

Trabajo Fin de Grado  
Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales

*Simulación y control de una planta multiprocesos  
utilizando Codesys, OPC y Matlab*

Autor: Pablo Martínez Parreño

Tutor: Francisco Salas Gómez

Dpto. de Ingeniería de Sistemas y Automática  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2020





Trabajo Fin de Grado  
Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales

***Simulación y control de una planta multiprocesos  
utilizando Codesys, OPC y Matlab***

Autor:

Pablo Martínez Parreño

Tutor:

Francisco Salas Gómez

Profesor titular

Dpto. de Ingeniería de Sistemas y Automática

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2020



Proyecto Fin de Carrera: *Simulación y control de una planta multiprocesos utilizando Codesys, OPC y Matlab*

Autor: Pablo Martínez Parreño

Tutor: Francisco Salas Gómez

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2020

El Secretario del Tribunal

*A mi familia*

*A mis amigos*

*A mis maestros*



# Agradecimientos

---

A mi familia y a Luz, por estar siempre ahí. Su apoyo incondicional, cariño y comprensión han sido claves para seguir siempre adelante en este y otros muchos proyectos vitales.

A mis amigos, los antiguos y los nuevos, por su interés y ánimos.

A Paco, mi tutor, por el conocimiento y consejos compartidos, así como su paciencia conmigo.

A aquellos docentes de vocación, incansables, que me han guiado e instruido en las distintas etapas de mi vida con la misma pasión del primer día.

Muchas gracias a todos.

*Sevilla, 2020*





# Resumen

---

En este Trabajo de Fin de Grado se ha realizado un programa en relación con la planta multiprocesos del laboratorio de control perteneciente al *Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática* que, a través de varios actuadores y configuraciones, permite realizar ensayos de control de variables como el nivel y la presión de un depósito o la temperatura del líquido que recorre sus tuberías.

Este programa se compone de dos partes. La primera es una simulación lo más fidedigna posible de la planta utilizando para ello los bloques tipo *Simscape* dentro de la función *Simulink* de *Matlab*, que representan a los elementos reales que la conforman a partir de su parametrización; y la segunda parte se compone de un autómata (PLC) y un panel de operario (SCADA) programados en *Codesys*.

Ambas partes se comunicarán entre sí a partir de una interfaz *OPC* que proporcionará un servidor desde el que intercambiar tanto datos como el estado de las variables, permitiendo emular así el modelo de la planta en tiempo real mientras se ejecutan órdenes desde el cuadro de control del operario.

Esta nueva forma de aunar el cálculo matemático y las simulaciones que proporciona *Matlab* con la automatización de procesos y las herramientas gráficas y visuales de *Codesys*, permitirá una mejora sustancial en el método docente para las lecciones sobre el control y la automática, mientras que deja la puerta abierta a posibles implementaciones prácticas en la propia industria.



# Abstract

---

A program has been carried out in this project in relation to the multi-process plant of the control laboratory belonging to the *Systems Engineering and Automation Department* which allows control tests to be performed on different variables, such as the level and pressure of a tank or the temperature of the liquid running through its pipes, through various actuators and configurations.

This program consists of two parts. The first one is a plant simulation as reliable as possible using the *Simscape* type blocks within the *Matlab's Simulink* function, which represent the real elements that conform it from its parameterization; and the second one is composed of a programmable logic controller (PLC) and an operational panel (SCADA) programmed in *Codesys*.

Both parts will communicate with each other exchanging data and variables state information using the server provided by an *OPC* interface. This will allow to emulate the plant model in a real time simulation while orders are executed from the operator's panel.

This new way of combining the mathematical calculation and the simulations provided by *Matlab* with the process automation and the graphical and visual tools of *Codesys*, will allow a substantial improvement in the teaching method for lessons about control and automation while leaving the door open to possible practical implementations in the industry itself at the same time.

# Índice

---

<b>Agradecimientos</b>	<b>viii</b>
<b>Resumen</b>	<b>x</b>
<b>Abstract</b>	<b>xii</b>
<b>Índice</b>	<b>xiii</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>xv</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>xvii</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
1.1 <i>Objetivo y estructura del proyecto</i>	1
1.2 <i>Descripción de la planta multiprocesos</i>	2
1.3 <i>Elementos de la planta</i>	4
1.3.1 Depósito de nivel	5
1.3.2 Depósito colector	6
1.3.3 Bomba	7
1.3.4 Intercambiadores de calor	8
1.3.5 Resistencias térmicas	9
1.3.6 Válvulas	10
1.3.7 Sensores	13
1.3.8 Sistemas de adquisición y visualización de datos	17
1.4 <i>Configuraciones</i>	18
1.4.1 Configuración 1	18
1.4.2 Configuración 2	20
1.4.3 Configuración 3	21
1.4.4 Configuración de desagüe	22
<b>2 Interfaz OPC</b>	<b>23</b>
2.1 <i>Descripción</i>	23
2.2 <i>Interfaces de comunicación - Gateway V3</i>	24
2.3 <i>Comunicación entre servidor y cliente</i>	25
2.4 <i>Configuración de los símbolos (Items)</i>	26
2.5 <i>Configuración del Codesys OPC Server a través de OPCConfig</i>	27
2.5.1 Menú de comandos	27
2.5.2 Ajustes del servidor OPC	28
2.5.3 Ajustes generales del PLC	30
2.5.4 Ajustes de la conexión del PLC	32
2.6 <i>Configuración OPC del modelo en Matlab</i>	34

2.6.1	Bloque OPC Configuration	34
2.6.2	Bloque OPC Read	35
2.6.3	Bloque OPC Write	37
<b>3</b>	<b>Simulación, SCADA y PLC</b>	<b>38</b>
3.1	<i>Simulación de la planta utilizando los bloques de Simscape</i>	38
3.1.1	Descripción y funcionamiento	38
3.1.2	Modelo general de la planta	38
3.1.3	Selección de bloques y parametrización	43
3.1.4	Variables utilizadas junto al servidor OPC	67
3.2	<i>Codesys V3</i>	70
3.2.1	Variables globales cargadas en “Configuración de símbolos”	70
3.2.2	PLC	71
3.2.3	SCADA	74
<b>4</b>	<b>Control y ensayos</b>	<b>78</b>
4.1	<i>Condiciones iniciales de equilibrio</i>	78
4.1.1	Condiciones iniciales de la Configuración 1	79
4.1.2	Condiciones iniciales de la Configuración 2	80
4.2	<i>Identificación del comportamiento de la planta simulada en bucle abierto</i>	81
4.2.1	Comportamiento en bucle abierto de la Configuración 1	82
4.2.2	Comportamiento en bucle abierto de la Configuración 2	84
4.3	<i>Diseño de controladores e implementación</i>	85
4.4	<i>Ensayos y pruebas al comportamiento de la planta simulada en bucle cerrado</i>	87
4.4.1	Ensayos para la Configuración 1	87
4.4.2	Ensayos para la Configuración 2	88
<b>5</b>	<b>Conclusiones y mejoras propuestas</b>	<b>90</b>
	<b>Referencias</b>	<b>92</b>
	<b>Glosario</b>	<b>94</b>
	<b>ANEXO 1: Instalación, licencia y ajustes previos del servidor OPC</b>	<b>1</b>
	<b>ANEXO 2: Configuración del servidor OPC e inicio de la comunicación</b>	<b>1</b>

# ÍNDICE DE TABLAS

---

<b>Tabla 1.1:</b> Componentes del depósito de nivel	6
<b>Tabla 1.2:</b> Componentes del depósito colector y la bomba	7
<b>Tabla 1.3:</b> Componentes del intercambiador de calor y la resistencia térmica	9
<b>Tabla 3.1:</b> Nivel del depósito colector vs. volumen de líquido	49
<b>Tabla 4.1:</b> Ziegler-Nichols en bucle abierto	86





# ÍNDICE DE FIGURAS

---

<b>Figura 1.1:</b> Planta multiprocesos	2
<b>Figura 1.2:</b> Diagrama P&ID - Planta multiprocesos	3
<b>Figura 1.3:</b> Depósito de nivel	5
<b>Figura 1.4:</b> Esquema del depósito de nivel	5
<b>Figura 1.5:</b> Depósito colector	6
<b>Figura 1.6:</b> Esquema del depósito colector y la bomba	7
<b>Figura 1.7:</b> Bomba	7
<b>Figura 1.8:</b> Intercambiador de calor	8
<b>Figura 1.9:</b> Esquema del intercambiador de calor y la resistencia térmica	8
<b>Figura 1.10:</b> Resistencias térmicas	10
<b>Figura 1.11:</b> Válvula manual VA1	10
<b>Figura 1.12:</b> Válvula electroneumática de regulación	11
<b>Figura 1.13:</b> Elementos de una válvula electroneumática	11
<b>Figura 1.14:</b> Válvula solenoide VS1	12
<b>Figura 1.15:</b> Válvula de regulación eléctrica	12
<b>Figura 1.16:</b> Rotámetro	13
<b>Figura 1.17:</b> Esquema del rotámetro	13
<b>Figura 1.18:</b> Caudalímetro electromagnético	14
<b>Figura 1.19:</b> Esquema del caudalímetro electromagnético	14
<b>Figura 1.20:</b> Sensor de nivel capacitivo	15
<b>Figura 1.21:</b> Esquema del sensor de nivel capacitivo	15
<b>Figura 1.22:</b> Sensor de temperatura	16
<b>Figura 1.23:</b> Sonda de temperatura	16
<b>Figura 1.24:</b> Sensor de presión	17
<b>Figura 1.25:</b> Esquema del sensor de presión	17
<b>Figura 1.26:</b> Módulo PLC	18
<b>Figura 1.27:</b> Pantalla de control	18

<b>Figura 1.28:</b> Diagrama P&ID – Configuración 1	19
<b>Figura 1.29:</b> Diagrama P&ID – Configuración 2	20
<b>Figura 1.30:</b> Diagrama P&ID – Configuración 3	21
<b>Figura 1.31:</b> Diagrama P&ID – Configuración de desagüe	22
<b>Figura 2.1:</b> Estructura de la red <i>Codesys V3</i> con el PLC	25
<b>Figura 2.2:</b> Estados de una variable tipo <code>_CommState</code>	26
<b>Figura 2.3:</b> Configuración de símbolos	26
<b>Figura 2.4:</b> Ajustes del servidor en <code>OPCServer.ini</code>	27
<b>Figura 2.5:</b> Ajustes del servidor en <code>OPCConfig</code>	28
<b>Figura 2.6:</b> Ajustes generales del PLC en <code>OPCConfig</code>	30
<b>Figura 2.7:</b> Ajustes de la conexión del PLC en <code>OPCConfig</code>	32
<b>Figura 2.8:</b> Configuración del nombre o dirección del PLC en <code>OPCConfig</code>	33
<b>Figura 2.9:</b> Ajustes adicionales de la conexión en <code>OPCConfig</code>	33
<b>Figura 2.10:</b> Bloque OPC Configuration	34
<b>Figura 2.11:</b> Bloque OPC Read	35
<b>Figura 2.12:</b> Bloque OPC Write	37
<b>Figura 3.1:</b> Modelo de la planta multiprocesos en Matlab	39
<b>Figura 3.2:</b> Módulo de Cambio de unidades y Scopes	41
<b>Figura 3.3:</b> Módulo de Control Configuración 1	41
<b>Figura 3.4:</b> Módulo de Control Configuración 2	42
<b>Figura 3.5:</b> Módulo de Display tiempo real	42
<b>Figura 3.6:</b> Módulo OPC	43
<b>Figura 3.7:</b> Bloque “Solver Configuration”	44
<b>Figura 3.8:</b> Bloque “Thermal Liquid Settings” para ajustes del líquido térmico	45
<b>Figura 3.9:</b> Bloque “Tank (TL)” para Depósito de nivel	46
<b>Figura 3.10:</b> Bloque “Tank (TL)” para Depósito colector	48
<b>Figura 3.11:</b> Bloque “Reservoir (TL)” para Tanque de agua fría	50
<b>Figura 3.12:</b> Bloque Centrifugal pump	51
<b>Figura 3.13:</b> Bloque “Controlled Volumetric Flow Rate Source (TL)” para Bomba y Válvula	51
<b>Figura 3.14:</b> Bloque “Heat Exchanger (TL-TL)” para Intercambiador de calor	52
<b>Figura 3.15:</b> Configuración “Tubo concéntrico”	53
<b>Figura 3.16:</b> Configuración “Carcasa y tubo”	53
<b>Figura 3.17:</b> Configuración “Flujo cruzado”	53
<b>Figura 3.18:</b> Una pasada por la carcasa (izquierda) y dos pasadas por la carcasa (derecha)	54
<b>Figura 3.19:</b> Bloque “Thermal resistance” para Resistencia térmica	57
<b>Figura 3.20:</b> Bloque “Temperature Source” para fuente de temperatura	58
<b>Figura 3.21:</b> Bloque “Pipe (TL)” para tuberías	59
<b>Figura 3.22:</b> Esquema de funcionamiento del bloque “Pipe (TL)”	59
<b>Figura 3.23:</b> Bloque “Elbow” para Codos	61

<b>Figura 3.24:</b> Bloque “Interface” para conversión entre diferentes tipos de líquido	61
<b>Figura 3.25:</b> Bloque “Perfect Insulator” para aislador	62
<b>Figura 3.26:</b> Esquema general con válvulas de 3 vías marcadas	62
<b>Figura 3.27:</b> Bloque “3-Way Directional Valve (TL)” para válvulas solenoides	63
<b>Figura 3.28:</b> Posición 1 (izquierda) y posición 2 (derecha) de la válvula solenoide	63
<b>Figura 3.29:</b> Suavizado de la curva del área de apertura	64
<b>Figura 3.30:</b> Bloque “Volumetric Flow Rate Sensor (TL)” para caudalímetro	65
<b>Figura 3.31:</b> Bloque “Pressure & Temperature Sensor (TL)” para sensor de temperatura	66
<b>Figura 3.32:</b> Bloque “Absolute Reference (TL)” para referencia de temperatura	66
<b>Figura 3.33:</b> Variables para lectura en <i>Matlab</i>	67
<b>Figura 3.34:</b> Variables para escritura en <i>Matlab</i>	68
<b>Figura 3.35:</b> Variables globales cargadas como Ítems en el servidor OPC	70
<b>Figura 3.36:</b> Código del PLC en <i>Codesys</i>	72
<b>Figura 3.37:</b> Esquema de control PID	73
<b>Figura 3.39:</b> Esquema de visualización de la planta multiprocesos en el SCADA	74
<b>Figura 3.40:</b> Declaración de las variables locales para el SCADA en <i>Codesys</i>	75
<b>Figura 3.41:</b> Código <i>ladder</i> para las variables del panel en <i>Codesys</i>	76
<b>Figura 3.42:</b> Panel de operario del SCADA	77
<b>Figura 3.38:</b> Inicialización de los parámetros de los controladores en <i>Codesys</i>	78
<b>Figura 4.1:</b> Ajustes de inicio del panel de operario	79
<b>Figura 4.2:</b> SCADA con las condiciones iniciales para la Conf. 1	80
<b>Figura 4.3:</b> SCADA con las condiciones iniciales para la Conf. 2	80
<b>Figura 4.4:</b> Sistema de llenado y descarga de un depósito	81
<b>Figura 4.5:</b> Escalón del 10% sobre el caudal inicial de equilibrio – Conf. 1	82
<b>Figura 4.6:</b> Retardo en el escalón debido a comunicación OPC	83
<b>Figura 4.7:</b> Evolución del nivel en los depósitos tras escalón del 10% en el caudal – Conf. 1	83
<b>Figura 4.8:</b> Cálculo de parámetros que definen un sistema de primer orden	84
<b>Figura 4.9:</b> Escalón del 20% sobre el caudal inicial de equilibrio – Conf. 2	84
<b>Figura 4.10:</b> Evolución de la temperatura tras escalón del 20% en el caudal de agua fría – Conf. 2	85
<b>Figura 4.11:</b> Nivel de los depósitos durante ensayos de escalón en bucle cerrado – Conf. 1	87
<b>Figura 4.12:</b> Caudal de la planta durante ensayos de escalón en bucle cerrado – Conf. 1	88
<b>Figura 4.13:</b> Temperatura del agua durante ensayos de escalón en bucle cerrado – Conf. 2	88
<b>Figura 4.14:</b> Caudal de agua fría durante ensayos de escalón en bucle cerrado – Conf. 2	89



# 1 INTRODUCCIÓN

---

*Simulation is the situation created by any system of signs when it becomes sophisticated enough, autonomous enough, to abolish its own referent and to replace it with itself.*

*- Jean Baudrillard-*

**E**n este primer capítulo introductorio, se van a comentar los objetivos que se persiguen en el proyecto y cómo se va a estructurar este documento para desgranar los elementos que han permitido alcanzarlos. Además, se realizará una breve descripción de la planta multiprocesos real, sus componentes y las posibles configuraciones que permite a la hora de realizar los diferentes ensayos.

## 1.1 Objetivo y estructura del proyecto

El principal objetivo de este proyecto consiste en realizar una comunicación efectiva con un tiempo de retardo mínimo entre los programas de *Matlab* y *Codesys* para la simulación en tiempo real del modelo de la planta multiprocesos mientras que el panel virtual del SCADA es operado acorde a las órdenes que quiera dar el usuario. Se podrá cambiar de configuración, determinar el valor del caudal volumétrico de la planta en bucle abierto o fijar un lazo cerrado para que el sistema alcance las referencias de nivel o temperatura indicadas a partir de los controladores integrados en *Codesys*.

Este proyecto ha sido posible gracias a otros trabajos realizados en la planta multiprocesos real, que han servido como referencia en múltiples aspectos. Cabe destacar entre ellos, los Trabajos de Fin de Grado realizados por José Manuel Romero Martínez [1] y Enrique Antonio Rodríguez González [2].

También es importante señalar la versión software de los programas utilizados, con el fin de que otros usuarios puedan replicar las simulaciones realizadas. Estas versiones se listan a continuación:

- *Matlab 2017b*
- *Codesys V3.5 SP14*
- *Codesys OPC DA Server 3.5.14*

Hablando ya sobre la propia estructura que va a seguir este documento, primero se va a presentar el funcionamiento de la planta multiprocesos real, los elementos que la componen (depósitos, válvulas, sensores...) y las posibles configuraciones que se pueden establecer. A continuación, se hará una descripción del protocolo *OPC*, cómo conectar los servidores y cómo funciona el intercambio de datos entre distintos programas.

En el capítulo de Simulación, se detallarán los bloques de *Simscape* utilizados para representar los elementos reales de la planta, qué valores y opciones se han elegido para su parametrización, se analizarán otros bloques similares que se han descartado, así como se comentarán las limitaciones de la simulación y las simplificaciones que han sido necesarias para llevar ésta a cabo. También se realizará una descripción de las *POUs* que conforman el programa en *Codesys* donde está integrado el autómata programable a partir de unos bloques de *PID* y donde, entre varias pantallas de visualización, se tiene un sistema de *SCADA* con un panel y una botonera, una representación gráfica de la planta y la información del valor de las variables medidas por los sensores a través de distintas pantallas y gráficas.

Por último, en el capítulo de Control se someterá el programa en su conjunto a prueba (conectadas ambas partes por *OPC*). Se realizarán varios ensayos en las distintas configuraciones y aplicando tanto control en bucle abierto como cerrado, se elegirán los parámetros adecuados de los controladores según distintas técnicas de diseño, se

analizará la respuesta del sistema a las referencias dadas a través del panel de operario y se comprobarán los tiempos de respuesta y retardo que presenta la comunicación, entre otras cosas. También se plantearán futuras implementaciones que se pueden hacer en vista a mejorar el funcionamiento y la fidelidad del programa con respecto a la planta real.

Además, en un anexo aparte, se va a explicar punto por punto cómo realizar la instalación del servidor OPC, qué complementos son necesarios descargar, cómo activar la licencia de uso, qué ajustes hay que realizar en *Matlab* y *Codesys*, cómo realizar la configuración del propio servidor o cuáles son los errores más frecuentes que pueden aparecer y cómo solucionarlos.

Complementario a este anexo, se podrá encontrar también un segundo anexo con toda la información sobre la puesta en marcha del programa y otros similares que se quieran realizar, una vez las configuraciones y ajustes comentados en el párrafo anterior hayan sido completados.

También se pueden consultar al final del documento las *Referencias* utilizadas tanto en el proceso teórico como en el práctico de este proyecto, y que se reflejan en este trabajo escrito. A su vez, se puede encontrar un *Glosario* con la definición de algunos conceptos y acrónimos utilizados con frecuencia a lo largo del documento.

## 1.2 Descripción de la planta multiprocesos

La planta multiprocesos que ha sido simulada en este proyecto pertenece al Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática y está situada en el laboratorio de control del edificio L-1 de los laboratorios de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería.

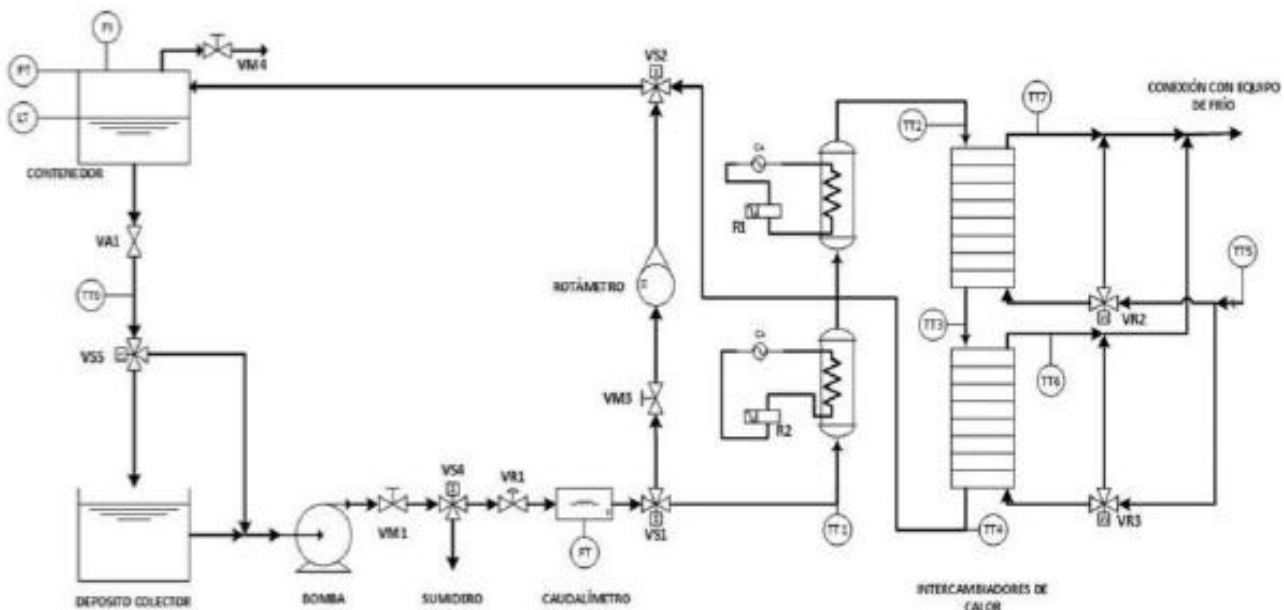
Partiendo de un sistema didáctico modular del fabricante GUNT, ha ido siendo modificada a lo largo de los años a raíz de la realización de los Trabajos de Fin de Grado de diversos alumnos que han pasado por la escuela. A causa de esto, tanto los elementos que componen la planta (actuadores, sensores...) como el propio software de control han sido parte de un rediseño, actualización y mejora para llevar a cabo los procesos de control y automatización que se realizan en ella.



**Figura 1.1:** Planta multiprocesos

Su fin, por ende, es didáctico, su uso está destinado al estudio y aprendizaje de las técnicas de control que son aplicables en un sistema real (control en cascada y monovariante, anti-windup...), la calibración de los sensores para obtener unas medidas con errores mínimos de las distintas variables o el diseño de los controladores que proporcionarán la mejor respuesta (SO mínima, tiempo de establecimiento moderado, error en régimen permanente mínimo...) de los actuadores para el control del nivel, el caudal, la presión o la temperatura en las distintas configuraciones que posee la planta.

Se muestra a continuación un diagrama P&ID (*piping and instrumentation diagram*) que refleja los elementos, actuadores y sensores que conforman la planta multiprocesos:



**Figura 1.2:** Diagrama P&ID - Planta multiprocesos

Los distintos elementos que conforman la planta están conectados a partir de un circuito de tuberías de PVC. El fluido con el que trabaja la planta es el agua y está contenida en un depósito colector de gran volumen. Conectada a la salida del depósito, se encuentra una bomba de potencia fija que impulsa el caudal de agua desde el depósito al resto de la planta a través de las tuberías. Es posible cerrar el paso de caudal a la salida de la bomba mediante la válvula manual VM1, no sin antes desactivar la bomba para no provocar sobrepresiones. Tras esta válvula se encontraba la válvula de 3 vías VS4 que permitía descargar el caudal de agua de todo el sistema a través de un sumidero (aunque fue retirada en uno de los rediseños).

A continuación, está dispuesta la válvula electro neumática VR1 que será el actuador encargado de fijar el caudal de agua que recorre la planta, definido por su grado de apertura y el volumen de agua que dejará pasar en cada instante. Para medir este caudal, se hará uso del caudalímetro electromagnético FT colocado justo a la salida de la válvula VR1.

A partir de este punto, se encuentra la válvula solenoide de tres vías VS1 que podrá dirigir el flujo hacia dos circuitos distintos según la configuración que tenga la planta en ese momento:

- En la **configuración 1**, el flujo de agua se dirigirá hacia el rotámetro que permite obtener una medida visual del caudal a la vez que se utilizará para calibrar el caudalímetro FT. Antes del rotámetro, se encuentra la válvula manual VM3 utilizada para interrumpir el flujo por este circuito si fuese necesario. A su salida, el flujo confluye en la válvula solenoide VS2, a partir de la cual el circuito vuelve a ser común para ambas configuraciones.
- En la **configuración 2**, el agua se dirigirá por un circuito térmico atravesando primero las resistencias térmicas R1 y R2 dispuestas en serie. Estas son de potencia regulable y afectarán a la temperatura del líquido en mayor o menor medida en proporción a esta. A continuación, el caudal de agua circulará por

dos intercambiadores de calor dispuestos también en serie que permitirán reducir la temperatura del líquido. Estos intercambiadores de placas están conectados a su vez a una planta en frío situada en la azotea del edificio del laboratorio, la cual proveerá de agua fría al circuito secundario de los intercambiadores, realizándose un intercambio de calor cuando convergen ambos fluidos que desembocará en la reducción de la temperatura del agua de la planta multiprocesos. El caudal de agua fría aportado a los intercambiadores puede ser modificado a partir de las dos válvulas de regulación eléctrica VR2 y VR3 que funcionarán como actuadores para controlar el intercambio de calor. También permiten realizar un *bypass* de vuelta a la planta en frío. Tras su paso por los intercambiadores, el agua de la planta confluirá en la válvula solenoide VS2, tal y como ocurría en la configuración 1.

Tras pasar por la válvula solenoide, el líquido descarga en un depósito de nivel (contenedor) de forma cilíndrica. El depósito cuenta con un sensor de nivel capacitivo y un sensor de presión, este último utilizado para realizar ensayos cerrando el depósito al ambiente a partir de la válvula manual VM4. A través de un desagüe en la base del depósito, se realiza la descarga del agua contenida y, mediante una válvula manual de 45 posiciones situada a la salida, se puede regular el coeficiente de la descarga.

Por último, se encuentra la válvula solenoide de 3 vías VS5 que conduce el líquido de vuelta al depósito colector, cerrando de esta forma el circuito. También permite desviar el caudal de agua por un circuito secundario realizando un *bypass* al depósito colector para que confluya directamente en la bomba.

Además de los sensores citados anteriormente, hay dispuestas tres sondas de temperatura (TT5, TT6 y TT7) conectadas de forma fija al circuito secundario de agua fría de los intercambiadores de calor y, a su vez, hay dispuestos a lo largo de la planta varios sensores de temperatura (TT1, TT2, TT3, TT4 y TT5) que se pueden acoplar y desacoplar en distintos puntos del circuito principal habilitados para ello.

### 1.3 Elementos de la planta

Acorde al diagrama de la **Figura 1.2**, se van a listar a continuación los elementos que conforman la planta y que serán descritos con más detalle en los apartados posteriores:

- Depósito de nivel (contenedor)
- Depósito colector
- Bomba
- Dos intercambiadores de calor (dispuestos en serie)
- Dos resistencias térmicas (dispuestas en serie): R1 (4 kW) y R2 (2 kW)
- Válvulas manuales: VA1, VM1, VM2, VM3 y VM4.
- Válvula electroneumática: VR1
- Válvulas solenoides (3 vías): VS1, VS2 y VS5
- Válvulas de regulación eléctrica (3 vías): VR2 y VR3
- Rotámetro
- Caudalímetro: FT
- Sensor de nivel capacitivo: LT
- Sondas de temperatura: TT5, TT6 y TT7
- Sensores de temperatura: TT1, TT2, TT3, TT4 y TT5
- Sensor de presión: PT
- Módulo PLC
- Pantalla de control



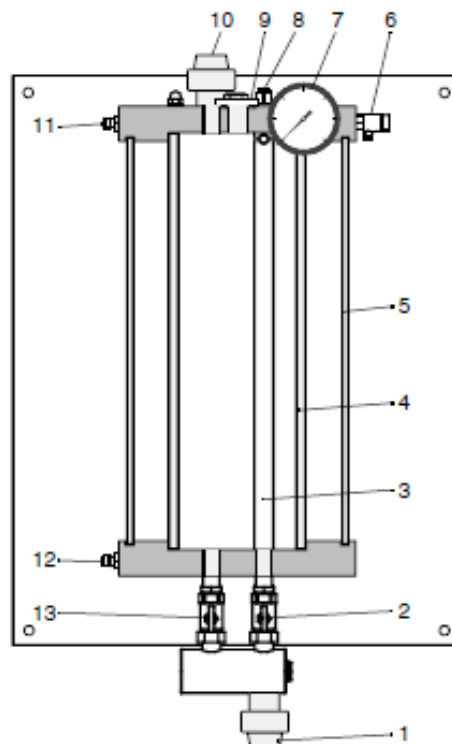
### 1.3.1 Depósito de nivel

El depósito de nivel funciona con agua como fluido de trabajo y está fabricado con vidrio Duran. Permite tanto el control del nivel de agua como el de la presión en su interior, aunque para la simulación realizada solo se ha fijado el control del primero como objetivo.



**Figura 1.3:** Depósito de nivel

Posee una forma completamente cilíndrica y una altura de 44 cm, aunque debido al sensor que tiene incorporado su altura útil real para el control se ve ligeramente reducida.



**Figura 1.4:** Esquema del depósito de nivel

Pos.	Denominación	Pos.	Denominación
1	Descarga de agua	8	Válvula de sobrepresión
2	Llave de rebose	9	Orificio de montaje para el sensor de nivel
3	Tubo de rebose	10	Afluencia de agua
4	Recipiente de nivel	11	Conexión de presión D2
5	Funda protectora	12	Conexión de presión D1
6	Válvula de ventilación	13	Llave de descarga de agua
7	Manómetro para la presión del recipiente		

**Tabla 1.1:** Componentes del depósito de nivel

A través del conducto de afluencia (10) que se encuentra en la parte superior y sirve como entrada, se puede bombear agua al interior del recipiente de nivel (4). El agua a su vez puede salir por la parte inferior a través del desagüe (1) mientras se mantenga abierta la llave de descarga (13). Además, a la salida del depósito se encuentra una válvula manual con la que se puede regular el caudal de descarga.

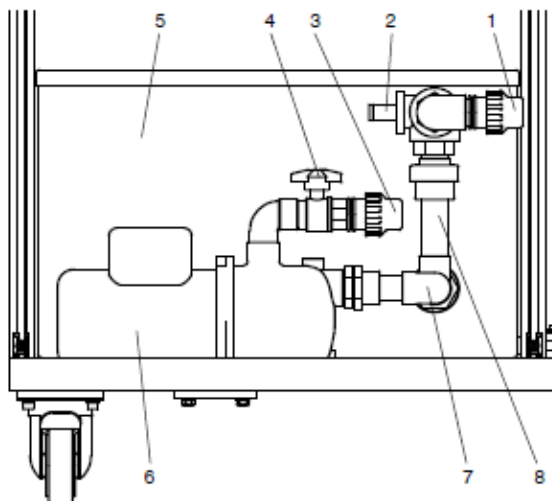
Como medida de seguridad, el recipiente de nivel está cubierto por una funda protectora de plástico transparente (5). Además, se utiliza un tubo de rebose (3) para evitar un sobrellenado accidental del depósito; para ello, la llave de rebose (2) tiene que estar abierta. Si se quiere ventilar el depósito de manera casual durante los ensayos, también se dispone de una válvula de ventilación separada (6).

### 1.3.2 Depósito colector

Este depósito colector da cabida al volumen de agua que se requiere para los ensayos de nivel y caudal en la planta. Posee una gran capacidad para abastecer de agua tanto al depósito de nivel como a las tuberías de circulación. Se ha estipulado para la simulación que tiene unas dimensiones de 34 cm de alto, 56 cm de ancho y 39,4 cm de largo, lo que corresponde a un volumen aproximado de 75 L.



**Figura 1.5:** Depósito colector



**Figura 1.6:** Esquema del depósito colector y la bomba

Pos.	Denominación	Pos.	Denominación
1	Retorno del agua del sistema	5	Depósito
2	Conmutador de tres vías para bypass	6	Bomba
3	Salida de la bomba	7	Entrada de la bomba
4	Llave de cierre	8	Bypass

**Tabla 1.2:** Componentes del depósito colector y la bomba

Como se verá posteriormente en los ensayos de control de temperatura correspondientes a la configuración 2, el agua podrá ser conducida alternativamente por un *bypass* a través de un sistema de tuberías sin que descargue en el depósito. Para ello, es necesario conmutar la válvula de 3 vías VS5 de tipo solenoide. Esta forma de proceder es especialmente razonable para la regulación de temperatura puesto que permite reducir la cantidad de agua del sistema a calentar, volviendo este proceso algo más rápido.

### 1.3.3 Bomba

A partir de esta bomba del fabricante *LOWARA*, el agua del depósito colector es bombeada a través del sistema de tuberías por toda la planta. La bomba en sí no está regulada, solamente puede ser encendida o apagada por medio de un interruptor. A través de una válvula electro neumática dispuesta a continuación, se podrá regular el caudal de agua en circulación. Además, dispone de una válvula manual a su salida. Se pueden observar el resto de los elementos que componen su entorno en la **Figura 1.6**.



**Figura 1.7:** Bomba

### 1.3.4 Intercambiadores de calor

Como parte del sistema de control de temperatura de la planta, esta cuenta con dos intercambiadores de calor de placas dispuestos en serie que, a través de un circuito de agua secundario, se encargan de enfriar el caudal de agua del circuito principal. El agua que circula por este circuito secundario pertenece al suministro de una planta en frío que se encuentra en la azotea de los laboratorios y que mantiene este caudal de agua a una temperatura media de 5°C, sin descender mucho de este valor pues provocaría la congelación del líquido en las tuberías. De esta forma, se produce un intercambio de calor conductivo y convectivo entre el agua de la planta multiprocesos que circula por el circuito principal y el del agua fría, permitiendo el enfriamiento del caudal de agua de toda la planta.



Figura 1.8: Intercambiador de calor

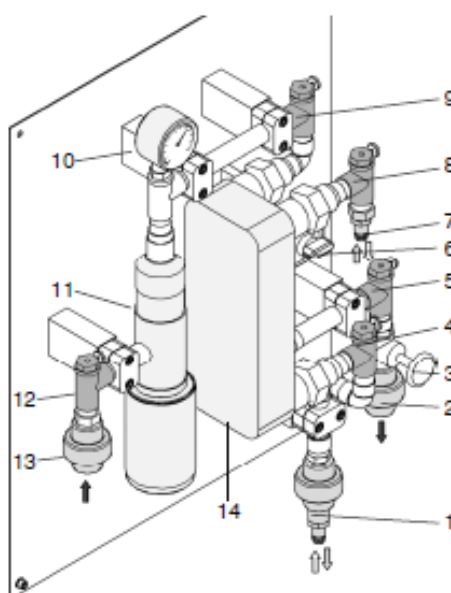


Figura 1.9: Esquema del intercambiador de calor y la resistencia térmica

Pos.	Denominación de los componentes
1	Afluencia / desagüe circuito de agua secundario (S1)
2	Desagüe circuito de agua primario (P2)
3	Válvula de control
6	Conmutador disp. de calefacción, funcionamiento automático / continuo
7	Afluencia / desagüe circuito de agua secundario (S2)
10	Termómetro
11	Dispositivo de calefacción
13	Afluencia circuito de agua primario (P1)
14	Cambiador de calor de placas
Pos.	Denominación de los puntos de medición para temperaturas de agua
4	Desagüe cambiador de calor de placas en el circuito de agua secundario (punto de medición T5)
5	Desagüe cambiador de calor de placas en el circuito de agua primario (punto de medición T3)
8	Afluencia cambiador de calor de placas en el circuito de agua secundario (punto de medición T4)
9	Desagüe dispositivo de calefacción, afluencia cambiador de calor de placas en el circuito de agua primario (punto de medición T2)
12	Afluencia hacia el dispositivo de calefacción (punto de medición T1)

**Tabla 1.3:** Componentes del intercambiador de calor y la resistencia térmica

Mediante la selección adecuada de la entrada (afluencia) y el desagüe en el circuito secundario, es posible disponer de una refrigeración en contraflujo o una refrigeración en flujo continuo, intercambiándose la entrada o afluencia (7) con el desagüe (1) en el caso de una disposición en contraflujo. Será a través de una válvula solenoide de 3 vías, colocada en la entrada del circuito secundario de cada uno de los dos intercambiadores, que se regule el caudal de agua fría que pasa por este circuito permitiendo un intercambio mayor o menor según el grado de apertura de esta. Regulando este intercambio, se podrá controlar la temperatura del agua de la planta multiprocesos (regulación continua). Esta válvula también permite realizar un *bypass* de forma que se desvíe el agua fría por las tuberías de vuelta al tanque de la planta en frío y que el único elemento que intervenga en el intercambio de calor sean las resistencias térmicas, aumentando la temperatura del agua de la planta.

### 1.3.5 Resistencias térmicas

Como se puede observar en la **Figura 1.9** y en la **Tabla 1.3**, también forman parte del sistema de temperatura de la planta dos resistencias térmicas. Antes que el caudal de agua acceda a los intercambiadores de calor, el líquido debe pasar por las dos resistencias térmicas R1 y R2 colocadas en serie que permitirán calentar esta agua. La primera de ellas, en orden de entrada del caudal de agua, es de un fabricante desconocido, cuenta con un recubrimiento de espuma como protección y tiene una potencia máxima de 4 kW, mientras que la segunda es del fabricante *GUNT* (fabricante del módulo didáctico inicial de la planta) y tiene una potencia máxima de 2 kW. El recubrimiento permite una protección contra funcionamiento en seco que reacciona a  $\sim 110^{\circ}\text{C}$ .



**Figura 1.10:** Resistencias térmicas

A partir de un conmutador, las resistencias térmicas pueden llegar incluso a ser controladas por un regulador y funcionar como actuador del bucle de control de temperatura (regulación conmutadora), variando la potencia térmica de estas resistencias. El conmutador tendrá 3 posibles posiciones:

- **Posición 0:** se mantienen apagadas las resistencias, por lo que no hay aporte de calor al caudal de agua de la planta.
- **Posición manual:** se fija la potencia térmica de las resistencias en su valor máximo constante (regulación continua).
- **Posición auto:** la potencia térmica de las resistencias es controlada por un regulador, fluctuando según la referencia de temperatura indicada en el panel de operación (regulación conmutadora).

### 1.3.6 Válvulas

#### 1.3.6.1 Válvulas manuales

Por la planta hay dispuestos varios tipos de válvulas manuales que permiten cortar el flujo de agua en determinados puntos si así se precisa para algún ensayo; como las colocadas a la salida de la bomba o en la entrada de los intercambiadores de calor.

Destaca la válvula manual de 45 posiciones (VA1) a la salida del desagüe del depósito de nivel del fabricante *COMAP*, cuyo alto nivel de precisión permite realizar distintas configuraciones del caudal de descarga del depósito.



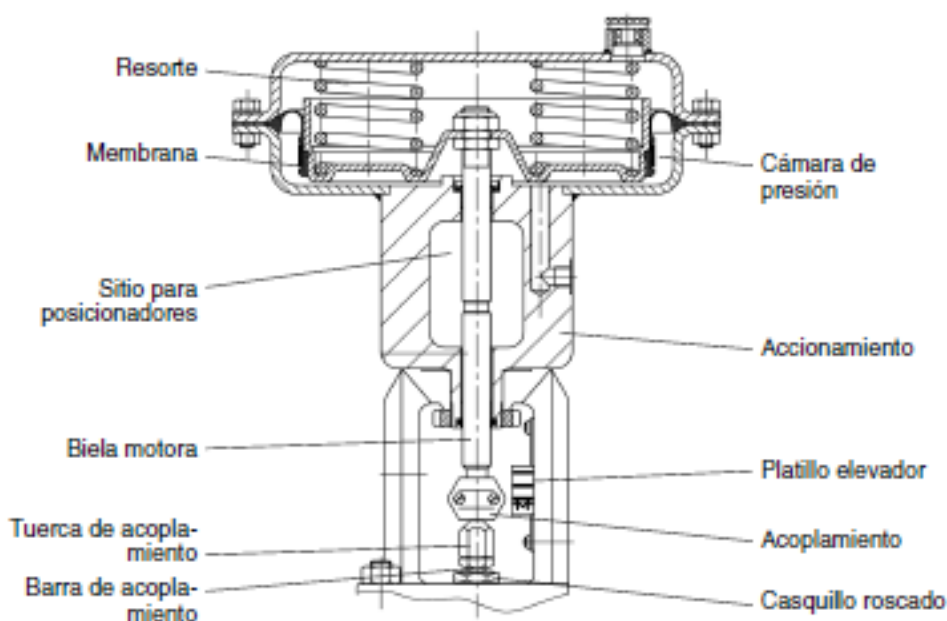
**Figura 1.11:** Válvula manual VA1

### 1.3.6.2 Válvula electro neumática de regulación

A continuación de la bomba hay dispuesta una válvula electro neumática del fabricante *SAMSON* que permite regular el caudal de agua que se aporta al resto de la planta según su grado de apertura. Tiene un comportamiento lineal y el porcentaje de apertura es controlado a través del autómatas mediante una señal de 4-20 mA.



**Figura 1.12:** Válvula electro neumática de regulación



**Figura 1.13:** Elementos de una válvula electro neumática

El grado de apertura es regulado por medio de la carrera de la válvula. Cuando la válvula está cerrada, el cono tiene contacto con el asiento de la válvula. Al elevarse el cono debido a la biela, se produce una apertura entre el cono y el asiento a través del cual fluye el caudal de agua.

El accionamiento de la biela del cono se realiza a través de la biela motora que es accionada por aire comprimido y que a su vez actúa sobre una membrana dentro de la cabeza de la propia válvula. La membrana está acoplada a un resorte mecánico, el cual es comprimido por la fuerza de compresión generada. De esta forma, por cada valor de presión en la cámara se obtendrá una carrera definida y un grado de apertura proporcional.



### 1.3.6.3 Válvulas solenoides

Se utilizan varias válvulas solenoides de tres vías a lo largo de la planta para desviar el flujo de caudal por unas tuberías u otras según la configuración elegida. Estas válvulas son de la marca *JOHNSON CONTROLS* y, a diferencia de las válvulas electroneumáticas, solo permiten abrir y cerrar las vías completamente, por lo que no tienen la capacidad de regular el caudal de agua. Es a través de una señal eléctrica generada por el autómata que la válvula actúa con ayuda del solenoide. Están dispuestas en puntos como el retorno al depósito de nivel tras el bombeo del agua a su paso por el circuito térmico, o a la entrada del depósito colector por si es necesario realizar un *bypass* para la configuración 2 de temperatura.



**Figura 1.14:** Válvula solenoide VS1

### 1.3.6.4 Válvulas de regulación eléctrica

Estas válvulas, que también son de 3 vías, pertenecen al fabricante *JOHNSON CONTROLS* (modelo *VG1805*) y cuentan con un actuador eléctrico que permite tanto decidir por qué vías circulará el agua como regular el grado de apertura para controlar el caudal.



**Figura 1.15:** Válvula de regulación eléctrica

Las válvulas de regulación eléctrica son aquellas que están dispuestas tras el desagüe de la planta en frío y antes de llegar a los intercambiadores de calor por lo que, como se vio anteriormente en el apdo. 1.3.4, permitirán actuar sobre el caudal de agua fría que recorrerá el circuito secundario de los intercambiadores y, por tanto, controlar la temperatura del agua de la planta (regulación continua). Se puede realizar incluso un *bypass* de forma que se desvíe el agua de vuelta a la planta en frío y no se realice ningún enfriamiento en los intercambiadores.

Para generar un cambio de sentido en el caudal, el actuador emplea unos 30 s, tras los cuales genera una señal de retorno indicando que la posición deseada ha sido alcanzada.



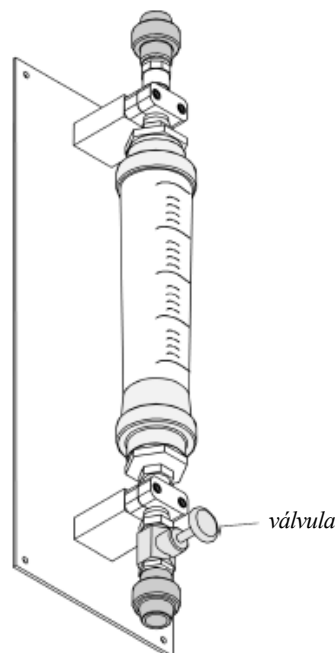
## 1.3.7 Sensores

### 1.3.7.1 Rotámetro

En el retorno del flujo de agua al depósito de nivel se encuentra un rotámetro, instrumento analógico que permite medir el caudal de agua de manera visual. Se compone de un tubo cilíndrico con medidas señaladas en el exterior y una pieza cónica en su interior. Al pasar el flujo por el rotámetro ejercerá una fuerza determinada sobre la pieza cónica que subirá a una altura correspondiente a la fuerza ejercida, indicando así la velocidad del caudal de agua en ese instante. Al ser un sensor analógico, se excluyen los problemas del tipo electrónico que podría generar un sensor convencional; lo que permitirá la posibilidad de calibrar el caudalímetro electromagnético (apdo. 1.3.7.2)



**Figura 1.16:** Rotámetro



**Figura 1.17:** Esquema del rotámetro

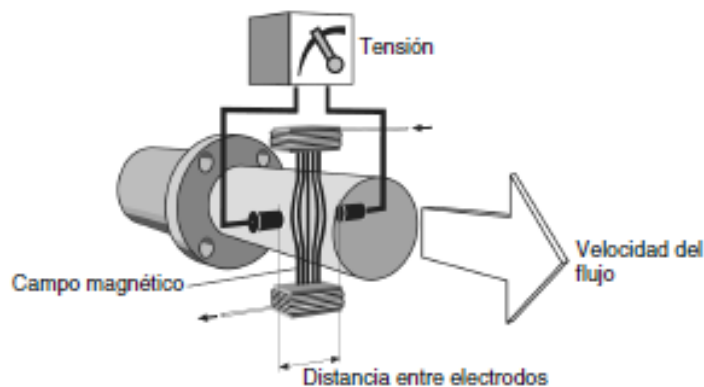
Además, con ayuda de una válvula se puede ajustar la resistencia al flujo y, por consiguiente, modificar las características de caudal del sistema controlado. Una ventaja del rotámetro es que permite observar directamente todas las modificaciones en el caudal resultantes de averías o reacciones de una regulación.

