

Proyecto Fin de Carrera
Grado en Ingeniería Electrónica, Robótica y
Mecatrónica

Laboratorio Virtual para el control de la Planta
Multiprocesos basado en LabView

Autor: Víctor Manuel Gracia Villegas

Tutor: Daniel Limón Marruedo

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

Sevilla, 2020



Proyecto Fin de Carrera
Ingeniería Electrónica, Robótica y Mecatrónica

Laboratorio Virtual para el control de la Planta Multiprocesos basado en LabView

Autor:

Víctor Manuel Gracia Villegas

Tutor:

Daniel Limón Marruedo

Catedrático

Dpto. de Ingeniería de Sistemas y Automática

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2020

Proyecto Fin de Carrera: Laboratorio Virtual para el control de la Planta Multiprocesos basado en LabView

Autor: Víctor Manuel Gracia Villegas

Tutor: Daniel Limón Marruedo

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 maestros

Agradecimientos

Quiero agradecer a todas aquellas personas que han estado a mi lado el apoyo y el cariño recibido durante esta etapa de mi vida, la cual, reconozco, no ha sido la más fácil. En especial a mi madre, por ser la que siempre ha estado ahí desde el primer día, por darme siempre esperanza y creer en mí, y hacerme todo más fácil. A mi padre, por haber querido siempre lo mejor para mí, porque, aunque me hubiese gustado que estuvieses aquí para verlo, sé que, desde algún lugar, me ves sonriendo. A mis hermanos y a María, por ser siempre un apoyo incondicional.

Me gustaría agradecer también a mi profesor y tutor del trabajo, Daniel Limón, todo lo que me ha enseñado y ha hecho por mí en este tiempo. Por estar disponible en cualquier momento y prestarme cuanta atención he necesitado, y ser un profesor y persona excepcional.

Ha sido un periodo en el que he aprendido muchas cosas, tanto a nivel personal como académico. Gracias a todas esas personas que han creído en mí. Gracias a vosotros, esto ha sido posible.

Victor Manuel Gracia Villegas

Sevilla, 2020

La planta multiprocesos, como su propio nombre indica, es un sistema en el cual se pueden llevar a cabo varios procesos a la vez, tales como el control de temperatura mediante resistencias térmicas e intercambiadores de calor, o el control de nivel. Se trata de un sistema muy atractivo desde el punto de vista académico, pues pone de manifiesto comportamientos propios de sistemas de control presentes en la industria actualmente, además de dar la posibilidad a los alumnos de poner en práctica técnicas de control multivariable, y trabajar con un sistema que presenta retardo en ciertos procesos.

El proyecto que aquí se describe consiste en la creación de un laboratorio virtual basado en el Software LabView, de forma que, mediante una interfaz gráfica sencilla realizada en dicho entorno de programación, se da la posibilidad al usuario de interactuar con la planta para realizar ensayos de identificación y control. Este trabajo consta de varias etapas que a continuación se exponen.

El primer paso ha sido diseñar un caso de estudio en el cual se ha propuesto una configuración para el sistema de control. Con el fin de conseguir que el sistema trabaje de forma óptima, se han analizado distintos puntos de operación de las variables del mismo.

De esta forma, mediante Matlab Simulink, se han llevado a cabo experimentos de identificación y control sobre la planta para elegir qué punto de operación es más conveniente para nuestro propósito, y se ha comprobado que la configuración elegida es adecuada. Con el emparejamiento de variables elegido, y mediante un experimento de control multivariable descentralizado, se ha validado todo lo anterior.

El siguiente paso realizado ha consistido en el diseño en LabView de una interfaz gráfica para identificación y control que actúa sobre los modelos lineales identificados anteriormente, implementados también en este Software. Este programa tiene como finalidad que el usuario se familiarice con la interfaz de forma previa, teniendo la posibilidad de realizar ensayos de identificación y control sobre los modelos, sin necesidad de estar conectado a la planta. Para validar que la implementación es correcta, se han realizado pruebas de funcionamiento sobre la interfaz.

Posteriormente, se ha diseñado un nuevo programa en el que se han sustituido los modelos lineales por el sistema real. Para ello, se ha establecido la comunicación entre LabView y la planta vía OPC, y, al tratarse de un sistema real, se ha implementado el arranque y la puesta en el punto de operación del mismo para asegurar un funcionamiento óptimo y la validez de los ensayos. Debido a ciertos problemas técnicos, sólo ha sido posible validar algunas partes de la implementación mediante ensayos.

