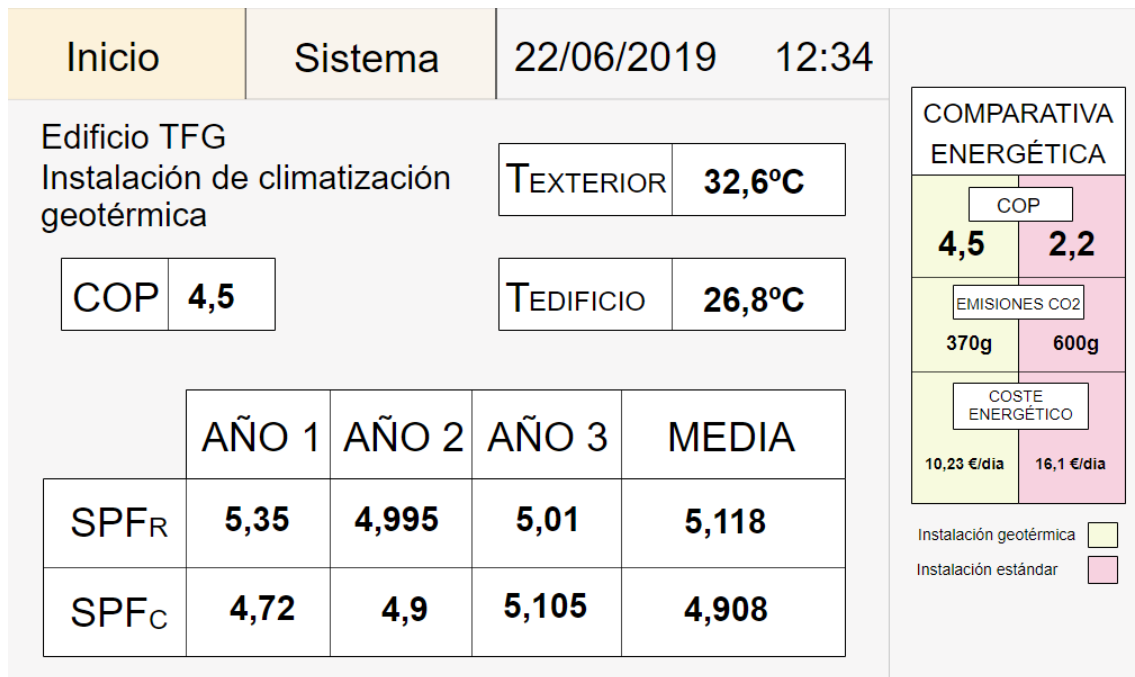


Figura A.2: Ventana de visualización del sistema. Pinchando sobre los elementos de la imagen el operario puede acceder a la ventana con información específica sobre el elemento seleccionado

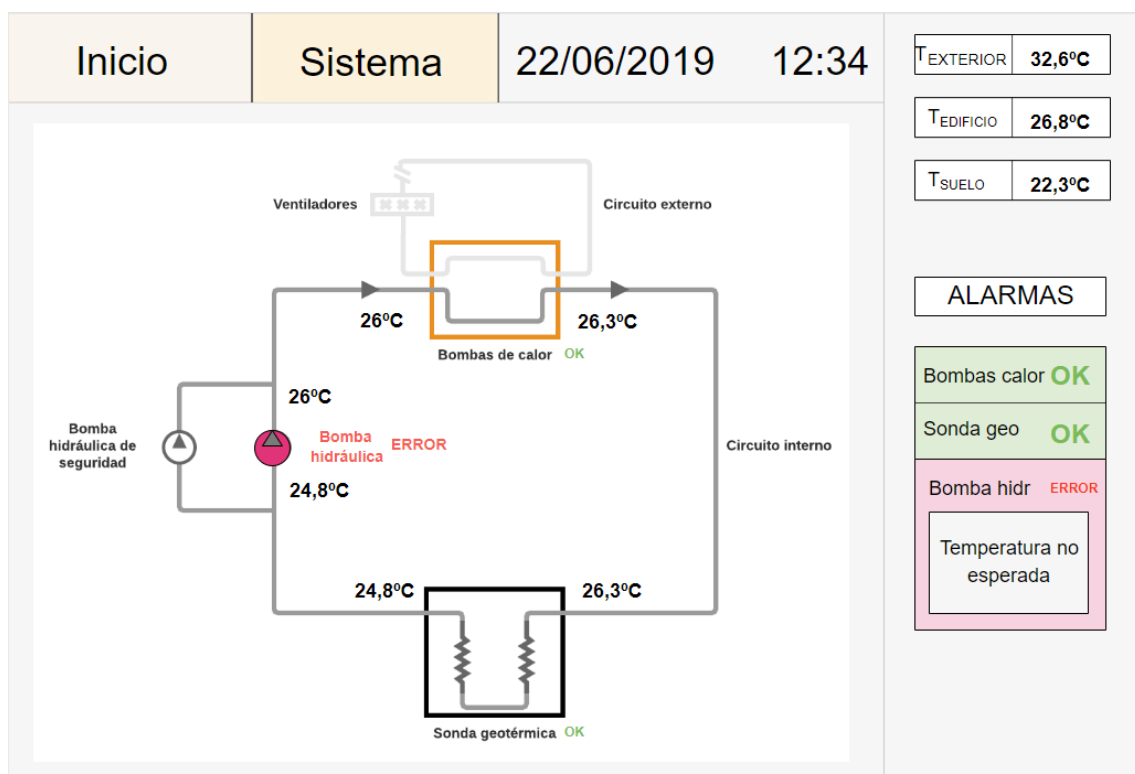
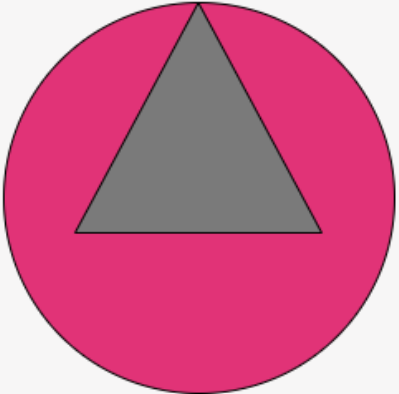


Figura A.3: Ventana con información específica sobre elementos





## Bomba hidráulica

**Cambiar a bomba de seguridad**



**BOMBA ACTIVA**

T <sub>ENTRADA</sub>	<b>24,8°C</b>	POTENCIA	<b>72%</b>
T <sub>SALIDA</sub>	<b>26°C</b>	 	

**ERROR**  
Los valores de temperatura de no son los correctos, se recomienda cambiar de bomba

**Cerrar**

Figura A.4: Ventana con información general sobre el sistema