### 1.3.7.2 Caudalímetro electromagnético

Tras la válvula electroneumática que regula el caudal de la planta, hay dispuesto un caudalímetro electromagnético del fabricante *GUNT* que mide de forma precisa la velocidad del flujo que circula por él. Se calibra a partir del rotámetro mencionado en el apdo. 1.3.7.1.



**Figura 1.18:** Caudalímetro electromagnético



**Figura 1.19:** Esquema del caudalímetro electromagnético

Tiene un principio de medición electromagnético acorde a la ley de Faraday. A partir de unas bobinas se genera un campo magnético en el que se mueve un conductor, con el que se induce la tensión. En este caso, el conductor es el agua que fluye por las tuberías (se requiere que el medio fluyente tenga un mínimo de conductividad).

La tensión inducida es proporcional a la velocidad del flujo y es registrada por medio de dos electrodos de medición. A partir de la velocidad del flujo y conociendo la sección transversal de la tubería, se puede calcular el caudal volumétrico de agua. Se genera entonces una señal estandarizada de 4-20 mA proporcional a este caudal.

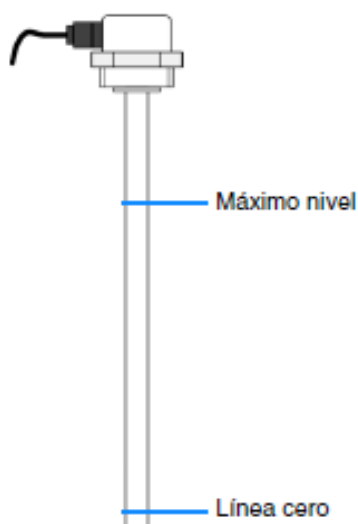
La ventaja que presenta este sensor es que no produce pérdidas de presión a causa de resistencias al flujo, ya que no hay involucrados elementos mecánicos móviles y la sección de la tubería es constante en todo el sistema.

### 1.3.7.3 Sensor de nivel capacitivo

Situado en el interior del depósito de nivel se encuentra un sensor capacitivo del fabricante *ELOBAU* con el que se obtiene la información sobre el nivel de este depósito.



**Figura 1.20:** Sensor de nivel capacitivo



**Figura 1.21:** Esquema del sensor de nivel capacitivo

La varilla de medición, con una longitud aproximada a la altura del depósito (~44 cm), es sumergida en el agua y representa un condensador eléctrico. Al diferenciarse enormemente las constantes dieléctricas del agua y el aire, la capacidad del condensador varía de forma sustancial según el nivel de agua. Esto hace que el rango útil del sensor esté entre los 5 y los 35 cm. Es necesario calibrarlo antes de su puesta en marcha a partir de unos potenciómetros situados en la cabeza del sensor.

#### 1.3.7.4 Sensores de temperatura

Distribuidos por distintos puntos de la planta se encuentran los sensores de temperatura *PT100* del fabricante *ENDRESS HAUSER*. En ellos, una resistencia eléctrica dependiente de la temperatura es utilizada como sensor, convirtiendo el valor de la resistencia en una señal eléctrica.

Han sido diseñados en técnica bifilar y emiten una señal estándar de 4-20 mA proporcional a la temperatura. El rango de medición aproximado es de 0°C a 100°C, y pueden ser dispuestos a lo largo de la planta en distintos soportes habilitados para su acoplamiento.



**Figura 1.22:** Sensor de temperatura

#### 1.3.7.5 Sondas de temperatura

A diferencia de los sensores de temperatura, hay dispuestas en la planta unas sondas de temperatura que son fijas; en concreto, se encuentran colocadas a la entrada y salida de los intercambiadores de calor. Son del fabricante *CAREL* y se tratan de termopares con transmisores integrados. Dos conductores de diferente material están soldados entre sí en uno de los extremos, de forma que en el extremo libre se produce una tensión dependiente de la diferencia de temperatura entre ambos extremos.

El rango de medición de temperatura está entre los  $-20^{\circ}\text{C}$  y los  $70^{\circ}\text{C}$  y, en general, estos dispositivos presentan una menor exactitud en la medición que los sensores de temperatura vistos en el apdo. 1.3.7.4, aunque su tiempo de respuesta es más corto.



**Figura 1.23:** Sonda de temperatura

### 1.3.7.6 Sensor de presión

Para medir la presión en el interior del depósito de nivel se emplea un sensor de presión del fabricante *GUNT* que cuenta con transmisores de presión piezocerámicos. El material cerámico del que está compuesto permite la medición de efectos piezoeléctricos. Se mide la presión relativa como la diferencia de presión con respecto a la presión atmosférica, y cuenta con un rango de medida de entre 0 y 2 bares de presión. La señal de corriente estandarizada generada es de 4-20 mA y es proporcional a la presión a medir.



Figura 1.24: Sensor de presión

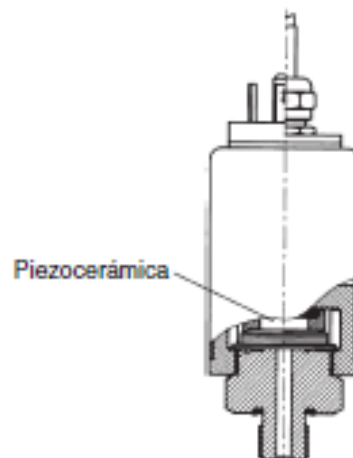


Figura 1.25: Esquema del sensor de presión

Gracias al tiempo de respuesta tan corto que posee este tipo de sensores, se suponen apropiados tanto para mediciones estáticas como dinámicas. Además, el material de los sensores no tiene prácticamente ninguna deriva provocada por la temperatura ni tampoco envejece; lo que hace que no precise de recalibraciones posteriores.

## 1.3.8 Sistemas de adquisición y visualización de datos

### 1.3.8.1 Módulo PLC

Para poder controlar los actuadores de la planta a través de las señales recibidas por los sensores, se precisa de un autómata programable o PLC (*programmable logic controller*). En este caso, se dispone de un PLC del fabricante *Schneider Electric* del modelo *MODICON 340*, que cuenta con 4 tarjetas de adquisición de datos adicionales. El PLC es conectado al ordenador por medio de un cable tipo Ethernet y con la ayuda de un router intermedio. Tras su programación en Unity pro (software específico del fabricante), llevará a cabo el control completo de todos los procesos a ensayar en la planta.



**Figura 1.26:** Módulo PLC

### 1.3.8.2 Pantalla de control

La pantalla a través de la cual podemos tanto configurar los ensayos como observar la información extraída de los sensores, también pertenece al fabricante *Schneider Electric*, en concreto, al modelo *MAGELIS HMI STU 655/855*. Se comunica a través del router al autómatas y permite cambiar entre las configuraciones de la planta y realizar el control en cascada y monovariante de distintas variables como el nivel del depósito o la temperatura del fluido a partir de los controladores PID integrados en el PLC.



**Figura 1.27:** Pantalla de control

## 1.4 Configuraciones

La planta multiprocesos dispone de varias configuraciones que permiten el paso del caudal de agua por distintos circuitos para los ensayos y pruebas que se deseen hacer. Como se verá posteriormente, las configuraciones que se aplicarán en la simulación se corresponderán con las configuraciones 1 y 2 explicadas a continuación.

### 1.4.1 Configuración 1

En esta configuración, el caudal de agua se dirigirá al rotámetro a partir de la válvula solenoide, impidiendo el paso de líquido por el circuito térmico (resistencias térmicas e intercambiadores de calor), y pasando directamente al depósito de nivel (contenedor). Así, a través de un control monovariante se podrán controlar las variables de nivel y presión del depósito contenedor, esta última siempre con el depósito cerrado al ambiente a partir de la válvula manual VM4, aunque el control de la presión no entra en el objetivo de este proyecto. El esquema de la configuración y los elementos que intervienen se pueden observar en la siguiente imagen:

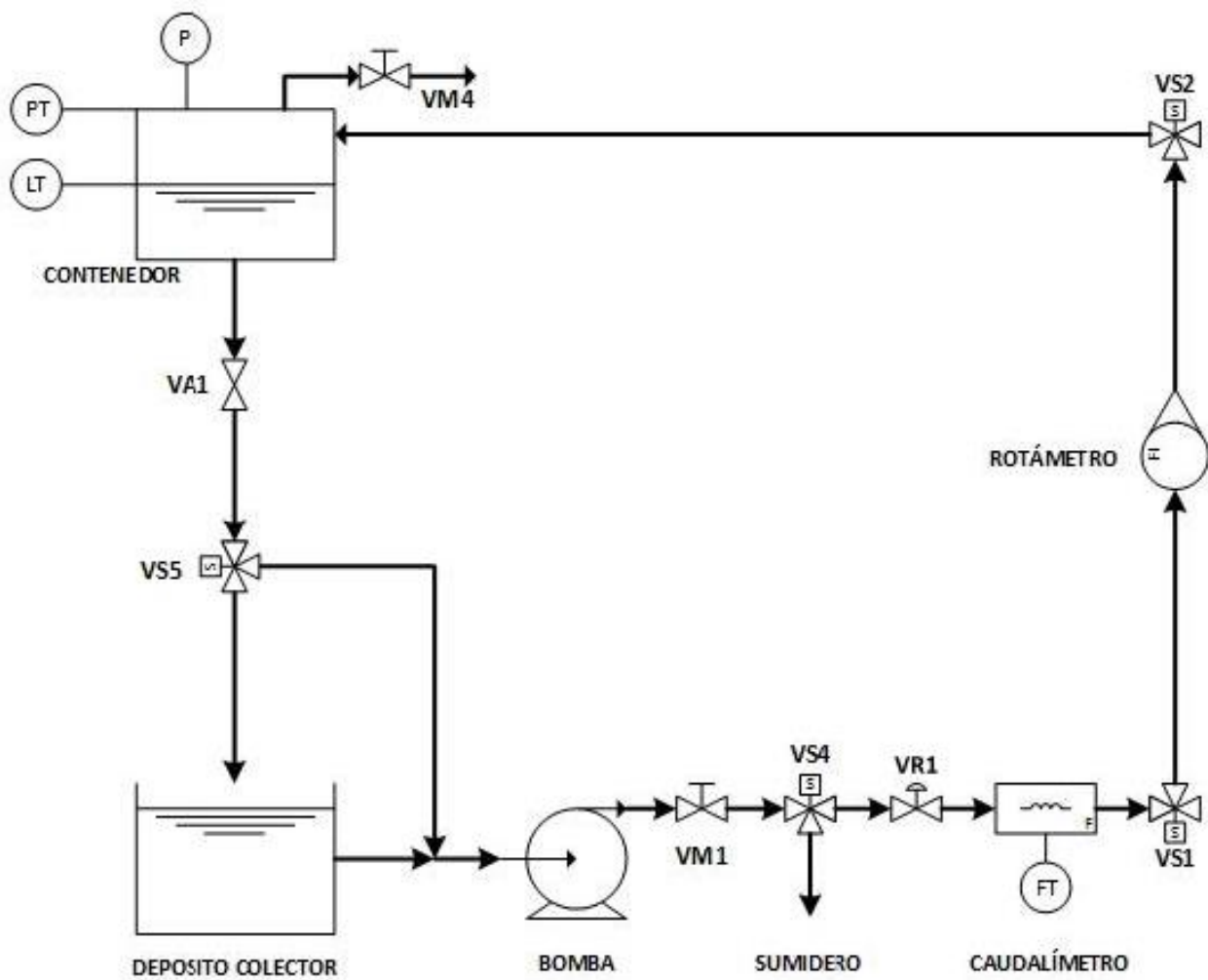


Figura 1.28: Diagrama P&ID – Configuración 1

Será a través de la válvula electroneumática VR1 que se realice la regulación del caudal de la planta y que, como resultado, se pueda controlar el nivel del depósito. Para ello, será primero necesario calibrar el caudalímetro FT, dispuesto a continuación de la válvula VR1, a partir del rotámetro; con el fin de medir el impacto del grado de apertura de la válvula VR1 sobre el caudal del circuito y tener la respuesta del sistema necesaria para completar el lazo en bucle cerrado.

Las válvulas solenoides VS1 y VS2 tendrán cerradas las vías al circuito térmico y la válvula VS5 tendrá que descargar siempre en el depósito colector, pues es necesario disponer del volumen de agua que contiene el depósito si se quiere modificar el caudal volumétrico y, con ello, el nivel del depósito contenedor. Se mantendrá también abierto el depósito de nivel al ambiente, de forma que la descarga producida sea una descarga por gravedad. Antes de realizar los ensayos, se podrá modificar también el grado de apertura de la válvula manual VA1 que cuenta con múltiples posiciones, permitiendo obtener distintos valores para el caudal de descarga del depósito de nivel (contenedor) al depósito colector.

Como se vio anteriormente, la bomba es la encargada de hacer circular el líquido del depósito colector por toda la planta, pero la potencia de aplicación será siempre constante y no tendrá poder de actuación del caudal de agua. Será preciso que la válvula manual VM1 (situada a su salida) se encuentre abierta en todo momento. De la misma forma, la válvula VS4 que permite desaguar el líquido del sistema por un sumidero también se encontrará cerrada.

## 1.4.2 Configuración 2

En la configuración 2 de la planta multiprocesos, las válvulas solenoides de 3 vías VS1 y VS2 cerrarán el paso por el rotámetro, de forma que el caudal de agua hará su recorrido por el circuito térmico compuesto por las resistencias térmicas R1 y R2, y los dos intercambiadores de calor, a su regreso al depósito de nivel. Además, la válvula VS5 tendrá cortado su acceso al depósito colector, realizando un *bypass* y desviando el flujo directamente a la entrada de la bomba. Se puede observar el recorrido del caudal de agua en esta 2ª configuración en la siguiente imagen:

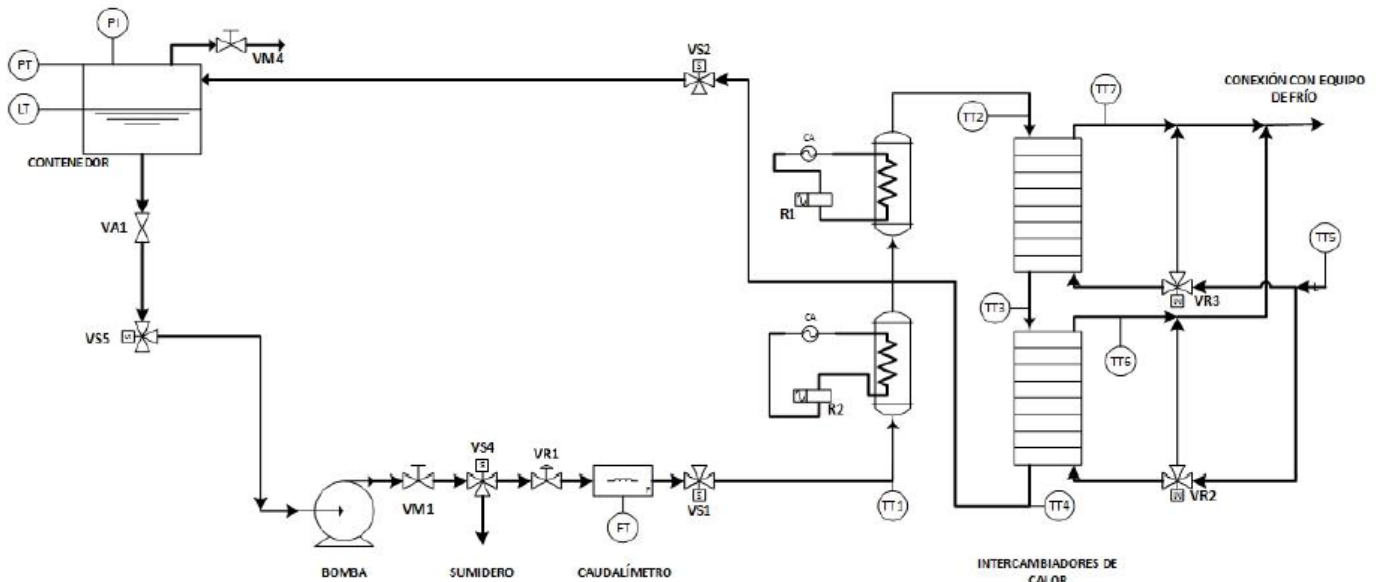


Figura 1.29: Diagrama P&ID – Configuración 2

Esta configuración presenta una mayor complejidad que la configuración 1 puesto que hay un mayor número de posibles variables a controlar y hay varias estrategias de control que implican diferentes elementos de actuación. En este proyecto, el foco de atención va a recaer únicamente en el control de la temperatura del líquido para esta configuración. Como se vio antes, el flujo se desvía sin descargar directamente en el depósito colector, por lo que el volumen de líquido que circula por el sistema se mantiene constante, y así lo hace el caudal volumétrico que suministra el dúo de la bomba y la válvula electro neumática. Esto favorece la reducción del tiempo de establecimiento del sistema en torno a una temperatura de referencia, pues la masa de líquido a calentar o enfriar es mucho menor.

Al inicio del circuito térmico, el líquido atraviesa las resistencias térmicas R1 y R2 dispuestas en serie, de 4 kW y 2 kW de potencia máxima. Estas resistencias son regulables, pudiendo establecer su potencia en un valor fijo, variarlo o incluso anularla manteniéndolas apagadas, suponiendo este cambio de opciones una de las posibles estrategias de control mediante la **regulación conmutadora**. Cuando el agua las atraviesa se calentará, en mayor o menor medida de forma proporcional a su potencia calorífica.

Tras pasar por las resistencias, el caudal de agua circulará por los intercambiadores de calor de placas, también dispuestos en serie. Como se vio en el apdo. Intercambiadores de calor 1.3.4, el flujo de agua de la planta circulará por el circuito primario de los intercambiadores, mientras que por el circuito secundario circulará un flujo de agua fría (5°C) proveniente de una planta en frío de los laboratorios. El caudal de agua fría que atraviesa los intercambiadores es también regulable a partir de las válvulas de regulación eléctrica VR2 y VR3, que permiten modificar su grado de apertura e incluso realizar un *bypass* y devolver el flujo de agua directamente a la planta en frío sin pasar por los intercambiadores. Esta sería otra estrategia de control conocida como **regulación continua**. Se tiene entonces una relación inversa entre la temperatura del flujo de agua de la planta y el caudal volumétrico de agua fría que circula por los intercambiadores pues, a mayor caudal, mayor es el intercambio de calor conductivo y convectivo entre ambos fluidos y más se enfriará el agua de la planta en el proceso.



Comentadas las dos estrategias de control de la temperatura posibles, se van a detallar a continuación:

- **Regulación conmutadora.** A través de la modificación del duty cycle de las resistencias R1 y R2, se podrá controlar su potencia calorífica y regular la temperatura del caudal de agua en la planta. Se pueden llegar incluso a apagar las resistencias para que sean los intercambiadores los únicos elementos que intervengan, enfriando el fluido. Para llevar a cabo esta regulación, el caudal de agua fría que circulará por el circuito secundario de los intercambiadores se tendrá que mantener constante.
- **Regulación continua.** La regulación de la temperatura del agua de la planta se llevará a cabo a través de la modificación del grado de apertura de las válvulas eléctricas de 3 vías VR2 y VR3 que permitirán controlar el volumen de agua fría que fluirá por las placas correspondientes al circuito secundario de los intercambiadores. También se puede realizar un *bypass* dejando solo a las resistencias térmicas como elementos funcionales en el intercambio de calor, aumentando la temperatura del agua. Para ello, la potencia térmica de las resistencias se mantendrá en un valor invariable para un intercambio de calor constante con el líquido.

Aunque ambos tipos de regulación son viables, como se verá más adelante la estrategia elegida para el control de temperatura será la regulación continua, pues tiene implicaciones que facilitan su uso en la simulación.

Para realizar las mediciones de temperatura hay dispuestos varios sensores de temperatura desacoplables y unas sondas fijas en los intercambiadores. De estos se obtendrá información muy interesante sobre cuánto contribuye cada elemento en el intercambio calorífico del caudal de agua. También se dispondrá de un aislador en la mayoría de los elementos de la simulación para considerar al sistema adiabático con el entorno y centrarse tan solo en la acción de las resistencias y los intercambiadores. De todos los sensores, se tomará la medida de TT4, sensor de temperatura dispuesto a la salida del segundo intercambiador, como la temperatura media del agua de la planta para realizar el control en bucle cerrado en la simulación.

### 1.4.3 Configuración 3

Esta configuración funcionará igual que la configuración 2, desviando el flujo de agua hacia el circuito térmico a partir de las válvulas de 3 vías VS1 y VS2. La diferencia reside en que, al igual que pasaba en la configuración 1, el caudal de agua del depósito contenedor descargará en el depósito contenedor pues no se realizará ningún *bypass* a partir de la válvula VS5. Debido al gran volumen de agua que alberga el depósito contenedor, la acción de las resistencias térmicas y los intercambiadores de calor en los cambios de la temperatura del caudal serán menos notables y el proceso de establecimiento mucho más lento. Además, se ha descubierto utilizando esta configuración que se producen burbujas de aire en la bomba de caudal, provocando fallos en su funcionamiento.

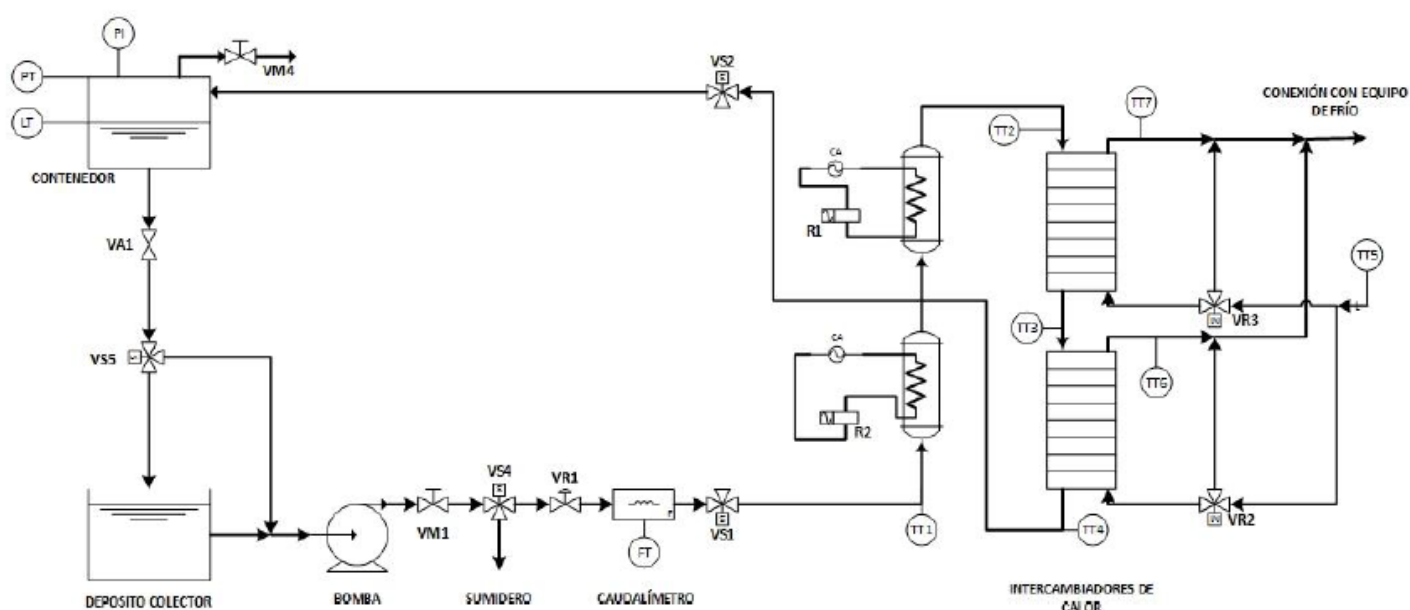


Figura 1.30: Diagrama P&ID – Configuración 3

#### 1.4.4 Configuración de desagüe

A partir de la apertura de la válvula de 3 vías VS4 dispuesta a continuación de la válvula manual de la bomba, es posible descargar el volumen de agua de ambos depósitos en un sumidero o desagüe. La válvula VS4 fue retirada en un rediseño por lo que no es posible llevar a cabo esta configuración actualmente.

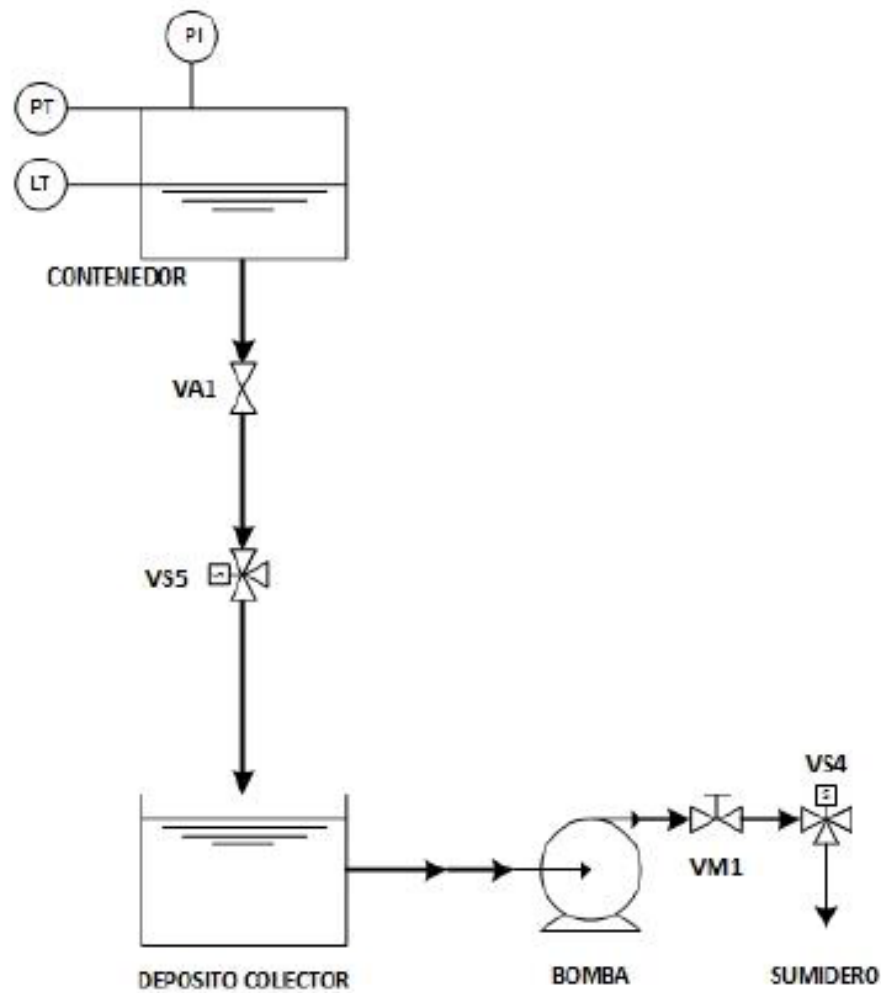


Figura 1.31: Diagrama P&ID – Configuración de desagüe

## 2 INTERFAZ OPC

---

Para realizar la comunicación entre los programas de *Matlab* y *Codesys* es necesario hacer uso de la interfaz OPC. El operario o usuario utilizará un SCADA diseñado en *Codesys* (que hará la función de cliente) para ordenar, a partir de un PLC que ejecuta el algoritmo de control, la siguiente acción o cambio de estado de la planta multiprocesos simulada con bloques de *Simscape* en un modelo *Simulink* de *Matlab* (que hará la función de proveedor/servidor), procesando los datos recibidos y devolviéndolos para su visualización. La comunicación de ambos programas tendrá como nexo al servidor OPC, que dispondrá de un caché donde se cargarán los datos y variables para su lectura y escritura.

Esta clase de servidores está ampliamente estandarizada, con versiones como la de *MatrikonOPC* para Modbus utilizada por gran parte de la industria para la comunicación con PLCs, RTUs, analizadores y otros tipos de controladores. Sin embargo, en este proyecto se ha utilizado el OPC DA Server (versión 3.5.14) de *Codesys* como interfaz, pues es la mejor forma de asegurar la compatibilidad con los programas utilizados.

En este capítulo se analizará en qué consiste esta clase de interfaces, cómo se establece la comunicación entre servidor, cliente y PLC, y qué ajustes se pueden realizar. Además, se apoyará en los anexos finales (“ANEXO1: Instalación, licencia y ajustes previos del servidor OPC” y “ANEXO2: Configuración del servidor OPC e inicio de la comunicación”) donde se explica paso por paso como activar la licencia, los ajustes previos que hay que realizar en el servidor OPC o los posibles errores que pueden ocurrir durante la configuración, con la idea de que otros usuarios puedan hacer uso de esta interfaz de comunicación creando sus propios programas.

### 2.1 Descripción

OPC es una interfaz estandarizada que permite el acceso a los datos procesados. Se basa en el estándar de Microsoft *COM/DCOM*, pero se amplía debido a los requisitos de acceso de los datos en el proceso de automatización, donde la interfaz se utiliza principalmente para la lectura y escritura de los datos en el autómeta.

Los clientes típicos en OPC son las visualizaciones y SCADAs, los programas que tienen el propósito de registrar datos operativos, etc. De esta forma, los proveedores habituales de los servidores OPC suelen ser los sistemas PLC y las tarjetas de interfaz de bus de campo. En el programa realizado, el modelo emulado de la planta en *Matlab* funcionará también como proveedor y servidor de datos, pues procesará a través de la simulación la acción de control del PLC.

El servidor OPC funciona como un programa ejecutable que se inicia automáticamente al establecerse una conexión entre el cliente, el proveedor y el PLC. A partir de ese momento, el servidor será capaz de informar al cliente sobre los valores o el estado de las variables que hayan cambiado.

El servidor OPC proporciona todas las variables (denominadas “*Items in*”) que están disponibles en el PLC (“*Item Pool*” o “*Address Space*”). Estos elementos se gestionan dentro de un caché de datos que asegura un acceso rápido a sus valores y estados. También es posible un acceso directo, sin uso del caché, a los elementos del PLC.

La información de las alarmas y los eventos de los elementos puede considerarse como otro tipo de dato. Con este propósito los elementos pueden ser vinculados a distintas alarmas o eventos digitales y de límite. Para ello se recomienda utilizar la herramienta “*AECConfiguration*” incluida con la instalación del servidor.

Otra función que incluyen los servidores OPC es la de organizar los distintos elementos en lo que se conocen como grupos (privados y públicos). Los grupos privados pueden ser creados por el cliente arbitrariamente a partir de elementos particulares. Inicialmente no afectan a las agrupaciones que se hayan realizado en el servidor OPC, pero en caso de que sea necesario pueden transformarse en grupos públicos (solo para la versión 2.3 del servidor OPC de *Codesys*). Trabajar con grupos privados puede resultar útil por ejemplo para poder activar o desactivar ciertos grupos de variables con un solo comando, dependiendo también de si estos son accesibles.

Los datos agrupados deben leerse del servidor OPC de manera simultánea, es decir, todas las variables deben leerse al mismo tiempo. Sin embargo, hay que tener en cuenta que esto no siempre es posible para sistemas de destino con buffers de comunicación restringidos.

Debido a las características del estándar DCOM es posible acceder a la comunicación desde otro ordenador distinto al que la inició. También se permite que más de un cliente acceda a la fuente de datos al mismo tiempo. La aplicabilidad de distintos tipos de lenguajes de programación (C++, Visual Basic, Delphi, Java) es otra de las ventajas de emplear COM.

## 2.2 Interfaces de comunicación - Gateway V3

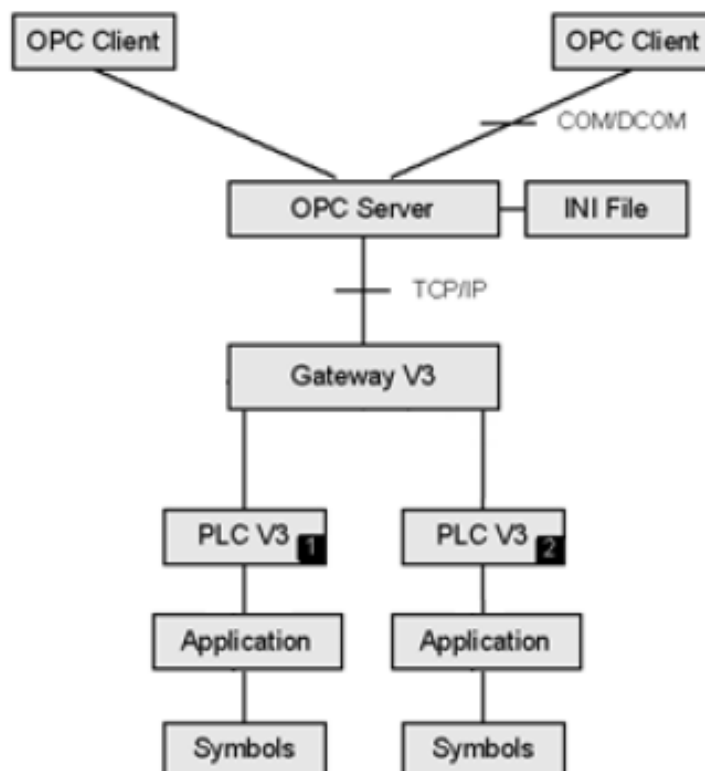
Los servidores OPC admiten varios tipos de interfaces según el tipo de comunicación que se quiera establecer:

- Gateway V3
- Gateway V2.3
- ARTI
- ARTI3
- SIMULATION3
- SIMULATION

La interfaz que se debe elegir para la comunicación dependerá del PLC utilizado en particular, y deberá ser configurado a través del archivo INI (extensión propia del archivo con la configuración del servidor) que podrá ser modificado con la ayuda de la herramienta OPCConfig como se verá más adelante.

Se utilizará la interfaz Gateway V3 para este proyecto pues se corresponde con la versión más actual. Primero, se debe generar una lista de símbolos y/o elementos en el propio sistema de programación. En la opción para la configuración de símbolos de *Codesys* (*Symbol Configuration*), se podrán elegir las variables que intervendrán de la propia lista de símbolos. Dependiendo de los ajustes realizados, las variables podrán ser transmitidas desde la propia aplicación o desde una aplicación hija creada, aunque se optará siempre por la primera opción. En el directorio del proyecto se generará un archivo de extensión XML con los datos de los símbolos. Este archivo también puede ser utilizado para una interfaz tipo SIMULATION si no se dispone de PLC.

La comunicación entre el servidor OPC y el autómata integrado en *Codesys V3* se realizará a través de *Codesys Gateway V3*, y seguirá una estructura muy similar a la que se muestra a continuación:



**Figura 2.1:** Estructura de la red *Codesys V3* con el PLC

Tanto la aplicación como la información de los símbolos se guardan en el PLC. Este será el encargado de gestionar las solicitudes relativas a la información de los símbolos, los valores y sus estados. La lista de símbolos basada en las variables definidas en “*Symbol Configuration*” será transferida implícitamente al autómatas con la propia descarga de la aplicación PLC. Al mismo tiempo que se descarga la aplicación, se exportará la lista de símbolos a un archivo XML que quedará guardado en el directorio del proyecto.

## 2.3 Comunicación entre servidor y cliente

A la hora de establecer la comunicación del SCADA en *Codesys* (que funciona como cliente) a través del servidor OPC con la simulación en *Matlab*, es necesario que previamente se hayan seguido una serie de pasos:

1. A través de la pestaña de “Configuración de símbolos” en *Codesys* se deben configurar los símbolos (ítems) de forma que queden guardados en la aplicación de control.
2. El servidor OPC recibe todos los ajustes necesarios para establecer las conexiones en “*OPCServer.ini*”. Estos ajustes se podrán configurar directamente desde el archivo o a través de la herramienta *OPCConfig* incluida con la descarga del servidor (esta segunda opción es la más recomendada).
3. Tras elegir la opción de conectarse con el servidor *CODESYS.OPC.DA* desde el cliente OPC, se podrá navegar entre los símbolos previamente configurados y elegir aquellos que interesen para el programa a ejecutar. A partir de los bloques OPC Read y OPC Write del modelo en *Simulink*, se elegirán los datos a leer o sobrescribir según interese.

El sistema operativo iniciará de forma automática al servidor OPC en cuanto el cliente establezca una conexión. De la misma manera, en cuanto todos los clientes se desconecten del servidor, éste también terminará automáticamente. No hay ningún icono que represente al servidor OPC en la barra de tareas, pero si aparecerá como proceso en el administrador de tareas de Windows.

Para cada PLC que se haya configurado, el OPC Server *V3* generará las variables de estado *\_CommState* y *\_CommStateOK*. Las variables tipo *\_CommState* podrán ser interpretadas desde el cliente OPC y solicitar los siguientes estados:

```

STATE_TERMINATE      = -1
STATE_PLC_NOT_CONNECTED = 0
STATE_PLC_CONNECTED  = 1
STATE_NO_SYMBOLS     = 2
STATE_SYMBOLS_LOADED = 3
STATE_RUNNING        = 4
STATE_DISCONNECT     = 5
STATE_NO_CONFIGURATION = 6

```

**Figura 2.2:** Estados de una variable tipo `_CommState`

La variable `_CommStateOK` será de tipo booleana y cuando sea TRUE indicará que la comunicación con el servidor OPC está activa, mientras que si es FALSE habrá fallado algo y la comunicación no se habrá establecido. Estas variables de estado se generarán de forma independiente para cada PLC en el grupo.

## 2.4 Configuración de los símbolos (Items)


Para que los datos de las variables en *Codesys* puedan ser leídos o modificados, estas deben ser previamente definidas como variables globales (GVL). En la pestaña “GVL” dentro de la aplicación de *Codesys* es posible realizar directamente la declaración de estas variables en código ST eligiendo el tipo de variable (entero, real, booleano...). También es posible inicializar las variables para que el programa se ejecute con unos valores iniciales.

Para gestionar las variables globales que pasarán al caché de datos del servidor OPC se utilizará la pestaña de “Configuración de símbolos”.


Símbolos	Derechos de acceso	Máximo	Atributo	Tipo	Variables de miembro	Comentario
<b>Constants</b>						
<b>GVL</b>						
PI_ACTUACION_C1	<input checked="" type="checkbox"/>			REAL		
PI_ACTUACION_C2	<input checked="" type="checkbox"/>			REAL		
TRACKING_C1	<input checked="" type="checkbox"/>			REAL		
TRACKING_C2	<input checked="" type="checkbox"/>			REAL		
VR1	<input checked="" type="checkbox"/>			REAL		
caudal_manual_C1	<input checked="" type="checkbox"/>			REAL		
caudal_manual_C2	<input checked="" type="checkbox"/>			REAL		
config	<input checked="" type="checkbox"/>			BOOL		
modo_C1	<input checked="" type="checkbox"/>			BOOL		
modo_C2	<input checked="" type="checkbox"/>			BOOL		
nivel_col_real	<input checked="" type="checkbox"/>			REAL		
nivel_dep_real	<input checked="" type="checkbox"/>			REAL		
nivel_equilibrio	<input checked="" type="checkbox"/>			REAL		
temp_equilibrio	<input checked="" type="checkbox"/>			REAL		
temp_real_TT1	<input checked="" type="checkbox"/>			REAL		
temp_real_TT2	<input checked="" type="checkbox"/>			REAL		
temp_real_TT3	<input checked="" type="checkbox"/>			REAL		

**Figura 2.3:** Configuración de símbolos

Se seleccionarán aquellas variables del listado (tic azul) que serán cargadas en el servidor como elementos de comunicación o símbolos (ítems). También es posible modificar los derechos de acceso de cada una de ellas:

 Lectura y escritura

 Solo lectura

 Solo escritura

## 2.5 Configuración del Codesys OPC Server a través de OPCConfig

En la conexión entre la simulación y el autómata programable hay una serie de parámetros que afectan directamente al servidor OPC y que pueden ser modificados. Estos parámetros están definidos en el archivo “*OPCServer.ini*”.

```

OPCServer: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
[Server]
Version=0x3050000
updaterate=200
logevents=1
logfilter=15
syncinit=1
ReadCyclesAfterWrite=0
UseColonAsPlcDevider=0
GroupUpdateBehaviour=0
PLCs=1
PLC0=PLC_GW3

[PLC:PLC_GW3]
interfacetype=GATEWAY3
reconnecttime=15
waittime=10
active=1
logevents=1
logfilter=15
gateway=Tcp/Ip
gatewayaddress=localhost
gatewayport=1217
parameters=1
parameter0=IpAddress
value0=127.0.0.1

[Redundancy]
NumOfGroups=0

```

**Figura 2.4:** Ajustes del servidor en OPCServer.ini

Este archivo puede ser modificado directamente si así se desea como si se tratara de un documento de texto, pero es más cómodo y sencillo hacer uso de la herramienta OPCConfig a la hora de realizar estos ajustes. La herramienta se encuentra en el directorio de instalación del servidor (por defecto: *C:\Archivos de programa\3S CODESYS\CODESYS OPC Server V3*).

### 2.5.1 Menú de comandos

En la barra superior de OPCConfig hay varios comandos que pueden ser útiles a la hora de crear y configurar el servidor OPC. En la opción de archivo (“*File*”) se pueden encontrar las siguientes opciones:

- **Abrir** (“*Open*”)
  - Opción para editar una configuración ya existente. Aparecerá un diálogo por defecto donde se puede seleccionar un archivo INI guardado. La configuración descrita en el archivo INI elegido se cargará en la herramienta de configuración.
- **Nuevo** (“*New*”)
  - Opción para crear una nueva configuración. Si ya hay una configuración abierta, se podrá guardar y cerrar para mostrar a continuación una configuración con las opciones por defecto.
- **Guardar** (“*Save*”)
  - Guarda la configuración actual en el archivo INI actualmente cargado.
- **Guardar como** (“*Save as*”)
  - Guarda la configuración actual en la carpeta especificada.

**<n> archivos INI abiertos recientemente** (“<n> recently opened INI files”)

Lista de los archivos INI que han sido editados desde que se inició la herramienta la última vez. Se puede seleccionar cualquiera de ellos para cargarlo en OPCConfig.

- **Salir** (“Exit”)

Se cerrará OPCConfig. Se da la opción de guardar la configuración antes de salir.

También existen varias opciones relativas a la creación de grupos o los PLCs recogidas en el comando “Edit”:

- **Nuevo grupo redundante** (“New Redundancy group”)

Se añadirá una rama de grupo redundante debajo del servidor.

- **Añadir PLC** (“Append PLC”)

Se añadirá una entrada de PLC debajo del servidor.

- **Borrar PLC** (“Delete PLC”)

El PLC seleccionado será eliminado del árbol de configuración.

- **Renombrar PLC** (“Rename PLC”)

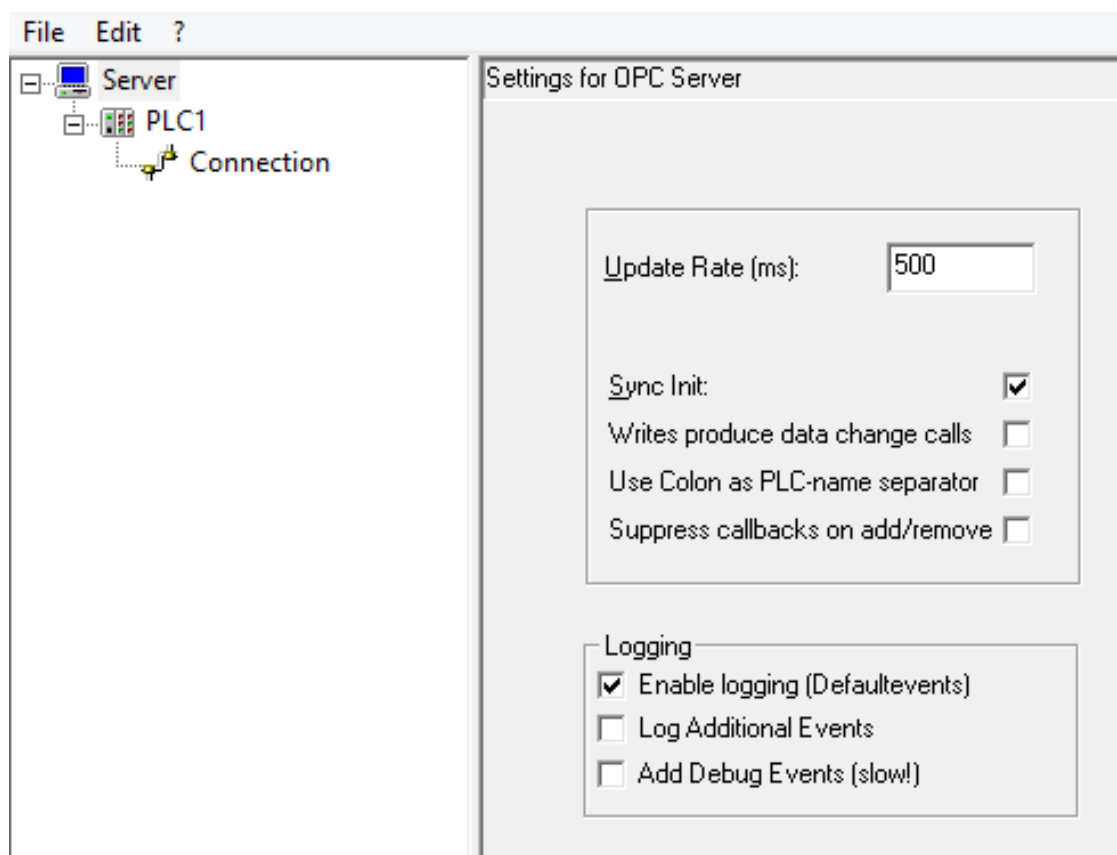
El PLC seleccionado será renombrado.

- **Reiniciar PLC** (“Reset PLC”)

La configuración del PLC seleccionado se restablecerá a los valores predeterminados por defecto definidos por OPCConfig.