Por último, se ha creado una guía de usuario con el objetivo de aclarar el funcionamiento de los programas de una forma cómoda y sencilla, facilitando así el manejo y la utilización de los mismos.

Abstract

The multiprocess plant, as its own name says, is a system in which several processes can occur at the same time, such as the temperature control by using termic resistances and heat exchangers, or the level control. It is a very attractive system from the academic point of view, as it shows typical behaviours from control systems present in the industry today, in addition to giving the possibility to the students to practice multivariable control techniques, and working with a system which show delays in some processes.

The project described here consists in the creation of a virtual laboratory based on the LabView Software, so that, by using a simple graphical interface made in that programming environment, the user is given the possibility of interacting with the plant to perform identification and control tests. This work consists of several stages wich are exposed below.

The first step has been designing a case study in wich it is proposed a configuration for the control system. In order to make the system work optimally, different operating points of the variables of the system have been analyzed.

In this way, through Matlab Simulink, some identification and control experiments have been permorfed in the plant for choosing the most convenient operating point for our purpose, and it has been proved that the chosen configuration is suitable. With the pairing of variables chosen, and through a multivariable decentralized control experiment, all of the above has been validated.

The next step has been the design in Labview of a graphical interface for identification and control that acts on the linear models identificated previously, also implemented in this Software. This program is inteded for the user to familiarize themselves with the interface in advance, having the possibility of making identification and control tests on the models, without the necessity of being connected to the plant. To validate that the implementation is correct, test run have been performed on the interface.

Subsequently, it has been added a new program in wich the linear models have been replaced by the real system. For this, the communication has been stablished between LabView and the plant via OPC, and, as it is a real system, it has been implemented the start-up and put in the operating point to ensure an optimal working and the validity of the essays. Due to certain technical problems, it has only been possible to validate some parts of the implementation through essays.

Finally, it has been created a user guide in order to clarify how the programs work in a confortable and simple way, in order to make it easier the handling and use of these.

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xiii
Índice	xv
Índice de Tablas	xvii
Índice de Figuras	xix
1 Introducción	1
1.1. <i>Motivación para la realización del proyecto.</i>	1
1.2. <i>Objetivos y alcance del proyecto.</i>	1
1.3. <i>Descripción de la planta.</i>	2
1.3.1. <i>Esquema, variables y configuraciones.</i>	2
1.3.2. <i>Descripción del funcionamiento de la planta.</i>	5
1.3.3. <i>Análisis del comportamiento de la planta de frío.</i>	6
1.3.4. <i>Calibración del sensor de nivel.</i>	7
2 Caso de Estudio: Configuración del Sistema de Control Propuesto	9
2.1. <i>Objetivo de control.</i>	9
2.2. <i>Estrategia de control a diseñar.</i>	9
2.3. <i>Elección del punto de operación: Acoplamiento de entradas y salidas.</i>	10
2.3.1. <i>Punto de operación de las variables del sistema.</i>	11
2.3.2. <i>Ventajas y desventajas del punto de operación con caudal elevado.</i>	11
2.3.3. <i>Ventajas y desventajas del punto de operación con caudal reducido.</i>	12
3 Primer Punto de Operación: Caudal Elevado	14
3.1. <i>Implementación del sistema de control en Simulink.</i>	14
3.2. <i>Lazo auxiliar de control.</i>	15
3.2.1. <i>Ensayo ante escalón y modelo.</i>	16
3.2.2. <i>Control de TT4 mediante VR2 y VR3.</i>	17
3.2.3. <i>Control anticipativo de TT4.</i>	18
3.3. <i>Modelo térmico.</i>	21
3.4. <i>Modelo de nivel.</i>	23
3.5. <i>Control de salto de temperatura.</i>	25
3.6. <i>Control de nivel.</i>	26
4 Segundo Punto de Operación: Caudal Reducido	28
4.1. <i>Lazo auxiliar de control.</i>	28
4.2. <i>Modelo térmico.</i>	30
4.3. <i>Modelo térmico ante escalón en VR1.</i>	31
4.4. <i>Modelo de nivel.</i>	33
4.5. <i>Control de salto de temperatura.</i>	35
4.6. <i>Control de nivel.</i>	36
5 Control Descentralizado: Control de Nivel y Salto Térmico Simultáneamente	38
6 Implementación en LabView: Control Simulado	40