## 2.5.2 Ajustes del servidor OPC

Al hacer selección en “Server” (capa superior) dentro del árbol de configuración, se abrirá la siguiente ventana:



**Figura 2.5:** Ajustes del servidor en OPCConfig

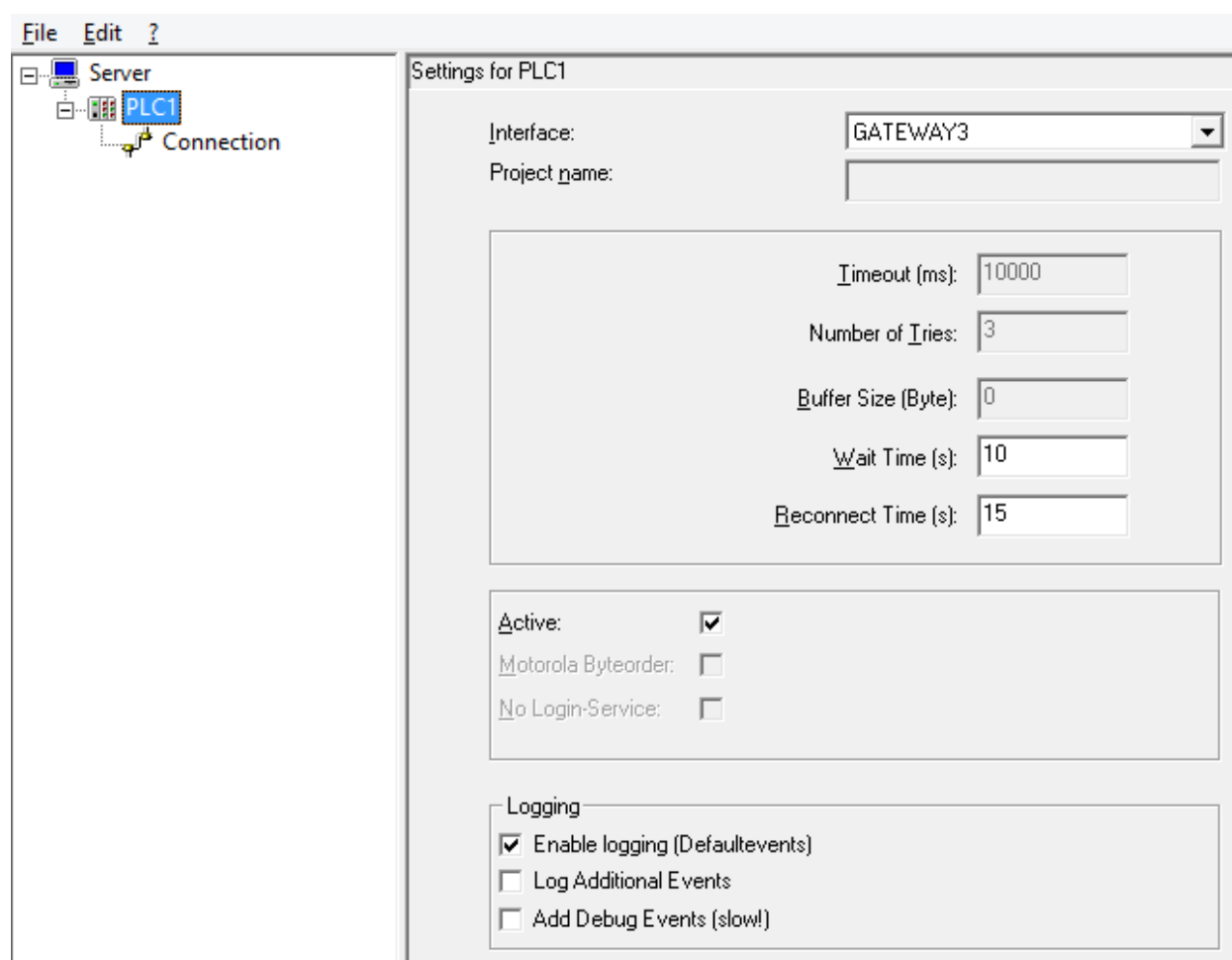


Se podrán modificar los parámetros de ajuste explicados a continuación:

- **Tasa de actualización** (“*Update rate*”): 500 ms  
Tasa de actualización básica del servidor OPC en milisegundos. Es el tiempo de ciclo en el que se leerán todos los datos de los elementos (ítems) desde el PLC. Los datos se escribirán en el autómata activo según una tasa de actualización definida aparte.  
Con la información de estado, el servidor también proporciona un parámetro de ancho de banda (“*Bandwidth Usage*”) que representa la relación entre la tasa de actualización real y la tasa de actualización configurada en porcentajes.
- **Inicio sincronizado** (“*Sync Init*”): Activado  
Si se activa esta opción, se inicializa el servidor con una conexión síncrona.
- **Las escrituras provocan llamadas de cambio de datos** (“*Writes produce data change calls*”): Desactivado (opción por defecto)
- **Usar dos puntos en la sintaxis de los nombres de los PLC** (“*Use Colon as PLC-name separator*”): Desactivado (opción por defecto)
- **Suprimir las devoluciones de llamadas al añadir/eliminar** (“*Suppress callbacks on add/remove*”): Desactivado (opción por defecto)
- **Habilitar registro** (“*Enable Logging*”): Activado  
Si esta opción se encuentra activa, todas las acciones realizadas y los errores ocurridos en el servidor OPC se registrarán en un archivo LOG. Este archivo se almacenará en el directorio de instalación y se denominará como “*OPCServer.log*”. Tras la desconexión del servidor OPC se podrá leer y evaluar este archivo.
- **Registrar eventos adicionales** (“*Log Additional Events*”): Desactivado (“opción por defecto”)  
Si esta opción está activa, entonces los eventos adicionales también se escribirán en el archivo LOG.
- **Agregar eventos de depuración** (“*Add Debug Events*”): Desactivado (“opción por defecto”)  
Si esta opción está activa, entonces los eventos de depuración se escribirán en el archivo LOG.

### 2.5.3 Ajustes generales del PLC

Al seleccionar “PLC” en el árbol de servidor se mostrará la siguiente ventana:



**Figura 2.6:** Ajustes generales del PLC en OPCConfig

La configuración de ajustes que se podrá realizar en el PLC con respecto al servidor se detalla a continuación:

- **Interfaz** (“*Interface*”): GATEWAY3

Nombre de la interfaz utilizada para la comunicación entre el sistema y el PLC. La lista de interfaces disponibles para esta versión del servidor se puede ver en el apdo. 2.2.

- **Nombre del proyecto** (“*Project Name*”)

Nombre del archivo XML con toda la información de los símbolos; de obligatorio uso en caso de elegirse la interfaz de simulación. Si no hay ninguna ruta hasta el directorio, el archivo deberá encontrarse en el directorio del servidor OPC.

- **Límite de tiempo** (“*Timeout*”): 10000 ms (valor por defecto)

Período de tiempo a partir del cual el servidor OPC se cerrará de manera automática si no recibe ninguna información sobre un servicio enviado desde el PLC.

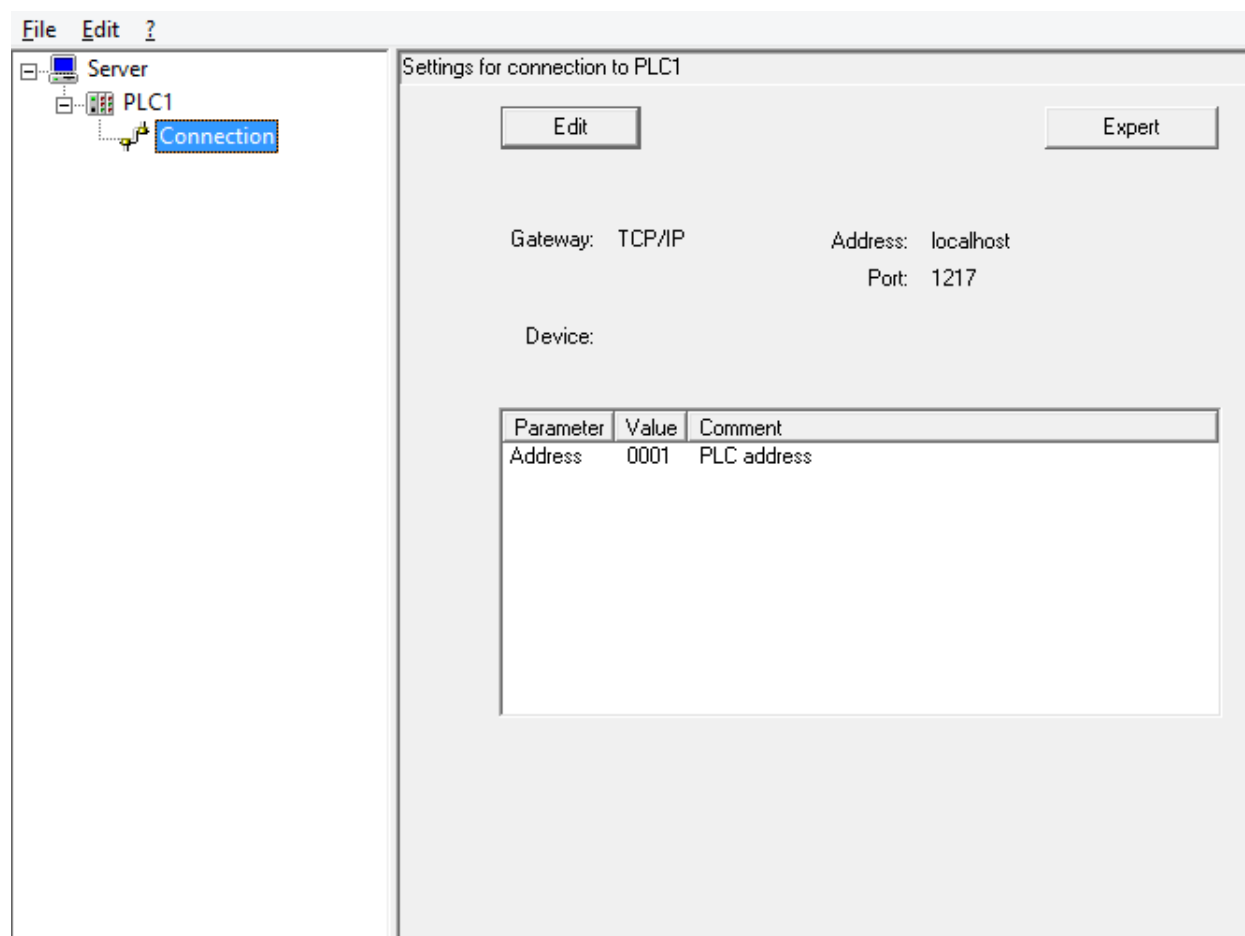
- **Número de intentos** (“*Number of Tries*”): 3 (valor por defecto)

Número de intentos que el *driver* de comunicación de la puerta de enlace (“*Gateway*”) realizará para transferir un bloque correctamente. Si falla en su último intento, se creará un mensaje de error de comunicación.

- **Tamaño del búfer en Bytes** (“*Buffer Size*”): 0 (valor por defecto)  
Tamaño del búfer de comunicación en el dispositivo de destino. Si el valor es "0" se buscará en el propio *driver* del dispositivo la información de tamaño. Si no se proporciona ninguna, se asumirá que el tamaño del búfer es ilimitado.
- **Tiempo de espera** (“*Wait time*”): 10 s (valor por defecto)  
Tiempo en segundos que el servidor OPC esperará hasta que el controlador esté listo (a tener en cuenta sobre todo durante el inicio automático del controlador).
- **Tiempo de reconexión** (“*Reconnect Time*”): 15 s (valor por defecto)  
Intervalo de tiempo durante el cual el servidor OPC tratará de reconectarse repetidamente con el controlador a través de la puerta de enlace.
- **Activo** (“*Active*”): Activado (opción por defecto)  
El PLC será visible para el servidor OPC solo si esta opción se encuentra activa.
- **Bytheorder Motorola**: Desactivado (opción por defecto)  
El sistema de destino del proyecto no utiliza el orden de bytes de Motorola (esta opción solo deberá ser tomada en cuenta cuando se trabaje con 68K, 8051, Power PC). Esta entrada tendrá que coincidir con la entrada en los ajustes para la conexión del PLC.
- **Sin servicio de entrada** (“*No Login Service*”): Desactivado (opción por defecto)  
Esta opción deberá activarse para sistemas de destino específicos que necesiten solicitar el envío de un servicio de acceso.
- **Registro** (“*Logging*”)  
Opciones para el registro de eventos en un archivo LOG visto en el apdo. 2.5.2

## 2.5.4 Ajustes de la conexión del PLC

Al seleccionar PLC en el árbol de configuración, se abre una nueva opción abajo que permite realizar ajustes sobre la conexión del propio controlador:



**Figura 2.7:** Ajustes de la conexión del PLC en OPCCONFIG

Aquí deberán introducirse los ajustes de comunicación definidos para la aplicación en el respectivo proyecto de *CODESYS V3*. Si no se define ningún parámetro de comunicación, el servidor OPC termina con *STATE\_TERMINATE*. Si es necesario, se puede echar un vistazo más de cerca al archivo LOG apropiado, donde se listan todas las secuencias que el servidor OPC ha hecho. En el archivo LOG generado se listarán todas las secuencias que ha realizado el servidor OPC y se podrán encontrar los intentos registrados y no registrados al iniciar la comunicación.

Para iniciar una nueva comunicación o modificar la ya existente, se podrá usar el botón editar (“*Edit*”) para abrir el cuadro de diálogo con la configuración de la dirección de *Codesys* para el PLC:

The screenshot shows the OPCConfig dialog box with the following fields and values:

- Gateway:**
  - IP address: localhost
  - Port: 1217
- PLC name or address:** 0001
- Use TCP/IP blockdriver:**
- IP address of PLC:** localhost
- IP port of PLC:** 11740

An OK button is located in the top right corner.

**Figura 2.8:** Configuración del nombre o dirección del PLC en OPCConfig

Se tiene que introducir la dirección IP y el puerto de acceso (*Gateway*). Para identificar el PLC se puede especificar el nombre o la dirección del PLC (opción recomendada), o bien la dirección y el puerto del *driver* Tcp/Ip (“*Use Tcp/blockdriver*”). Estos ajustes se deben corresponder con los definidos en la pestaña de ajustes de comunicación del editor de dispositivos para el proyecto *CODESYS V3* correspondiente.

A través del botón experto (“*Expert*”) se abrirá una configuración más extensa con parámetros adicionales cuyo valor podrá ser modificado directamente:

The screenshot shows the OPCConfig dialog box with the following advanced settings table:

Value	Name	Default
1	Ping	1
Download.sdb	SymbolFile	Download.sdb
	SymbolFilePath	
0	DirectAddressesOnly	0
	User	
	Password	
0	CheckDataChangeOnPlc	0
0	ClientAddressResolution	0
0	DontExpandSimpleType...	0
0	WriteThroughReadCache	0
0	AllowAlternateSymbolfile	0
0	DontLoadSymbolsFrom...	0
0	DontExpandComplexTy...	0
	DeviceNameInProject	

Buttons for OK and Cancel are located on the right side of the dialog.

**Figura 2.9:** Ajustes adicionales de la conexión en OPCConfig

## 2.6 Configuración OPC del modelo en *Matlab*

Para que la simulación de la planta multiprocesos en *Matlab* funcione como procesador y proveedor de los datos en la comunicación, es imprescindible que el programa en *Simulink* haga uso de los siguientes tres bloques:

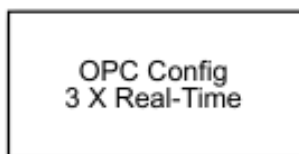
- *OPC Configuration*
- *OPC Read*
- *OPC Write*

Será a través del bloque OPC Configuration que se seleccione el servidor OPC al que se conectará el modelo, mientras que los bloques OPC Read y OPC Write definirán los elementos cargados en el servidor que se leerán o sobrescribirán, respectivamente. También permitirán configurar algunos parámetros relativos al comportamiento de la simulación con respecto a la comunicación, como la respuesta a los errores/eventos, el tiempo de muestreo para la lectura y la escritura o la ejecución en pseudo tiempo real, entre otros.

### 2.6.1 Bloque OPC Configuration

El bloque OPC Configuration permite definir los clientes OPC que se utilizarán en el modelo, configurar su comportamiento en pseudo tiempo real y fijar el tipo de respuesta para los errores y eventos OPC que puedan ocurrir.

No es posible colocar más de un bloque OPC Configuration en un mismo modelo de *Simulink*. De hacerlo, saltará un mensaje de error y el segundo bloque introducido se desactivará.



**Figura 2.10:** Bloque OPC Configuration

- **Librería:** *OPC Toolbox*
- **Puertos:** Ninguno. Es posible añadir un puerto de salida opcional que muestra la latencia del modelo (tiempo de espera en cada paso de la simulación para lograr un comportamiento a pseudo tiempo real).
- **Parámetros:**
  - **Configurar los clientes OPC** (“*Configure OPC Clients*”)

Botón que permite abrir el “*OPC Client Manager*” para ese modelo (cada modelo tiene una lista de clientes asociado a él). Estos clientes se utilizarán durante la simulación para leer y/o escribir datos en el servidor OPC.

Se elegirá el servidor OPC a través del cual se hará la conexión con los clientes. También se podrá configurar el tipo de *host* y el tiempo de espera del servidor con el modelo antes de su desconexión.

- **Control de errores** (“*Error control*”)

Define las acciones que debe realizar el programa cuando se encuentre determinados errores y eventos específicos de OPC. Las acciones disponibles son: provocar un error y detener la simulación, provocar una advertencia y continuar con la simulación, o ignorar el error o evento. Los errores y eventos que pueden ocurrir son:

- **Variables (Ítems) no disponibles en el servidor:** Error (por defecto)

Define el comportamiento de aquellos elementos especificados en los bloques de lectura (OPC Read) o escritura (OPC Write) pero no disponibles en el servidor al comienzo de la simulación.

- **Error de lectura/escritura:** Advertencia (por defecto)  
Define el comportamiento cuando falla una operación de lectura o escritura.
  - **Servidor no disponible:** Error (por defecto)  
Define el comportamiento del programa cuando el cliente es incapaz de conectarse al servidor OPC, o cuando el servidor envió un evento de desconexión al cliente.
  - **Violación del pseudo tiempo real:** Advertencia (por defecto)  
Define la respuesta del sistema cuando la simulación se ejecuta de forma más lenta que el tiempo real.
- **Simulación en pseudo tiempo real** (“*Pseudo real-time simulation*”): Activado (Speedup: 3 s)
- Permite configurar las opciones para ejecutar la simulación en pseudo tiempo real. Para ello hay que marcar la casilla “*Enable*”. El tiempo de ejecución del modelo coincidirá con el reloj del sistema de la forma más fiel posible, ralentizando la simulación si fuese necesario. También es posible acelerar esta ejecución indicando en “*Speedup*” cuántas veces más rápido que el reloj del sistema deberá ejecutarse la simulación. Puesto que los procesos hidráulicos que toman lugar en la planta multiprocesos son en general muy lentos, se ha optado por ejecutar la simulación 3 veces más rápido (se puede observar este valor en el propio icono del bloque). Este parámetro de “*Speedup*” debe ser un entero y no puede ser utilizada ninguna variable del modelo para definirlo.
- Además, hay que tener en cuenta que los parámetros de control en tiempo real no garantizan un comportamiento en tiempo real. Si el modelo funciona más lentamente que el tiempo real, se producirá un error de incumplimiento con respecto a la latencia. Como se vio anteriormente, es posible ajustar el comportamiento del programa a este tipo de eventos, provocando un error o una simple advertencia según lo importante que sea esta violación de la latencia en el modelo.
- **Mostrar pseudo puerto de latencia en tiempo real** (“*Show pseudo real-time latency port*”): Desactivado (por defecto)
- Si se activa, saldrá un puerto por el bloque que permite comprobar la pseudo latencia en tiempo real de la simulación. Esta pseudo latencia en tiempo real se corresponde con el tiempo de espera del reloj del sistema durante cada paso. Si este valor es negativo, la simulación se ejecuta más lentamente que el tiempo real.

## 2.6.2 Bloque OPC Read

El bloque OPC Read permite la lectura de los datos de uno o más elementos del servidor OPC. La operación de lectura se puede realizar de forma síncrona (desde la caché de datos o el dispositivo) o asíncrona (directamente desde el dispositivo).

Es imprescindible para poder usar este bloque añadir al modelo el bloque OPC Configuration.

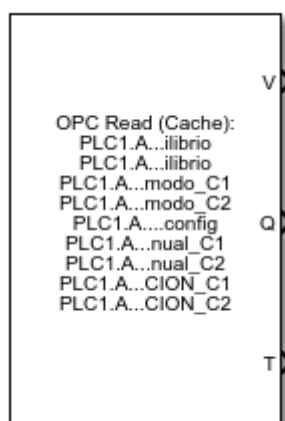


Figura 2.11: Bloque OPC Read

- **Librería:** *OPC Toolbox*
- **Puertos:**
  - **V:** puerto de salida con la señal de todos los datos de los elementos solicitados. Es posible separar estos datos para modificar el valor de las variables que se deseen a partir de un bloque “*Demux*”.
  - **Q:** puerto de salida opcional para los identificadores (IDs) de calidad.
  - **T:** puerto de salida con las marcas de tiempo asociadas a los valores de los datos de las otras dos salidas. Esta marca de tiempo puede emitirse como una fecha (hora real) o como el tiempo transcurrido desde el comienzo de la simulación (en segundos).
- **Parámetros:**
  - **Importar desde el Workspace** (“*Import from Workspace*”)

Permite importar la configuración del bloque OPC Read desde un objeto *dagroup* en el *Workspace*. El tipo de cliente, los identificadores (IDs) de los elementos y el tiempo de muestreo se actualizarán en función de las propiedades del grupo importado. El tipo de datos del puerto V también se establecerá si todos los elementos del grupo tienen la misma propiedad *DataType*.
  - **Cliente** (“*Client*”)

Define el cliente OPC asociado a este bloque. Se pueden agregar clientes adicionales a la lista mediante el botón “*Configure OPC Clients*”.
  - **Identificadores de los elementos** (“*Item IDs*”)

Muestra la lista de elementos cargados en el servidor para su lectura. Se pueden añadir elementos a la lista mediante la opción “*Add items*” o eliminarlos mediante “*Delete*”. También se pueden reordenar los elementos de la lista subiéndolos (“*Move up*”) o bajándolos (“*Move down*”). El orden de los elementos determina el orden de sus valores en las salidas del bloque.
  - **Modo de lectura** (“*Read Mode*”): Síncrono (caché)

Define el modo de lectura que empleará el bloque. Las opciones disponibles son asíncrono y síncrono (caché o dispositivo). Las lecturas síncronas tienen más costes en la ejecución que las asíncronas, pero generalmente son más fiables.
  - **Tiempo de muestreo** (“*Sample time*”): 0.5 s

Define el tiempo de muestreo para las lecturas del bloque. Si las lecturas son síncronas, los datos se leen desde el servidor OPC en el tiempo de muestreo especificado y, si son asíncronas, los ajustes en el tiempo de muestreo definen la tasa de actualización de los eventos de cambio de datos.
  - **Tipo de datos del puerto de valores** (“*Value port data type*”): Double (por defecto)

Define el tipo de datos para la salida del puerto V. El servidor OPC será el responsable de convertir todos los datos al tipo requerido.
  - **Mostrar puerto Q** (“*Show quality port*”): Activado (por defecto)

Si se activa esta opción, los identificadores de calidad de todos los elementos se extraen en el segundo puerto como un vector de enteros de 16 bits sin signo. Se puede utilizar el bloque “*OPC Quality Parts*” para separar el identificador de calidad en distintos componentes.
  - **Mostrar puerto T** (“*Show timestamp port*”): Activado (por defecto)

Si se activa esta opción, las marcas de tiempo de los elementos de los dos primeros puertos se generarán como un vector tipo double en el tercer puerto. Se puede elegir que estos datos aparezcan como una fecha real o como tiempo transcurrido desde el inicio de la simulación (en segundos).



### 2.6.3 Bloque OPC Write

El bloque OPC Write permite escribir datos en uno o más elementos del servidor OPC. Esta operación de escritura se podrá realizar tanto de forma síncrona como asíncrona.

Es imprescindible para poder usar este bloque añadir al modelo el bloque OPC Configuration.

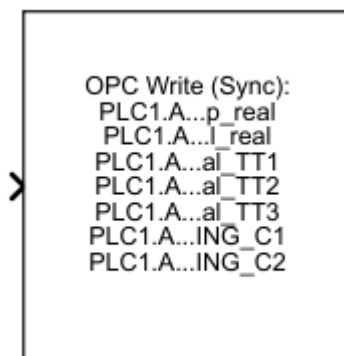


Figura 2.12: Bloque OPC Write

- **Librería:** *OPC Toolbox*
- **Puertos:** uno. En el puerto de entrada se introducirá una señal con el valor de las variables que será escrito en los elementos correspondientes de la lista de símbolos definida dentro del bloque.
- **Parámetros:**
  - **Importar desde el Workspace** (“*Impot from Workspace*”)

Permite importar los ajustes del bloque OPC Write desde un objeto *dagroup* en el *Workspace*. El tipo de cliente, los identificadores (IDs) de los elementos y el tiempo de muestreo se actualizarán en función de las propiedades del grupo importado.
  - **Cliente** (“*Client*”)

Define el cliente OPC asociado a este bloque. Se pueden agregar clientes adicionales a la lista mediante el botón “*Configure OPC Clients*”.
  - **Identificadores de los elementos** (“*Item IDs*”)

Muestra la lista de elementos del servidor especificado cuyos valores podrán ser sobrescritos. Se pueden añadir elementos a la lista mediante la opción “*Add items*” o eliminarlos mediante “*Delete*”. También se pueden reordenar los elementos de la lista subiéndolos (“*Move up*”) o bajándolos (“*Move down*”). El orden de los elementos determina el orden de sus valores en la entrada del bloque.
  - **Modo de escritura** (“*Write mode*”): Síncrono

Define el modo de escritura del bloque. Las opciones disponibles son asíncrono y síncrono. Las escrituras síncronas tienen más costes en la ejecución que las asíncronas, pero generalmente son más fiables.
  - **Tiempo de muestreo** (“*Sample time*”): 0 (modo continuo por defecto)

Define el tiempo de muestreo del bloque que determina cada cuanto se sobrescriben los datos sobre los elementos del servidor. Se puede especificar 0 para el modo continuo, o -1 para emplear el tiempo de muestreo del bloque conectado al puerto de entrada de OPC Write.

## 3 SIMULACIÓN, SCADA Y PLC

---

Una vez ha sido descrita la planta multiprocesos real y se ha establecido como funcionan los servidores *OPC* para realizar la comunicación, se va a proceder a analizar los bloques utilizados en el programa en *Matlab* que emularan los distintos elementos de la planta. Se indicará dónde encontrarlos, de qué tipo son, qué puertos poseen, cómo se han parametrizado y cuáles son sus restricciones y limitaciones. A su vez, se van a desglosar las POU's que componen el programa en *Codesys*: los bloques de PID utilizados para el autómatas, las pantallas de visualización que representan un SCADA de la planta y el panel de operario pertinente, o los códigos auxiliares en *ladder* para que los botones y palancas de la visualización funcionen correctamente, entre otros.

### 3.1 Simulación de la planta utilizando los bloques de *Simscape*

#### 3.1.1 Descripción y funcionamiento

Según la propia página de producto de *Matlab* [3] sobre *Simscape*, se trata de una herramienta que permite crear rápidamente modelos de sistemas físicos dentro del entorno de *Simulink*. Con *Simscape*, se pueden crear modelos de componentes físicos basados en conexiones físicas reales que se integran directamente con diagramas de bloques y otros paradigmas de modelado. De esta forma, es posible modelar sistemas tales como motores eléctricos, rectificadores de puente, actuadores hidráulicos, sistemas de refrigeración o, como en este proyecto, plantas multiprocesos con distintos parámetros a controlar, todo con el ensamblaje de los componentes fundamentales en un esquema. Existen también otros productos complementarios de *Simscape* que proporcionan más capacidad de análisis y componentes más complejos.

*Simscape* ayuda a desarrollar sistemas de control y a probar el rendimiento a nivel de sistema. Puede crear modelos de componentes personalizados con el lenguaje basado en *Matlab* de *Simscape*, que permite la creación basada en texto de componentes, dominios y librerías de modelado físico. También puede parametrizar sus modelos mediante variables y expresiones de *Matlab*, así como diseñar sistemas de control para su sistema físico en *Simulink*. Para desplegar sus modelos en otros entornos de simulación, como sistemas de tipo *hardware-in-the-loop* (HIL), *Simscape* soporta la generación de código C, así como la comunicación vía *OPC* con otros programas para el paso de datos y variables.

#### 3.1.2 Modelo general de la planta

El modelo en *Matlab* de la planta multiprocesos está diseñado en una plantilla *Simulink* utilizando bloques *Simscape*, y es capaz de simular las configuraciones 1 y 2 de la planta real (ver apdo. 1.4). Para la configuración 1 el objetivo de control será el nivel del depósito contenedor (entre 0 y 44 cm), determinado a través de la regulación de la apertura de una válvula electro neumática y el caudal de agua que deja circular por la planta. La configuración 2, en cambio, dispondrá de un circuito térmico alternativo y se centrará en el control de la temperatura del agua de la planta (entre 5 y 37°C) a través de la regulación del caudal de agua fría que circulará por el circuito secundario del intercambiador de calor.

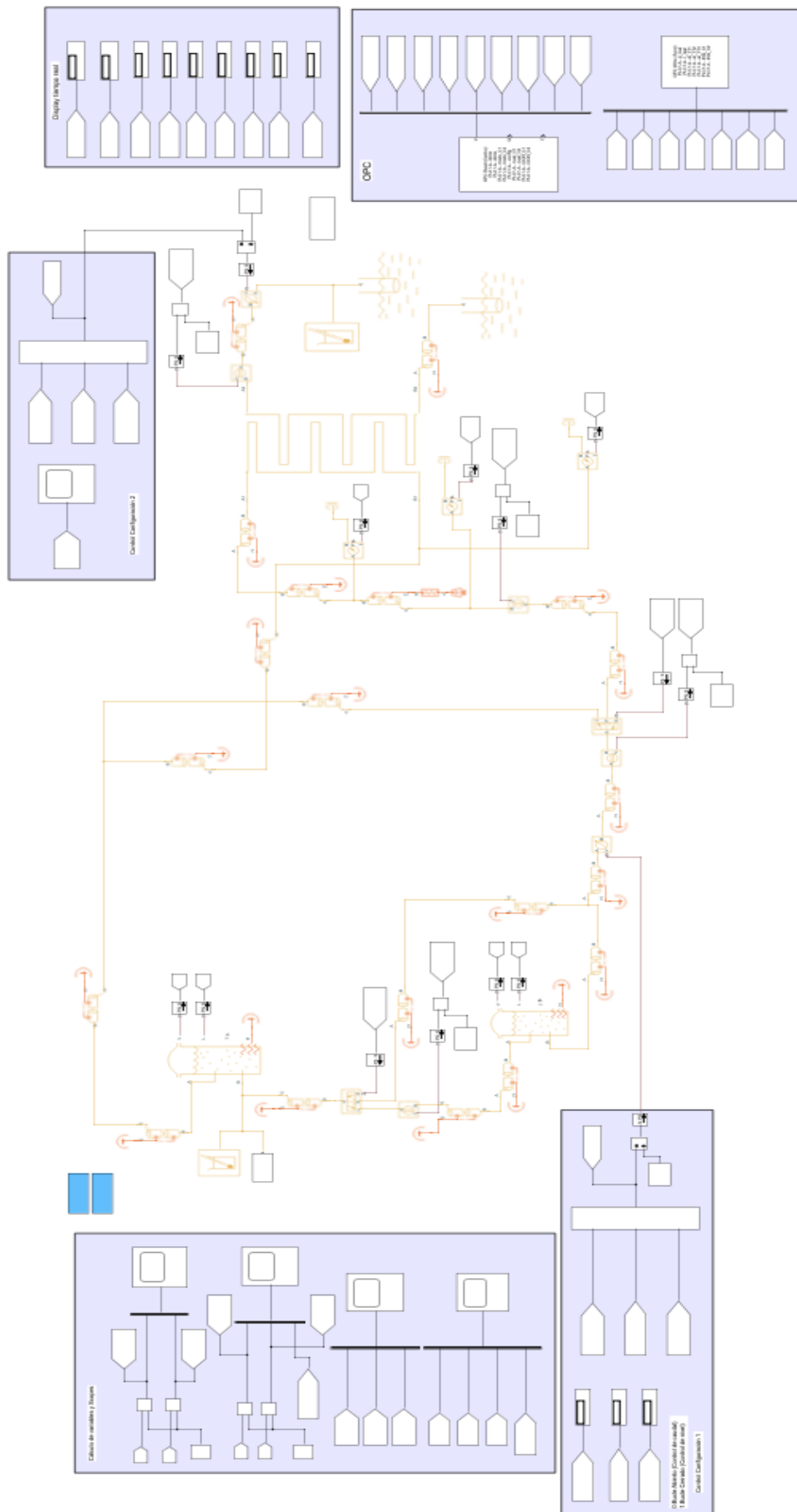


Figura 3.1: Modelo de la planta multiprocesos en Matlab

Se han realizado algunos cambios y simplificaciones con respecto a las configuraciones reales para evitar algunos errores en la simulación y facilitar su diseño:

- El dúo conformado por la bomba de caudal y la válvula electroneumática ha sido sustituido por un único bloque de caudal ideal debido a la complejidad y falta de datos para parametrizar la bomba.
- Tanto las entradas como las salidas de los bloques que representan al depósito de nivel y al colector están situados a una altura 0 con respecto a la base. Esto es debido a un error provocado cuando el nivel de líquido desciende en los tanques por debajo de la altura de sus orificios. Esto produce un fallo fatal que detiene la ejecución.
- No se han incluido los codos de las tuberías debido a la incompatibilidad existente entre los bloques que los simulan y los bloques tipo “*Thermal liquid*” que utilizan el resto de los elementos (ver apdo. 3.1.3.9.1).
- Las dos resistencias térmicas y los dos intercambiadores de calor dispuestos en serie en el circuito térmico han sido sustituidos por una resistencia térmica y un intercambiador de calor equivalentes.
- La válvula de 3 vías VS2 no se ha simulado, sino que las señales de caudal convergen en ese punto y el sistema es capaz de dirigir el flujo de forma adecuada hacia el depósito de nivel. Esto es debido a los numerosos problemas de ejecución que dan los bloques utilizados para simular este elemento.
- El caudal de agua fría que circula por el circuito secundario del intercambiador de calor descarga en un tanque reservorio distinto por simplificación.
- En vez de realizar un *bypass* del caudal de agua fría para que sea solo la resistencia térmica la que intervenga en el intercambio de calor (solicitud de aumento de temperatura), el bloque ideal de caudal que simula la válvula eléctrica de 3 vías regulable devolverá un caudal nulo.
- Se han colocado sensores de caudal y temperatura en algunos puntos distintos a los de la planta real pues se considera que aportan información relevante para el usuario.

Además del propio modelo de la planta multiprocesos con bloques de *Simscape*, el programa se compone de distintos módulos que ejercen varias funciones en la simulación:

- **Cambio de unidades y Scopes.** Este módulo dispone de los bloques *Scope* utilizados para la visualización del comportamiento que ha tenido el sistema durante la simulación. Se han introducido los siguientes *Scopes*:
  - **VOLUMEN (l):** permite visualizar el volumen en litros del depósito de nivel y el depósito colector a través de las variables “VOL\_DEPOSITO” y “VOL\_COLECTOR”, respectivamente. Es preciso convertir antes las unidades de estas variables a litros pues el modelo trabaja con  $m^3$ .
  - **NIVEL (cm):** permite visualizar el nivel en cm tanto del depósito de nivel como del depósito colector a través de las variables “NIV\_DEP\_REAL” y “NIV\_COLEC\_REAL”, respectivamente. También tiene como entrada la variable “NIV\_DEP\_EQUILIBRIO” con el nivel de equilibrio del depósito contenedor, con el fin de cuantificar los escalones y ver cuando se producen, además de poder contemplar el error en régimen permanente de forma más clara. Es necesaria la conversión de estas variables a cm pues el modelo trabaja con m.
  - **CAUDAL (l/h):** permite visualizar el caudal de agua de la planta a partir de 3 sensores de caudal volumétrico situados a la salida de la válvula electroneumática de regulación, en la entrada del depósito colector y a la entrada de la resistencia térmica equivalente, a través de las variables “CAUDAL”, “CAUDAL2” y “CAUDAL3”. Estos caudales estarán en l/h que previamente se han convertido de  $m^3/s$ , la unidad que utiliza el modelo de la planta.
  - **TEMPERATURA:** permite visualizar la temperatura del agua en distintos puntos del circuito térmico de la planta donde se han colocado sensores de temperatura. En concreto, antes de la resistencia térmica equivalente, entre esta y el intercambiador de calor equivalente y a la salida de este, utilizando el valor de las variables “TT1”, “TT2” y “TT3”, respectivamente. Será la medida de “TT2” la que se utilice como referencia para el control de la temperatura de la planta. También se podrá visualizar el valor de equilibrio de la temperatura introducida por el operario en el SCADA de *Codesys* a través de la variable “TEMP\_EQUILIBRIO”.

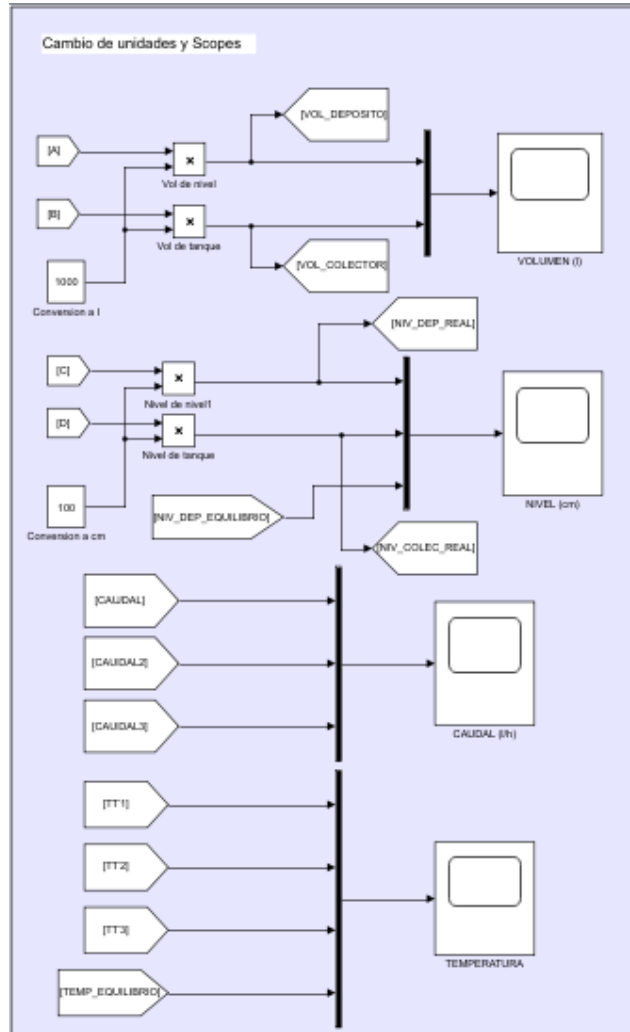


Figura 3.2: Módulo de Cambio de unidades y Scopes

• **Control Configuración 1.**

Para establecer la acción de control sobre el caudal de agua de la planta se tiene este módulo con un bloque "Switch" que permite cambiar entre el modo manual y el automático a través de la variable "MODO\_C1". El caudal designado por el usuario en bucle abierto vendrá representado por la variable "MANUAL\_CAUDAL\_C1", y el establecido por el PLC en bucle cerrado por "PI\_ACTUACION\_C1". Será necesaria la conversión de estas variables a  $m^3/s$ , unidades con las que trabajan los bloques de la simulación. También se disponen de varios bloques "Display" para visualizar estos valores.

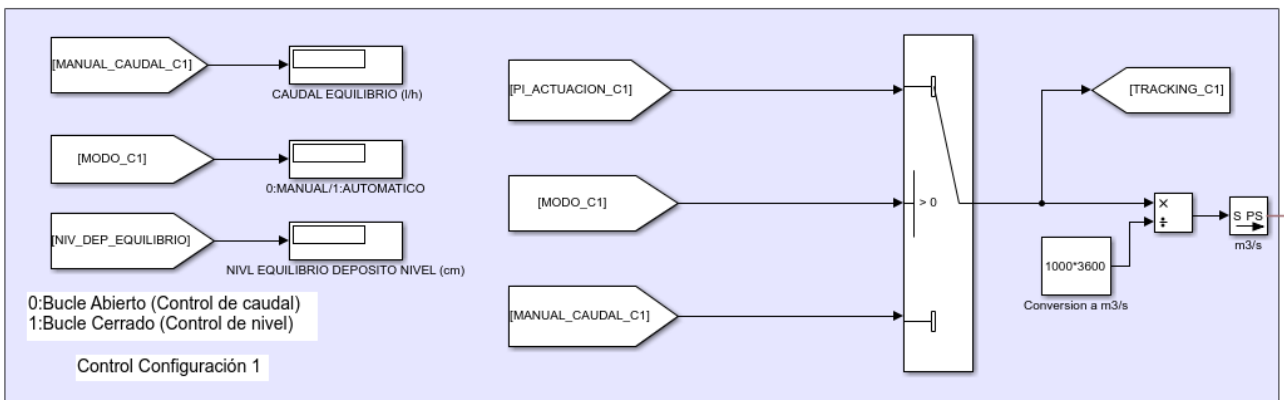
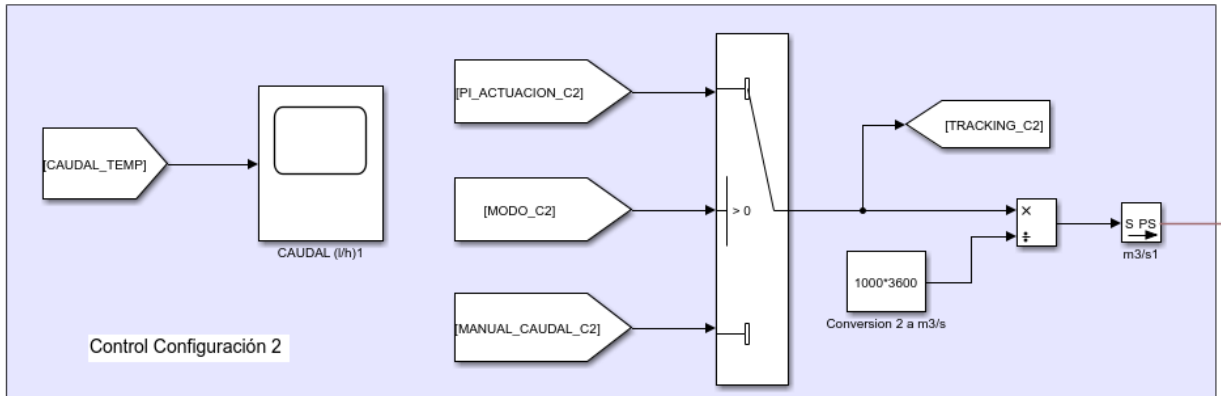


Figura 3.3: Módulo de Control Configuración 1

- **Control Configuración 2.**

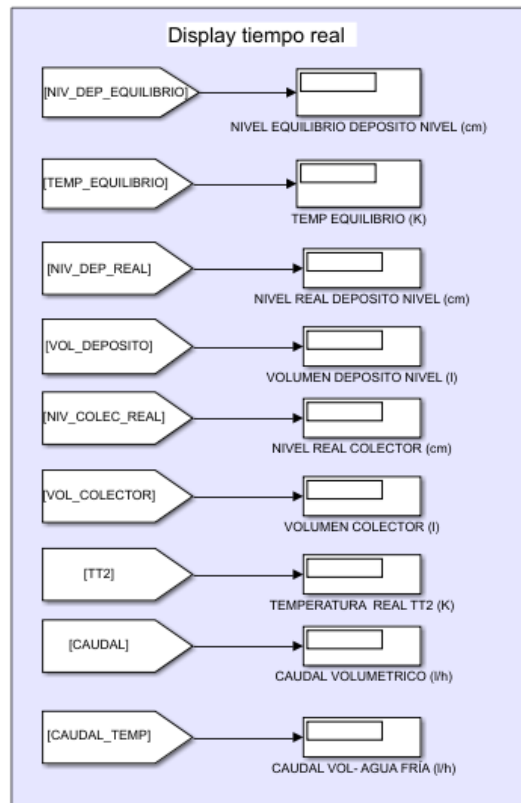
Para establecer la acción de control sobre el caudal de agua fría que recorre el circuito secundario del intercambiador de calor se ha introducido el siguiente módulo con un bloque “Switch” que permite cambiar entre el modo manual y el automático a través de la variable “MODO\_C2”. El caudal de agua fría designado por el usuario en bucle abierto vendrá representado por la variable “MANUAL\_CAUDAL\_C2”, y el establecido por el PLC en bucle cerrado por “PI\_ACTUACION\_C2”. Será necesaria la conversión de estas variables a m<sup>3</sup>/s, unidades con las que trabaja el modelo de la simulación. También se dispone de un bloque “Scope” para analizar la evolución del caudal al finalizar la simulación.



**Figura 3.4:** Módulo de Control Configuración 2

- **Display tiempo real**

En este módulo se han introducido varios *displays* para poder observar la evolución de las variables más relevantes del modelo durante la simulación. Estas variables formarán parte de la comunicación OPC ya sea como elementos de lectura o de escritura, por tanto, también podrán ser visualizadas en el SCADA de Codesys.



**Figura 3.5:** Módulo de Display tiempo real

- **OPC**

El módulo de OPC contiene los tres bloques imprescindibles para la comunicación OPC en *Matlab*: “*OPCConfig*” para la selección del cliente y la configuración de otros ajustes, “*OPCRead*” para la lectura de los elementos cargados en el servidor OPC y “*OPCWrite*” para sobrescribir algunos de estos items con el valor de las variables de *Matlab*. Es posible consultar más información sobre cómo funcionan los bloques OPC en el apdo. 2.6.

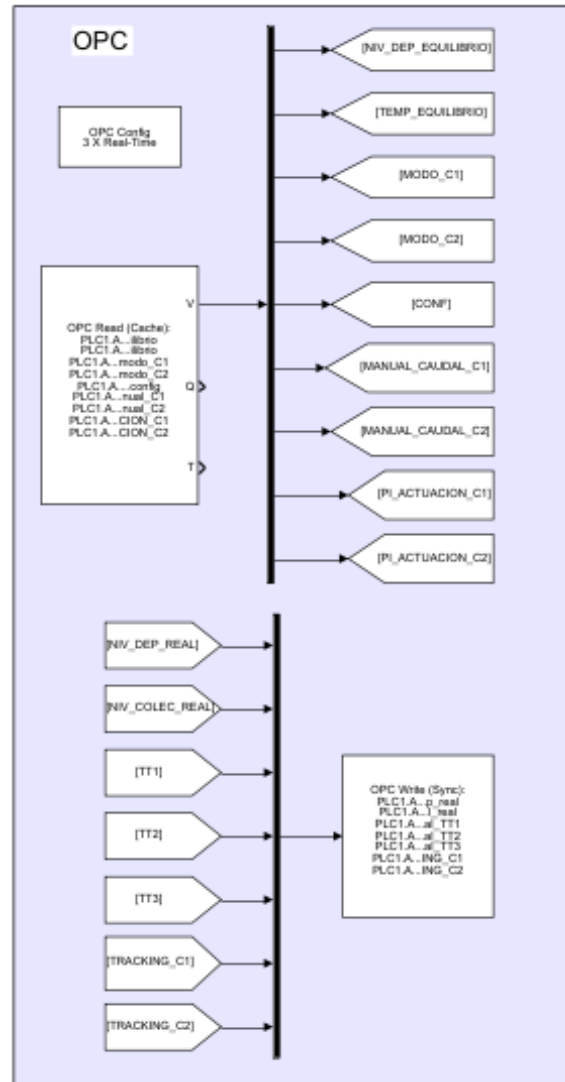


Figura 3.6: Módulo OPC

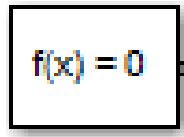
### 3.1.3 Selección de bloques y parametrización

En este apartado, se van a detallar aquellos bloques de *Simulink* y *Simscape* utilizados para recrear la planta multiprocesos como una simulación. Se podrá consultar información sobre las librerías a las que pertenecen, sus puertos de entrada y salida, los valores utilizados para su parametrización, las variables medibles que devuelven y otro tipo de particularidades de su uso.

#### 3.1.3.1 Configuración del solver

Un *solver* aplica un método numérico que permite resolver el conjunto de ecuaciones diferenciales ordinarias que representan un modelo. A través de este cálculo, determina el tiempo del siguiente escalón de la simulación. Para llevar a cabo la simulación, cada red física representada por un diagrama de bloques tipo *Simscape* requiere la información sobre la configuración del *solver*. Con el bloque “*Solver Configuration*” se especifican estos parámetros antes de iniciar la propia simulación.

Cada diagrama de bloques tipo *Simscape*, que sea topológicamente distinto, precisa de un bloque “*Solver Configuration*” conectado a él.