6.1.	<i>Introducción a LabView.</i>	40
6.2.	<i>Esquema general del Block Diagram para el programa basado en modelos.</i>	41
6.3.	<i>Implementación de modelos lineales mediante ecuaciones en diferencias.</i>	42
6.3.1.	<i>Ecuaciones en diferencias del modelo térmico ante cambios en DC de R1/R2.</i>	42
6.3.2.	<i>Ecuaciones en diferencias del modelo térmico ante cambios en VR1.</i>	43
6.3.3.	<i>Ecuaciones en diferencias del modelo de nivel ante cambios en VR1.</i>	43
6.3.4.	<i>Implementación de las ecuaciones en diferencias en LabView.</i>	44
6.4.	<i>Implementación de modos de identificación y control mediante Tab Control.</i>	45
6.5.	<i>Programación de señales para ensayos de identificación en LabView.</i>	46
6.6.	<i>Programación de interfaz gráfica para ensayos de identificación.</i>	48
6.7.	<i>Pruebas de funcionamiento sobre el programa.</i>	49
6.7.1.	<i>Ensayos ante escalón sobre modelos lineales.</i>	49
6.7.2.	<i>Ensayos Chirp sobre modelos lineales.</i>	50
6.8.	<i>Programación de controladores en LabView.</i>	52
6.9.	<i>Programación de interfaz gráfica para ensayos de control.</i>	54
6.10.	<i>Pruebas de funcionamiento sobre el programa.</i>	54
6.10.1.	<i>Modo manual.</i>	55
6.10.2.	<i>Modo automático.</i>	55
7	Implementación en LabView: Control Sobre Planta Real	57
7.1.	<i>Comunicación vía OPC con la planta desde LabView.</i>	57
7.1.1.	<i>Conexión Cliente/Servidor OPC.</i>	57
7.1.2.	<i>Temporización e implementación en orden secuencial en LabView.</i>	60
7.2.	<i>Arranque y puesta en el punto de operación del sistema.</i>	61
7.3.	<i>Lazo auxiliar de control.</i>	62
7.3.1.	<i>Implementación en LabView.</i>	62
7.3.2.	<i>Pruebas de funcionamiento del lazo de control.</i>	63
7.4.	<i>Programación de señales para ensayos de identificación en LabView.</i>	64
7.5.	<i>Programación de interfaz gráfica para ensayos de identificación.</i>	65
7.6.	<i>Pruebas de funcionamiento sobre el programa.</i>	66
7.6.1.	<i>Ensayo ante escalones sobre el sistema real mediante interfaz gráfica.</i>	66
7.6.2.	<i>Ensayo Chirp sobre el sistema real mediante interfaz gráfica.</i>	67
7.7.	<i>Programación de controladores en LabView.</i>	68
7.8.	<i>Programación de interfaz gráfica para ensayos de control.</i>	68
7.9.	<i>Pruebas de funcionamiento sobre el programa.</i>	69
8	Guía de Uso de las Interfaces Gráficas	70
8.1.	<i>Guía de uso de las interfaces gráficas sobre modelos lineales.</i>	70
8.1.1.	<i>Guía de la interfaz gráfica de identificación.</i>	70
8.1.2.	<i>Guía de la interfaz gráfica de control.</i>	72
8.2.	<i>Guía de uso de las interfaces gráficas sobre la planta real.</i>	73
8.2.1.	<i>Guía de la interfaz gráfica de identificación.</i>	73
8.2.2.	<i>Guía de la interfaz gráfica de control.</i>	74
	Referencias	75

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 – Relación de instrumentos instalados en la planta y nomenclatura.	4
Tabla 1.2 – Nivel medido en puntos y en centímetros para la calibración del sensor de nivel.	7