**Figura 3.7:** Bloque “*Solver Configuration*”

- **Librería:** *Utilities*
- **Puertos:** uno. Se puede conectar a cualquier punto de la red física para aplicar los ajustes del *solver* a toda la simulación.
- **Parámetros:**
  - **Iniciar la simulación desde el punto de equilibrio** (“*Start simulation from steady state*”): Desactivado (opción por defecto)
 

Al activar esta opción el *solver* intenta encontrar el punto de equilibrio que resultaría si las entradas se mantuvieran constantes durante un tiempo lo suficientemente prolongado, a partir del estado inicial obtenido en base al cálculo de las propias condiciones iniciales. En el bloque simulado, esta opción se encuentra desactivada, pues se parte del punto de equilibrio (que corresponde a un nivel de 10 cm en el depósito de nivel) al ejecutar la simulación, aplicando un valor inicial de caudal determinado.
  - **Tolerancia de consistencia** (“*Consistency tolerance*”):  $10^{-9}$  (valor por defecto)
 

Este parámetro afecta al *solver* no lineal utilizado para calcular las condiciones iniciales y para la inicialización transitoria. Determina con qué precisión se deben satisfacer las restricciones algebraicas al principio de la simulación y después de cada evento de tipo discreto (discontinuidades, paradas bruscas, etc.). Si se ajusta el valor de la tolerancia (disminuyéndola) se obtendrá una simulación temporalmente más fiable, y al relajarla (aumentándola) se reducirá el tiempo de cálculo o permitirá obtener una solución en caso de que las condiciones iniciales no converjan.
  - **Usar *solver* local** (“*Use local solver*”): Desactivado (opción por defecto)
 

Permite utilizar un *solver* local (*Backward Euler* o *Trapezoidal Rule*) con un tiempo de muestreo especificado. De esta forma los estados de la red física, que en cualquier otro caso son de tipo continuo, pasan a representarse de forma discreta.
  - **Usar iteraciones en la consistencia a tiempo de ejecución fijo** (“*Use fixed-cost runtime consistency iterations*”): Desactivado (valor por defecto)
 

Permite realizar una inicialización transitoria a un coste de computación fijo. Se puede especificar el número máximo de iteraciones no lineales y de modo para la inicialización transitoria. En caso de que esté desactivado, el sistema utiliza un algoritmo más robusto que requiere más tiempo.
  - **Álgebra lineal** (“*Linear Algebra*”): *Sparse* (opción por defecto)
 

Especifica como el *solver* trabaja con las matrices. Se puede elegir *Sparse* o *Full*.
  - **Carga máxima de memoria para los retrasos** [kB] (“*Delay memory budget*”): 1024 kB (valor por defecto)
 

Permite especificar la carga máxima de memoria para procesar los retrasos de los modelos simulados que contienen bloques de la librería “*Delays*”, o bloques personalizados tipo *Simscape*. El objetivo de este parámetro es protegerse del intercambio excesivo de memoria. Si se excede este valor, se eliminan los errores de la simulación. Se puede ajustar este valor según los recursos de memoria disponible.



- **Aplicar filtro en las conexiones 1-D/3-D cuando sea necesario** (“*Apply filtering at 1-D/3-D connections when needed*”): Activado (opción por defecto)

Opción solo aplicable a modelos que utilicen los bloques de *Simscape Multibody* (2ª generación). Permite aplicar automáticamente un filtro de entrada a la señal del bloque “*Simulink-PS Converter*” para obtener una derivada adicional que permita que la red se resuelva. El parámetro “constante de tiempo de filtrado” (*Filtering time constant*) proporciona la constante de tiempo para el retardo provocado.

### 3.1.3.2 Ajustes del líquido térmico

Toda red tipo *thermal liquid* necesita la conexión del bloque “*Thermal Liquid Settings*” a ella para poder configurar los parámetros del líquido térmico que se quiera utilizar. Estos ajustes no se aplican a un solo elemento, sino que afectan a las propiedades de toda la red. Para el agua fría del circuito secundario del intercambiador de calor será necesario otro bloque de configuración independiente, pues pertenece a una red térmica diferente.



**Figura 3.8:** Bloque “*Thermal Liquid Settings*” para ajustes del líquido térmico

Entre las propiedades que es posible modificar con este bloque están:

- **Propiedades termodinámicas:** densidad, energía interna específica y calor específico.
- **Propiedades derivativas:** módulo de masa y coeficiente de expansión térmica.
- **Propiedades de transporte:** viscosidad cinemática y conductividad térmica.

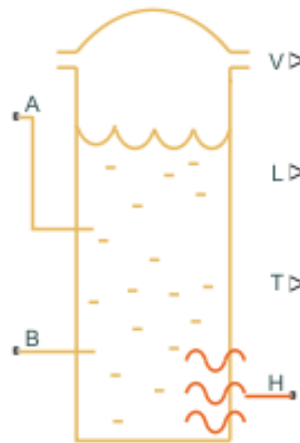
Cada parámetro se encuentra tabulado con relación a los valores de temperatura y presión del líquido, aunque es posible enfrentar estos datos solo a la tabla de temperatura.

Todas las opciones de parametrización se han dejado en sus valores por defecto, pues está configurado de tal forma que simula las propiedades del agua en estado líquido (fluido de trabajo de la planta multiprocesos).

### 3.1.3.3 Depósito de nivel

Para simular el depósito de nivel se ha utilizado el bloque “*Tank (TL)*”. Este permite modelar un contenedor de líquido térmico con un volumen de fluido variable. La presión absoluta del volumen de líquido se supone constante e igual al valor especificado.

El depósito puede intercambiar energía con su entorno, permitiendo que su temperatura y presión internas evolucionen con el tiempo. La transferencia de calor se produce tanto por convección, ya que el líquido entra y sale del depósito, como por conducción, debido a la energía térmica que fluye a través de las paredes del depósito y del propio líquido en las entradas de este.



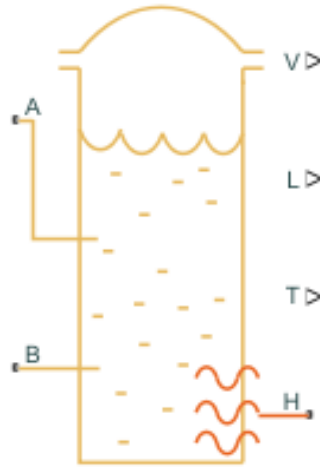
**Figura 3.9:** Bloque “Tank (TL)” para Depósito de nivel

- **Librería:** *Thermal Liquid/Tanks & Accumulators*
- **Puertos:**
  - **A:** puerto tipo líquido térmico que representa la entrada del depósito de nivel.
  - **B:** puerto tipo líquido térmico que representa la salida del depósito de nivel.
  - **V:** puerto de salida para la señal física que permite medir el volumen de líquido en el depósito.
  - **L:** puerto de salida para la señal física que permite medir el nivel de líquido en el depósito.
  - **T:** puerto de salida para la señal física que permite medir la temperatura del líquido en el depósito.
  - **H:** puerto tipo térmico que representa la transferencia de calor a través de la pared del depósito.
- **Supuestos y limitaciones:**
  - La presión del depósito es constante y uniforme en todo el volumen. La elevación del depósito solo afecta a los cálculos de la presión de entrada.
  - El momento del líquido se pierde en la entrada del depósito debido a la repentina expansión del volumen de este.
- **Parámetros:**
  - **Ajustes de la presurización** ("*Pressurization specification*"): Presión atmosférica  
Tipo de presurización del depósito a elegir entre presión atmosférica para un depósito ventilado, o especificando la presión para un depósito de presión constante personalizado.
  - **Capacidad máxima del depósito** ("*Maximum tank capacity*"):  $(\pi \times 100 \times 44) \text{ cm}^3$   
Volumen de líquido en el depósito en un estado de llenado completo.
  - **Parametrización del volumen del depósito** ("*Tank volumen parametrization*"): Área transversal constante (opción por defecto)  
Parametrización para el cálculo del volumen de líquido térmico en función del nivel del depósito, a elegir entre área transversal constante y datos tabulados. Con la primera opción, se establece el volumen de líquido térmico igual al producto del nivel del depósito y el área transversal. Con la opción de datos tabulados, se especifica un volumen de líquido en función del nivel del depósito, como por ejemplo para modelar un depósito de geometría arbitraria.
  - **Área de la sección transversal del depósito** ("*Tank cross-sectional area*"):  $(\pi \times 100) \text{ cm}^2$   
Se supone uniforme a lo largo de la altura del depósito.

- **Vector de alturas para las entradas A y B** (“*Heigth vector for inlets A and B*”): [0,0] cm  
Aunque la entrada A del depósito en la planta multiprocesos real se encuentra en la parte superior de este, es decir, a 44 cm, ha sido necesario establecer la entrada en la base. Esto se debe a que un descenso del nivel de líquido por debajo de alguno de sus orificios provoca un error en la simulación.
- **Vector de la sección transversal para las entradas A y B** (“*Cross-sectional área vector for inlets A and B*”):  $[\frac{\pi \times 20,4^2}{4}, \frac{\pi \times 20,4^2}{4}] \text{ mm}^2$   
Vector con las secciones transversales de los conductos A y B de entrada y salida del líquido de la planta.
- **Aceleración gravitatoria** (“*Gravitational acceleration*”):  $9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$  (valor por defecto)  
Valor constante de la gravedad para los cálculos de la descarga libre.
- **Variables:**
  - **Nivel de líquido** (“*Liquid level*”): 10 cm (prioridad alta)  
Nivel del volumen de líquido térmico en el depósito al inicio de la simulación.
  - **Volumen de líquido** (“*Volume of liquid*”):  $(\pi \times 100 \times 10) \text{ cm}^3$  (prioridad alta)  
Volumen de líquido térmico en el depósito al inicio de la simulación.
  - **Masa del líquido** (“*Mass of liquid*”): - (sin prioridad)  
Masa de líquido térmico en el depósito al inicio de la simulación.
  - **Temperatura del volumen de líquido** (“*Temperature of liquid volume*”): 293,15 K (prioridad baja)  
Temperatura del líquido térmico en el depósito al inicio de la simulación.

### 3.1.3.4 Depósito colector

En la simulación del depósito colector también se ha utilizado el bloque “Tank (TL)”. Para ver su funcionamiento en detalle ver apdo. 3.1.3.3.



**Figura 3.10:** Bloque “Tank (TL)” para Depósito colector

- **Librería:** *Fluid Network Interfaces / Heat Exchangers*
- **Puertos:**
  - **A:** puerto tipo líquido térmico que representa la entrada del depósito colector.
  - **B:** puerto tipo líquido térmico que representa la salida del depósito colector.
  - **V:** puerto de salida para la señal física que permite medir el volumen de líquido en el depósito.
  - **L:** puerto de salida para la señal física que permite medir el nivel de líquido en el depósito.
  - **T:** puerto de salida para la señal física que permite medir la temperatura del líquido en el depósito.
  - **H:** puerto tipo térmico que representa la transferencia de calor a través de la pared del depósito.
- **Parámetros:**
  - **Ajustes de la presurización (“Pressurization specification”):** Presión atmosférica  
Tipo de presurización del depósito, a elegir entre presión atmosférica y una presión constante determinada.
  - **Capacidad máxima del depósito (“Maximun tank capacity”):** 75 L  
Volumen de líquido en el depósito cuando se encuentra completamente lleno.
  - **Parametrización del volumen del depósito (“Tank volumen parametrization”):** Datos tabulados – Volumen vs. Nivel  
Se especifica el volumen de líquido en función del nivel del depósito colector. Dado que el depósito colector es prismático, y no cilíndrico, se ha optado por esta opción.
  - **Vector del nivel del depósito (“Liquid level vector”):** Ver **Tabla 3.1**  
El nivel del depósito se corresponde con la altura del líquido térmico con respecto a la base de este. El bloque utiliza el vector para construir una tabla de consulta de volumen en 1-D.
  - **Vector de volumen del líquido (“Liquid volume vector”):** Ver **Tabla 3.1**  
Vector de volúmenes de líquido térmico con relación a los valores especificados en el vector del nivel del depósito.

Nivel del depósito (m)	Volumen de líquido (L)
0,00	0.0000
0,02	4.4128
0,04	8.8256
0,06	13.2384
0,08	17.6512
0,10	22.0640
0,12	26.4768
0,14	30.8896
0,16	35.3024
0,18	39.7152
0,20	44.1280
0,22	48.5408
0,24	52.9536
0,26	57.3664
0,28	61.7792
0,30	66.1920
0,32	70.6048
0,34	75.0176

**Tabla 3.1:** Nivel del depósito colector vs. volumen de líquido

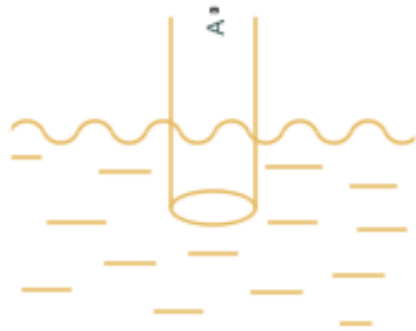
- **Vector de alturas para las entradas A y B** (“*Height vector for inlets A and B*”): [0,0] cm  
Se sitúan tanto la entrada como la salida A y B en la base del depósito para evitar el error mencionado anteriormente.
- **Vector de la sección transversal para las entradas A y B** (“*Cross-sectional area vector for inlets A and B*”):  $[\frac{\pi \times 20,4^2}{4}, \frac{\pi \times 20,4^2}{4}] \text{ mm}^2$   
Vector con las secciones transversales de los conductos A y B de entrada y salida del líquido de la planta.
- **Aceleración gravitatoria** (“*Gravitational acceleration*”):  $9,81 \frac{m}{s^2}$  (valor por defecto)  
Valor constante de la gravedad para los cálculos de la descarga libre.
- **Variables:**
  - **Nivel de líquido** (“*Liquid level*”): 220 mm (prioridad alta)
  - **Volumen de líquido** (“*Volume of liquid*”):  $(560 \times 394 \times 220) \text{ mm}^3$  (prioridad alta)

- **Masa del líquido** (“*Mass of liquid*”): - (sin prioridad)
- **Temperatura del volumen de líquido** (“*Temperature of liquid volume*”): 293,15 K (prioridad baja)

### 3.1.3.5 Tanque de agua fría

Para simular el tanque de agua fría (5°C), utilizado para la regulación continua de temperatura de la configuración 2, se ha empleado el bloque “*Reservoir (TL)*”. Este bloque representa un tanque o reservorio de volumen infinito a una presión y temperatura fijas. La temperatura de su entrada/salida (según uso) depende de la dirección del flujo de líquido. Si el líquido fluye dentro del reservorio, la temperatura de la entrada será la del fluido aguas arriba. Para asegurar un cambio de temperatura suave en la entrada del tanque durante la inversión del flujo de líquido, el bloque permite la conducción de calor a lo largo de una longitud igual al diámetro efectivo de la tubería. También se puede utilizar el bloque como punto de referencia para mediciones relativas de la presión y la temperatura del tanque.

Para simplificar la simulación, el caudal de agua que sale del intercambiador de calor descarga en un tanque diferente, modelado también con un bloque “*Reservoir (TL)*”.

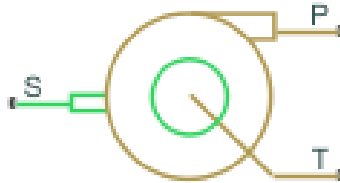


**Figura 3.11:** Bloque “*Reservoir (TL)*” para Tanque de agua fría

- **Librería:** *Thermal liquid/Elements*
- **Puertos:**
  - A: salida del líquido térmico.
- **Supuestos y limitaciones:**
  - La temperatura del tanque es constante.
- **Parámetros:**
  - **Ajustes de la presurización del tanque** (“*Reservoir pressure specification*”): Presión atmosférica (opción por defecto)  
A seleccionar entre presión atmosférica o una presión especificada.
  - **Temperatura del tanque** (“*Reservoir temperature*”): 278 K  
Temperatura determinada para el líquido del tanque que permanecerá constante durante la simulación.
  - **Área de la sección transversal en el puerto A** (“*Cross-sectional area at port A*”):  $(\pi \times \frac{20,4^2}{4}) \text{ mm}^2$   
El bloque utiliza esta área para determinar la longitud característica de la tubería a lo largo de la cual se produce la conducción de calor.

### 3.1.3.6 Bomba

En la planta multiprocesos real, el suministro de agua por todo el circuito hidráulico se realiza a través de una bomba, que trabaja a una potencia constante, mientras que el control del propio caudal se lleva a cabo a partir de la regulación del grado de apertura de la válvula electroneumática. En la biblioteca de *Simscape* “*Pumps and Motors*” se puede encontrar el bloque “*Centrifugal pump*”, que simularía la bomba real.



**Figura 3.12:** Bloque Centrifugal pump

Para parametrizar el modelo se pueden elegir varias opciones:

- **Aproximación con polinomio.** Proporcionando los valores para los coeficientes del polinomio de aproximación.
- **Mediante dos características 1-D: P-Q y N-Q.** Proporcionando los datos tabulados del diferencial de presión P y la potencia de frenado N frente a la potencia de la bomba Q.
- **Mediante dos características 2-D: P-Q-W y N-Q-W.** Proporcionando los datos tabulados del diferencial de presión P y la potencia de frenado N frente a la potencia de la bomba Q a diferentes velocidades angulares W.

El problema es que los datos proporcionados por la ficha técnica del fabricante son insuficientes para parametrizar la bomba. Se ha optado, como alternativa, sustituir la bomba y la válvula electroneumática por un bloque ideal de caudal que permita, de forma similar, hacer el control del caudal. El bloque que se ha utilizado para ello ha sido “*Controlled Volumetric Flow Rate Source (TL)*”.



**Figura 3.13:** Bloque “Controlled Volumetric Flow Rate Source (TL)” para Bomba y Válvula

Este bloque genera un flujo volumétrico asignado variable a lo largo del tiempo a través de su puerto de salida. Este flujo especificado se mantiene invariable independientemente de la diferencia de presión entre la entrada y la salida.

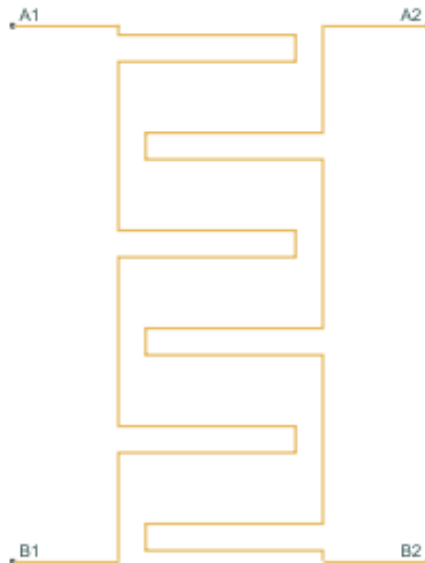
Los puertos que representan la entrada y la salida cambian con el signo del caudal. Si el caudal es positivo, el líquido fluye desde el puerto A al B; y si el caudal es negativo, fluye de manera inversa.

- **Librería:** *Thermal Liquid/Sources*
- **Puertos:**
  - **A:** puerto tipo líquido térmico que funcionará como entrada del bloque.
  - **B:** puerto tipo líquido térmico que funcionará como salida del bloque.
  - **V:** puerto de entrada de la señal física que especifica el flujo volumétrico que circulará por la planta.

- **Supuestos y limitaciones:**
  - La fuente de caudal es ideal. Las pérdidas por fricción se consideran despreciables.
  - La fuente de caudal es adiabática. El intercambio de calor con el entorno se considera despreciable.
  - El trabajo realizado se considera isoentrópico, es decir, reversible y adiabático.
- **Parámetros:**
  - **Área de la sección transversal en los puertos A y B** ("Cross-sectional area"):  $(\pi \times \frac{20,4^2}{4}) \text{ mm}^2$   
Se suponen idénticas las dos áreas de la sección transversal de los puertos A y B.
  - **Longitud longitudinal característica** ("Characteristic longitudinal length"): 0,1 mm  
Distancia promedio que el fluido atraviesa en la fuente antes de llegar a la salida. Al considerarse un bloque ideal, se utiliza un tamaño mínimo para poder ser introducido en la simulación.

### 3.1.3.7 Intercambiador de calor

Para simplificar el modelo, los dos intercambiadores de calor dispuestos en serie de la planta multiprocesos real se han simulado con un único intercambiador equivalente representado por el bloque "Heat Exchanger (TL-TL)", en el que el fluido de trabajo para los dos circuitos hidráulicos del intercambiador es tipo "thermal liquid".



**Figura 3.14:** Bloque "Heat Exchanger (TL-TL)" para Intercambiador de calor

Este bloque permite modelar la transferencia de calor y la dinámica de fluidos de un intercambiador de calor situado entre dos redes de líquidos térmicos diferentes. Los ajustes de cada líquido térmico se tienen que especificar por separado; estos no se mezclan ni cambian de fase.

Se pueden seleccionar dos variantes distintas para el bloque, que dan pie a ecuaciones, parametrizaciones y entradas necesarias diferentes. Haciendo clic derecho en el bloque y seleccionando *Simscape* > Opciones de bloque, se puede elegir:

- *Modelo simple*. Realiza la simulación a partir de los datos tabulados que relacionan el caudal másico en las entradas con la caída de presión entre ellas y con el factor de disipación específico del intercambiador. La transferencia de calor se determina a partir del valor del factor de disipación específico en las condiciones de funcionamiento simuladas.



- *Modelo E-NTU*. Realiza la simulación a partir de los datos detallados sobre la geometría de los componentes, la configuración del flujo y distintas propiedades de actuación, como la resistencia térmica, el coeficiente de pérdida de presión y el factor de ensuciamiento (*fouling factor*). La transferencia de calor se determina, en parte, a través de un parámetro conocido como “número de unidades de transferencia” o NTU.

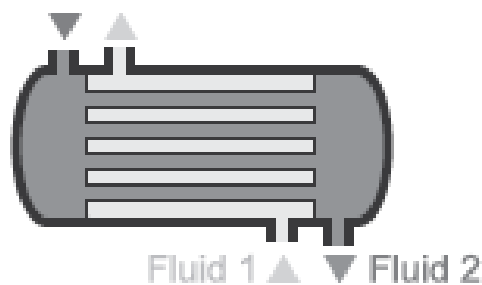
Debido a la poca información disponible por parte de la ficha técnica del fabricante, se ha optado por una simulación aproximada a partir de la geometría del intercambiador utilizando el modelo E-NTU. Este modelo ofrece a su vez tres tipos de configuraciones comunes:

- Tubos concéntricos con flujos paralelos y contraflujos



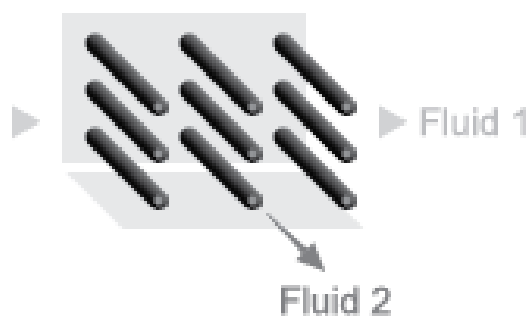
**Figura 3.15:** Configuración “Tubo concéntrico”

- Carcasa y tubo con uno o varios pasos en el lado del tubo



**Figura 3.16:** Configuración “Carcasa y tubo”

- Flujos cruzados (flujos mezclados y no mezclados)



**Figura 3.17:** Configuración “Flujo cruzado”

- **Librería:** *Fluid Network Interfaces/Heat Exchangers*

- **Puertos:**

- **A1:** apertura de entrada al intercambiador del líquido térmico 1.
- **B1:** apertura de salida al intercambiador del líquido térmico 1.
- **A2:** apertura de entrada al intercambiador del líquido térmico 2.
- **B2:** apertura de salida al intercambiador del líquido térmico 2.

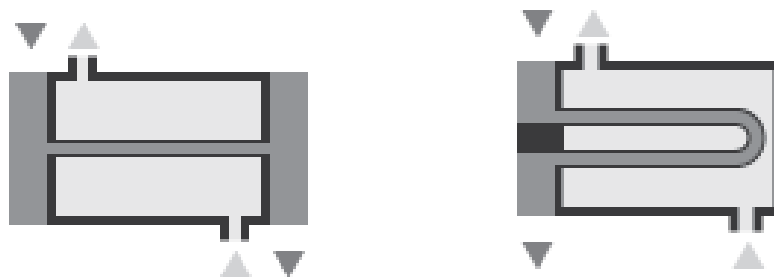
- **Parámetros comunes:**

- **Configuración del flujo** (“*Flow Arrangement*”): Carcasa y tubo

Geometría del flujo que circula a través del intercambiador de calor, a elegir entre las mencionadas anteriormente. También se puede seleccionar una tabla con aquellos datos que permitan configurar el flujo de una forma no proporcionada explícitamente.

- **Número de pasos en el armazón** (“*Number of Shell passes*”): 1 (valor por defecto)

Número de pases que la tubería del intercambiador de calor hace a lo largo de la longitud del armazón entre la entrada y la salida del fluido. Aumentar el número de pases del armazón aumenta el área de transferencia de calor entre los fluidos.



**Figura 3.18:** Una pasada por la carcasa (izquierda) y dos pasadas por la carcasa (derecha)

- **Resistencia térmica de la pared** (“*Wall thermal resistance*”):  $(1,6 \times 10^{-8}) \frac{K}{W}$

Relación temperatura/potencia de la resistencia térmica de la pared entre los dos fluidos del intercambiador.

- **Parámetros de los líquidos térmicos:**

- **Área de flujo libre mínima** (“*Minimum free-flow area*”):

- Agua de la planta:  $(\pi \times \frac{20,4^2}{4}) mm^2$
- Agua fría del tanque:  $(\pi \times \frac{20,4^2}{4}) mm^2$

Área del flujo agregado libre de obstáculos basado en el menor espacio de la tubería o paso de corrugación.

- **Diámetro hidráulico para la pérdida de presión** (“*Hydraulic diameter for pressure loss*”):

- Agua de la planta: 20,4 mm
- Agua fría del tanque: 20,4 mm

Diámetro hidráulico de las tuberías que componen la interfaz del intercambio de calor. El diámetro hidráulico es la relación entre el área de la sección transversal del flujo y el perímetro de la tubería.

- **Volumen de líquido térmico** (“*Thermal liquid volume*”):

- Agua de la planta:  $(\pi \times \frac{20,4^2}{4} \times 500) \text{ mm}^3$
- Agua fría del tanque:  $((450 \times 50 \times 50 - \pi \times \frac{20,4^2}{4}) \times 500) \text{ mm}^3$

Volumen de líquido térmico que ocupa el intercambiador de calor en un momento dado. Este volumen es constante durante la simulación.

- **Límite superior del número de Reynolds del flujo laminar** (“*Laminar flow upper Reynolds number limit*”):

- Agua de la planta: 2000
- Agua fría del tanque: 2000

Valor del número de Reynolds por debajo del cual el flujo es laminar. El flujo pasa a ser transitorio por encima de este número.

- **Límite inferior del número de Reynolds del flujo turbulento** (“*Turbulent flow lower Reynolds number limit*”):

- Agua de la planta: 4000
- Agua fría del tanque: 4000

Valor del número de Reynolds por encima del cual el flujo es turbulento. El flujo pasa a transitorio por debajo de este número.

- **Parametrización para la pérdida de presión** (“*Pressure loss parametrization*”):

- Agua de la planta: Correlación para las tuberías
- Agua fría del tanque: Correlación para las tuberías

Parametrización del cálculo de la pérdida de presión. También se puede utilizar un coeficiente de pérdida constante (como opción más simple), datos tabulados del factor de fricción Darcy vs. número de Reynolds o datos tabulados del número de Euler vs. número de Reynolds.

- **Longitud del recorrido del flujo desde la entrada hasta la salida** (“*Length of flow path from inlet to outlet*”):

- Agua de la planta: 500 mm
- Agua fría del tanque: 450 mm

Distancia recorrida por el fluido desde la entrada hasta la salida del intercambiador.

- **Longitud equivalente de las resistencias locales** (“*Aggregate equivalent length of local resistances*”):

- Agua de la planta: 20 mm
- Agua fría del tanque: 20 mm

Pérdida de presión debida a las resistencias locales como codos, entradas o empalmes, expresada como la longitud equivalente de esas resistencias.

- **Valor total de la rugosidad de la superficie interna** (“*Internal surface absolute roughness*”):

- Agua de la planta:  $(15 \times 10^{-6}) \text{ mm}$  (valor por defecto)
- Agua fría del tanque:  $(15 \times 10^{-6}) \text{ mm}$  (valor por defecto)

Altura media de todos los defectos de la superficie interna del tubo. La rugosidad de la superficie permite el cálculo del factor de fricción en el régimen de flujo turbulento.

- **Factor de forma para la fricción viscosa del flujo laminar** (“*Shape factor for laminar flow viscous friction*”):

- Agua de la planta: 64 (valor por defecto)
- Agua fría del tanque: 64 (valor por defecto)

Constante de proporcionalidad entre la transferencia de calor convectivo y conductivo en el régimen laminar. El factor de forma engloba los efectos de la geometría de todos los elementos en las pérdidas por fricción laminar.

- **Parametrización de la transferencia de calor** (“*Heat transfer parameterization*”):

- Agua de la planta: Correlación para las tuberías
- Agua fría del tanque: Correlación para las tuberías

Parametrización utilizada para calcular la tasa de transferencia de calor entre los fluidos del intercambiador de calor. También se puede utilizar un coeficiente de transferencia de calor constante, datos tabulados del factor de Colburn vs. número de Reynolds o datos tabulados del número de Nusselt vs. número de Reynolds y número de Prandtl.

- **Superficie de transferencia de calor** (“*Heat transfer surface area*”):

- Agua de la planta:  $(\pi \times 24,5 \times 500) \text{ mm}^2$
- Agua fría del tanque:  $(\pi \times 24,5 \times 500) \text{ mm}^2$

Superficie equivalente en la que se produce la transferencia de calor entre los fluidos del intercambiador de calor.

- **Longitud del recorrido del flujo para la transferencia de calor** (“*Length of flow path for heat transfer*”):

- Agua de la planta: 500 mm
- Agua fría del tanque: 500 mm

Distancia a lo largo de la cual se produce la transferencia de calor.

- **Número de Nusselt para la transferencia de calor por flujo laminar** (“*Nusselt number for laminar flow heat transfer*”):

- Agua de la planta: 3,66 (valor por defecto)
- Agua fría del tanque: 3,66 (valor por defecto)

Constante de proporcionalidad entre la transferencia de calor convectivo y conductivo en el régimen laminar. Este parámetro permite el cálculo de las tasas de transferencia de calor convectivo en los flujos laminares. El valor apropiado a utilizar depende de la geometría de los elementos del intercambiador.

- **Factor de ensuciamiento** (“*Fouling factor*”):

- Agua de la planta:  $10^{-5} \frac{\text{m}^2 \times \text{K}}{\text{W}}$
- Agua fría del tanque:  $10^{-5} \frac{\text{m}^2 \times \text{K}}{\text{W}}$

Parámetro empírico utilizado para cuantificar el aumento de la resistencia térmica debido a los depósitos de suciedad en la interfaz de transferencia de calor.

- **Estados y condiciones iniciales:**

- **Compresibilidad dinámica del líquido térmico** (“*Thermal Liquid dynamic compressibility*”):
  - Agua de la planta: Desactivado
  - Agua fría del tanque: Desactivado

Opción de modelar la dinámica de la presión dentro del intercambiador de calor. Desactivar este parámetro elimina los términos derivados de la presión de las ecuaciones de conservación de energía y masa de los elementos. La presión dentro del intercambiador de calor se reduce entonces al promedio ponderado de las dos presiones en las entradas.

- **Temperatura inicial del líquido térmico** (“*Thermal Liquid initial temperature*”):
  - Agua de la planta: 293,15 K
  - Agua fría del tanque: 278 K

Temperatura del volumen interno del líquido térmico al comienzo de la simulación.

### 3.1.3.8 Resistencia térmica

Para simular las dos resistencias térmicas colocadas en serie empleadas por la planta multiprocesos para aumentar la temperatura del fluido en la configuración 2, se ha utilizado el bloque “*Thermal resistance*”, emulando una única resistencia equivalente. Este bloque permite modelar la transferencia de calor en términos generalizados, independientemente de si es por conducción, convección, radiación o una combinación de ellas. Tendrá que ir conectado a un bloque de tubería (apdo. 3.1.3.9) por el que circule el caudal de la planta en la configuración 2, así como a una referencia de temperatura, que en este caso será una fuente de temperatura ideal (apdo. 3.1.3.8.1).

La ecuación de transferencia de calor para el bloque de resistencia térmica es:

$$R \cdot Q = \Delta T$$

Donde:

- **R**: resistencia térmica
- **Q**: flujo de calor asignado
- **ΔT**: diferencia de temperatura entre capas



**Figura 3.19:** Bloque “*Thermal resistance*” para Resistencia térmica

- **Librería:** *Simscape / Foundation Library / Thermal / Thermal Elements*
- **Puertos:**
  - **A:** puerto térmico conectado a la referencia de temperatura.
  - **B:** puerto térmico conectado a la tubería asociada.

- **Parámetros:**
  - **Resistencia térmica** (“*Thermal resistance*”):  $0,1 \frac{K}{W}$   
Valor de la resistencia térmica, relación entre temperatura y potencia de esta.
- **Variables:**
  - **Diferencia de temperatura** (“*Temperature difference*”): - (sin prioridad)  
Diferencia de temperatura entre los puertos térmicos A y B.
  - **Flujo de calor asignado** (“*Heat Flow rate*”):  $6 kW$  (prioridad baja)  
Flujo asociado a la potencia térmica de la resistencia térmica equivalente.

#### 3.1.3.8.1 Fuente de temperatura

Asociado a la resistencia térmica es necesario un elemento complementario que establezca su valor de temperatura. Este elemento utilizado como fuente de temperatura será simulado por el bloque “*Temperature Source*”.

El bloque representa una fuente ideal de energía térmica lo suficientemente potente como para mantener la temperatura especificada a su salida, independientemente del flujo de calor consumido por el sistema.



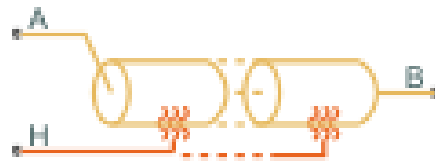
**Figura 3.20:** Bloque “*Temperature Source*” para fuente de temperatura

- **Librería:** *Simscape / Foundation Library / Thermal / Thermal Sources*
- **Puertos:**
  - A: puerto térmico asociado con la salida de la fuente de temperatura.
- **Parámetros:**
  - **Temperatura** (“*Temperature*”):  $310 K$   
Valor absoluto constante de la temperatura a la salida del puerto térmico.

#### 3.1.3.9 Tuberías

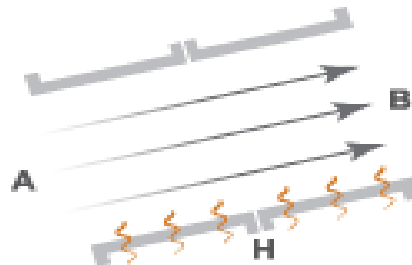
Para la emulación de las tuberías por las que discurre tanto el caudal de la planta como el de agua fría del tanque, se han utilizado los bloques “*Pipe (TL)*”. El bloque modela la dinámica de flujo de un líquido térmico a través de un segmento de tubería o una tubería completa. El modelo de la tubería tiene en cuenta las pérdidas por fricción viscosa y la transferencia de calor por convección con la pared de la tubería. La compresibilidad dinámica, la inercia del fluido y el comportamiento de la pared de la tubería (rigidez o flexibilidad) son características opcionales del modelo que también se pueden aplicar.

La tubería consiste en uno o más segmentos de tubería, cada uno de los cuales comprende un volumen de fluido con distintos estados de presión y temperatura. Estos estados evolucionan de forma dinámica durante la simulación y dependen de los valores iniciales especificados. Las entradas de los estados iniciales pueden ser valores escalares o vectores con tamaños coherentes con el número de segmentos de la tubería. Al aplicar una entrada, el valor especificado se aplica a todos los segmentos de la tubería. Todos los bloques utilizados estarán conformados por un único segmento completo.



**Figura 3.21:** Bloque “Pipe (TL)” para tuberías

- **Librería:** *Thermal Liquid/Pipes & Fittings*
- **Puertos:**
  - **A:** puerto tipo líquido térmico que representa la entrada a la tubería.
  - **B:** puerto tipo líquido térmico que representa la salida de la tubería.
  - **H:** puerto térmico para modelar la transferencia de calor entre la tubería y el ambiente.



**Figura 3.22:** Esquema de funcionamiento del bloque “Pipe (TL)”

- **Supuestos y limitaciones:**
  - El flujo en la tubería está completamente desarrollado.
  - Las tuberías con paredes flexibles son circulares en sección transversal y se expanden solo en dirección radial.
- **Parámetros de configuración:**
  - **Compresibilidad fluidodinámica** (“*Fluid dynamic compressibility*”): Off (opción por defecto)  
Ajuste de compresibilidad dinámica. Si se selecciona On, la densidad del fluido dependerá de la presión y la temperatura; mientras que, si se selecciona Off, se tratará la densidad del fluido como una constante. La compresibilidad dinámica afecta a la respuesta transitoria del fluido en pequeños espacios de tiempo y puede ralentizar la simulación.
  - **Longitud de la tubería** (“*Pipe length*”): Según tubería  
Distancia entre la entrada A de la tubería y la salida B.
  - **Área nominal de la sección transversal** (“*Nominal cross-sectional area*”):  $(\pi \times 20,4^2) \text{ mm}^2$   
Área de la sección transversal de la tubería. Esta área se supone constante a lo largo de la tubería.
  - **Diámetro hidráulico** (“*hydraulic diameter*”): 20,4 mm  
Diámetro de la tubería equivalente si la sección transversal es completamente circular. Todas las tuberías utilizadas tienen una forma perfectamente circular. Para poder seleccionar este parámetro es necesario que la pared de la tubería se establezca en “rígida”.

- **Elevación ganada del puerto A al puerto B** (“*Elevation gain from port A to port B*”): Según tubería  
Cambio de elevación del puerto A al puerto B. El valor de la elevación ganada puede ser positivo o negativo, según si el puerto B se encuentra en una posición superior o inferior con respecto al puerto A respectivamente. Un valor de 0 se corresponde con una tubería horizontal.
- **Aceleración gravitatoria** (“*Gravitational acceleration*”):  $9,81 \frac{m}{s^2}$   
Valor de la constante gravitatoria.
- **Parámetros para la fricción viscosa:**
  - **Parametrización de la fricción viscosa** (“*Viscous friction parameterization*”): Correlación (opción por defecto)  
Método utilizado para el cálculo del factor de fricción viscosa en flujos laminares y turbulentos. Con la opción “Correlación” se calcula automáticamente el factor de fricción viscosa a partir de correlaciones semiempíricas. También se pueden seleccionar Datos tabulados - Factor de fricción Darcy vs. número de Reynolds para proporcionar directamente el factor de fricción viscosa como una tabla de búsqueda unidireccional.
  - **Longitud equivalente de las resistencias locales** (“*Aggregate equivalent length of local resistances*”): Según la tubería  
Pérdida de presión debido a resistencias locales como codos, entradas y empalmes, expresada como la longitud equivalente de estas resistencias.
  - **Rugosidad absoluta de la superficie interna** (“*Internal surface absolute roughness*”):  $(1,5 \times 10^{-5}) m$  (valor por defecto)  
Altura media de todos los defectos superficiales de la superficie interna de la tubería. Este parámetro permite el cálculo del factor de fricción en el régimen de flujo turbulento.
  - **Factor de forma para la fricción viscosa de flujo laminar** (“*Shape factor for laminar flow viscous friction*”): 64 (valor por defecto)  
Constante de proporcionalidad entre la inversa del número de Reynolds y el factor de fricción de Darcy en el régimen de flujo laminar. Este parámetro representa la forma de la sección transversal de la tubería en el cálculo de las pérdidas por fricción laminar. El valor por defecto corresponde a una sección transversal de tubería circular.
  - **Límite superior del número de Reynolds del flujo laminar** (“*Laminar flow upper Reynolds number limit*”): 2000 (valor por defecto)  
El número de Reynolds que separa los regímenes de flujo laminar y transitorio. El flujo es laminar por debajo de este número y transitorio por encima de él.
  - **Límite inferior del número de Reynolds del flujo turbulento** (“*Turbulent flow lower Reynolds number limit*”): 4000 (valor por defecto)  
El número de Reynolds que separa los regímenes transitorio y turbulento. El flujo es transitorio por debajo de este número y turbulento por encima de él.
- **Parámetros para la transferencia de calor:**
  - **Parametrización de la transferencia de calor** (“*Heat transfer parameterization*”): Correlación (opción por defecto)  
Método para la obtención del número de Nusselt en flujos laminares y turbulentos para su uso en cálculos de transferencia de calor. Seleccionando la opción de “Correlación”, se calculará automáticamente el de Nusselt a partir de correlaciones semiempíricas. También se puede seleccionar Datos tabulados - Factor de Colburn vs. número de Reynolds para calcular el número de Nusselt a partir de los datos del factor de Colburn que se proporcione, o Datos tabulados - Número de Nusselt frente a número de Reynolds y número de Prandtl para proporcionar directamente el número de Nusselt como una tabla de búsqueda bidireccional.



- **Número de Nusselt para la transferencia de calor del flujo laminar** (“*Nusselt number for laminar flow heat transfer*”): 3,66 (valor por defecto)

Proporción constante entre la transferencia de calor convectivo y conductivo en el régimen laminar. Este parámetro permite el cálculo de la transferencia de calor convectivo en los flujos laminares. El valor del parámetro cambia con el área de la sección transversal de la tubería y las condiciones de los límites térmicos. El valor por defecto corresponde a una sección transversal de tubería circular.

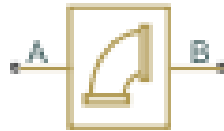
- **Condiciones iniciales:**

- **Temperatura inicial del fluido** (“*Initial fluid temperature*”): Según tubería

Temperatura inicial a la que se encuentra el líquido de la tubería. Aquellas tuberías que formen parte del transcurso del agua de la planta estarán inicialmente a una temperatura de 293,15 K (20,15°C), mientras que aquellas por las que transcurre el agua fría del tanque estarán a 298 K (5°C).

### 3.1.3.9.1 Codos

En una primera versión del programa para representar los codos en las tuberías, se utilizaron los bloques “*Elbow*” de la librería “*Local Hydraulic Resistances*”.



**Figura 3.23:** Bloque “Elbow” para Codos

Dado que la planta está simulada utilizando bloques tipo líquido térmico y que para representar los codos de una tubería solo existe este bloque tipo líquido isotérmico, era necesario utilizar un bloque de transición que convirtiera el caudal tipo líquido térmico de la planta en líquido isotérmico mientras circulara por el codo y volver a convertirlo en térmico para su transcurso por las tuberías. El bloque de conversión utilizado para esto es “*Interface*” de la librería “*Fluid Network Interfaces*”.



**Figura 3.24:** Bloque “Interface” para conversión entre diferentes tipos de líquido

El principal inconveniente al usar estos bloques reside en que, al hacer esta conversión, toda la información térmica que contiene el líquido se pierde, incluyendo el valor de la temperatura. Esto impide realizar un seguimiento del comportamiento de la temperatura en el fluido y, por tanto, realizar el control de esta en la configuración 2 tras pasar por la resistencia térmica y el intercambiador de calor. Omitir los codos entorpece el cálculo de los parámetros de la simulación, pero el resultado obtenido se corresponde con el comportamiento normal de la planta multiprocesos y es la solución más viable.

### 3.1.3.10 Aisladores

Dado que los puertos térmicos de las tuberías y el resto de bloque tipo líquido térmico (como los depósitos) no pueden quedar desconectados, es necesario utilizar los bloques “*Perfect Insulator*” que modelan un elemento térmico con un aislamiento perfecto y sin masa térmica. De esta forma, se evita el intercambio de calor con el ambiente (proceso adiabático) para que sean, tanto la resistencia térmica como el intercambiador de calor, los únicos agentes que intervengan en la variación de la temperatura del caudal de la planta. También se pueden utilizar estos bloques para establecer la temperatura inicial del elemento, aunque este valor se fijará a través de las variables de los depósitos y el tanque de agua fría.



**Figura 3.25:** Bloque “Perfect Insulator” para aislador

- **Librería:** *Thermal Elements*
- **Puertos:** uno. Tipo térmico.
- **Variables:**
  - **Temperatura** (“*Temperature*”): - (sin prioridad)

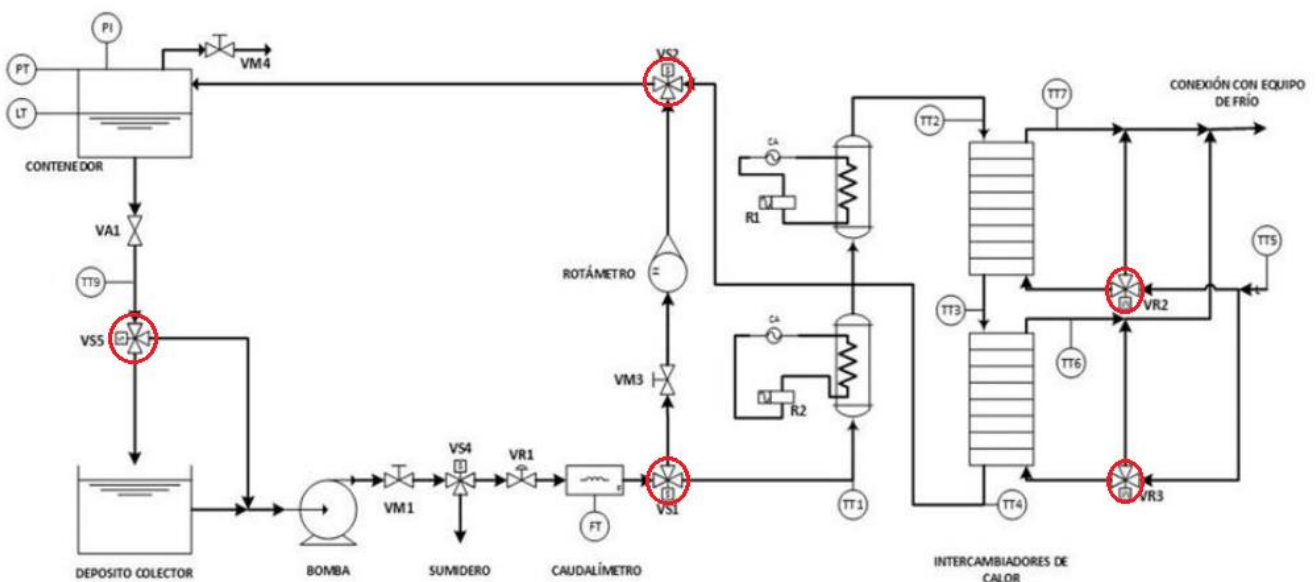
### 3.1.3.11 Válvulas

#### 3.1.3.11.1 Válvula electro neumática de regulación

Como se comenta en el apdo. 1.3.3, el dúo bomba y válvula electro neumática utilizado para el impulso y control del caudal que circula a través de la planta, se ha sustituido por un bloque que actúa como una fuente ideal de caudal volumétrico (“*Bloque “Controlled Volumetric Flow Rate Source (TL)”*” para Bomba y Válvula).

#### 3.1.3.11.2 Válvulas de tres vías

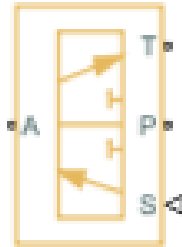
En el funcionamiento normal de la planta multiprocesos, existe la necesidad de desviar el caudal de líquido de unas tuberías a otras, ya sea para el cambio de configuración o para realizar el *bypass* en el agua fría y que esta no circule por el intercambiador de calor. Para este propósito se utilizan las válvulas de 3 vías. Se puede observar en el siguiente esquema (marcadas en rojo) que hay 5 en toda la planta: por un lado, las válvulas solenoides VS1, VS2 y VS5, y por el otro las válvulas de regulación eléctrica VR2 y VR3.



**Figura 3.26:** Esquema general con válvulas de 3 vías marcadas

Para simular este tipo de válvulas se utiliza el bloque “*3-Way Directional Valve (TL)*”. Si bien en el modelo solo se han empleado para simular las válvulas VS1 y VS5 (ambas parametrizadas de forma similar). Al emplear un único intercambiador de calor equivalente para simplificar el diseño del modelo, las válvulas VR2 y VR3 no se han simulado directamente, sino que se ha buscado una solución alternativa para realizar el *bypass* del caudal de agua fría que circula por el intercambiador. En su lugar se ha implementado un bloque de caudal ideal (como

el visto en el apdo. 3.1.3.6) que permite regular este como si se tratara de una válvula de regulación eléctrica. Tampoco se ha introducido ningún bloque que simule la válvula VS2, pues su incorporación en el programa provocaba fallos en la compilación y ejecución de este; en su lugar se hace directamente la intersección del caudal que regresa al depósito de nivel en la configuración 1 y el que sale del intercambiador de calor en la configuración 2. No es necesario utilizar ningún bloque para guiar el flujo del caudal en esta intersección dado que el propio programa, con la información sobre el caudal de líquido y el resto de elementos, dirige siempre de forma correcta el agua hacia el depósito de nivel.