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – Fotografía de la planta multiprocesos.	2
Figura 1.2 – Esquema de la planta multiprocesos y su instrumentación.	3
Figura 1.3 – Diagrama del sistema de control de la planta.	5
Figura 1.4 – Temperatura de la planta de frío (TT5).	6
Figura 1.5 – Recta de calibración del sensor de nivel LT.	8
Figura 2.1 – Modelo de sistema multivariable (2 entradas, 2 salidas).	10
Figura 2.2 – Característica Estática de TT2-TT1 ante cambios en VR1, con $R1=R2=55\%$.	11
Figura 3.1 – Bloques OPC en Simulink.	14
Figura 3.2 – Bloque de la planta real en Simulink.	15
Figura 3.3 – Ejemplo de estructura de control en Simulink.	15
Figura 3.4 – Temperatura de regreso al tanque (TT4) frente a escalón en válvulas VR2 y VR3 con caudal elevado.	16
Figura 3.5 – Modelo de primer orden con retraso de TT4 frente a VR2 y VR3 con caudal elevado.	17
Figura 3.6 – Control de TT4 mediante válvulas VR2 y VR3 con caudal elevado.	18
Figura 3.7 – Estructura de Control Anticipativo o FeedForward.	18
Figura 3.8 – Respuesta de TT4 frente a oscilaciones de TT5.	19
Figura 3.9 – Control de TT4 con estructura FeedForward y caudal elevado.	21
Figura 3.10 – Respuesta de TT2-TT1 ante escalón en R1 y R2 con caudal elevado.	22
Figura 3.11 – Modelo de primer orden con retraso TT2-TT1 frente a escalón en DC de R1 y R2 y caudal elevado.	23
Figura 3.12 – Nivel LT ante escalón en válvula VR1.	24
Figura 3.13 – Modelo de nivel LT ante escalón en VR1 con caudal elevado.	25
Figura 3.14 – Control de TT2-TT1 con caudal elevado.	26
Figura 3.15 – Control de nivel LT mediante válvula VR1 con caudal elevado.	27
Figura 4.1 – Control de la TT4 con estructura FeedForward y caudal reducido.	28
Figura 4.2 – Temperatura TT1 con control FeedForward en TT4 y caudal reducido.	29
Figura 4.3 – Respuesta de TT2-TT1 ante escalones en R1 y R2 con caudal reducido.	30
Figura 4.4 – Modelo de salto de temperatura de TT2-TT1 ante escalón en R1 y R2 con caudal reducido.	31
Figura 4.5 – Respuesta del Salto de Temperatura ante escalones en VR1.	32
Figura 4.6 – Respuesta del modelo G21(s) ante escalones a la entrada.	33
Figura 4.7 – Nivel LT ante ensayo en escalón en válvula VR1.	34
Figura 4.8 – Modelo de primer orden de nivel ante escalón en VR1.	35
Figura 4.9 – Control del salto de temperatura mediante R1 y R2 con caudal reducido.	36

Figura 4.10 – Control de Nivel LT mediante válvula VR1 con caudal reducido.	37
Figura 5.1 – Ensayo de control multivariable descentralizado.	38
Figura 6.1 – Pantalla Block Diagram.	40
Figura 6.2 – Pantalla Front Panel.	41
Figura 6.3 – Block Diagram del programa basado en modelos.	41
Figura 6.4 – FeedBack Node en LabView.	44
Figura 6.5 – Modelo de la planta implementado en LabView mediante ecuaciones en diferencias.	45
Figura 6.6 – Modo Identificación usando Tab Control.	46
Figura 6.7 – Modo Control usando Tab Control.	46
Figura 6.8 – Programación de las señales para identificación de VR1.	47
Figura 6.9 – Señal Fin de ensayo Chirp.	47
Figura 6.10 – Captura del valor instáneo del tiempo ante un flanco de subida en Escalón/Chirp.	48
Figura 6.11 – Interfaz gráfica del programa de identificación sobre modelos.	49
Figura 6.12 – Pruebas de ensayos ante encalón sobre modelos lineales simulados.	50
Figura 6.13 – Ensayo Chirp en VR1 sobre modelos lineales.	51
Figura 6.14 – Ensayo Chirp en DC de R1 y R2 sobre modelos lineales.	52
Figura 6.15 – Bloque de controlador con selección manual/automático y anti-Windup programado en LabView.	53
Figura 6.16 – Interfaz gráfica para la prueba de controladores.	54
Figura 6.17 – Funcionamiento del modo manual en la interfaz de control sobre modelos.	55
Figura 6.18 – Funcionamiento del modo automático en la interfaz de control sobre modelos.	56
Figura 7.1 – Esquema jerárquico de conexión vía OPC.	57
Figura 7.2 – Interfaz de OPC Factory Server (OFS 2.0).	58
Figura 7.3 – Interfaz de MatrikonOPC.	58
Figura 7.4 – De izquierda a derecha, bloques DataSocket Open, Read, Write y Close.	59
Figura 7.5 – Lectura de la señal del sensor TT1.	59
Figura 7.6 – Escritura de la señal del actuador VR1.	59
Figura 7.7 – Etapas del proceso de control.	60
Figura 7.8 – Estructura Flat Sequence implementada en Bucle While.	60
Figura 7.9 – Block Diagram del programa basado en la planta real.	61
Figura 7.10 – Implementación de puesta en el punto de operación del sistema en LabView.	61
Figura 7.11 – Programación del lazo auxiliar de control.	63
Figura 7.12 – Respuesta del lazo auxiliar de control implementado en LabView.	64
Figura 7.13 – Programación de señales para ensayos identificación con VR1 en planta real.	65
Figura 7.14 – Interfaz gráfica del programa de identificación sobre la planta real.	66
Figura 7.15 – Salto térmico frente a ensayo en escalón en DC mediante interfaz gráfica de identificación en LabView.	67
Figura 7.16 – Ensayo Chirp en DC mediante interfaz gráfica de identificación en LabView.	68
Figura 7.17 – Interfaz gráfica para la prueba de controladores sobre la planta real.	69
Figura 8.1 – Interfaz gráfica del programa de identificación sobre modelos lineales.	70