**Figura 3.27:** Bloque “3-Way Directional Valve (TL)” para válvulas solenoides

El bloque “3-Way Directional Valve (TL)” representa una válvula de control direccional de tres vías y cuenta con dos posiciones para dirigir el líquido térmico. La posición 1 de la válvula permite el flujo de líquido entre las puertas A y T. La posición 2 de la válvula permite el flujo de líquido entre las puertas A y P. En la siguiente figura se muestran las dos posiciones de la válvula:



**Figura 3.28:** Posición 1 (izquierda) y posición 2 (derecha) de la válvula solenoide

La entrada de la señal física S establece la posición de la válvula a través de una señal de desplazamiento del componente de control. La válvula está en la posición 1 si tiene un valor de desplazamiento cero del componente de control, y en la posición 2 al máximo desplazamiento permitido a través del parámetro especificado en el bloque.

- **Librería:** *Thermal Liquid/Valves/Directional Control Valves*
- **Puertos:**
  - **A:** puerto tipo líquido térmico que representa la entrada de la válvula A.
  - **P:** puerto tipo líquido térmico que representa la entrada de la válvula P.
  - **T:** puerto tipo líquido térmico que representa la entrada de la válvula T.
  - **S:** puerto de entrada de la señal física para el desplazamiento del componente de control.
- **Parámetros:**
  - **Parametrización del área de la válvula** (“*Valve area parameterization*”): Relación lineal de apertura del área (opción por defecto)

Parametrización utilizada para calcular el área de apertura de la válvula. Con la opción “Relación lineal de apertura del área” seleccionada, se calculará esta área a partir del desplazamiento del elemento de control de la válvula. También se puede elegir “Datos tabulados - Área vs. apertura” para especificar el área de apertura de la válvula como una tabla de consulta parametrizada en términos del desplazamiento del mismo elemento de control.

  - **Apertura máxima de la válvula** (“*Maximum valve opening*”): 1 in

Desplazamiento del elemento de control en el que el área de apertura de la válvula alcanza su valor máximo. La entrada de la señal física S se satura a este valor.

- **Área de apertura máxima** (“*Maximum opening area*”):  $(\pi \times \frac{20,4^2}{4}) \text{ mm}^2$

Área de la sección transversal de la válvula en la posición de total apertura. Esta área se corresponde con el máximo desplazamiento del elemento de control.

- **Área de fuga** (“*Leakage area*”):  $10^{-12} \text{ mm}^2$

Área a través de la cual el líquido puede fluir a través de la posición en la que la válvula está completamente cerrada. Esta área explica las fugas en las entradas de la válvula.

- **Factor de suavizado** (“*Smoothing factor*”): 0,5

Porción de la curva del área de apertura a suavizar expresada como una fracción. El suavizado elimina las discontinuidades en las posiciones de las válvulas de flujo mínimo y máximo. El factor de suavizado debe estar entre 0 y 1. Con un valor de 0 se obtiene un suavizado nulo y con un valor de 1 se obtiene un suavizado de toda la curva. Se ha establecido de forma empírica el valor en 0,5 por dar mejores resultados en la simulación.

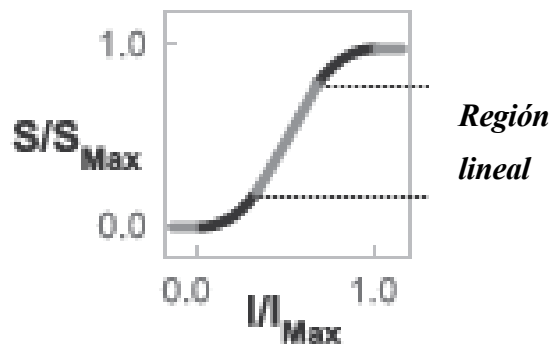


Figura 3.29: Suavizado de la curva del área de apertura

- **Área de la sección transversal en los puertos A, P y T** (“*Cross-sectional area at ports A, P, and T*”):  $(\pi \times \frac{25^2}{4}) \text{ mm}^2$

Área normal a la dirección del flujo en las entradas de la válvula. Se supone esta área igual para todas las entradas.

- **Longitud longitudinal característica** (“*Characteristic longitudinal length*”): 10 mm

Este parámetro proporciona una medida de la escala longitudinal de la válvula.

- **Coefficiente de descarga** (“*Discharge coefficient*”): 0,7 (valor por defecto)

Parámetro semiempírico comúnmente utilizado como medida del rendimiento de la válvula. El coeficiente de descarga se define como la relación entre el caudal másico real que pasa por la válvula y su valor teórico.

El bloque utiliza este parámetro para tener en cuenta los efectos de la geometría de la válvula en los caudales de masa. Por definición, todos los valores deben ser mayores que 0 y menores que 1.

- **Número crítico de Reynolds** (“*Critical Reynolds number*”): 12 (valor por defecto)

El número de Reynolds corresponde a la transición entre los regímenes de flujo laminar y turbulento. El flujo a través de la válvula se supone laminar por debajo de este valor y turbulento por encima de él.

- **Variables:**

- **Offset de apertura de la válvula entre los puertos P y A** (“*Valve Opening Offsets Between ports P and A*”): 0,01 in

El elemento de control se desplaza desde la posición cero entre los puertos P y A. La posición del miembro de control es la suma del offset especificado y la entrada de la señal física S. El valor del desplazamiento no afecta a las posiciones límites.

- **Offset de apertura de la válvula entre los puertos A y T** (“*Valve Opening Offsets Between ports P and A*”): (1 – 0,01) in

El elemento de control se desplaza desde la posición cero entre los puertos A y T. La posición del miembro de control es la suma del offset especificado y la entrada de la señal física S. El valor del desplazamiento no afecta a las posiciones límites.

### 3.1.3.12 Sensores

#### 3.1.3.12.1 Caudalímetro

Para realizar el correcto seguimiento de la evolución del caudal volumétrico a lo largo de planta, se han utilizado 4 caudalímetros representados por los bloques “*Volumetric Flow Rate Sensor (TL)*”. Estos caudalímetros están colocados en lugares estratégicos por la información que pueden aportar:

- A la salida del bloque “*Controlled Volumetric Flow Rate Source (TL)*”, que funciona como el dúo bomba/válvula de regulación para el control del caudal de la planta, para medir la acción de control que lleva a cabo el controlador en la configuración 1 y obtener la referencia de nivel indicada en el depósito.
- A la salida del depósito de nivel y antes de llegar al depósito colector (tras pasar por la válvula solenoide), para conocer el caudal volumétrico debido a la descarga del depósito por la propia gravedad; así como para comprobar que no circula caudal en dirección al depósito colector durante la configuración 2.
- A la entrada de la resistencia térmica de la configuración 2, para comprobar que se ha realizado correctamente el cambio de configuración y hay circulación del caudal de agua.
- A la salida del bloque “*Controlled Volumetric Flow Rate Source (TL)*”, utilizado como alternativa para realizar el *bypass* del agua fría que circula por el intercambiador de calor. Este caudalímetro permite medir la acción de control que lleva a cabo el controlador en la configuración 2 y obtener la referencia de temperatura indicada en el agua que recorre la planta.

El bloque “*Volumetric Flow Rate Sensor (TL)*” mide el caudal de flujo volumétrico a través de la conexión de líquido térmico definida por los puertos A y B. La velocidad de flujo es positiva si el fluido fluye del puerto A al puerto B.



**Figura 3.30:** Bloque “*Volumetric Flow Rate Sensor (TL)*” para caudalímetro

- **Librería:** *Thermal Liquid/Sensors*

- **Puertos:**

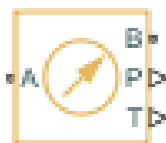
- **A:** puerto tipo líquido térmico que representa la entrada A del sensor.
- **B:** puerto tipo líquido térmico que representa la salida B del sensor.
- **V:** puerto de salida de la señal física para detectar el flujo volumétrico.

### 3.1.3.12.2 Sensor de temperatura

A la hora de medir el efecto que tienen tanto la resistencia térmica como el intercambiador de calor en la variación de temperatura del caudal de la planta durante la configuración 2, es necesario utilizar sensores de temperatura en distintos puntos de la red de líquido térmico. Para este propósito, se han utilizado los bloques “*Pressure & Temperature Sensor (TL)*” y se han dispuesto en 3 puntos:

- Uno a la entrada de la resistencia térmica (TT1) y otro a la salida de esta (TT3), de forma que se obtenga en qué medida afecta la resistencia al aumento de temperatura del caudal de la planta.
- A la salida del intercambiador de calor (TT2). Este sensor es el utilizado como referencia de la temperatura media del agua de toda la planta pues se mantiene prácticamente invariable desde este punto hasta la entrada de nuevo en la resistencia térmica. Esto se debe al uso de aisladores en la mayoría de bloques.

El bloque “*Pressure & Temperature Sensor (TL)*” representa un sensor ideal que mide las diferencias de presión y temperatura entre dos nodos de líquido térmico. Dado que la presión y la temperatura son variables cruzadas, el bloque del sensor debe conectarse en paralelo con el componente que se está midiendo. El puerto de medida de la presión se ha dejado desconectado pues no es necesario el conocimiento de esta para el control de las variables.



**Figura 3.31:** Bloque “*Pressure & Temperature Sensor (TL)*” para sensor de temperatura

Dado que el sensor necesita ser conectado en paralelo pero el dato buscado es el valor absoluto de la temperatura del caudal de fluido, y no la diferencia de temperatura entre dos nodos, se ha colocado en el otro puerto el bloque “*Absolute Reference (TL)*” que es utilizado como referencia de temperatura. Con una referencia en este bloque de 0 K, se obtiene el valor absoluto de la temperatura en el nodo al que se conecta el sensor.



**Figura 3.32:** Bloque “*Absolute Reference (TL)*” para referencia de temperatura

La orientación relativa de los puertos A y B del sensor de temperatura determina el signo de la medición. El signo es positivo si el valor medido es mayor en el puerto A que en el puerto B. Las principales características del bloque sensor son las siguientes:

- **Librería:** *Thermal Liquid/Sensors*
- **Supuestos y limitaciones:**
  - La inercia del sensor es despreciable.
- **Puertos:**
  - **A:** puerto tipo líquido térmico que irá conectado al punto a medir de la red térmica.
  - **B:** puerto tipo líquido térmico que irá conectado al bloque “*Absolute Reference (TL)*” de referencia de temperatura.
  - **P:** salida de la señal física de la medida de la presión (no se ha utilizado en la simulación).
  - **T:** salida de la señal física de la medida de la temperatura.

### 3.1.4 Variables utilizadas junto al servidor OPC

Para entender cómo se pueden beneficiar los programas de *Matlab* y *Codesys* de la comunicación entre ambos, es necesario explicar qué variables van a ser cargadas en el servidor OPC y cuál es su función.

#### 3.1.4.1 Variables del bloque OPC Read

Como se vio en el apdo. 2.6.2, el bloque OPC Read tiene un puerto de salida V en el que se deberán conectar aquellas variables en las que se guardaran los valores leídos de los elementos cargados y seleccionados en el servidor OPC, para de esta forma sobrescribir su propio valor y ser utilizado en la simulación de *Matlab*.

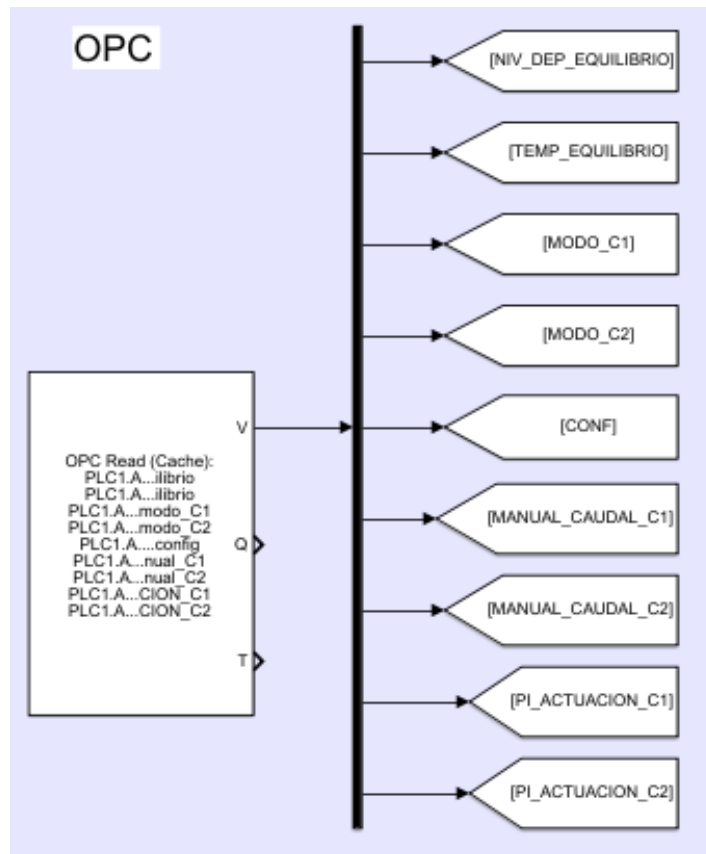


Figura 3.33: Variables para lectura en *Matlab*

Las variables de *Matlab* utilizadas para la lectura de los elementos del servidor OPC son:

- **NIV\_DEP\_EQUILIBRIO**: lee la variable “nivel\_equilibrio” de *Codesys*. Esta variable contiene el valor (en cm) del nivel de equilibrio del depósito de nivel en bucle cerrado que se desea alcanzar (seleccionado por el operario a través del SCADA) y que se utiliza en *Matlab* para visualizar la evolución del nivel de la planta a partir de un bloque *Scope*.
- **TEMP\_EQUILIBRIO**: lee la variable “temp\_equilibrio” de *Codesys*. Esta variable contiene el valor (en grados Kelvin) de la temperatura de equilibrio en TT2 (sensor de temperatura entre la salida de la resistencia térmica y la entrada del intercambiador de calor) en bucle cerrado que se desea alcanzar (seleccionada por el operario a través del SCADA) y que se utiliza en *Matlab* para visualizar la evolución de la temperatura ante la acción de control del PI.
- **MODO\_C1**: lee la variable “modo\_C1” de *Codesys*. El valor de esta variable indica si el modelo en su configuración 1 se encuentra en bucle abierto (valor 0) o bucle cerrado (valor 1). Será utilizado en *Matlab* como condición de cambio entre las entradas de un bloque *Switch* para aplicar desde el bloque de caudal ideal del circuito principal la acción de control de caudal del PI para bucle cerrado o el caudal manual en bucle abierto indicado desde el SCADA, según corresponda.



- **MODO\_C2**: lee la variable “modo\_C2” de *Codesys*. El valor de esta variable indica si el modelo en su configuración 2 se encuentra en bucle abierto (valor 0) o bucle cerrado (valor 1). Será utilizado en *Matlab* como condición de cambio entre las entradas de un bloque *Switch* para aplicar en la válvula electroneumática (bloque de caudal ideal) del circuito de agua fría la acción de control de caudal del PI para bucle cerrado o el caudal manual en bucle abierto indicado desde el SCADA, según corresponda.
- **CONF**: lee la variable “config” de *Codesys*. El valor de la variable es controlado a través de una palanca del SCADA para variar entre la configuración 1 (valor 0) y la configuración 2 (valor 1). Este valor será utilizado en el modelo de *Matlab* como entrada en las válvulas de 3 vías para cambiar entre el circuito hidráulico correspondiente a la configuración 1 y al de la configuración 2.
- **MANUAL\_CAUDAL\_C1**: lee la variable “caudal\_manual\_C1” de *Codesys*. Valor del caudal del circuito principal en bucle abierto que aplicará el bloque de caudal ideal según se haya introducido en el SCADA. Este valor estará expresado en l/h y será necesario convertirlo a m<sup>3</sup>/s pues son las unidades con las que funciona el modelo de *Matlab*.
- **MANUAL\_CAUDAL\_C2**: lee la variable “caudal\_manual\_C2” de *Codesys*. Valor del caudal del circuito de agua fría en bucle abierto que aplicará el bloque de caudal ideal según se haya introducido en el SCADA. Este valor estará expresado en l/h y será necesario pasarlo a m<sup>3</sup>/s pues son las unidades con las que funciona el modelo de *Matlab*.
- **PI\_ACTUACION\_C1**: lee la variable “PI\_ACTUACION\_C1” en *Codesys*. Valor del caudal del circuito principal en bucle cerrado que aplicará el bloque de caudal ideal según la acción de control del PLC. Este valor estará expresado en l/h y será necesario convertirlo a m<sup>3</sup>/s pues son las unidades con las que funciona el modelo de *Matlab*.
- **PI\_ACTUACION\_C2**: lee la variable “PI\_ACTUACION\_C2” en *Codesys*. Valor del caudal del circuito de agua fría en bucle cerrado que aplicará el bloque de caudal ideal según la acción de control del PLC. Este valor estará expresado en l/h y será necesario convertirlo a m<sup>3</sup>/s pues son las unidades con las que funciona el modelo de *Matlab*.

### 3.1.4.2 Variables del bloque OPC Write

Como se vio en el apdo. 2.6.3, el bloque OPC Write tiene un único puerto de entrada en el que se deberán conectar aquellas variables cuyos valores se sobrescribirán sobre el de los elementos cargados y seleccionados en el servidor OPC, con el objetivo de actualizarlos en *Codesys* y utilizarlos allí.

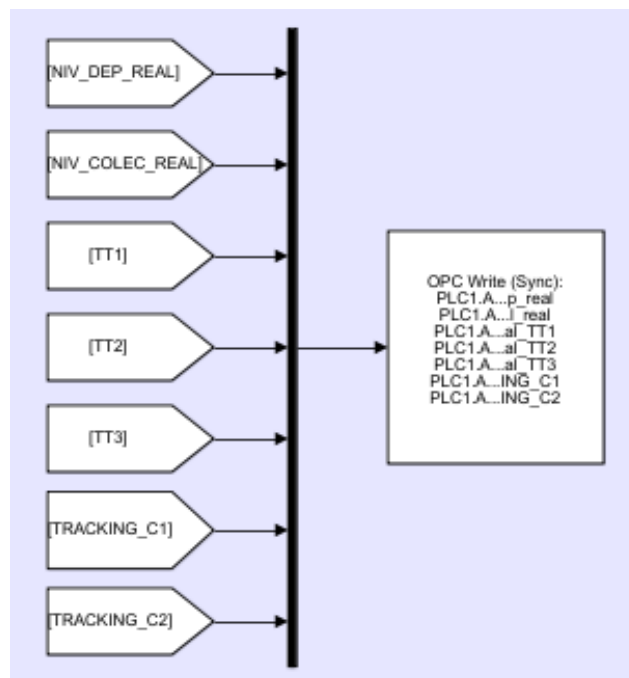


Figura 3.34: Variables para escritura en *Matlab*



Las variables de *Matlab* utilizadas para escribir sobre los elementos del servidor OPC son:

- **NIV\_DEP\_REAL**: escribe sobre la variable “niv\_dep\_real” en *Codesys*. Valor del nivel del depósito de nivel (en cm) en tiempo real extraído de una de las salidas del bloque.
- **NIV\_COLEC\_REAL**: escribe sobre la variable “niv\_dep\_real” en *Codesys*. Valor del nivel del depósito colector (en cm) en tiempo real extraído de una de las salidas del bloque.
- **TT1**: escribe sobre la variable “temp\_real\_TT1” en *Codesys*. Valor medido de la temperatura (en grados Kelvin) del flujo de agua por el sensor de temperatura TT1, situado a la entrada de la resistencia térmica equivalente.
- **TT2**: escribe sobre la variable “temp\_real\_TT2” en *Codesys*. Valor medido de la temperatura (en grados Kelvin) del flujo de agua por el sensor de temperatura TT2, situado entre la salida de la resistencia térmica y la entrada del intercambiador de calor. Se considera la medida media del caudal de agua que circula por la planta. Es utilizado para que el PLC emita una acción de control del caudal de agua fría que deberá circular por el intercambiador.
- **TT3**: escribe sobre la variable “temp\_real\_TT3” en *Codesys*. Valor medido de la temperatura (en grados Kelvin) del flujo de agua por el sensor de temperatura TT3, situado a la salida del intercambiador de calor equivalente.
- **TRACKING\_C1**: escribe sobre la variable “TRACKING\_C1” en *Codesys*. Valor del caudal (en l/h) que aplicará el bloque de caudal ideal en el circuito principal, ya sea tanto en bucle abierto como en bucle cerrado, y que permitirá al PLC realizar un seguimiento de su evolución.
- **TRACKING\_C2**: escribe sobre la variable “TRACKING\_C2” en *Codesys*. Valor del caudal (en l/h) que aplicará el bloque de caudal ideal en el circuito de agua fría, ya sea tanto en bucle abierto como en bucle cerrado, y que permitirá al PLC realizar un seguimiento de su evolución.

## 3.2 Codesys V3

En el programa de automatización *Codesys*, se han integrado dos partes imprescindibles en cualquier esquema de control: el autómata programable o PLC, y el panel de control y visualización o SCADA.

Ambas están alojadas en POU's distintas del mismo programa, pero tienen una relación directa. Desde el panel de usuario será posible modificar los parámetros característicos de los controladores PI que conforman al autómata, y las variables globales que se cargarán en el servidor OPC referentes a los estados de equilibrio solicitados serán de utilidad para ambas aplicaciones.

### 3.2.1 Variables globales cargadas en “Configuración de símbolos”

Es necesario empezar describiendo aquellas variables globales de las que harán uso tanto el SCADA como el PLC y que serán compartidas como símbolos o ítems a través del servidor OPC, ya sea tanto con una función de lectura como de escritura.

Símbolos	Derechos de acceso	Máximo	Atributo	Tipo	Variables de miembro	Comentario
Constants						
GVL						
PI_ACTUACION_C1				REAL		
PI_ACTUACION_C2				REAL		
TRACKING_C1				REAL		PI INCORPORADO EN PLC CONF 1
TRACKING_C2				REAL		PI INCORPORADO EN PLC CONF 2
caudal_manual_C1				REAL		
caudal_manual_C2				REAL		
config				BOOL		
modo_C1				BOOL		
modo_C2				BOOL		
nivel_col_real				REAL		
nivel_dep_real				REAL		
nivel_equilibrio				REAL		
temp_equilibrio				REAL		
temp_real_TT1				REAL		
temp_real_TT2				REAL		
temp_real_TT3				REAL		
IoConfig_Globals						
PANEL						
PI						

Figura 3.35: Variables globales cargadas como Ítems en el servidor OPC

Aquellas variables cargadas en el servidor OPC son:

- **PI\_ACTUACION\_C1**: escribe sobre la variable “PI\_ACTUACION\_C1” de *Matlab*. Acción de control del controlador PI para la configuración 1 de la planta. Se corresponde con el valor de caudal (en l/h) en bucle cerrado que aplicará el bloque de caudal ideal en el circuito principal de la planta.
- **PI\_ACTUACION\_C2**: escribe sobre la variable “PI\_ACTUACION\_C2” de *Matlab*. Acción de control del controlador PI para la configuración 2 de la planta. Se corresponde con el valor de caudal (en l/h) en bucle cerrado que aplicará el bloque de caudal ideal en el circuito de agua fría de la planta.
- **TRACKING\_C1**: lee la variable “TRACKING\_C1” de *Matlab*. Valor del caudal (en l/h) que aplicará el bloque de caudal ideal en el circuito principal, ya sea en bucle abierto o en bucle cerrado. Utilizado en la entrada “Y\_MANUAL” del PI del circuito principal para asegurar una transición suave al pasar de control manual a automático, y viceversa.
- **TRACKING\_C2**: lee la variable “TRACKING\_C2” de *Matlab*. Valor del caudal (en l/h) que aplicará el bloque de caudal ideal en el circuito de agua fría, ya sea en bucle abierto o en bucle cerrado. Utilizado en la entrada “Y\_MANUAL” del PI del circuito de agua fría para asegurar una transición suave al pasar de control manual a automático, y viceversa.

- **caudal\_manual\_C1**: escribe sobre la variable “MANUAL\_CAUDAL\_C1” de *Matlab*. Valor del caudal (en l/h) del circuito principal en bucle abierto según selección del operario en el SCADA. El valor que se puede solicitar está limitado entre 1635 y 2260 l/h.
- **caudal\_manual\_C2**: escribe sobre la variable “MANUAL\_CAUDAL\_C2” de *Matlab*. Valor del caudal (en l/h) del circuito de agua fría en bucle abierto según selección del operario en el SCADA. El valor que se puede solicitar está limitado entre 0 y 10000 l/h.
- **config**: escribe sobre la variable “CONF” de *Matlab*. El valor de la variable es controlado a través de una palanca del SCADA para variar entre la configuración 1 (valor 0) y la configuración 2 (valor 1).
- **modo\_C1**: escribe sobre la variable “modo\_C1” de *Matlab*. El valor de esta variable indica si el modelo en su configuración 1 se encuentra en bucle abierto (valor 0) o bucle cerrado (valor 1). Se controla a través de una palanca en el SCADA.
- **modo\_C2**: escribe sobre la variable “modo\_C2” de *Matlab*. El valor de esta variable indica si el modelo en su configuración 1 se encuentra en bucle abierto (valor 0) o bucle cerrado (valor 1). Se controla a través de una palanca en el SCADA.
- **nivel\_col\_real**: lee la variable “NIV\_COLEC\_REAL” de *Matlab*. Valor del nivel del depósito colector (en cm) en tiempo real para mostrarlo en la visualización de la planta.
- **nivel\_dep\_real**: lee la variable “NIV\_DEP\_REAL” de *Matlab*. Valor del nivel del depósito de nivel (en cm) utilizado por el PLC para emitir la acción de control del caudal del circuito principal. También se utiliza en la visualización del SCADA.
- **nivel\_equilibrio**: escribe sobre la variable “NIV\_DEP\_EQUILIBRIO” de *Matlab*. Variable con el valor (en cm) del nivel de equilibrio del depósito de nivel en bucle cerrado que el operario indica a través del SCADA. El valor que se puede solicitar está limitado entre 0 y 44 cm.
- **temp\_equilibrio**: escribe sobre la variable “TEMP\_EQUILIBRIO” de *Matlab*. Variable con el valor (en grados Kelvin) de la temperatura de equilibrio en bucle cerrado que se desea alcanzar en la medida del sensor de temperatura TT2 (entre la resistencia térmica y el intercambiador de calor) y que el operario indica a través del SCADA. El valor que se puede solicitar está limitado entre 270 y 310 K.
- **temp\_real\_TT1**: lee la variable “TT1” de *Matlab*. Valor medido de la temperatura (en grados Kelvin) del flujo de agua por el sensor de temperatura TT1, situado a la entrada de la resistencia térmica equivalente. Utilizado en las visualizaciones.
- **temp\_real\_TT2**: lee la variable “TT2” de *Matlab*. Valor medido de la temperatura (en grados Kelvin) del flujo de agua por el sensor de temperatura TT2, situado entre la salida de la resistencia térmica y la entrada del intercambiador de calor. Es utilizado para que el PLC emita una acción de control del caudal de agua fría que deberá circular por el intercambiador, y para las visualizaciones del SCADA.
- **temp\_real\_TT3**: lee la variable “TT3” de *Matlab*. Valor medido de la temperatura (en grados Kelvin) del flujo de agua por el sensor de temperatura TT3, situado a la salida del intercambiador de calor equivalente. Utilizado en las visualizaciones.

### 3.2.2 PLC

El autómata programable o PLC de *Codesys* que permitirá el control de las distintas variables de la planta multiprocesos simulada está programado en la POU “PI” y su código está escrito en *Ladder*, aunque también se compone de una parte en *ST* para declarar e inicializar algunas variables internas.

Los elementos encargados del control del sistema van a ser los dos bloques predefinidos “PID\_FIXCYCLE” que representan un controlador PID. “PID\_FIXCYCLE\_0” será utilizado para el control del caudal de agua de la planta en su circuito principal de la configuración 1, permitiendo alcanzar el nivel del depósito contenedor seleccionado en el SCADA; mientras que “PID\_FIXCYCLE\_1” será el controlador encargado de la acción de control del caudal de agua fría que recorre el intercambiador de calor en la configuración 2 y que permite establecer la temperatura del fluido de la planta según desee el usuario.

También, a través de unos contactos con las variables globales “modo\_C1” y “modo\_C2” se podrán poner los controladores en su modo manual cuando el control esté en lazo abierto.

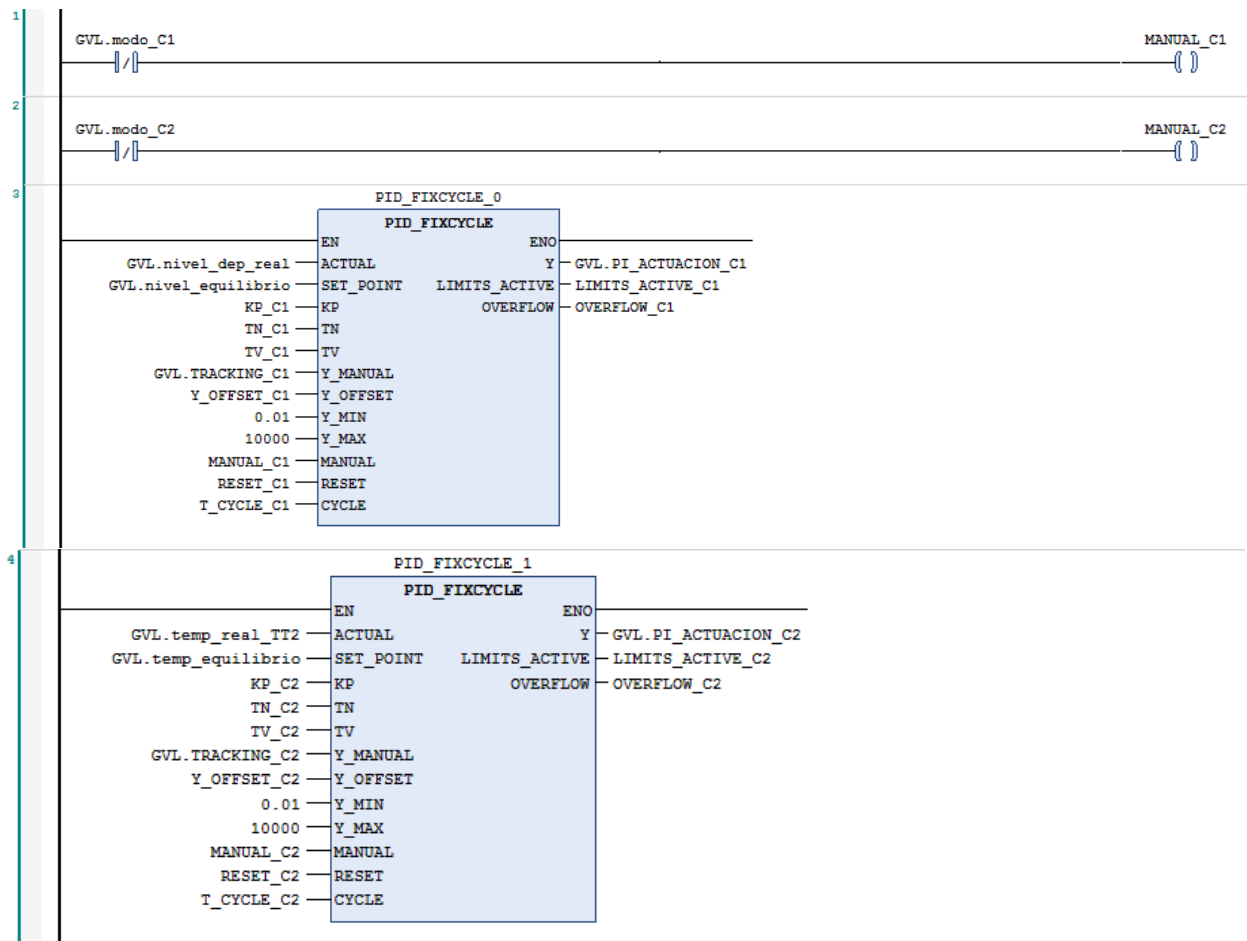


Figura 3.36: Código del PLC en Codesys

Los bloques introducidos hacen la función de un controlador PID. Una vez seleccionado el control en bucle cerrado en el SCADA y a partir de la realimentación del error, devuelve una señal de control sobre el caudal que permite alcanzar el nivel del depósito o la temperatura del líquido de la planta introducidos para la configuración 1 y 2, respectivamente. Se compone de la suma de tres términos de control [4]:

- **Término proporcional P.** Permite encargarse de los valores actuales del error. La acción de control es proporcional al control. A través de aumentar su constante de proporcionalidad  $K_p$ , el sistema se volverá más agresivo y rápido a costa de aumentar su comportamiento oscilatorio.
- **Término integral I.** Permite mejorar el comportamiento del sistema en régimen permanente. La acción de control será proporcional también a la integral del error, convirtiendo al controlador en un sistema dinámico con memoria que recuerda los errores anteriores.
- **Término derivativo D.** Permite mejorar el comportamiento del sistema en el régimen transitorio. La acción de control será proporcional también a la derivada del error, proporcionando al controlador una predicción de la evolución de este y permitiéndole adelantarse para mejorar su comportamiento.

El esquema de control de un controlador PID, con la suma de sus términos, se puede observar en la siguiente figura:

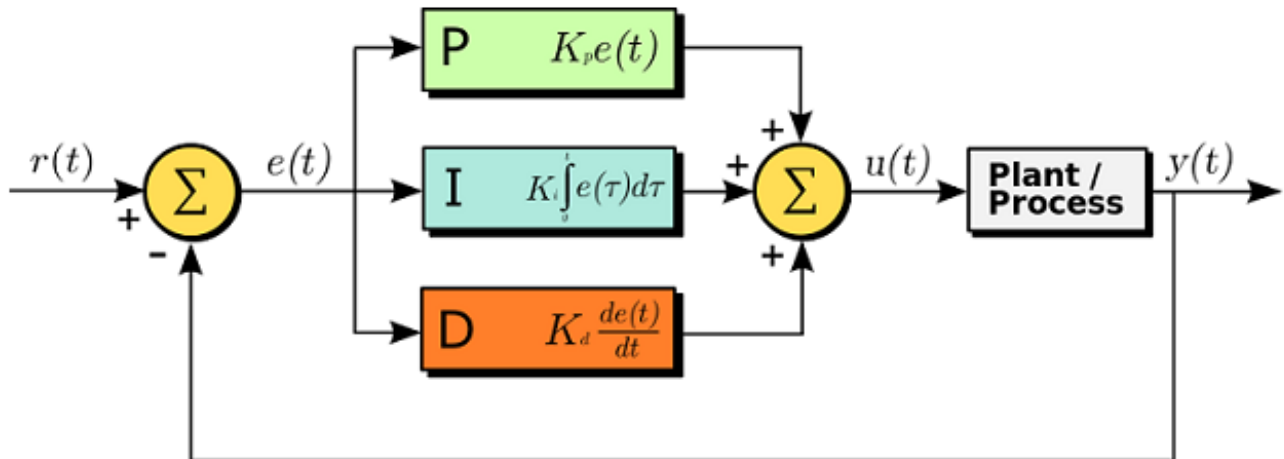


Figura 3.37: Esquema de control PID

La diferencia entre el bloque “*PID\_FIXCYCLE*” utilizado y el bloque normal “*PID*” que se puede encontrar en las librerías de *Codesys*, es la inclusión de una entrada para modificar el parámetro “*CYCLE*” que permite establecer el tiempo de ciclo de actualización del controlador en un valor fijo. Esto es recomendable para ciclos cortos del orden de ms, pues el valor del tiempo transcurrido entre llamadas para el bloque de “*PID*” puede fluctuar.

El bloque “*PID\_FIXCYCLE*” presenta los siguientes parámetros:

- **Parámetros de entrada:**

- **ACTUAL:** valor actual de la variable que se desea controlar.
- **SET\_POINT:** punto de equilibrio que se desea alcanzar para la variable controlada.
- **KP:** valor de la constante de proporcionalidad. Será posible modificarlo en el panel de operario.
- **TN:** valor del tiempo integral en segundos. Será posible modificarlo en el panel de operario.
- **TV:** valor del tiempo derivativo en segundos. Será posible modificarlo en el panel de operario.
- **Y\_MANUAL:** valor de salida Y establecido cuando el parámetro “*MANUAL*” está a valor 1.
- **Y\_OFFSET:** valor de salida Y de *offset* (punto de equilibrio inicial) para la variable manipulada.
- **Y\_MIN:** valor mínimo de salida Y de la variable manipulada.
- **Y\_MAX:** valor máximo de salida Y de la variable manipulada.
- **MANUAL:** tipo booleano. Con valor 1 se establece un control manual de la variable, es decir, un control en bucle abierto en el que el controlador no intervendrá. Con valor 0 será la acción de control del controlador en bucle cerrado la que se aplique.
- **RESET:** tipo booleano. Con valor 1, establece el valor de salida Y de la variable manipulada en su valor de *offset* y reinicia el término integral (errores pasados acumulados).
- **CYCLE:** tiempo de ciclo en segundos entre dos llamadas al controlador.

- **Parámetros de salida:**

- **Y:** valor establecido de aplicación de la variable manipulada.
- **LIMITS\_ACTIVE:** tipo booleano. Devuelve el valor 1 si se exceden los valores límites de la variable manipulada “*Y\_MIN*” e “*Y\_MAX*”.
- **OVERFLOW:** tipo booleano. Devuelve el valor 1 si se produce un *overflow* (saturación) del término integral.

Es importante recalcar la necesidad de que el controlador reciba y devuelva el valor de caudal de agua en control manual a través de la variable “Y\_MANUAL” para hacer una transferencia suave entre modos de control. Cuando el lazo está en modo manual, el controlador PID está calculando e interpreta que la señal que se genera no es la que recibe el actuador y, por tanto, que debe ser recalculada para seguir a la señal que el operador está enviando al actuador. De esta forma, el controlador siempre está preparado para que, si se solicita el cambio de manual a automático, la señal de control que enviará al actuador sea la misma que estaba enviando el operador [5]. Este cambio suave entre modos lo realiza el bloque “PID\_FIXCYCLE” de forma normal, pero sería necesario hacer una serie de ajustes si el PLC estuviera integrado en el propio modelo de *Matlab*.

Los controladores que se van a implementar en el sistema van a ser ambos tipos PI (el controlador más utilizado en la industria), puesto que son más fáciles de diseñar y se desea alcanzar el punto de equilibrio de las variables controladas con el menor margen de error posible. Se prescindirá pues del término derivativo que permite mejorar el comportamiento en régimen transitorio. Esto no supondrá ningún problema puesto que la estabilidad relativa y el tiempo de establecimiento no son una prioridad en este tipo de sistemas. Aun así, siempre será posible diseñar e introducir un controlador PID en el PLC a través del panel de operario.

### 3.2.3 SCADA

El término SCADA, acrónimo de “*Supervisory Control And Data Acquisition*”, hace referencia a un sistema de supervisión y control de procesos que recoge y analiza los datos en tiempo real. Con estos datos el sistema será capaz de provocar alarmas, obtener el histórico de sus valores o generar gráficas de visualización.

En el programa de *Codesys*, hay dos objetos de visualización que integrarán el SCADA. Uno de ellos es “Planta”, donde se tiene una visualización de la planta multiprocesos real, y la otra es “Panel”, que contiene el panel de operario con el que modificar configuraciones y modos de control o establecer el punto de equilibrio de las variables de la planta simulada. Esta última se apoya en la POU “Panel (PRG)” programada en código *ladder* y que permite actuar sobre el valor de las variables globales de comunicación a través de las variables locales que activan los botones y palancas del panel.

#### 3.2.3.1 Planta

Como parte del SCADA, y a partir de los bloques y elementos de la herramienta “*Visualization Toolbox*” de *Codesys*, se ha creado el siguiente esquema de visualización de la planta multiprocesos:

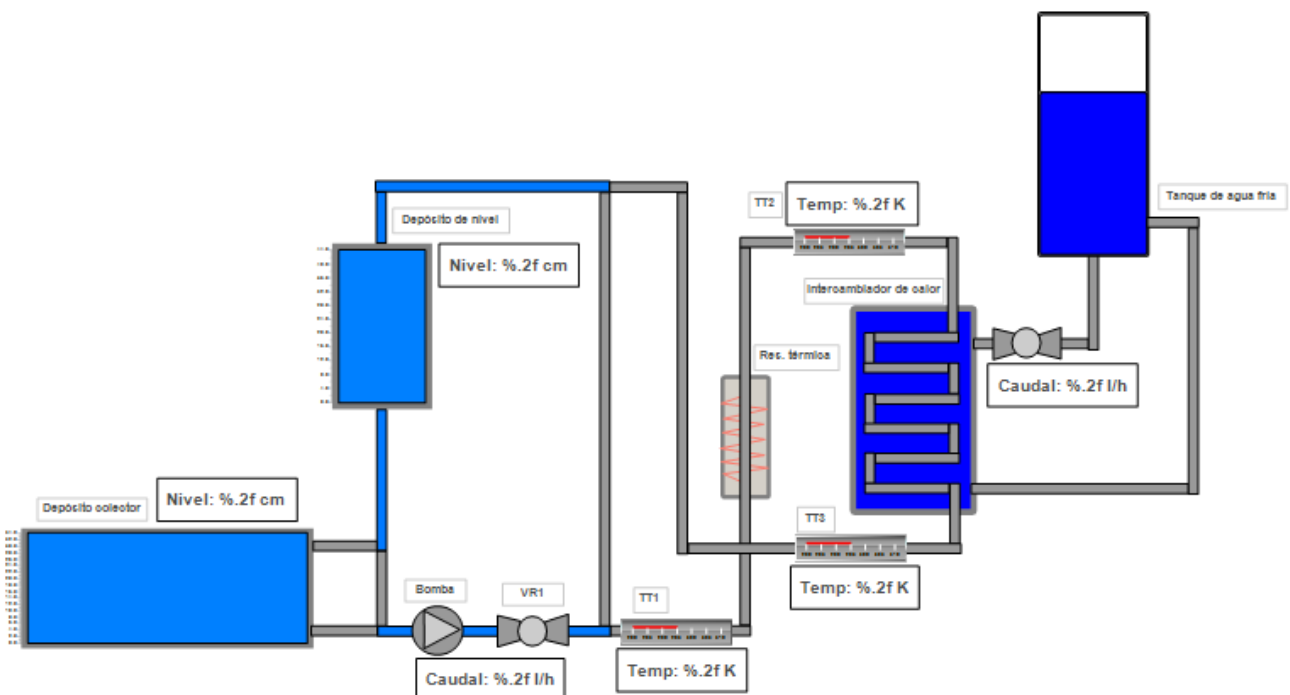


Figura 3.38: Esquema de visualización de la planta multiprocesos en el SCADA

Se pueden contemplar los elementos más importantes que componen la planta: el depósito de nivel (contenedor), el depósito colector, la bomba, la válvula electropneumática VR1, la resistencia térmica equivalente, el intercambiador de calor equivalente y el tanque de agua fría. Además, se disponen varios marcadores que recogen los valores de las medidas de los sensores del modelo de Matlab (nivel, caudal y temperatura) y lo muestran como un valor real con dos decimales (%.2f).

Además, para acercarse más a los SCADAs utilizados en la industria, tanto el nivel de los depósitos como el cambio de temperatura en los distintos puntos del circuito térmico son observables a través de la propia visualización, modificándose el nivel de llenado o de “mercurio” respectivamente. También se volverán azules las tuberías correspondientes al circuito hidráulico por el que circule el agua en la configuración seleccionada.

En el programa se pueden encontrar los objetos de visualización “Graficas\_Confl\_1” y “Graficas\_Confl\_2” con gráficas que representan en tiempo real la evolución del caudal de la planta y el nivel del depósito contenedor, para la primera configuración, y de la evolución del caudal que circula por el intercambiador de calor y la temperatura medida por el sensor TT2 para la segunda.

### 3.2.3.2 Panel (PRG)

El panel de operario emplea una serie de variables locales que permiten modificar el valor de ciertas variables globales y elementos de la visualización como las lámparas de señalización. El código en *ladder* donde están programadas se encuentra en la POU “Panel (PRG)” y se declaran también en la POU mediante código ST.

```

1 | PROGRAM PANEL
2 | VAR
3 |     palanca_conf:BOOL;
4 |     modo_manual_C1:BOOL;
5 |     modo_auto_C1:BOOL;
6 |     palanca_modo_C1:BOOL;
7 |     modo_manual_C2:BOOL;
8 |     modo_auto_C2:BOOL;
9 |     palanca_modo_C2:BOOL;
10 |
11 |     modo_conf1: BOOL;
12 |     modo_conf2: BOOL;
13 | END_VAR
14 |

```

Figura 3.39: Declaración de las variables locales para el SCADA en Codesys

Las variables locales utilizadas en el panel de operario del SCADA son las siguientes:

- **palanca\_conf**: se activa mediante la palanca de configuración del panel y permite modificar el valor de la variable global “config” que establece la configuración actual de la simulación. Además, permite modificar el valor de las variables locales “modo\_conf1” y “modo\_conf2” utilizadas por las lámparas de señalización del SCADA.
- **modo\_manual\_C1**: utilizada por la lámpara de señalización del panel para indicar que la simulación se encuentra en la configuración 1 con control de lazo abierto.
- **modo\_auto\_C1**: utilizada por la lámpara de señalización del panel para indicar que la simulación se encuentra en la configuración 1 con control de lazo cerrado.
- **palanca\_modo\_C1**: se activa mediante la palanca de la configuración 1 del panel y permite cambiar entre los modos de control en bucle abierto y bucle cerrado para esta configuración. Además, permite modificar el valor de las variables locales “modo\_manual\_C1” y “modo\_auto\_C1” utilizadas por las lámparas de señalización del SCADA.

- **modo\_manual\_C2**: utilizada por la lámpara de señalización del panel para indicar que la simulación se encuentra en la configuración 2 con control de lazo abierto.
- **modo\_auto\_C2**: utilizada por la lámpara de señalización del panel para indicar que la simulación se encuentra en la configuración 2 con control de lazo cerrado.
- **palanca\_modos\_C2**: se activa mediante la palanca de la configuración 2 del panel y permite cambiar entre los modos de control en bucle abierto y bucle cerrado para esta configuración. Además, permite modificar el valor de las variables locales “modo\_manual\_C2” y “modo\_auto\_C2” utilizadas por las lámparas de señalización del SCADA.
- **modo\_conf1**: utilizada por la lámpara de señalización del panel para indicar que la simulación se encuentra en la configuración 1.
- **modo\_conf2**: utilizada por la lámpara de señalización del panel para indicar que la simulación se encuentra en la configuración 2.



Figura 3.40: Código ladder para las variables del panel en Codesys

### 3.2.3.3 Panel

A modo de botonera o panel de operario, en el objeto de visualización “Panel” se tiene un sistema de botones, palancas y campos de texto separados en módulos que permiten controlar distintos parámetros y ajustes referentes a la simulación de la planta. Acompañando a estas palancas y botones se tienen unas lámparas de señalización que permiten identificar el estado actual y los cambios realizados con mayor facilidad.



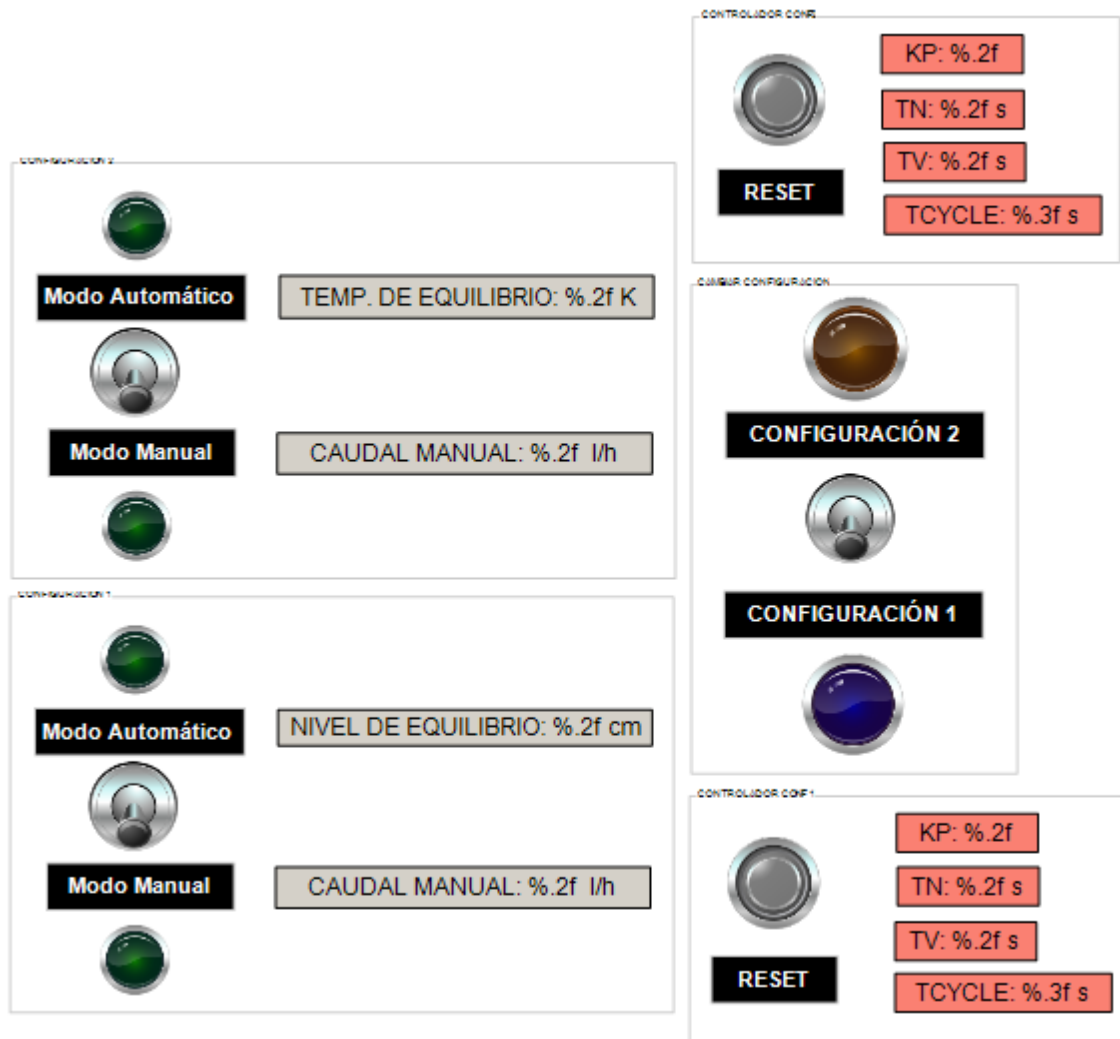


Figura 3.41: Panel de operario del SCADA

El módulo “Cambiar Configuración” permite cambiar entre las dos configuraciones principales de la simulación modificando el valor de la variable local “palanca\_conf”.

Para cada una de las configuraciones hay también un módulo con una palanca que permite cambiar entre control en bucle abierto (modo manual) y bucle cerrado (modo automático) para esa configuración. La palanca del módulo de la configuración 1 actuará sobre “palanca\_modulo\_C1” y la que utiliza la configuración 2 sobre “palanca\_modulo\_C2”. Ambos módulos harán uso de unos campos de texto que permiten fijar el valor (como un número real de hasta dos decimales) del caudal de agua de circulación si el control está en modo manual (caudal de la planta multiprocesos para la configuración 1 y del reservorio de agua fría para la configuración 2), o del punto de equilibrio que se desea alcanzar para las variables a controlar (nivel del depósito contenedor para la configuración 1 y temperatura del agua de la planta medido por el sensor TT2 para la configuración 2) y del que se ocuparán los controladores implementados en el PLC mencionados anteriormente.

Además, existen dos módulos referentes al controlador de cada una de las configuraciones que permiten modificar durante la ejecución del programa los términos del controlador: constante de proporcionalidad (KP), tiempo integral (TN) y tiempo derivativo (TV). También se incluye un campo de texto que permite introducir el tiempo de ciclo (en s) de cada uno de los controladores, es decir, el tiempo transcurrido entre llamadas al controlador. Por último, se incluye un botón de reseteo que permite activar la variable “RESET” de los controladores y encargada de reiniciar el término integral y fijar la acción de control en su valor de *offset*.

# 4 CONTROL Y ENSAYOS

Con las bases de la comunicación OPC establecidas y una vez explicado el funcionamiento de los distintos elementos que componen el modelo *Simscape* de *Matlab*, y el autómata programable y el SCADA de *Codesys*, es el momento de poner a prueba la simulación y diseñar los controladores integrados en el PLC, ver cómo se comportan las variables a controlar en sus distintas configuraciones y averiguar qué retardo existe entre las órdenes del usuario y su ejecución en la simulación a través de los ítems del servidor OPC.

## 4.1 Condiciones iniciales de equilibrio

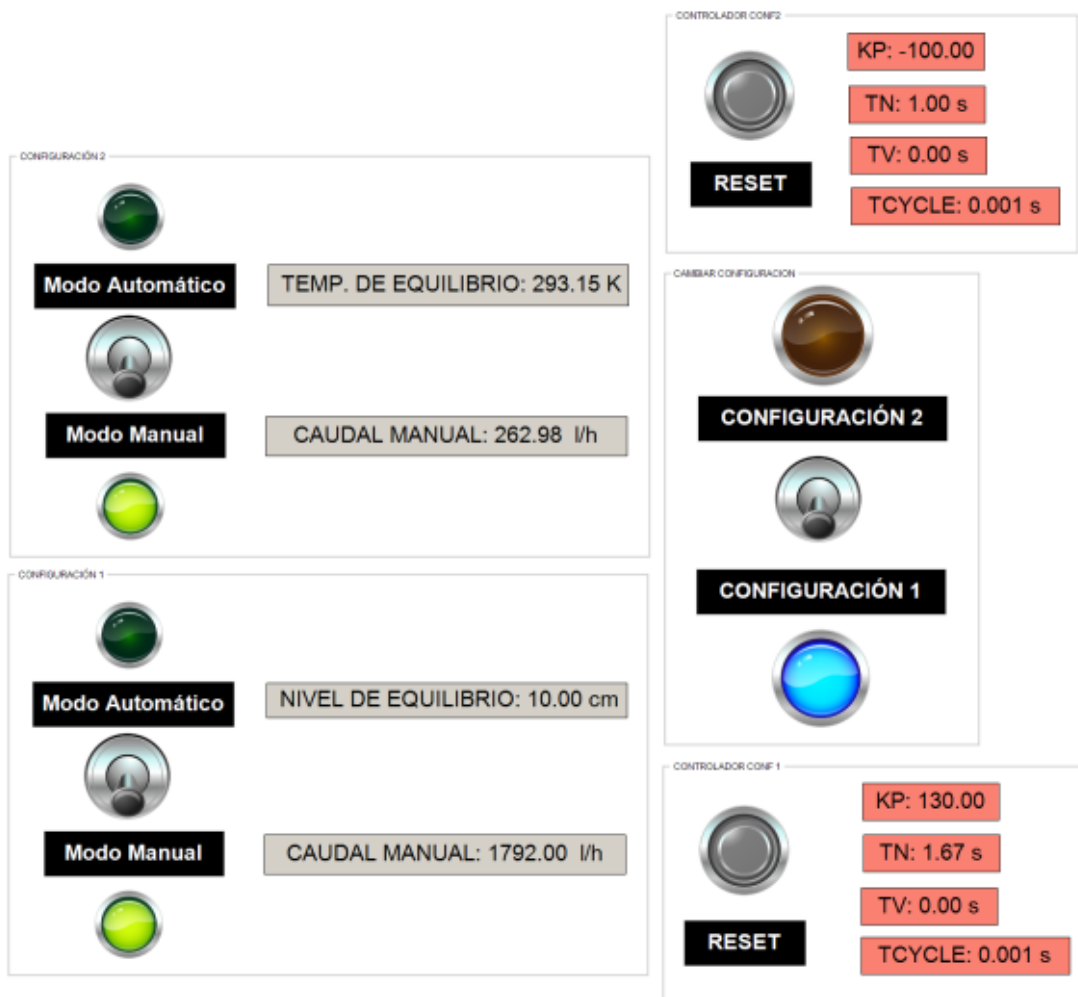
Dado que el modelo simulado no parte de valores nulos en su inicialización, es necesario ajustar el valor de las variables controladas en el panel de operario para empezar desde un punto de equilibrio. Estos valores de caudal (de la planta para la configuración 1 y de agua fría para la configuración 2) también formarán parte de la entrada  $Y_{\text{OFFSET}}$  de sus respectivos controladores.

Para la declaración e inicialización de los parámetros de los controladores, la POU “PI” dispone del siguiente código en ST:

```
1 PROGRAM PI
2 VAR
3     //CONFIGURACIÓN 1
4     PID_FIXCYCLE_0: PID_FIXCYCLE;
5     T_CYCLE_C1: REAL:=1E-3;
6     RESET_C1:BOOL:=0;
7     MANUAL_C1:BOOL;
8     LIMITS_ACTIVE_C1:BOOL:=0;
9     OVERFLOW_C1:BOOL:=0;
10    Y_OFFSET_C1:REAL:=1792;
11
12    //VALORES INICIALES PI
13    KP_C1:REAL:=100;
14    TN_C1:REAL:=1.6667;
15    TV_C1:REAL:=0;
16
17    //CONFIGURACIÓN 2
18    PID_FIXCYCLE_1: PID_FIXCYCLE;
19    T_CYCLE_C2: REAL:=1E-3;
20    RESET_C2:BOOL:=0;
21    MANUAL_C2:BOOL;
22    LIMITS_ACTIVE_C2:BOOL:=0;
23    OVERFLOW_C2:BOOL:=0;
24    Y_OFFSET_C2:REAL:=262.98;
25    //VALORES INICIALES PI
26    KP_C2:REAL:=-100;
27    TN_C2:REAL:=1;
28    TV_C2:REAL:=0;
29 END_VAR
```

Figura 4.1: Inicialización de los parámetros de los controladores en Codesys

El panel de operario, tras la ejecución del programa en Codesys, se inicia con la configuración y los parámetros de ajuste mostrados a continuación:



**Figura 4.2:** Ajustes de inicio del panel de operario

#### 4.1.1 Condiciones iniciales de la Configuración 1

La simulación se iniciará siempre con la configuración 1 y en el modo manual de control, con un caudal de 1792 l/h que se corresponde a un nivel de equilibrio en el depósito contenedor de  $\approx 10,03$  cm. El depósito colector, por otro lado, partirá de un nivel de  $\approx 22$  cm.

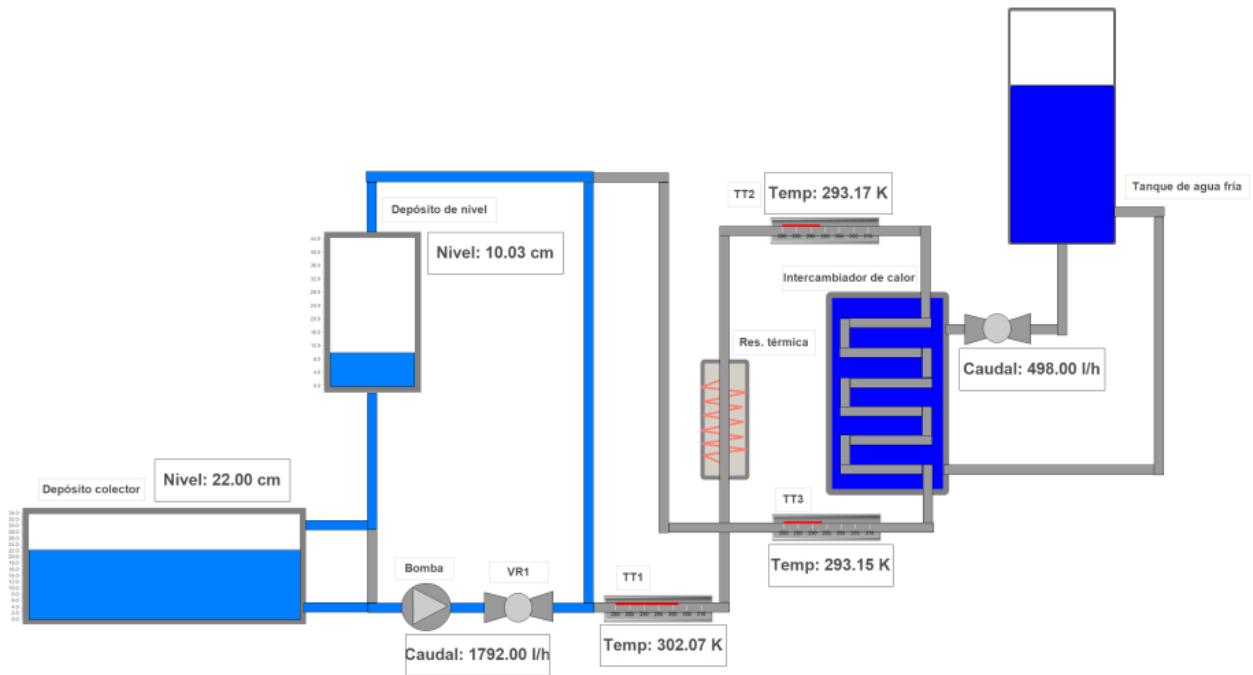


Figura 4.3: SCADA con las condiciones iniciales para la Conf. 1

Se puede observar en la visualización del SCADA como el agua de las tuberías del sistema solo circula por el circuito primario, descargando en el depósito colector tras su paso por el depósito de nivel.

#### 4.1.2 Condiciones iniciales de la Configuración 2

Al pasar a la configuración 2 de la planta a través de la palanca en el panel de operario, se podrá observar el cambio en la circulación del caudal por las tuberías de la visualización del SCADA. Ahora, atravesará el circuito térmico, pasando tanto por la resistencia térmica como por el intercambiador de calor equivalentes. También se puede apreciar como el caudal de agua fría del tanque recorre el circuito secundario del intercambiador, y como se realiza un *bypass* tras la descarga del depósito de nivel, confluyendo el caudal de la planta directamente en la bomba sin pasar por el depósito colector.

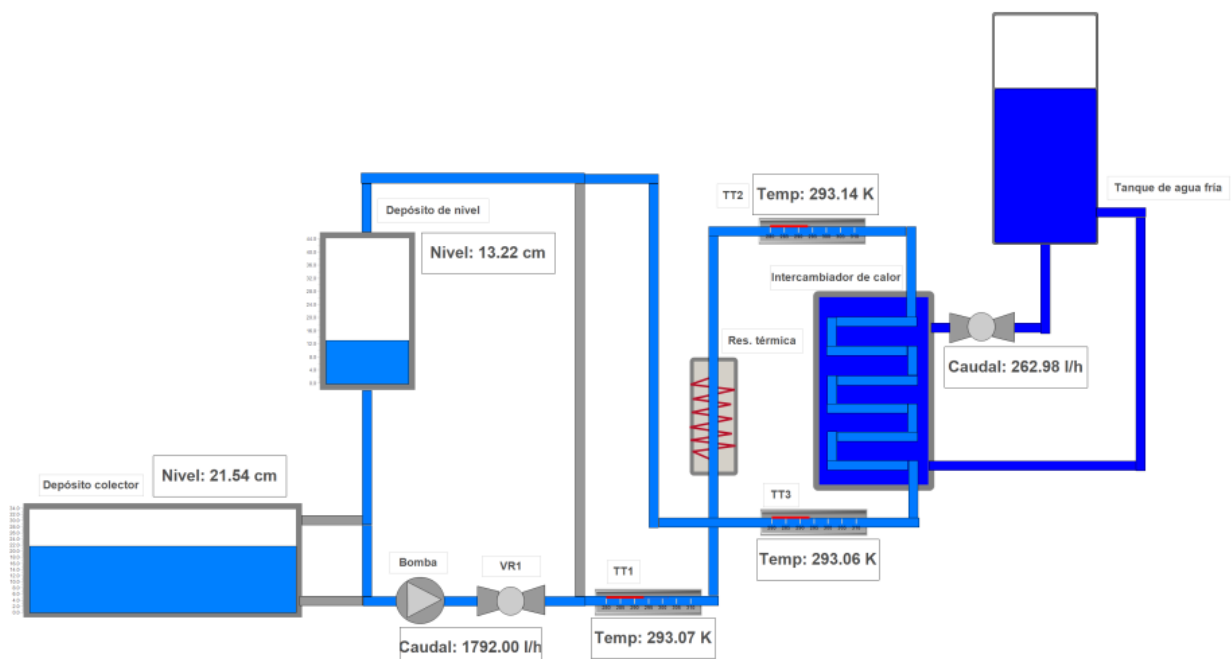
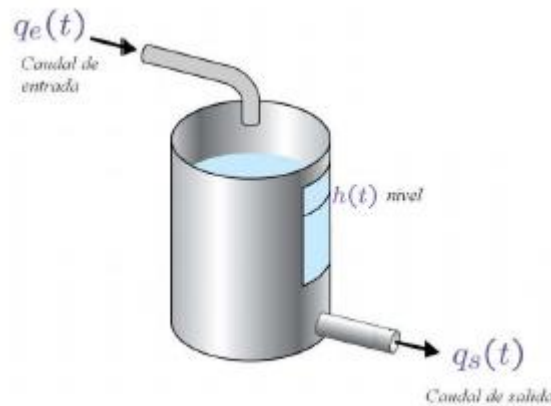


Figura 4.4: SCADA con las condiciones iniciales para la Conf. 2

En sus condiciones iniciales, el caudal de agua fría se fijará a un valor de 262,98 l/h, obteniendo una medición del sensor TT2 de la temperatura aproximada a los 293,15 K (20,15°C). Se puede apreciar que, en esta configuración, el nivel del depósito contenedor (con el caudal de equilibrio de la planta) sube hasta  $\approx 13,22$  cm. Esto es debido al volumen de líquido contenido en el circuito que no descarga en el depósito colector tras el *bypass* realizado.

## 4.2 Identificación del comportamiento de la planta simulada en bucle abierto

El principio de funcionamiento de la planta multiprocesos se puede simplificar como el del modelo de llenado y descarga de un depósito cilíndrico abierto al ambiente, tal y como se muestra en la siguiente imagen [1]:



**Figura 4.5:** Sistema de llenado y descarga de un depósito

El depósito se llena por la parte superior con un caudal variable  $q_e(t)$  mientras que descarga por gravedad en su parte inferior con caudal  $q_s(t)$ . La velocidad de descarga dependerá del volumen de líquido y es representado por la altura del depósito  $h(t)$ .

Se pueden deducir 3 ecuaciones matemáticas que identificarán el modelo: la variación del volumen de agua que depende de los caudales de entrada y salida, el volumen de un cilindro y la dinámica de la descarga por gravedad de un depósito.

$$\frac{dV(t)}{dt} = q_e(t) - q_s(t)$$

$$V = A h(t)$$

$$q_s(t) = k h(t)^\alpha$$

Expresando estas ecuaciones como una única ecuación diferencial que relacione la variación del nivel de la columna de agua con el caudal de entrada al depósito se tiene:

$$\frac{dA h(t)}{dt} = q_e(t) - k h(t)^\alpha$$

Como se tiene un sistema no lineal, será necesario linealizarlo. Para ello, se establece un punto de equilibrio y se definen las variables del sistema como variables incrementales. Tras aplicar la transformada de Laplace, se obtiene una función de transferencia como la siguiente:

$$G(s) = \frac{H(s)}{Q(s)} = \frac{1}{A s + k \alpha h_0^{\alpha-1}}$$

Donde  $k$  y  $\alpha$  son constantes que solo pueden ser identificadas experimentalmente. Se puede ver que el tipo de función lineal resultante se identifica con la de un sistema de primer orden. Pero, como se verá posteriormente, el sistema simulado tendrá un parámetro más que habrá que tener en cuenta y es el tiempo de retardo que se produce entre las órdenes del operario y la actuación de los elementos controlados debido a la comunicación entre los dos programas a través del servidor OPC.

Un sistema de primer orden con retraso se puede expresar a partir de la siguiente función de transferencia:

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1} e^{-\tau_d s}$$

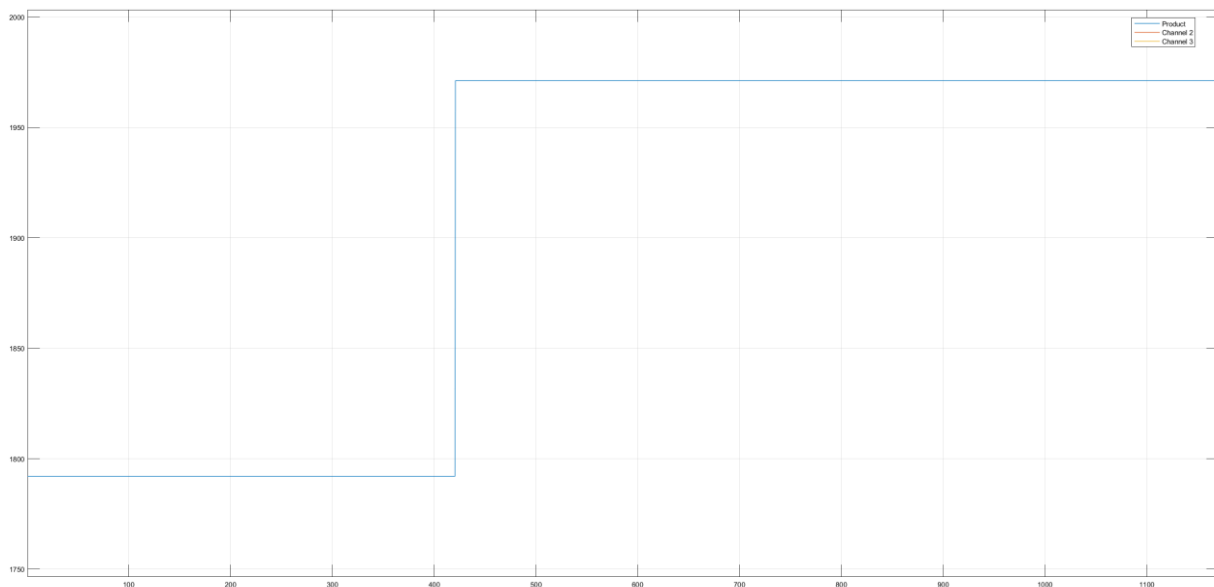
donde:

- $K$  es la ganancia estática del sistema  $\frac{\Delta Y}{\Delta U}$  (unidades conformes a las de entrada y salida).
- $\tau$  es la constante de tiempo (medida en segundos).
- $\tau_d$  es el tiempo de retardo, o tiempo muerto, entre la orden y la ejecución de las variables controladas (medida en segundos).

La función de transferencia que se obtiene de la relación entre el caudal de agua fría que circula por el intercambiador de calor y la temperatura del líquido de la planta para la configuración 2 también deriva en un sistema de primer orden, por lo que se utilizará la ecuación anterior para expresarla.

#### 4.2.1 Comportamiento en bucle abierto de la Configuración 1

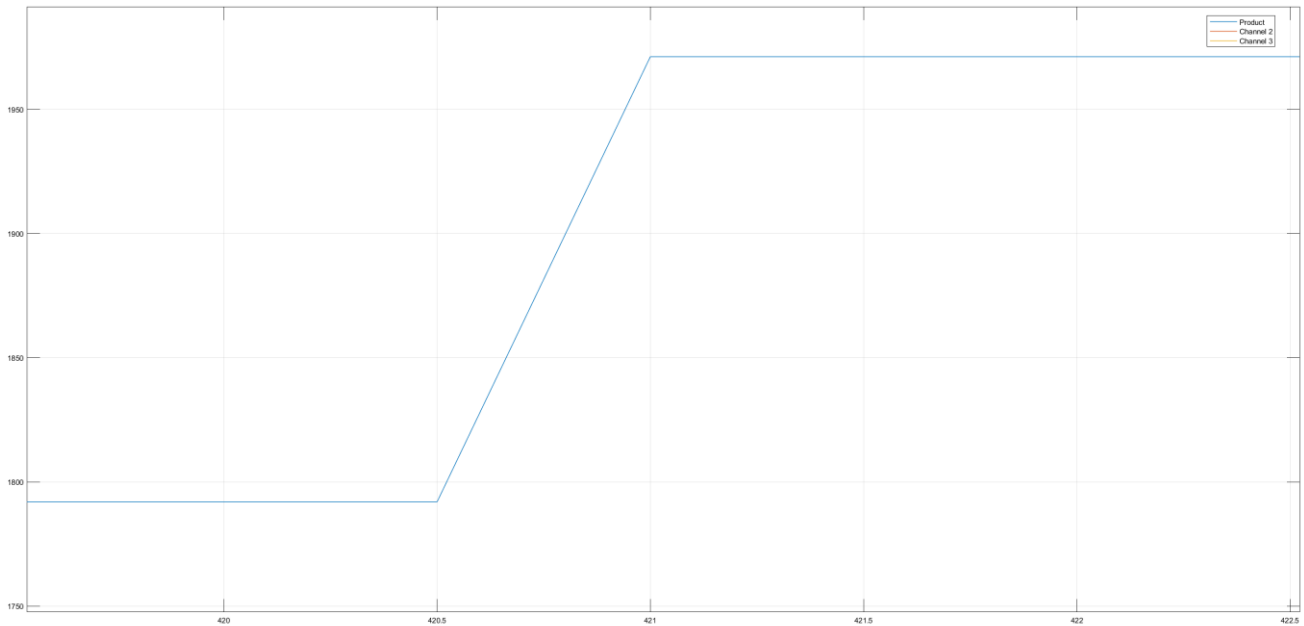
Se aplica un escalón del 10% sobre el caudal de equilibrio inicial en la configuración 1, resultando en un caudal de 1971,2 l/h.



**Figura 4.6:** Escalón del 10% sobre el caudal inicial de equilibrio – Conf. 1

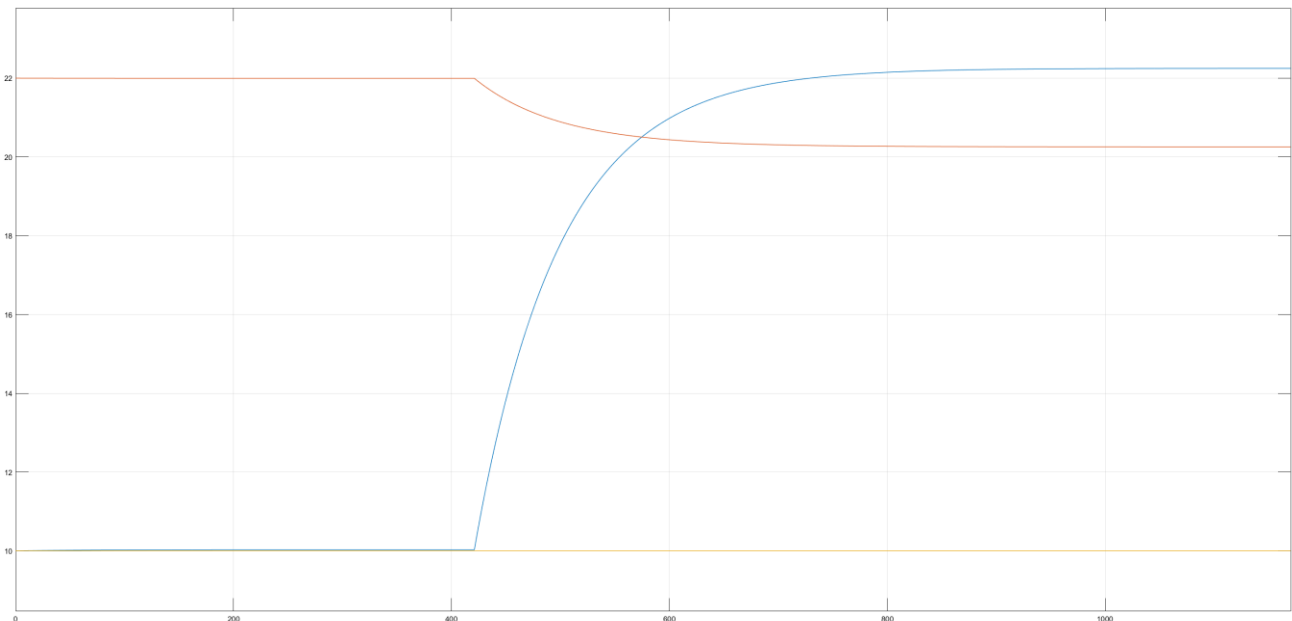
Mirando con más detalle este escalón se puede apreciar que existe un retraso de 0,5s entre la orden del usuario a través del panel de operario en el SCADA y la ejecución del cambio en el escalón. A diferencia del sistema real, este retraso no se produce debido al tiempo transcurrido en la actuación de la válvula electro neumática VR1 y la modificación de su grado de apertura, sino que, al tratarse de una simulación, el tiempo muerto se corresponde con el de lectura de la orden a través del servidor OPC.

En concreto, el tiempo de retardo  $\tau_d$  obtenido en la simulación dependerá exclusivamente del tiempo de muestreo (*sample time*) seleccionado en el bloque OPCRead (apdo. 2.6.2). Para sobrescribir los elementos del servidor OPC desde *Matlab*, se puede seleccionar un tiempo de muestreo síncrono que actualice estos valores de forma continua.



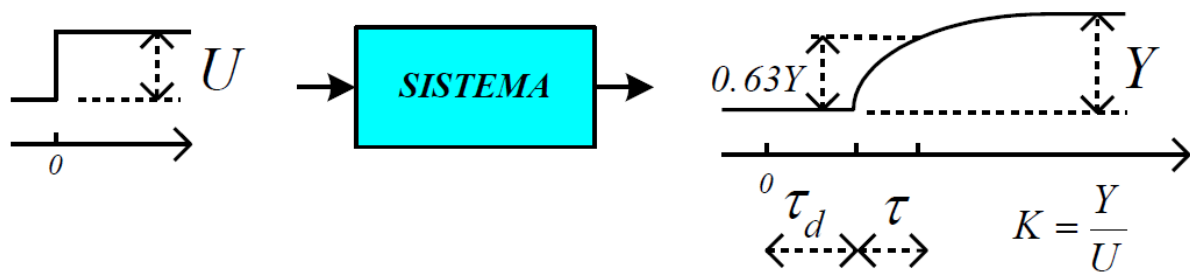
**Figura 4.7:** Retardo en el escalón debido a comunicación OPC

La evolución en el nivel de los depósitos de la planta se puede ver en la siguiente imagen extraída de la simulación:



**Figura 4.8:** Evolución del nivel en los depósitos tras escalón del 10% en el caudal – Conf. 1

La curva azul se corresponde con el nivel del depósito contenedor, mientras que la naranja representa el nivel del depósito colector. Se puede observar que se comporta como un sistema de primer orden. A través de la respuesta del sistema se podrán obtener los parámetros que caracterizan al sistema:



**Figura 4.9:** Cálculo de parámetros que definen un sistema de primer orden

Se realiza el cálculo de la constante de tiempo y la ganancia estática como se muestra en la figura anterior y se obtiene que:

$$\tau = 498,98 \text{ s} - 421 \text{ s} = 78,98 \text{ s}$$

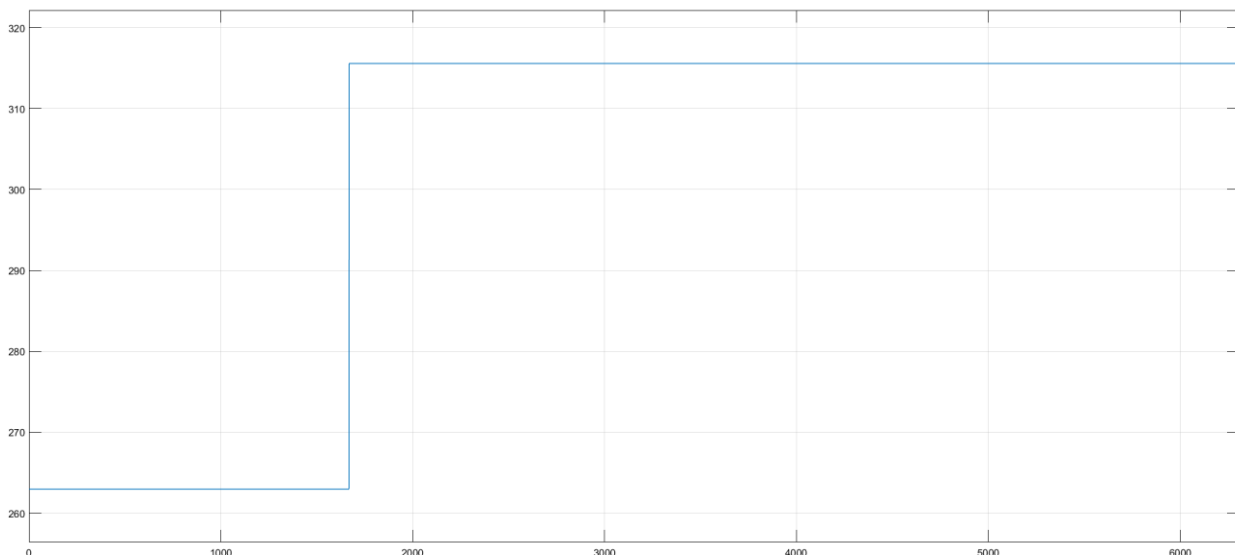
$$K = \frac{22,25 - 10,03}{1971,2 - 1792} = 0,068$$

Obteniendo la siguiente función de transferencia para la primera configuración:

$$G_1(s) = \frac{0,068}{78,98s + 1} e^{-0,5s}$$

#### 4.2.2 Comportamiento en bucle abierto de la Configuración 2

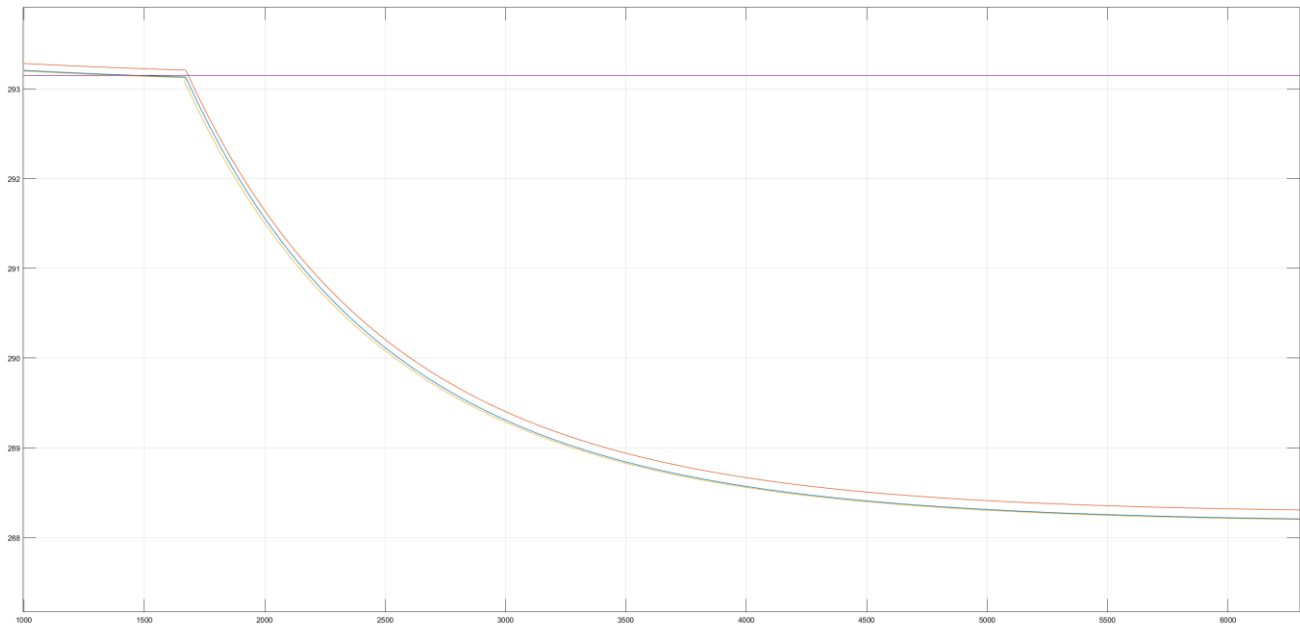
Para la configuración 2 de temperatura de la planta, se va a aplicar un escalón del 20% sobre el caudal de equilibrio del agua fría, resultando un caudal de 315,58 l/h.



**Figura 4.10:** Escalón del 20% sobre el caudal inicial de equilibrio – Conf. 2

El sistema para esta configuración es inverso, es decir, cuanto mayor es el caudal de agua fría menor es la temperatura del agua de la planta.





**Figura 4.11:** Evolución de la temperatura tras escalón del 20% en el caudal de agua fría – Conf. 2

La curva roja se corresponde con la temperatura medida por el sensor TT2 situado entre la resistencia térmica y el intercambiador, siendo la variable a controlar en esta configuración, mientras que la curva verde se corresponde con la medida de TT1 (sensor situado antes de la resistencia térmica) y la amarilla con TT3 (sensor situado a la salida del intercambiador de calor).

Se calculan los parámetros que identifican al sistema como se vio anteriormente para la configuración 1:

$$\tau = 2530,74 \text{ s} - 1668 \text{ s} = 862,74 \text{ s}$$

$$K = \frac{288,3 - 293,15}{315,58 - 262,88} = -0,092$$

Obteniendo la siguiente función de transferencia:

$$G_2(s) = \frac{-0,092}{862,74s + 1} e^{-0,5s}$$

### 4.3 Diseño de controladores e implementación

En los primeros controladores integrados en el propio modelo *Simscape* de *Matlab* se utilizó la técnica de cancelación de dinámicas para su diseño. Dado que el sistema completo con el PLC integrado en *Codesys* presenta retardo, se van a emplear las tablas de Ziegler-Nichols en bucle abierto para rediseñarlos:

	$K_P$	$T_i$	$T_D$
P	$\frac{\tau}{K \tau_d}$	$\infty$	0
PI	$\frac{0.9 \tau}{K \tau_d}$	$\frac{\tau_d}{0.3}$	0
PID	$\frac{1.2 \tau}{K \tau_d}$	$2 \tau_d$	$0.5 \tau_d$

**Tabla 4.1:** Ziegler-Nichols en bucle abierto

Como el régimen transitorio y las pequeñas sobreoscilaciones que se puedan dar durante este no son realmente relevantes en el comportamiento que se espera de los controladores, se ha optado por diseñar un controlador PI para ambas configuraciones.

Además de las características propias de utilizar un controlador proporcional, los controladores PI presentan las siguientes propiedades [4]:

- Elimina el error en régimen permanente frente a referencias constantes
- Disminuye la estabilidad relativa (a costa de aumentar la sobreoscilación) para valores pequeños de  $T_i$

A partir de las tablas de Ziegler-Nichols, y con las funciones de transferencia de ambas configuraciones obtenidas previamente, se tienen los siguientes valores de la constante de proporcionalidad y el tiempo integral que definen a un controlador PI:

- Configuración 1:
  - $K_p = 2084.82$
  - $T_i = 1,67$
- Configuración 2:
  - $K_p = -16879,70$
  - $T_i = 1,67$

En ambos casos las  $K_p$  obtenidos mediante este método resultan muy grandes y, por tanto, demasiado agresivos para el sistema, provocando unas sobreoscilaciones durante el transitorio que provocan un error y la detención de la simulación. Se han establecido pues, experimentalmente, en un valor de 130 la constante de proporcionalidad  $K_p$  del controlador de la configuración 1 y en -100 el de la configuración 2, permitiendo un tiempo de establecimiento aceptable (dentro de la lentitud propia de los sistemas hidráulicos) con una sobreoscilación mínima en algunos casos.

Para la configuración 2, que es especialmente lenta, también se ha ajustado el tiempo integral a un valor de 1. A menor tiempo integral se tardará menos en alcanzar el régimen permanente, aunque por otra parte aumentará la inestabilidad, por lo que es necesario buscar un equilibrio entre ambas características.

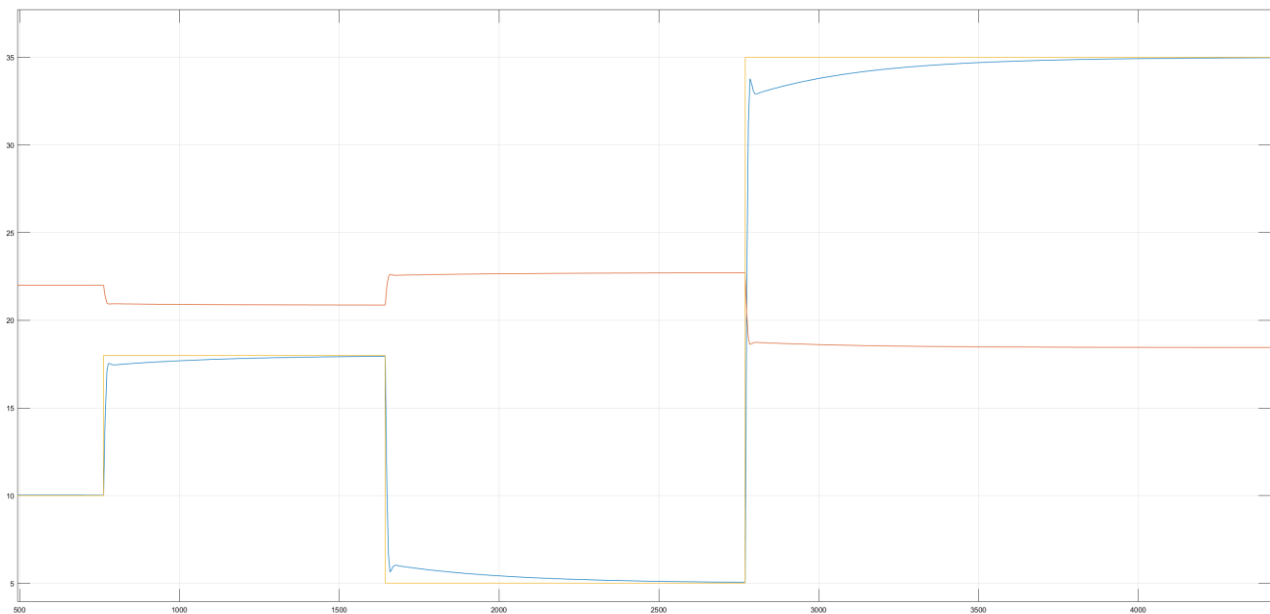
Los controladores diseñados serán lo suficientemente buenos como para alcanzar el valor en régimen permanente introducido por el usuario para las variables a controlar, con un error mínimo y un tiempo de establecimiento aceptable. Sin embargo, no son óptimos, y siempre será posible modificar sus parámetros durante la simulación, incluso probar como se comportarían un controlador proporcional o un PID integrados en el PLC.

## 4.4 Ensayos y pruebas al comportamiento de la planta simulada en bucle cerrado

Una vez configurados los parámetros de los PI integrados en el PLC, se van a realizar una serie de pruebas en ambas configuraciones que permitan observar cómo se comporta el sistema ante la acción de control del autómatas, el tiempo de establecimiento y las sobreoscilaciones en el transitorio.

### 4.4.1 Ensayos para la Configuración 1

Se van a aplicar 3 escalones desde el panel de operario para observar el comportamiento del sistema partiendo del nivel de equilibrio, en concreto de 10 a 18 cm, de 18 a 5 cm y de 5 a 35 cm. La evolución del nivel durante el ensayo es la siguiente:



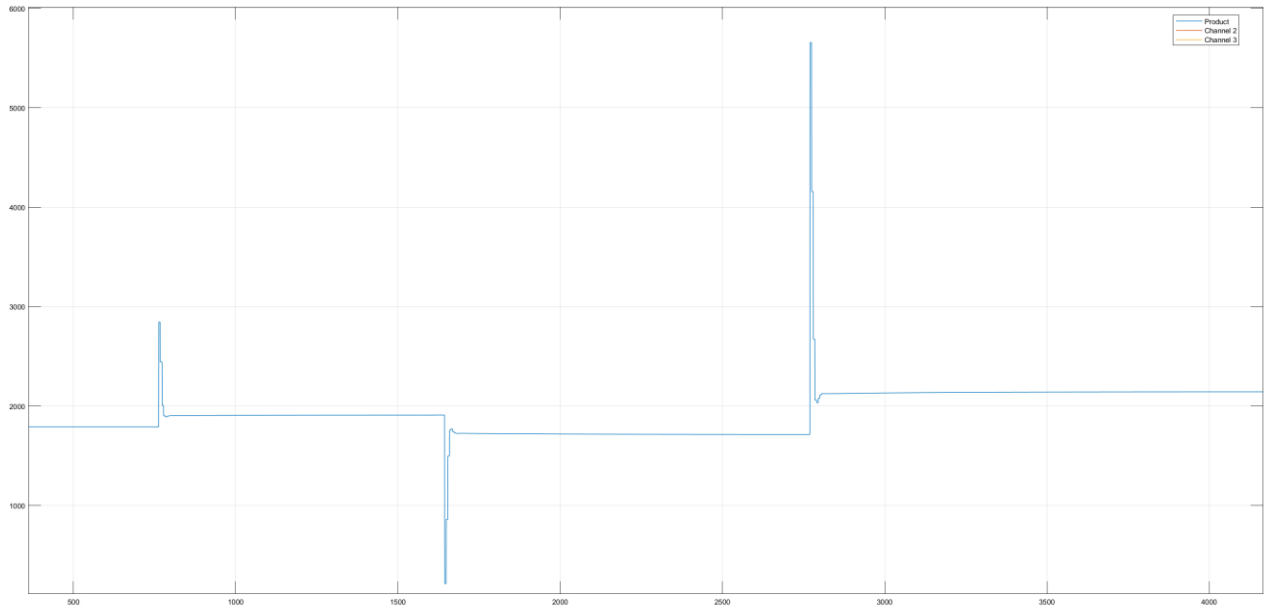
**Figura 4.12:** Nivel de los depósitos durante ensayos de escalón en bucle cerrado – Conf. 1

Siendo la curva amarilla el escalón, la curva azul el nivel del depósito contenedor y la curva naranja el nivel del depósito colector.

Se obtienen unos tiempos de establecimiento  $t_e$  al 2% de  $\approx 950$  s (16 min) en los escalones de aumento de nivel, y de 1100 s (18 min) en el de disminución de este. El proceso de descarga siempre será más lento que el de llenado pues es dependiente de la gravedad y el volumen de líquido que tenga el depósito.

Se observa también que con estos parámetros del controlador no hay sobreoscilaciones durante el transitorio, evitando el colapso de la simulación si se solicitan valores cercanos a los límites (0 y 44 cm).

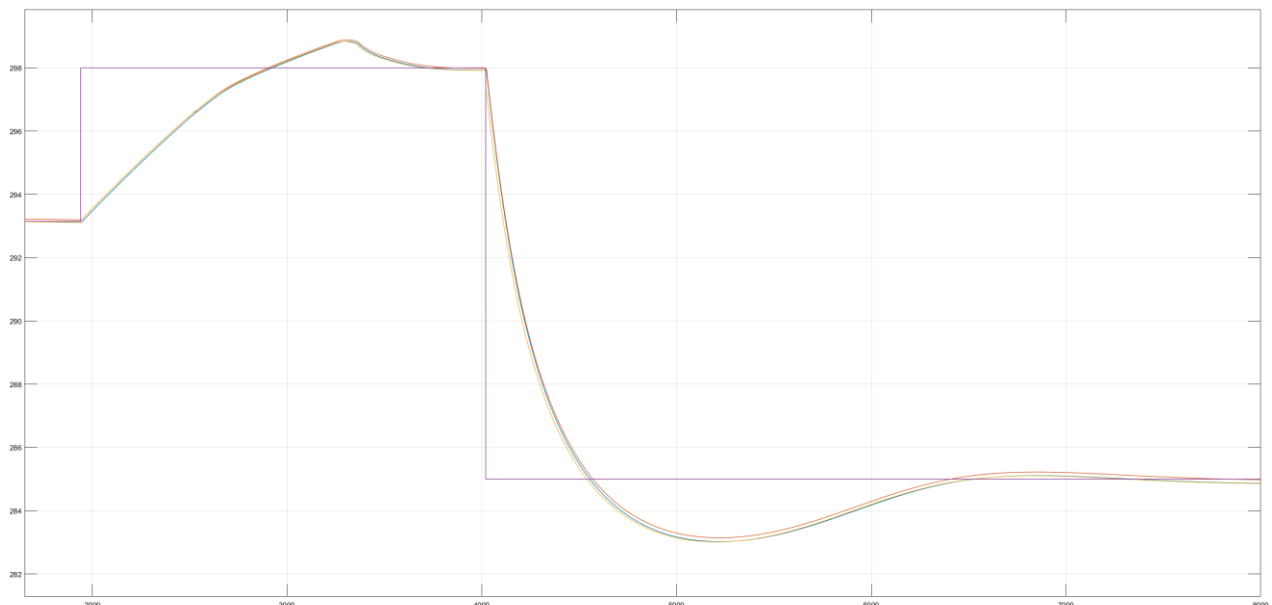
A continuación, se puede ver la acción de control del PLC sobre el caudal de la planta.



**Figura 4.13:** Caudal de la planta durante ensayos de escalón en bucle cerrado – Conf. 1

#### 4.4.2 Ensayos para la Configuración 2

Para el ensayo en lazo cerrado de la configuración 2 se han realizado dos escalones sobre la temperatura del agua de la planta, partiendo de la temperatura inicial de equilibrio de 293,15 K (20,15°C) hasta 298 K (25°C), y hasta 285 K (12°C) una vez se ha establecido en la temperatura anterior. Los resultados obtenidos son los siguientes:

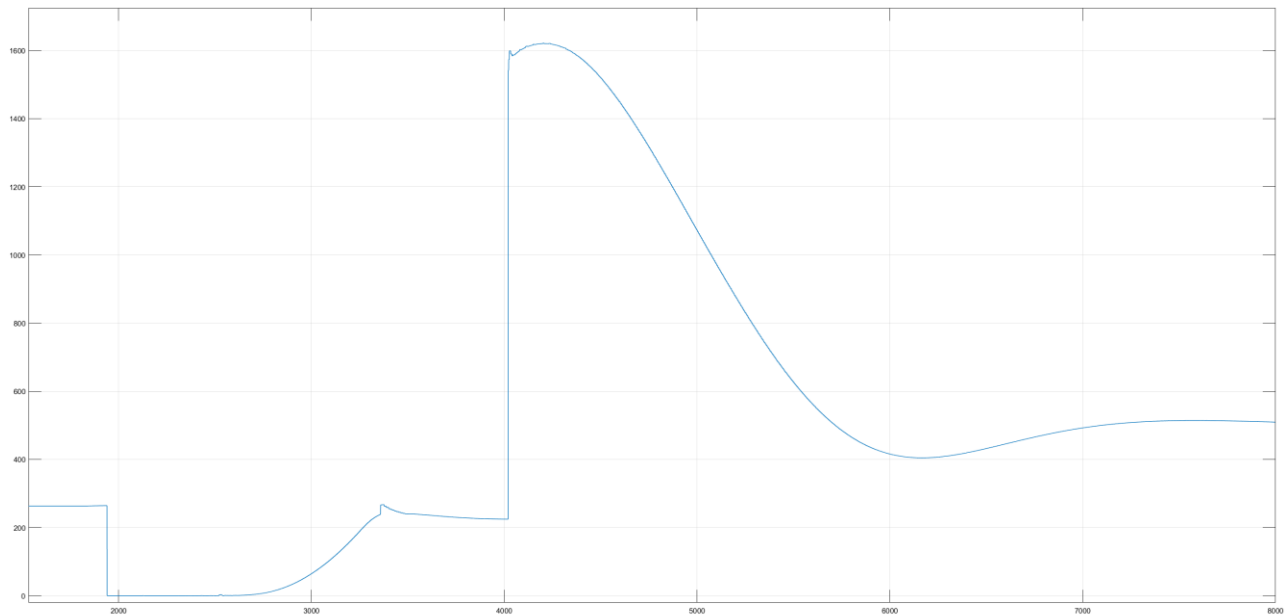


**Figura 4.14:** Temperatura del agua durante ensayos de escalón en bucle cerrado – Conf. 2

La curva morada representa el escalón de temperatura dado desde el panel de operario, la curva naranja la temperatura medida en TT2 (variable a controlar), la curva azul la temperatura medida en TT1 (antes de la resistencia térmica) y la curva amarilla la temperatura medida en TT3 (tras pasar por el intercambiador de calor).

Se obtiene en el primer escalón de subida de temperatura una sobreoscilación SO de apenas el 0,30% y un  $t_e$  al 2% de unos 2000 s (33 min), mientras que en la bajada de temperatura la SO sube hasta el 0,65% y el  $t_e$  es de  $\approx 3750$  s (62,5 min). Como se puede ver el control sobre la temperatura del agua de la planta resulta en un sistema extremadamente lento, resultando necesario efectuar una acción más agresiva del controlador, aunque provoque pequeñas sobreoscilaciones.

Se muestra a continuación la acción de control que lleva a cabo el PLC sobre el caudal de agua fría que circula por el circuito secundario del intercambiador:



**Figura 4.15:** Caudal de agua fría durante ensayos de escalón en bucle cerrado – Conf. 2

# 5 CONCLUSIONES Y MEJORAS PROPUESTAS

---

El uso de la interfaz OPC deja la puerta abierta a múltiples aplicaciones como herramienta didáctica para el control y la automatización de procesos, pero también a su implementación en la propia industria. La sencillez de su uso y los bajos tiempos de respuesta y actualización que permite, la convierten en una opción a tener en cuenta para la implementación de distintos PLCs y SCADAs sobre modelos simulados, o incluso sistemas reales.

Del uso de bloques tipo *Simscape* para diseñar el modelo se puede intuir su gran potencial a futuro gracias al amplio abanico de posibilidades que ofrecen y a su constante actualización en cada nueva versión de *Matlab*. Aunque la parametrización de los bloques es compleja, pues exige un alto grado de conocimiento sobre las características del elemento, siempre es posible realizar algunas simplificaciones o sustituir ciertos bloques más problemáticos por ecuaciones análogas que los simulen utilizando *Simulink*.

Para terminar, se van a listar una serie de posibles añadidos que se podrían hacer sobre los programas realizados para mejorar su funcionamiento, así como otras propuestas de utilización de las herramientas empleadas, con vistas a futuros proyectos relacionados o nuevas formas de aplicación del propio:

- Implementar el PLC y el SCADA diseñados en *Codesys* a la planta multiprocesos real de los laboratorios, en sustitución al autómeta y la pantalla que utiliza normalmente. Sería necesaria una revisión de los elementos que se cargarán en el servidor OPC, además de otros ajustes.
- Realizar el control de la presión del depósito de nivel a través del caudal de la válvula electroneumática en la configuración 1. Para ello, será necesario cerrar el depósito al ambiente a partir de la válvula manual VM4.
- Añadir la configuración 3 al modelo de *Matlab* que permite emplear el circuito térmico de la configuración 2, pero con el paso del caudal de agua por el depósito colector tras la descarga del depósito de nivel. Esto se traducirá en un proceso del control de la temperatura del líquido más lento debido a que también será necesario calentar el volumen de agua que contiene este depósito y que estará en constante circulación.
- Obtener la información necesaria para la parametrización de la bomba de caudal y la válvula electroneumática a través de las fichas técnicas de estos elementos o de la propia experimentación. Se podrá lograr así una simulación más fidedigna y hacer una relación de control entre la apertura de la válvula y el nivel del depósito, tal y como se hace en la planta real.
- Introducir alarmas, temporizadores y avisos de eventos que puedan aportar información relevante sobre la simulación, como por ejemplo al alcanzar ciertos valores límites. Con la descarga del servidor OPC también viene incorporada la aplicación de gestión de alarmas para el servidor *AEConfiguration*.
- Añadir la regulación conmutadora como opción para el control de la temperatura de la planta en la configuración 2. Esta regulación de control permitirá alcanzar la temperatura del líquido deseada a través de la modificación del *duty cycle* de las resistencias térmicas, regulando su potencia calorífica interna.
- Diseñar e implementar los controladores PI óptimos que permitan un tiempo de establecimiento y unas sobreoscilaciones mínimas. Probar también el uso de PIDs integrados en el autómeta.
- Emplear la comunicación vía servidor OPC para otro tipo de aplicaciones. Existen librerías de *Simscape* para simular modelos mecánicos, eléctricos o electrónicos, entre otros, y siempre es posible utilizar las funciones de transferencia, y el resto de los bloques tipo *Simulink*, para emular otros modelos y hacer uso de este tipo de interfaz de comunicación.



# REFERENCIAS

---

- [1] J. M. R. Martínez, Modelado, Identificación y Control de una Planta Piloto, Sevilla: Universidad de Sevilla, 2016.
- [2] E. A. R. González, Identificación y desarrollo de controladores para planta multiprocesos, Sevilla: Universidad de Sevilla, 2019.
- [3] MathWorks. [En línea]. Available: <https://es.mathworks.com/products/simscape.html>.
- [4] D. d. I. d. S. y. Automática, Apuntes de Control Automático de 2º GITI.
- [5] T. Á. Cantarero, Diseño del Controlador PID, Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática - Universidad de Sevilla.
- [6] G.U.N.T., *Manual de instrucciones-RT 450-Sistema Didáctico Modular para la Automatización de Procesos*, Gerätebau, Barsbüttel, Alemania, 02/2013.
- [7] CODESYS, *CODESYS OPC Server V3 - Installation and Usage*, 3S-Smart Software Solutions GmbH.





- ❖ **COM:** Component Object Model
- ❖ **DCOM:** Distributed Component Object Model
- ❖ **Extensión .ini:** extensión para archivos de configuración para aplicaciones en sistemas operativos Windows consistentes en archivos de texto ASCII con secciones que permiten agrupar parámetros relacionados entre sí y los valores que lo definen. También permiten introducir comentarios. Su nombre viene de "Windows Initialization file".
- ❖ **Extensión .log:** extensión asociada a archivos de registro normalmente expresados como archivos de texto en código ASCII con información relevante sobre un programa en ejecución o ya utilizado.
- ❖ **Extensión .xml:** los archivos con extensión xml están escritos en un lenguaje multiplataforma del mismo nombre diseñado para almacenar varios tipos de datos. Son fácilmente leíbles utilizando un editor de texto y son legibles tanto a nivel de usuario como nivel de máquina. Su nombre representa las siglas de "Extensible Markup Language".
- ❖ **LD:** Ladder. Lenguaje de programación gráfico, conocido también como diagrama de contactos, utilizado para la programación de PLCs y basado en esquemas eléctricos de control. A través de distintos tipos de contactos y bobinas unidos entre sí, se forman sentencias lógicas que permiten el control de las variables. Los símbolos que representan a estos elementos eléctricos están normalizados bajo el estándar IEC y es utilizado por todos los fabricantes, lo que hace que sea uno de los lenguajes más utilizados en la industria para la programación de autómatas.
- ❖ **Modbus:** protocolo de comunicaciones público y gratuito situado en los niveles 1, 2 y 7 del Modelo OSI, basado en la arquitectura maestro/esclavo (RTU) o cliente/servidor (TCP/IP) y diseñado para su uso con PLCs. Se ha convertido en un protocolo de comunicaciones estándar en la industria y goza de una gran disponibilidad para la conexión de dispositivos electrónicos industriales.
- ❖ **OPC:** OLE (Object Linking and Embedding) for Process Control
- ❖ **P&ID:** Pipes and Instrumentation Diagram
- ❖ **PLC:** Programmable Logic Controller. Autómata programable.
- ❖ **POU:** Program Organization Unit. Tipo de objeto independiente en *Codesys* para programas, funciones o bloques de funciones que pueden ser escritos en distintos tipos de lenguajes de programación como ST o *Ladder*.
- ❖ **RTU:** Remote Terminal Unit
- ❖ **SCADA:** Supervisory Control And Data Acquisition
- ❖ **ST:** Structured Text. Lenguaje de alto nivel particularmente utilizado en la programación de los autómatas.

# ANEXO 1: Instalación, licencia y ajustes previos del servidor OPC

En el proyecto desarrollado para realizar la comunicación a través de OPC, el operario o usuario utilizará un SCADA diseñado en *Codesys* (que hará la función de cliente) para ordenar, a partir de un PLC, la siguiente acción o cambio de estado de una planta multiprocesos simulada con bloques de *Simscape* en un modelo *Simulink* de *Matlab* (que hará la función de proveedor/servidor), procesando los datos recibidos y devolviéndolos para su visualización. La comunicación de ambos programas tendrá como nexo al servidor OPC, que dispondrá de un caché donde se cargarán los datos y variables para su lectura y escritura.

Las versiones de los programas utilizados han sido:

- *Matlab 2017b*
- *Codesys V3.5 SP14*
- *Codesys OPC DA Server SL Demo 3.5.14*

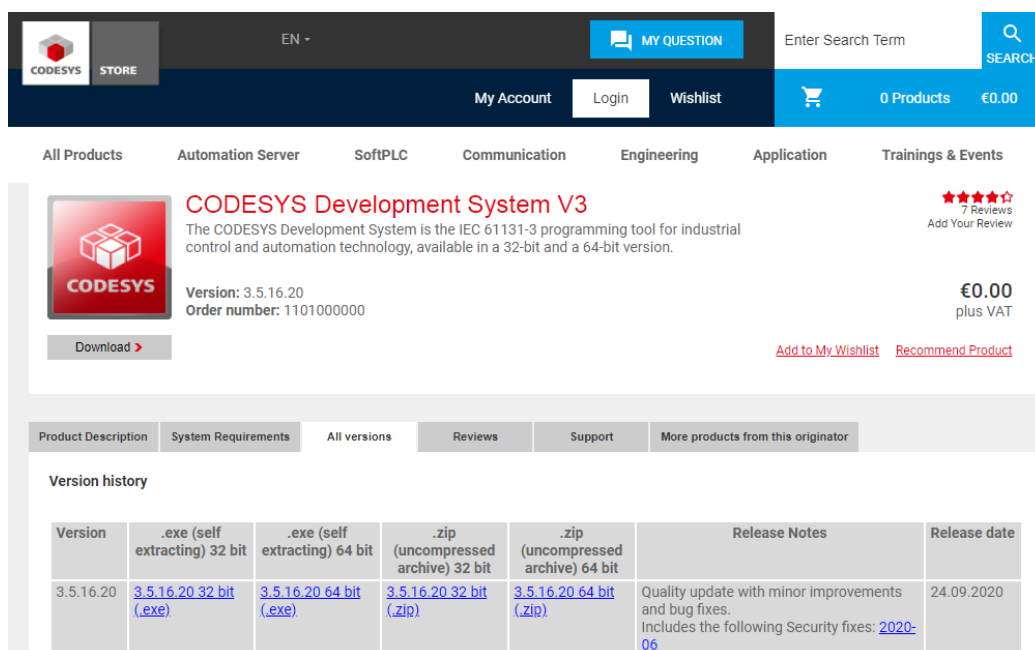
El servidor OPC que se ha utilizado es el propio de *3S-Smart Software Solutions GmbH*, compañía creadora de *Codesys*, con la intención de encontrar facilidades en la conexión de los programas y que no haya problemas de compatibilidad con el PLC.

## Descarga y activación de la licencia de uso

Para la descarga de *Codesys V3* y de *Codesys OPC DA Server*, se debe acceder a la tienda online de *Codesys* (<https://store.codesys.com/>) y registrarse como usuario.

Una vez realizado el registro y haber accedido con el usuario a la tienda, se puede utilizar el buscador situado en la esquina superior derecha para encontrar los programas con mayor facilidad.

Si se desea instalar una versión en concreto del programa, se puede seleccionar la opción “*All versions*” y elegir la acorde al procesador del ordenador en el que se instale (32 o 64 bits). Si se selecciona la opción “*Download*” bajo el icono del programa, se descarga siempre por defecto la versión más reciente.

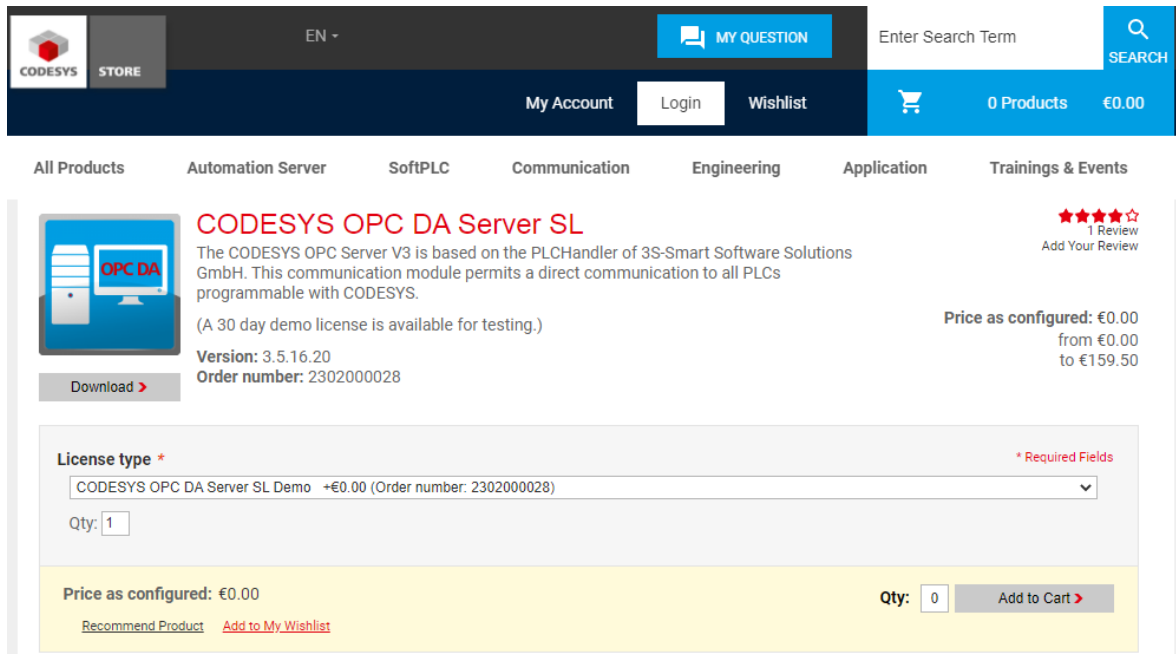


The screenshot shows the Codesys online store interface. At the top, there is a navigation bar with the Codesys logo, a search bar, and a 'MY QUESTION' button. Below the navigation bar, there are tabs for 'All Products', 'Automation Server', 'SoftPLC', 'Communication', 'Engineering', 'Application', and 'Trainings & Events'. The main content area displays the product 'CODESYS Development System V3'. The product card includes a 'Download' button, a price of '€0.00 plus VAT', and a '7 Reviews' rating. Below the product card, there is a 'Version history' table with the following data:

Version	.exe (self extracting) 32 bit	.exe (self extracting) 64 bit	.zip (uncompressed archive) 32 bit	.zip (uncompressed archive) 64 bit	Release Notes	Release date
3.5.16.20	<a href="#">3.5.16.20 32 bit (.exe)</a>	<a href="#">3.5.16.20 64 bit (.exe)</a>	<a href="#">3.5.16.20 32 bit (.zip)</a>	<a href="#">3.5.16.20 64 bit (.zip)</a>	Quality update with minor improvements and bug fixes. Includes the following Security fixes: <a href="#">2020-06</a>	24.09.2020

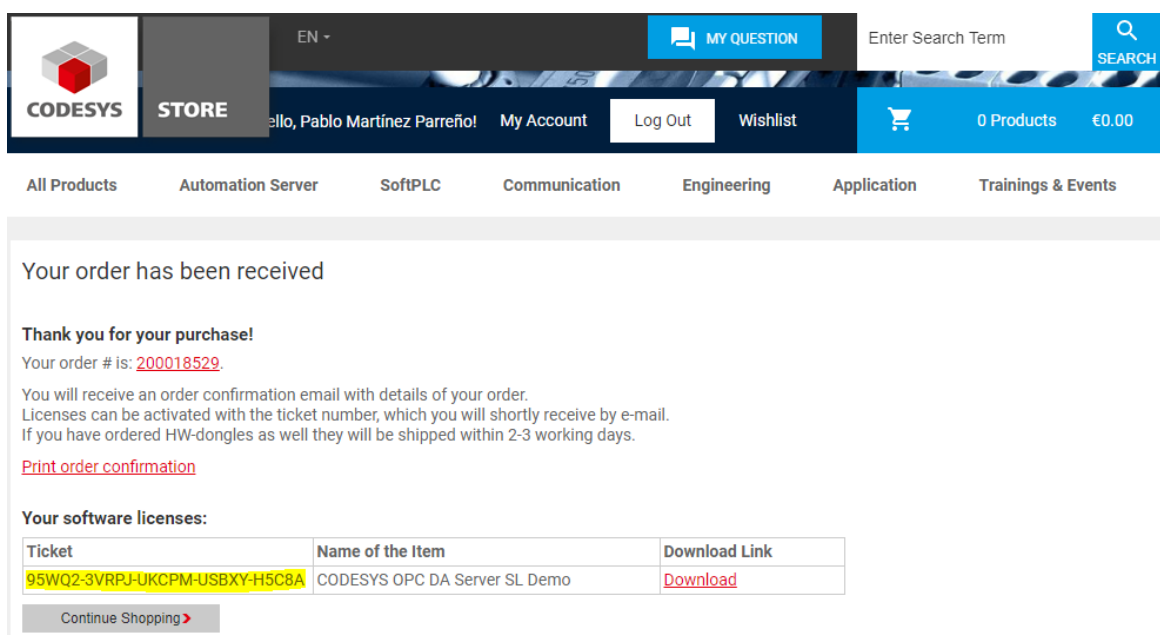
Figura Anexol - 1: Descarga de *Codesys V3*

Se procedería de la misma forma para la descarga del *Codesys OPC DA Server SL*, eligiendo la versión del programa más acorde a nuestro sistema, con la salvedad de que es necesaria una licencia para el uso del servidor OPC. Esta licencia es de pago en su versión completa, pero es posible obtener una licencia de prueba de 30 días seleccionando la opción de “*Demo*” que aparece en el desplegable “*License type*”. Siempre será posible solicitar otra licencia de prueba para continuar utilizando el servidor OPC (aunque no haya expirado aún la licencia actual).



**Figura Anexo1 - 2:** Descarga de *Codesys OPC DA Server SL*

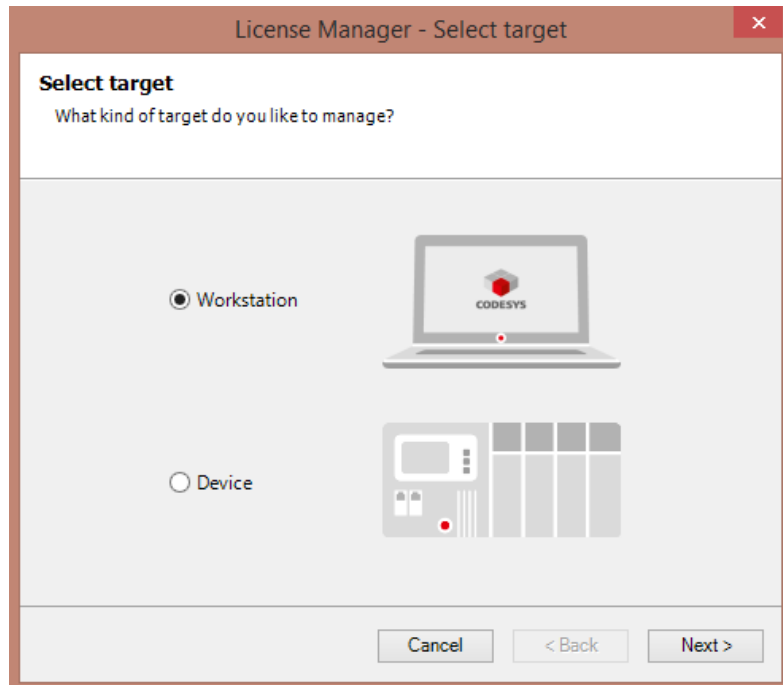
Tras añadir la licencia al carro (“*Add to cart*”), proceder a su compra (“*Proceed to checkout*”) y aceptar los términos y condiciones exigidos, se generará un código de licencia (“*Ticket*”) que permitirá activar la misma en el “*License Manager*” de *Codesys V3*. También es posible activar el código vía online a través del siguiente enlace [license.Codesys.com](http://license.Codesys.com), aunque se recomienda la activación a través del primer método. Este código también se envía al correo del usuario



**Figura Anexo1 - 3:** Código de licencia del servidor OPC

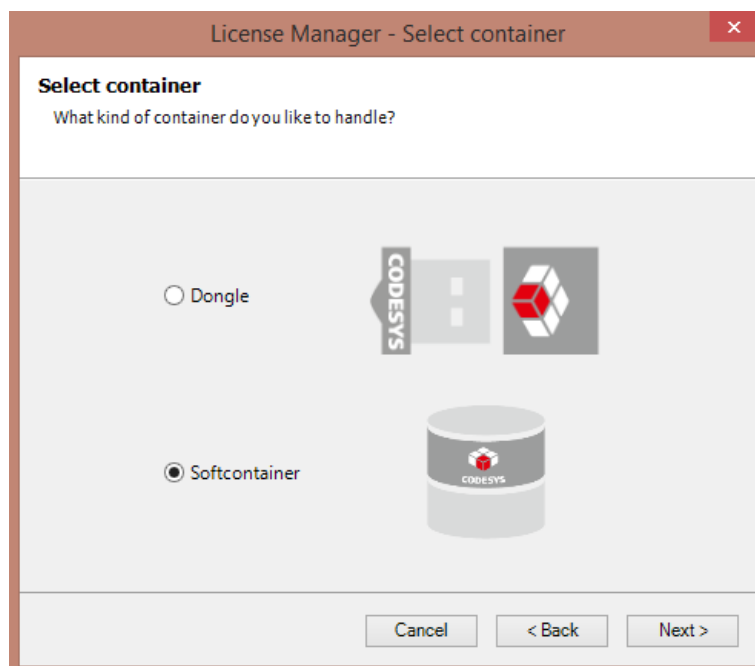
Para activar la licencia en *Codesys V3*, primero se debe iniciar el programa y cargar un proyecto. A continuación, se selecciona la opción “Herramientas” (“*Tools*”) de la barra de comandos superior del programa; y se hace clic en “Administrador de licencias”.

Ahora se debe seleccionar donde se desea activar licencia: “*Workstation*” si se quiere activar en un ordenador o “*Device*” si por el contrario la activación se va a realizar en otro dispositivo (PLC).



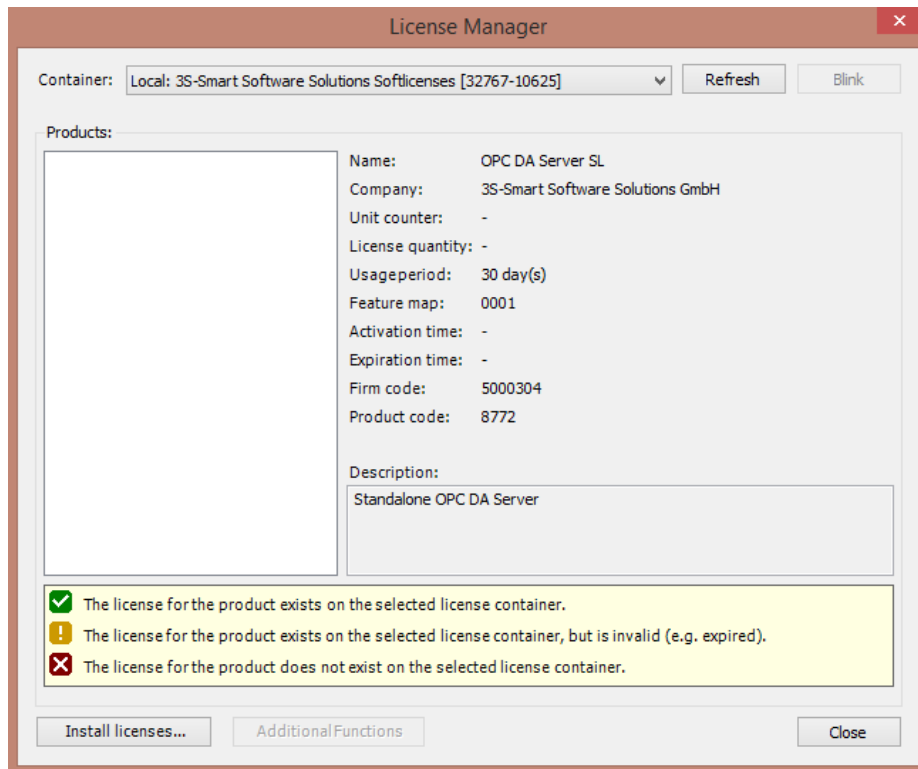
**Figura Anexo1 - 4:** Lugar de activación de la licencia

También hay que elegir el repositorio o contenedor de la licencia (“*Container*”): “*Dongle*” si se guarda en una memoria tipo USB que podrá ser utilizada en otros dispositivos, o “*Softcontainer*” si se desea guardar en un contenedor de licencias asociado al programa y al equipo. Para la comunicación que se ha probado, se han empleado las opciones de “*Workstation*” y “*Softcontainer*”.



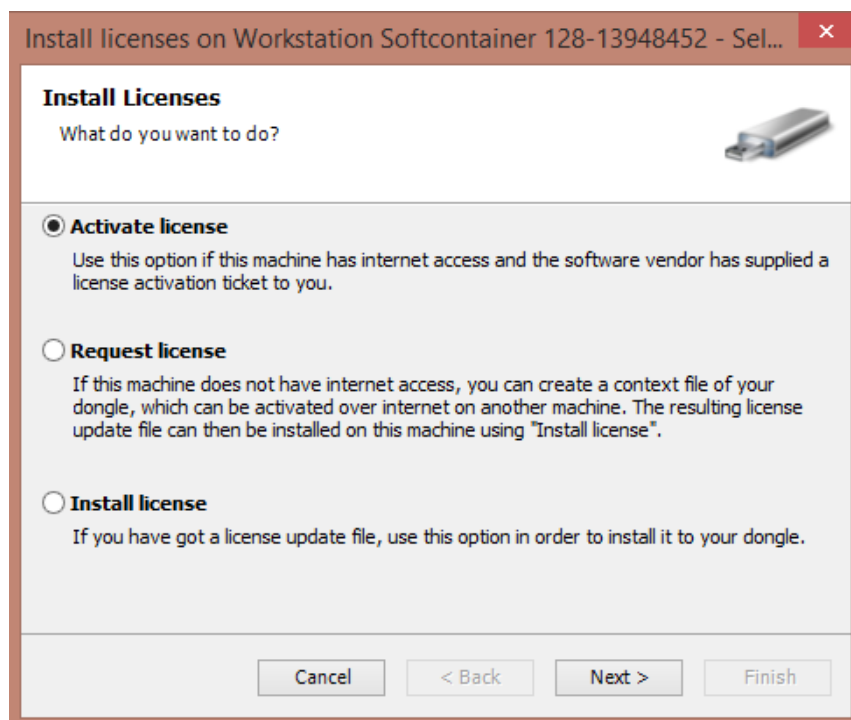
**Figura Anexo1 - 5:** Contenedor de la licencia

Para el proyecto realizado, se han empleado las opciones de “*Workstation*” y “*Softcontainer*”. Una vez hecha la selección, aparecerá la siguiente ventana:



**Figura Anexo1 - 6:** Administrador de licencias

En la parte superior se pueden seleccionar los contenedores o repositorios de licencias para ver en qué estado se encuentran estas: existe y está activa en el contenedor, existe y ha expirado o no existe en ese contenedor. Para activar el código de licencia, se deberá hacer clic en el botón “*Install licenses...*” de la esquina inferior izquierda.

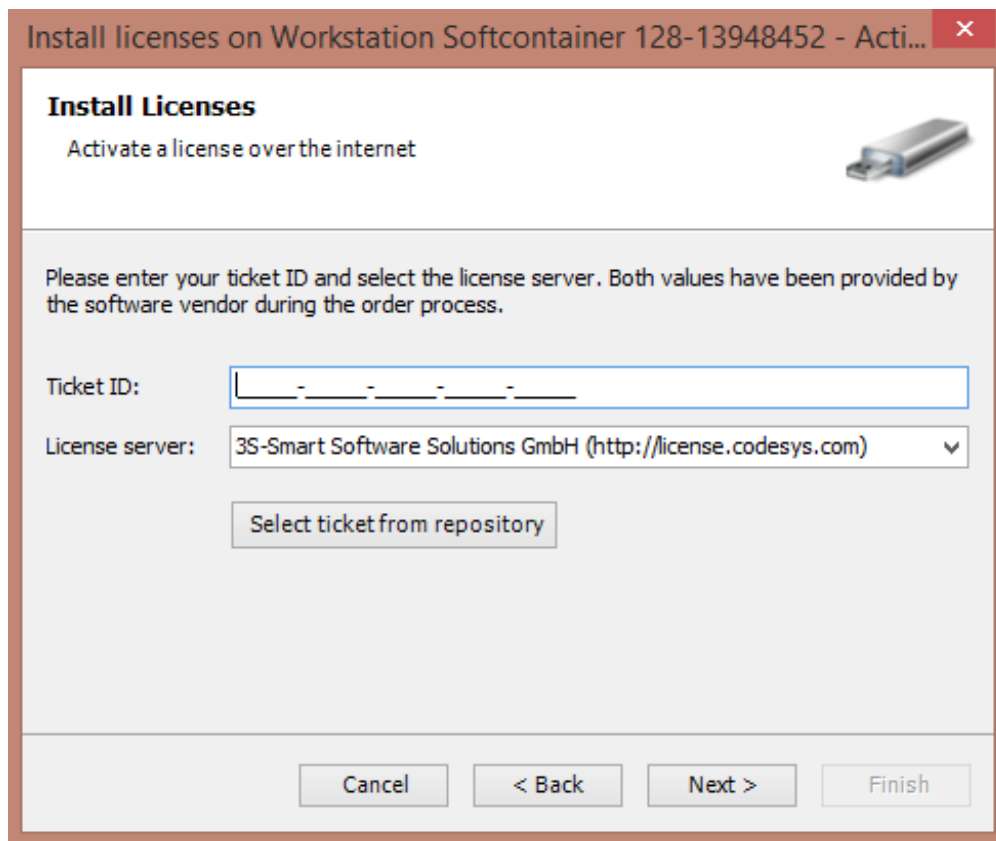


**Figura Anexo1 - 7:** Instalar licencia

En la ventana emergente aparecerán las siguientes opciones:

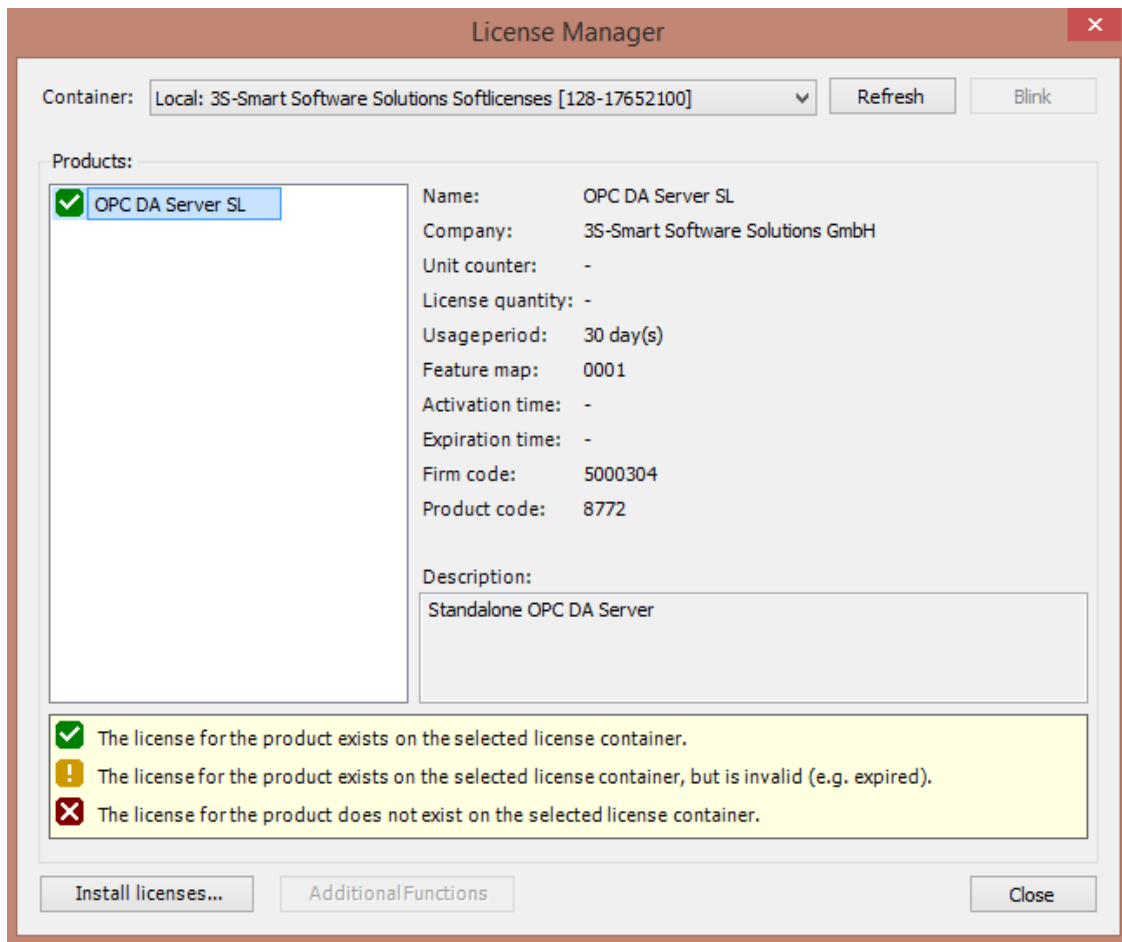
- **Activar licencia** (“*Activate license*”). Opción recomendada si se dispone de acceso a internet y un código de licencia.
- **Solicitar licencia** (“*Request license*”). Si no se dispone de acceso a internet se puede crear un archivo especial en un dispositivo USB y activarlo en otro ordenador con acceso a internet. El archivo de licencia resultante puede ser instalado posteriormente en el equipo sin internet a partir de la opción “Instalar licencia”
- **Instalar licencia** (“*Install license*”). Si se dispone de un archivo de licencia, es posible utilizar esta opción para activarla directamente desde el dispositivo en el que se encuentre el archivo.

Al disponer de acceso a internet en el equipo utilizado y haber obtenido el código de licencia previamente, se procederá con la primera opción. Al seleccionarla se abrirá otra ventana donde se deberá introducir el código de licencia en el recuadro “*Ticket ID*”. También aparece el servidor de la licencia “*3S-Smart Software Solutions GmbH*”, opción que se dejará por defecto. Si se tiene un archivo de licencia también es posible importarlo al equipo utilizando la opción “*Select ticket from repository*”.



**Figura Anexo1 - 8:** Activación de la licencia

Si la activación de la licencia es correcta debería aparecer lo siguiente:

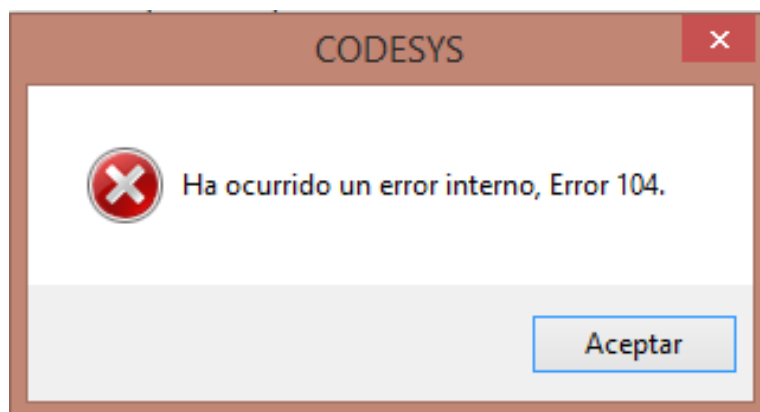


**Figura Anexo1 - 9:** Servidor OPC con licencia activada

Se puede observar en la columna de productos que aparece el tic verde que confirma la correcta activación de la licencia. En la parte derecha aparecerá la información relativa al servidor instalado (tiempo de uso de la licencia, código de producto, descripción...). El tiempo de uso de la licencia no comenzará a disminuir hasta que no se haya hecho uso del servidor OPC por primera vez.

#### **Error de activación – Actualización de la licencia**

Al intentar activar la licencia también podría aparecer el siguiente error:



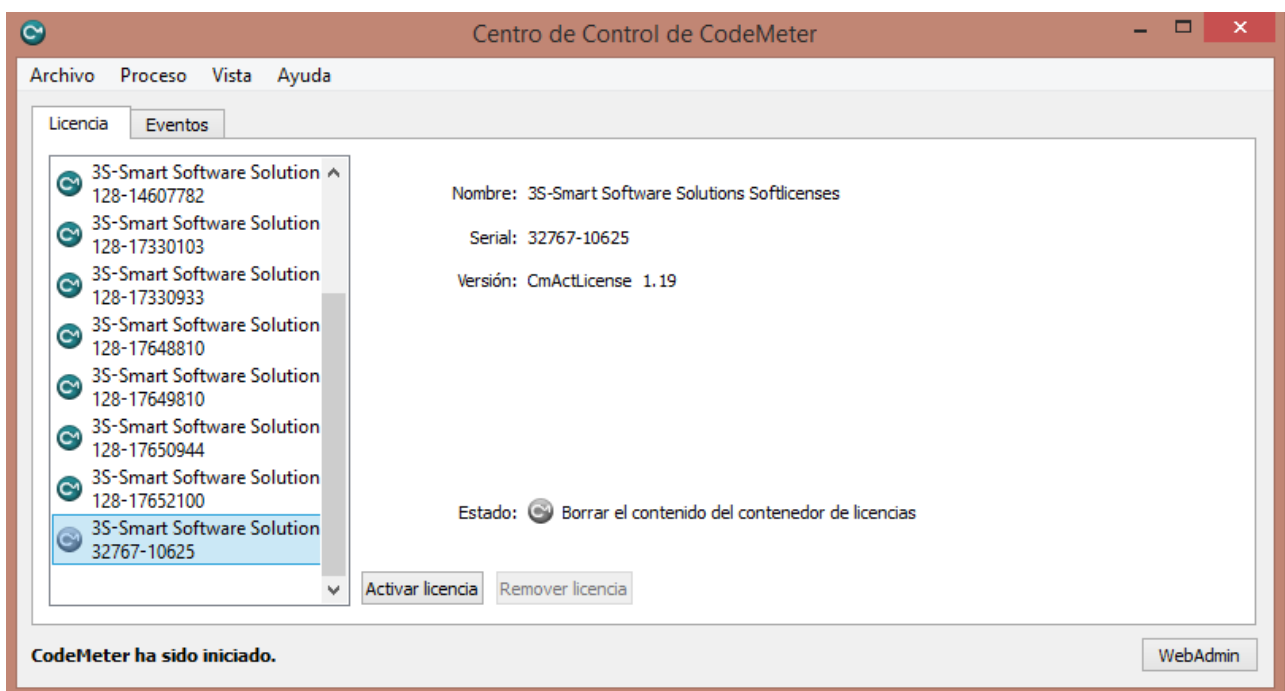
**Figura Anexo1 - 10:** Error de licencia



La única situación en la que ha aparecido este “error 104” ha sido al expirar la licencia activa e intentar instalar un nuevo código obtenido de la tienda de *Codesys*; aunque se desconoce si puede ser provocado por otros factores. Lo que ocurre es que el contenedor de la licencia no puede ser actualizado con otra licencia de prueba, siendo necesario crear otro contenedor que albergue la nueva licencia.

Para generar un nuevo contenedor habrá que acceder al directorio de 32 bits donde esté instalado “*CODESYS 3.5.14.0*” (dirección del directorio por defecto *C:\Program Files (x86)\CODESYS 3.5.14.0\GatewayPLC*) y acceder a la carpeta “*Gateway PLC*” que contiene los archivos competentes a la puerta de acceso del servidor. En esta carpeta aparece un archivo tipo *WIBU Binary File* con el nombre “*3SLicense\_SmartBind*” que se deberá ejecutar. Tras la aparición de una ventana emergente, se procederá a confirmar el deseo de importar un documento de licencia.

Si se accede a la aplicación “*CodeMeterCC*” dentro de la carpeta “*CodeMeter*” del directorio de 32 bits (dirección del directorio por defecto *C:\Program Files (x86)\CodeMeter\Runtime\bin*), se podrá observar la lista de contenedores o repositorios instalados en el equipo.



**Figura Anexo1 - 11:** Centro de Control de CodeMeter

En la lista de contenedores de la figura anterior se observa una con el icono de “*CM*” en gris. Esto indica que no alberga ningún tipo de licencia y se corresponde con el contenedor que se generó anteriormente. Se procederá como se vio antes, accediendo al administrador de licencias en *Codesys* (**Figura Anexo1 - 6**), actualizando la lista de contenedores que aquí aparece (botón “*Refresh*”) y seleccionando el nuevo contenedor vacío. Al introducir el código de licencia sin usar, se debería activar de forma normal.

# ANEXO 2: Configuración del servidor OPC e inicio de la comunicación

Se podrá proceder a la comunicación de los tres programas (*Matlab 2017b*, *Codesys V3.5 SP14* y *Codesys OPC DA Server SL Demo 3.5.14*) a través de la interfaz OPC una vez se hayan instalado estos correctamente y el modelo de la simulación en *Matlab*, el SCADA y el diseño del autómatas (PLC) en *Codesys* hayan sido completados. También se tendrá que haber activado previamente la licencia de uso del servidor OPC.

Primero será necesario seleccionar los elementos y variables que van a formar parte directa de la comunicación.

## Configuración de símbolos (Items)

Para que los datos de las variables en *Codesys* puedan ser leídos o modificados, estas variables deben ser definidas como variables globales (GVL). En la pestaña GVL dentro de la aplicación de *Codesys* es posible realizar directamente la declaración de estas variables en código ST; eligiendo el tipo de variable (entero, real, booleano...). También es posible inicializar estas fijando el valor que tendrán al ejecutar el programa.

Para gestionar las variables globales que pasarán al caché de datos del servidor OPC se utilizará la pestaña de “Configuración de símbolos”.

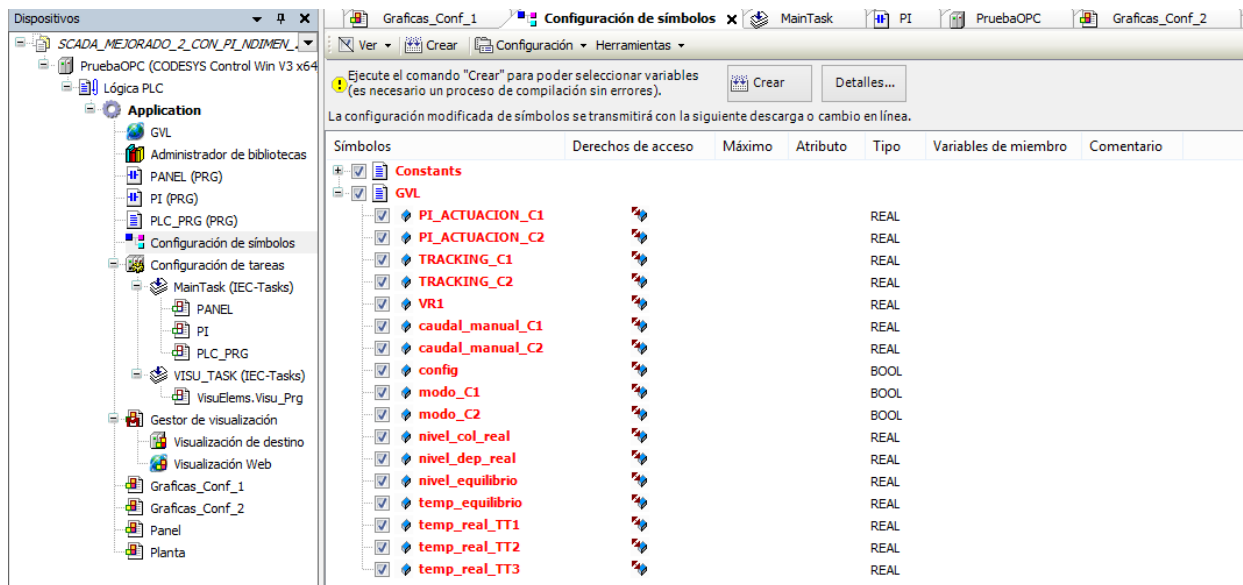


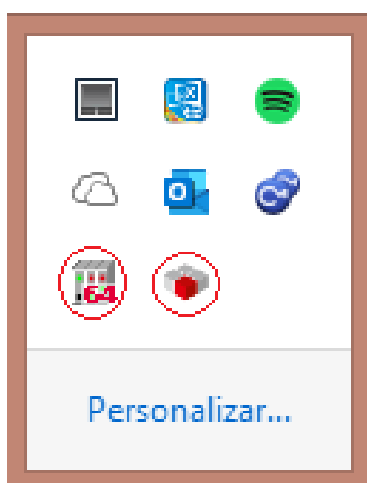
Figura Anexo2 - 1: Configuración de símbolos

Se seleccionarán aquellas variables del listado (tic azul) que serán cargadas en la caché del servidor OPC como elementos o símbolos (*Items*). También es posible modificar los derechos de acceso de cada una de ellas: solo lectura, solo escritura o lectura y escritura.

## Abrir la puerta de enlace (Gateway) e iniciar el PLC

Al descargar el *OPC DA Server SL* debería aparecer en los iconos ocultos del ordenador un icono con el símbolo de *Codesys* denominado “*Codesys Gateway SysTray*”. Al activarlo se abrirá la puerta de enlace que permitirá conectar el PLC al servidor OPC. Si por algún motivo no se encuentra aquí este icono, se podrá activar desde el siguiente directorio: *C:\Program Files\CODESYS 3.5.14.0\GatewayPLC*.

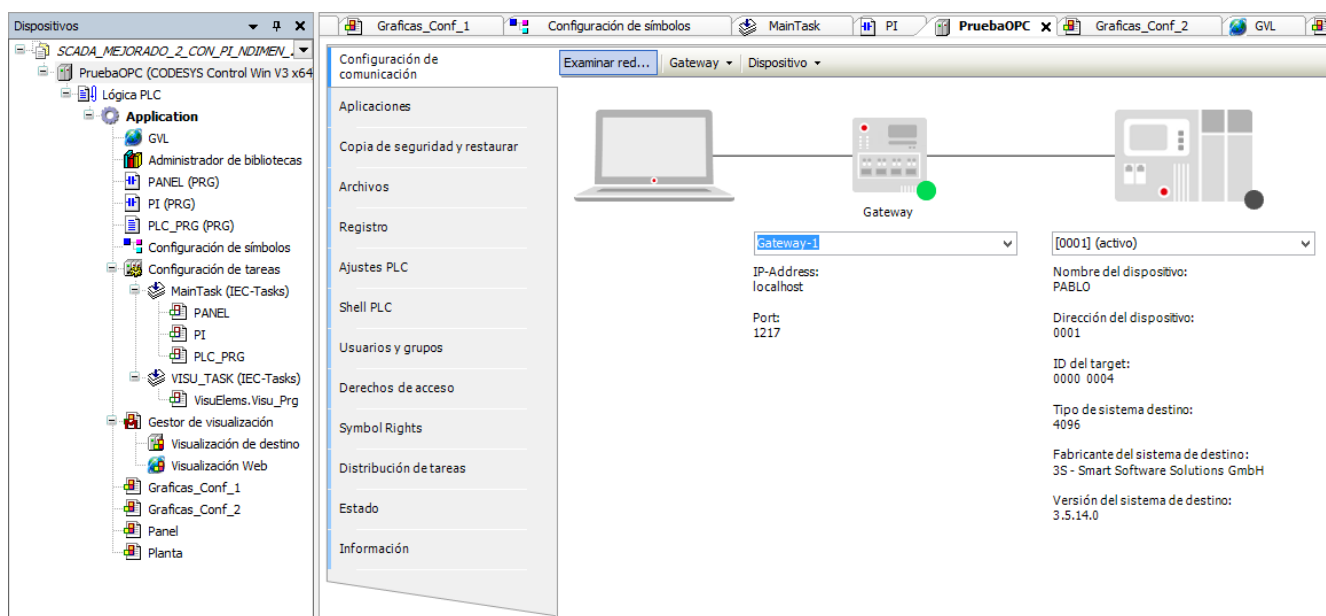
También será necesaria activar la aplicación del PLC “*Codesys Control Win SysTray (x64)*”, que aparecerá en el siguiente directorio: *C:\Program Files (x86)\CODESYS 3.5.14.0\GatewayPLC*. Una vez se haya iniciado por primera vez, aparecerá en los iconos ocultos junto a la *Gateway*.



**Figura Anexo2 - 2:** Aplicaciones de la puerta de enlace y el PLC

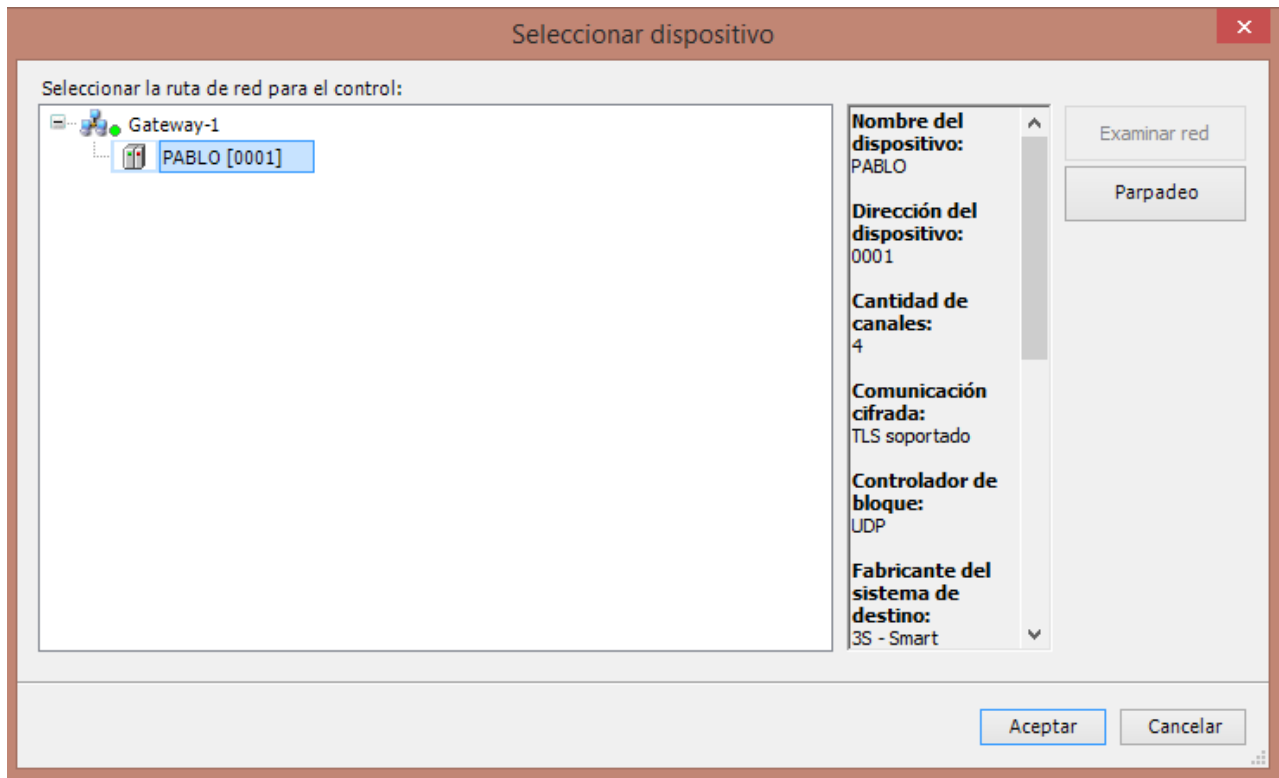
Al iniciar la aplicación del PLC se abrirá en una ventana aparte la visualización principal en *Codesys*, pudiendo cerrarla sin interferir con el programa si así se desea.

Una vez estén activadas ambas aplicaciones, se procederá a seleccionar la puerta de acceso que se acaba de habilitar desde el programa en *Codesys*. Se abrirá la pestaña “Configuración de la comunicación” en el dispositivo (“*Codesys Control Win V3 x64*”). Aquí se puede observar un pequeño esquema de la configuración que representa al equipo, la puerta de acceso y el autómatas programable. Es necesario para poder modificar esta configuración que el programa no se encuentre en modo simulación (opción “En línea” en la barra superior).



**Figura Anexo2 - 3:** Configuración de la comunicación en *Codesys V3*

Se puede observar que el icono que representa a la puerta de enlace (“*Gateway*”) tiene un círculo verde en la esquina inferior derecha indicando que se encuentra activa (aplicación activada anteriormente). En caso de que apareciera en rojo, no se tendría acceso a la puerta de enlace (ver pasos anteriores de activación). El círculo del icono del PLC se encuentra en gris puesto que aún no se ha seleccionado el autómatas. Para ello, se deberá pulsar en la opción “Examinar red...” con la que aparecerá un listado de los PLCs disponibles que permitan establecer una ruta de red:

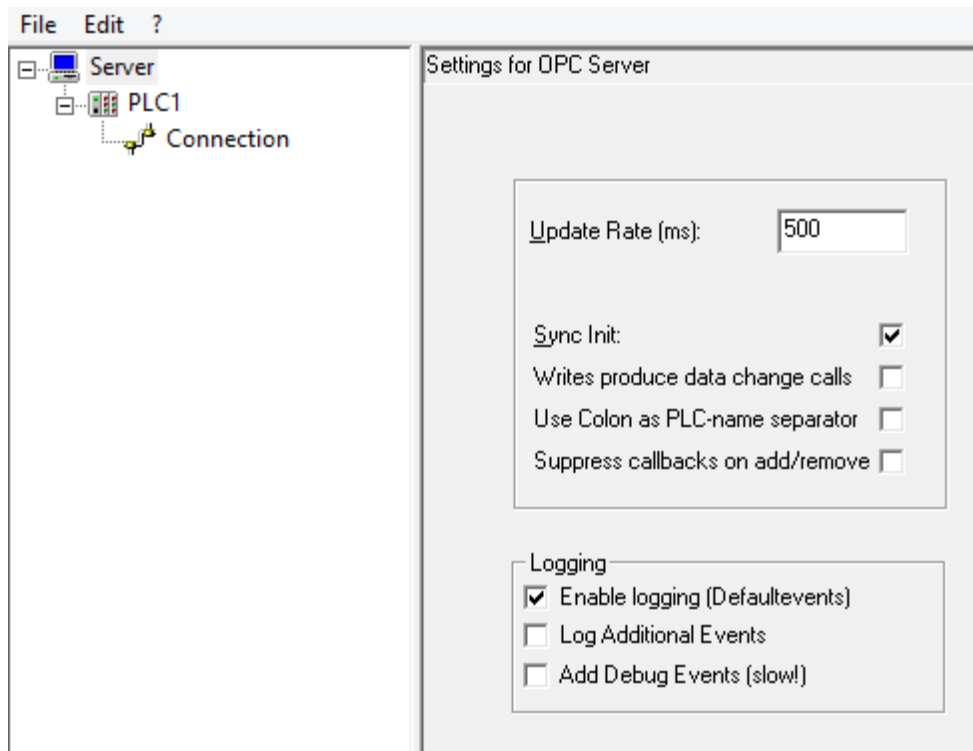


**Figura Anexo2 - 4:** Selección de la ruta de red

Se selecciona y acepta el PLC que se vaya a utilizar y, si se completa la conexión, el círculo gris que aparecía junto al icono del PLC deberá aparecer ahora en verde. El nombre del controlador o su dirección (entre corchetes) serán necesarios después para configurar los ajustes del servidor OPC.

### **Configuración del servidor OPC a través de OPCConfig**

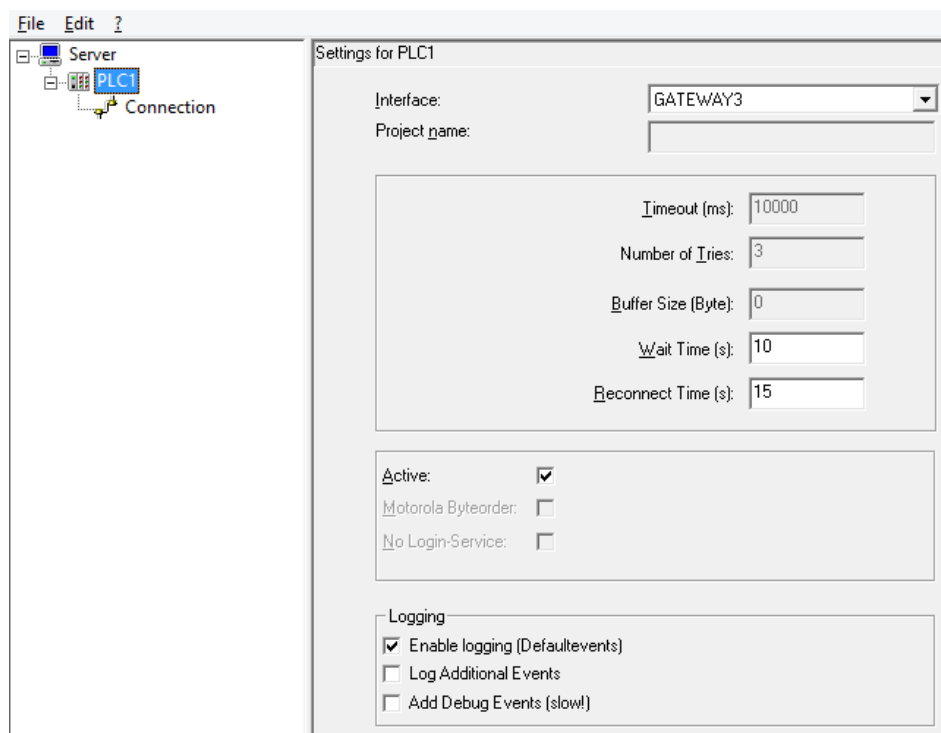
Definidos en el archivo “*OPCServer.ini*”, se encuentran los parámetros y ajustes del servidor OPC que definen el tipo de conexión o el PLC utilizados. Este archivo puede ser modificado directamente si así se desea como si se tratara de un documento de texto, pero es más sencillo y cómodo a la hora de realizar los ajustes hacer uso de la herramienta OPCConfig que se encuentra en el directorio de instalación del servidor (por defecto: *C:\Archivos de programa\3S CODESYS\CODESYS OPC Server V3*). Si no existe una configuración previa, se podrá crear una nueva a partir de la opción “*File*” en la esquina superior izquierda.



**Figura Anexo2 - 5:** Ajustes del servidor OPC en OPCConfig

Entre los parámetros que se pueden ajustar destaca la tasa de actualización (“*Update Rate*”) que determina el tiempo de ciclo en el que se leerán las variables globales configuradas anteriormente (Items) por parte del PLC. Lo aconsejable es fijar este valor acorde al tiempo de muestreo de lectura y escritura del modelo en *Matlab*, que se verá más adelante, con la idea de no provocar errores en la simulación con respecto al tiempo real.

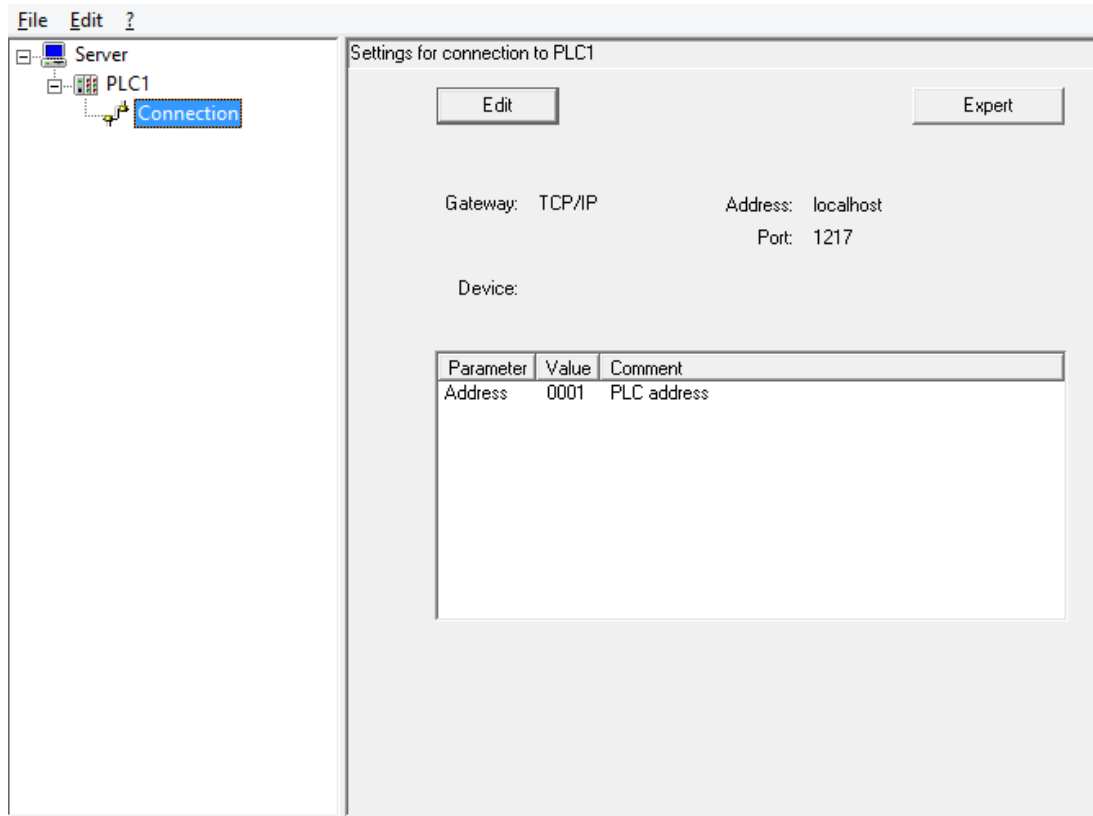
En los ajustes del PLC dentro de OPCConfig será imprescindible seleccionar la interfaz “*GATEWAY V3*” que se corresponde con la versión de *Codesys* instalada.



**Figura Anexo2 - 6:** Ajustes generales del PLC en OPCConfig

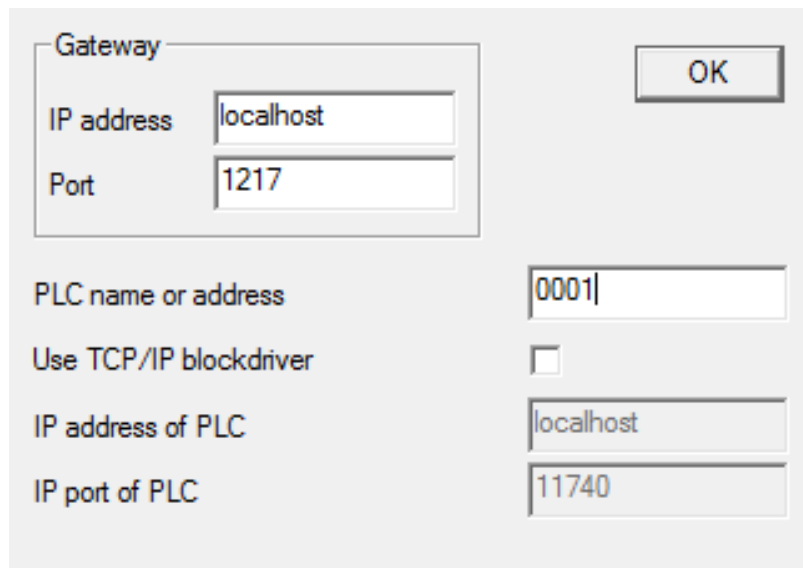
Además, se pueden cambiar los valores de algunos parámetros como el tiempo de espera (“*Wait Time*”) que determina el tiempo que esperará el servidor OPC a que el controlador esté preparado, o el tiempo de reconexión (“*Reconnect Time*”) que fija el intervalo de tiempo durante el cual el servidor tratará de reconectarse con el controlador a través de la puerta de enlace, entre otros.

Dentro de los propios ajustes del PLC se abre la rama “*Connection*” que permite modificar aquellos ajustes relacionados con la conexión del controlador y el servidor.



**Figura Anexo2 - 7:** Ajustes de la conexión del PLC en OPCConfig

Para iniciar una nueva comunicación o modificar la ya existente, será necesario introducir la dirección del PLC a través del botón “*Edit*”. Al pulsarlo se abrirá la siguiente ventana:



**Figura Anexo2 - 8:** Configuración del nombre o dirección del PLC en OPCConfig

En el recuadro con el nombre “*PLC name or address*” se introducirá el nombre del PLC o su dirección a partir de los datos del PLC elegido en la pestaña de “Configuración de la comunicación” de *Codesys V3* (**Figura Anexo2 - 3**). Se recomienda introducir el nombre pues este permanecerá invariable para el controlador, mientras que la dirección del PLC puede cambiar al volver a activar la aplicación “*Codesys Control Win SysTray (x64)*”

Una vez se hayan introducido todos los ajustes, será necesario guardar la configuración pulsando en la opción “*File/Save*” para que los cambios queden registrados en el archivo “*OPCServer.ini*”.

### **Cargar variables globales (Items) del PLC en el servidor OPC**

Cuando el servidor OPC haya sido configurado, será el momento de cargar las variables globales seleccionadas anteriormente en la configuración de símbolos para poder ser leídas y modificados en tiempo real durante la ejecución del programa. Para ello se compilará el programa del PLC en *Codesys V3* a través de la opción disponible en la barra superior. Si no se detectan errores de compilación, se ejecutará a continuación el programa con la opción “Iniciar la sesión”. Será necesario volver a cargar los datos de la aplicación en caso de que se hayan hecho cambios con respecto al último inicio de sesión. Tras esto, los datos de las variables se encontrarán cargados en el servidor OPC y solo faltará configurar el modelo de *Matlab* para que procese los datos en la simulación.

### **Configuración del modelo en *Matlab* (servidor/proveedor)**

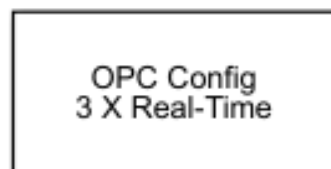
En el modelo de *Simulink* en *Matlab* habrá que añadir tres bloques de la librería “*OPC Toolbox*” que permitirán la configuración de la interfaz OPC. Estos son:

- *OPC Configuration*
- *OPC Read*
- *OPC Write*

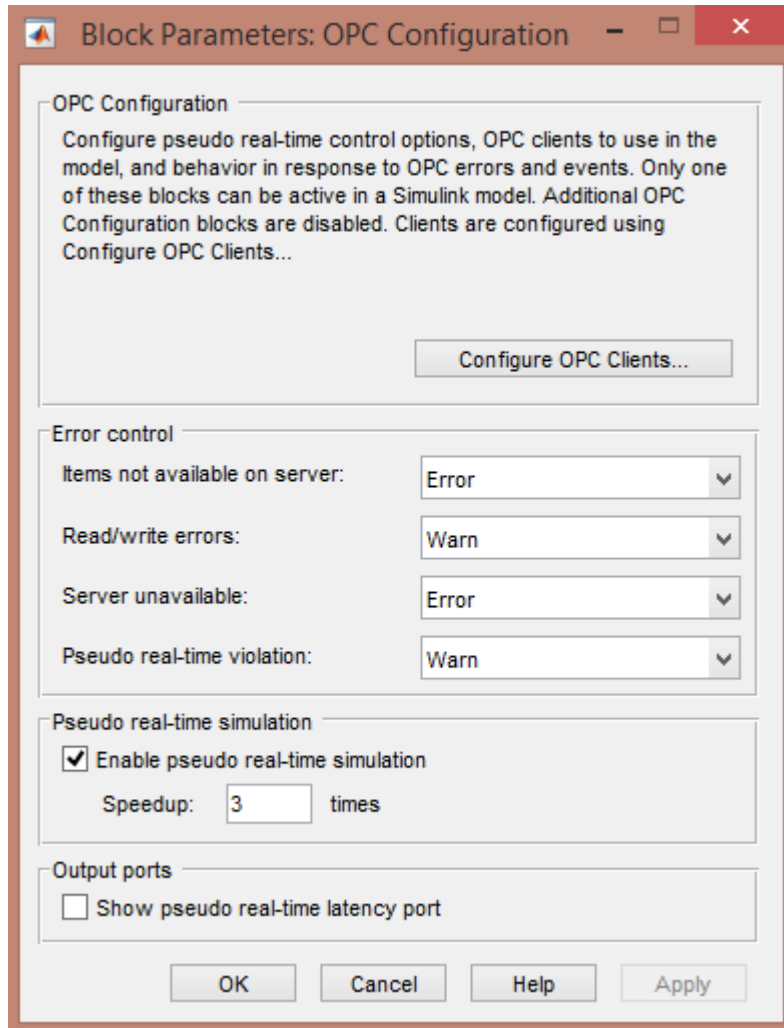
Será imprescindible al menos la inclusión del bloque OPC Configuration, pues a través de él se seleccionará el servidor OPC al que se conectará el modelo, mientras que los bloques OPC Read y OPC Write permitirán elegir qué elementos cargados en el caché de datos del servidor OPC será leídos o sobrescritos, respectivamente.

También permitirán configurar algunos parámetros relativos al comportamiento de la simulación con respecto a la comunicación, como la respuesta a los errores/eventos del servidor, el tiempo de muestreo para la lectura y la escritura o la posibilidad de ejecutar el modelo en pseudo tiempo real.

Primero habrá que conectar el modelo al servidor OPC. Para ello se deberá entrar en los ajustes del bloque OPC Configuration y pulsar el botón “*Configure OPC Clients...*”.

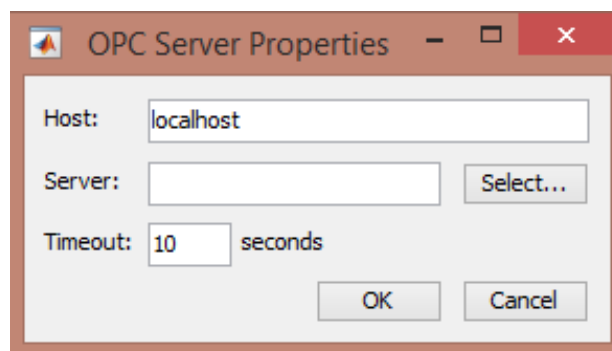


**Figura Anexo2 - 9:** Bloque OPC Configuration



**Figura Anexo2 - 10:** Parámetros del bloque OPC Configuration

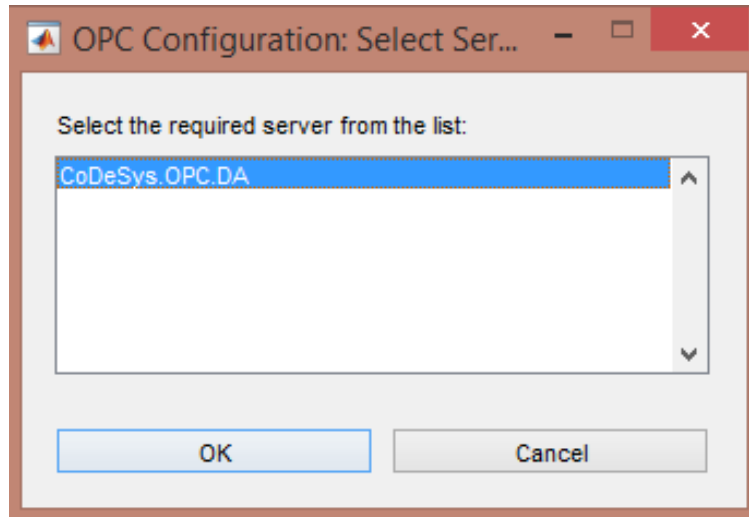
A continuación, aparecerá un listado con todos los clientes disponibles para su conexión que hayan sido agregados previamente. En la primera conexión que se haga este listado aparecerá vacío, por lo que habrá que pulsar el botón “Add” y añadir el cliente deseado. La conexión con el cliente (*Codesys*) se realiza con el servidor OPC como intermediario, por lo que en la nueva ventana donde aparecen varias opciones, como el tipo de *host* o tiempo de desconexión, se seleccionará el servidor.



**Figura Anexo2 - 11:** Propiedades del servidor OPC del bloque OPC Configuration

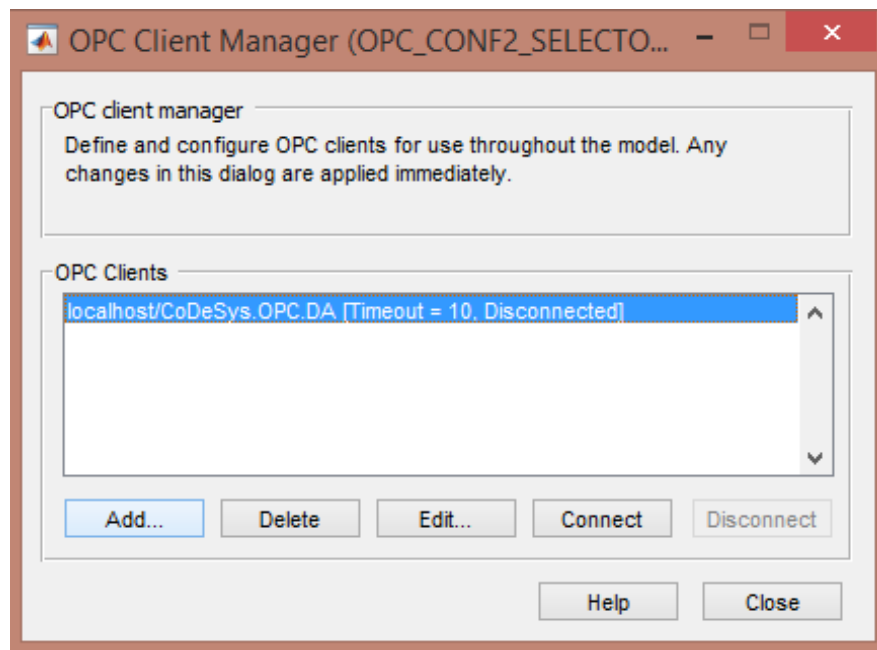
Si la conexión previa entre PLC y servidor OPC a través de la puerta de enlace se ha hecho de manera correcta, debe aparecer el servidor *Codesys.OPC.DA* como opción. Es posible que la primera vez que se busque el servidor salte un error. Si este fuera el caso, se detallará como proceder para solucionarlo al final del anexo.





**Figura Anexo2 - 12:** Selección de servidor OPC del bloque OPC Configuration

Una vez seleccionado, volverá a aparecer la ventana con el listado de los clientes OPC donde ahora se habrá añadido como opción el servidor OPC de *Codesys*.

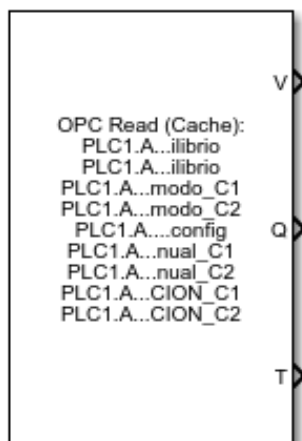


**Figura Anexo2 - 13:** Listado de clientes OPC en el bloque OPC Configuration

Al pulsar el botón “*Connect*” para iniciar la conexión del modelo con el servidor OPC, deberá aparecer una nueva ventana con el tiempo restante para el uso de la licencia del servidor. Además, se podrá observar que el estado del servidor en el listado habrá cambiado de “*Disconnected*” a “*Connected*”.

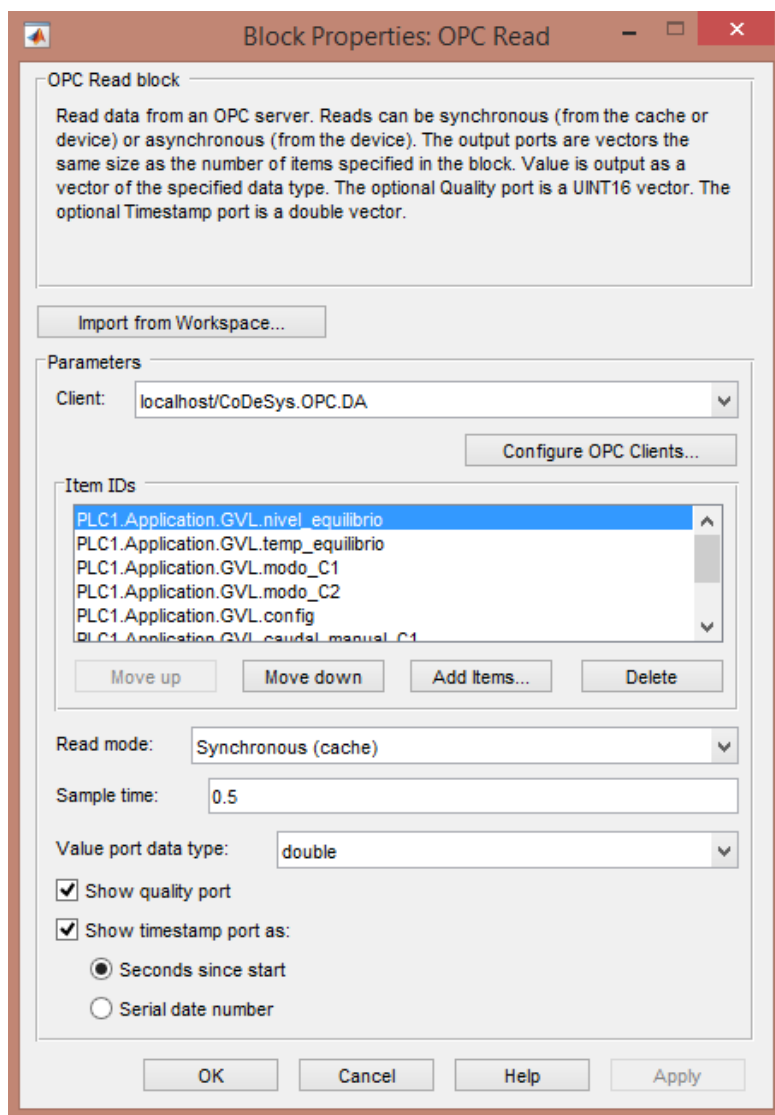
De vuelta a la configuración dentro del bloque OPC Configuration, es interesante activar el parámetro “*Pseudo real-time simulation*” y ajustar el valor de “*Speedup*”. Al activar esta opción, se ejecutará la simulación en pseudo tiempo real; lo que se traduce en que el tiempo de ejecución del modelo coincidirá con el reloj del sistema de la forma más fiel posible, acelerando o ralentizando la simulación en caso de que fuera necesario. Modificando el valor de “*Speedup*”, se acelerará la ejecución el número de veces indicado más rápido que el reloj. Este valor debe ser siempre un entero y es aconsejable incrementarlo para sistemas lentos.

Para la lectura de los datos cargados en el servidor OPC se va a utilizar el bloque OPC Read. Aquellas variables en las que se leerán y guardarán los valores de los elementos del servidor, deberán ser conectadas al puerto de salida V. Será útil para separar las señales el uso del bloque “*Demux*” de *Simulink* y las etiquetas.



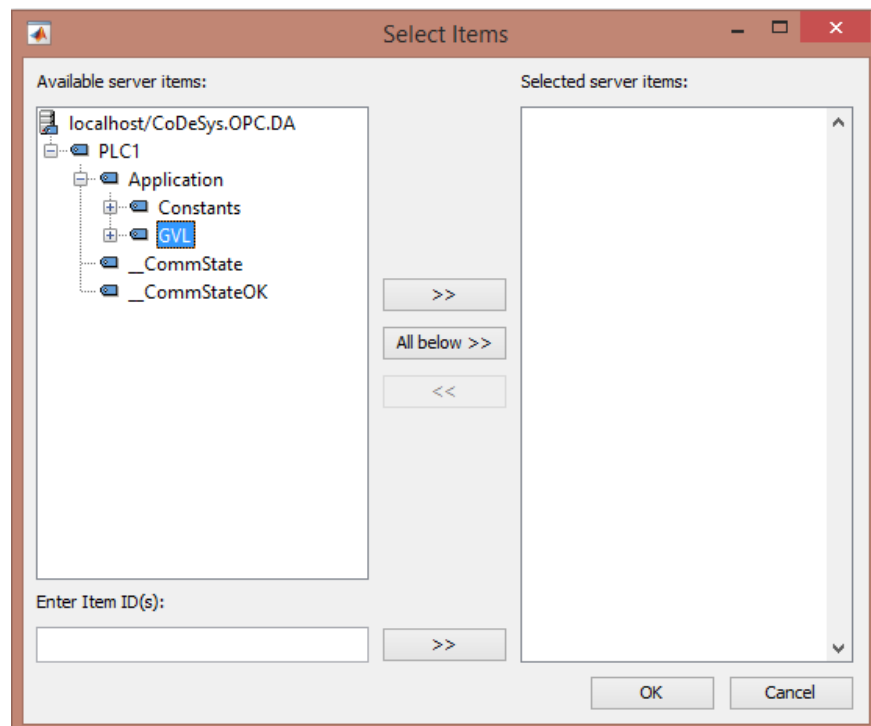
**Figura Anexo2 - 14:** Bloque OPC Read

Dentro de la ventana de configuración del bloque aparecerá el cliente al que está conectado el modelo (previamente seleccionado en el bloque OPC Configuration), la lista de elementos (IDs) cargados en el servidor OPC y una serie de parámetros ajustables.



**Figura Anexo2 - 15:** Propiedades del bloque OPC Read

En la primera conexión, el listado de variables (Item IDs) debería aparecer vacío. Pulsando el botón “Add Items...” se desplegará una ventana con todos los elementos cargados en el servidor OPC que podrán ser leídos por el bloque.



**Figura Anexo2 - 16:** Selección de elementos del servidor OPC

Abriendo la pestaña GVL con las variables globales cargadas desde *Codesys*, se podrán ir seleccionando y añadiendo al listado de elementos que serán leídos a través del botón “>>”. El orden en el que se seleccionan es importante, pues deberá coincidir con el de las variables conectadas al puerto V del bloque. En la ventana de propiedades, será posible modificar el orden de estos elementos a través de los botones “Move up” y “Move down”.

También aparecen algunos parámetros configurables en la ventana de propiedades. Los más destacados son:

- **Modo de lectura** (“*Read Mode*”)

Define el modo de lectura que empleará el bloque. Las opciones disponibles son asíncrono y síncrono (caché o dispositivo). Las lecturas síncronas tienen más costes en la ejecución que las asíncronas, pero generalmente son más fiables.

Dado que la conexión se va a realizar en tiempo real es imprescindible que la comunicación se haga de manera síncrona. Se seleccionará también la opción del caché pues es donde se encuentran los datos cargados en el servidor OPC.

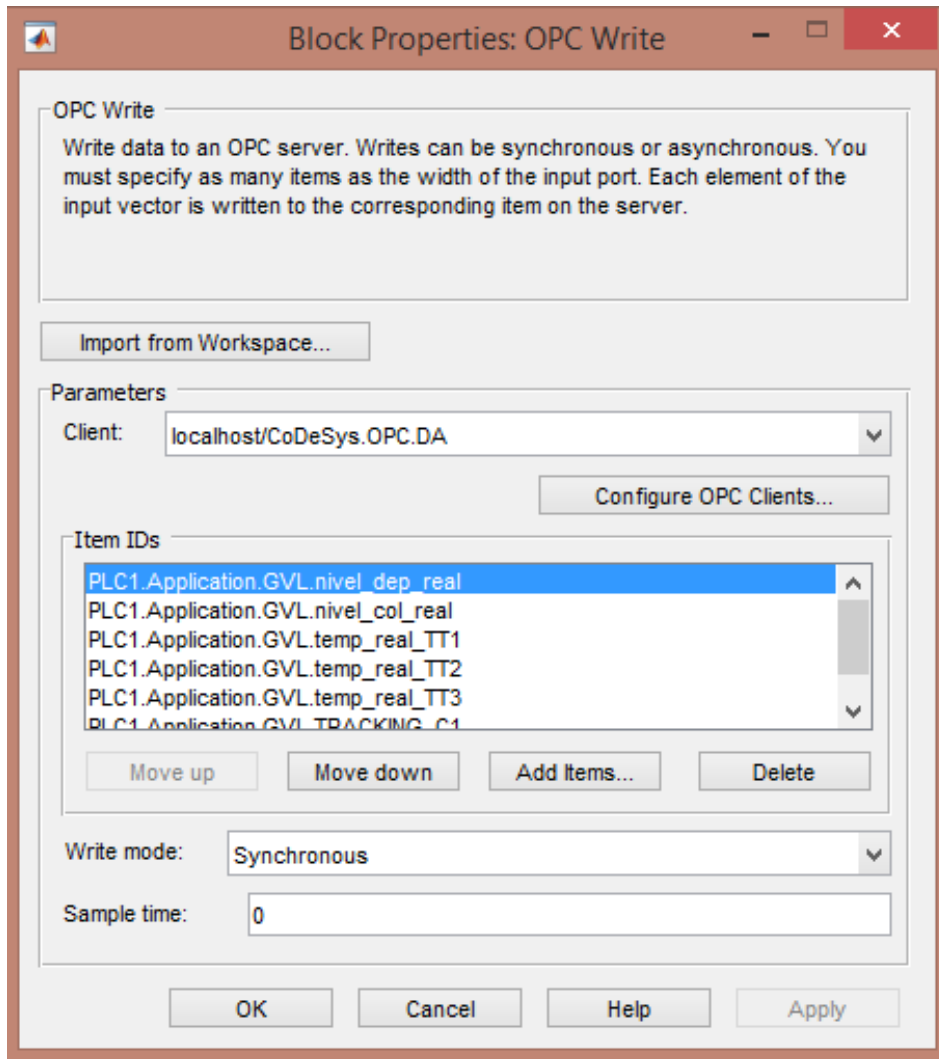
- **Tiempo de muestreo** (“*Sample time*”)

Define el tiempo de muestreo para las lecturas del bloque. Si las lecturas son síncronas, los datos se leen desde el servidor en el tiempo de muestreo especificado, y si son asíncronas, los ajustes en el tiempo de muestreo definen la tasa de actualización de los eventos de cambio de datos.

Si el modelo diseñado precisa de una actualización de sus variables casi instantánea (por procesos delicados o precisión) se puede reducir el valor del tiempo de muestreo, aunque esto se traducirá en un mayor coste de procesado. El tiempo de muestreo definirá el tiempo de retardo ( $\tau_d$ ) entre las ordenes que el operario realice desde el SCADA y su respuesta en la simulación.

Hay opciones también para habilitar los puertos de salida Q y T del bloque. El puerto Q permitirá extraer los identificadores de calidad de los elementos del servidor seleccionados, y del puerto T se extraerán las marcas de tiempo de los datos de los otros dos puertos. Ninguno es imprescindible para llevar a cabo la comunicación.

Para la escritura de los datos cargados en el servidor OPC se va a emplear el bloque OPC Write. Aquellas variables de la simulación cuyos datos y estados serán utilizados para reemplazar al de los elementos del servidor OPC elegidos, deberán ser conectadas al puerto de entrada único. Será útil para unificar las señales el uso del bloque “Mux” de *Simulink*, y la utilización de etiquetas para que sea más cómodo.



**Figura Anexo2 - 17:** Propiedades del bloque OPC Write

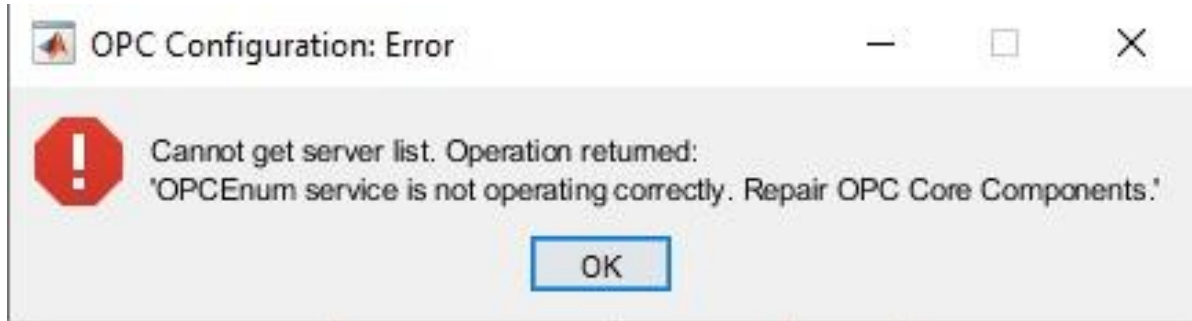
La selección de los elementos del servidor OPC para su reescritura se realiza de la misma forma que se vio antes con el bloque OPC Read. Se tienen también dos parámetros configurables similares a los del bloque anterior:

- **Modo de escritura** (“*Write mode*”):  
Define el modo de escritura del bloque. Las opciones disponibles son asíncrono y síncrono. Vuelve a ser necesario utilizar la opción síncrona para que la simulación del modelo pueda ejecutarse en pseudo tiempo real.
- **Tiempo de muestreo** (“*Sample time*”):  
Define el tiempo de muestreo del bloque que determina cada cuanto se reescriben los datos de los elementos del servidor OPC. Se puede especificar 0 para emplear el modo continuo.

Una vez se hayan configurado los tres bloques y establecido la conexión entre el modelo y el servidor OPC (previa configuración del servidor, conexión con el PLC y ejecución del programa en *Codesys* cargando las variables globales en el caché de datos), ya es posible ejecutar la simulación a través del botón “*Run*” de la barra superior de *Matlab* e iniciar la comunicación entre el modelo de simulación, el SCADA y el PLC ubicados en programas distintos a partir de la interfaz OPC.

## Error de búsqueda del servidor OPC en el bloque OPC Configuration

La primera vez que se realice la búsqueda del servidor OPC a través del “*Client manager*” del bloque de *Simulink* OPC Configuration, es posible que salte el siguiente aviso de error:



**Figura Anexo2 - 18:** Error en la búsqueda de servidor

Este error es provocado si los elementos OPC de *Matlab* (*OPC Foundation Core Components*) no están instalados en el programa o necesitan una reparación. Sea cual sea de los dos el problema, la solución es la misma. En el “*Command window*” de *Matlab* habrá que introducir la función *opcregister* (*'install'*) y confirmar su instalación. Si salta la advertencia de que estos elementos ya estaban instalados se puede proceder de la misma forma, pero *Matlab* aplicará la acción correspondiente a la función *opcregister* (*'repair'*).

```
>> opcregister ('install')
Warning: OPC Core Components are already installed. Reinstalling may require a repair of the Core Components.

Continuing this operation will modify any OPC Foundation files already installed.
MATLAB may shut down, and a system reboot may occur.
Type 'Yes' (exactly as shown) to install the OPC Foundation files

fx Confirmation string: Yes
```

**Figura Anexo2 - 19:** Función *opcregister* (*'install'*)

Una vez ejecutada la función, se podrá proceder con la conexión al servidor OPC desde el bloque OPC Configuration de forma normal.