Figura 8.2 – Interfaz gráfica para la prueba de controladores sobre modelos lineales.	72
Figura 8.3 – Interfaz gráfica del programa de identificación sobre la planta real.	73
Figura 8.4 – Interfaz gráfica para la prueba de controladores sobre la planta real.	74

1 INTRODUCCIÓN

Este proyecto ha sido realizado sobre la planta de control multiprocesos, disponible en el Laboratorio de Control, que pertenece al Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad de Sevilla.

1.1. Motivación para la realización del proyecto.

La planta multiprocesos es un sistema muy interesante para poner en práctica los conocimientos adquiridos sobre el control automático, pues posee características propias de sistemas implementados en la industria actualmente.

La principal motivación para la realización de este proyecto es la creación de un laboratorio remoto integrado en un programa de laboratorios remotos promovido por la CEA-IFAC. Esto permitirá la realización de prácticas remotas de plantas experimentales para el aprendizaje sobre sistemas de control.

Si bien este laboratorio podrá estar accesible a alumnos de toda España, mejorará también la accesibilidad de los alumnos del Departamento a la realización de prácticas en la planta, pues podrán trabajar con la misma sin necesidad de estar físicamente en el laboratorio.

1.2. Objetivos y alcance del proyecto.

Los objetivos de este trabajo serán los siguientes:

- Caracterizar la planta obteniendo modelos a partir de ensayos realizados sobre la misma.
- Creación de un caso de estudio adecuado para el estudio de sistemas de control multivariable.
- Realizar un control multivariable sencillo del sistema para después implementarlo en LabView y comprobar que funciona de la forma esperada.
- Implementar los modelos obtenidos de la planta en el Software LabView y crear una interfaz para la identificación y control sobre estos modelos. Esto se denominará “control simulado”.
- Poder realizar ensayos y control sobre sistema real mediante LabView, es decir, sustituyendo los modelos por la planta real. Esto se denominará “control real”.

1.3. Descripción de la planta.

La planta multiprocesos es un equipo de laboratorio orientado a la enseñanza de sistemas de control de procesos de variables fundamentales como nivel, caudal, temperatura o presión. Está basada en una planta desarrollada por la empresa GUNT, pero ampliada y modificada en el Departamento para mejorar su funcionalidad (véase la Figura 1.1). La instrumentación de la planta es de tipo industrial y el sistema de control está basado en un PLC Schneider M340 emulando un sistema de control realista. Además, cuenta con una pantalla HMI Magelis para su operación local, y permite su control remoto desde un PC.



Figura 1.1 – Fotografía de la planta multiprocesos.

1.3.1. Esquema, variables y configuraciones.

El esquema de la planta se muestra en la Figura 1.2 en la configuración que se va a operar la planta. En este esquema también se muestra la instrumentación instalada en la planta.

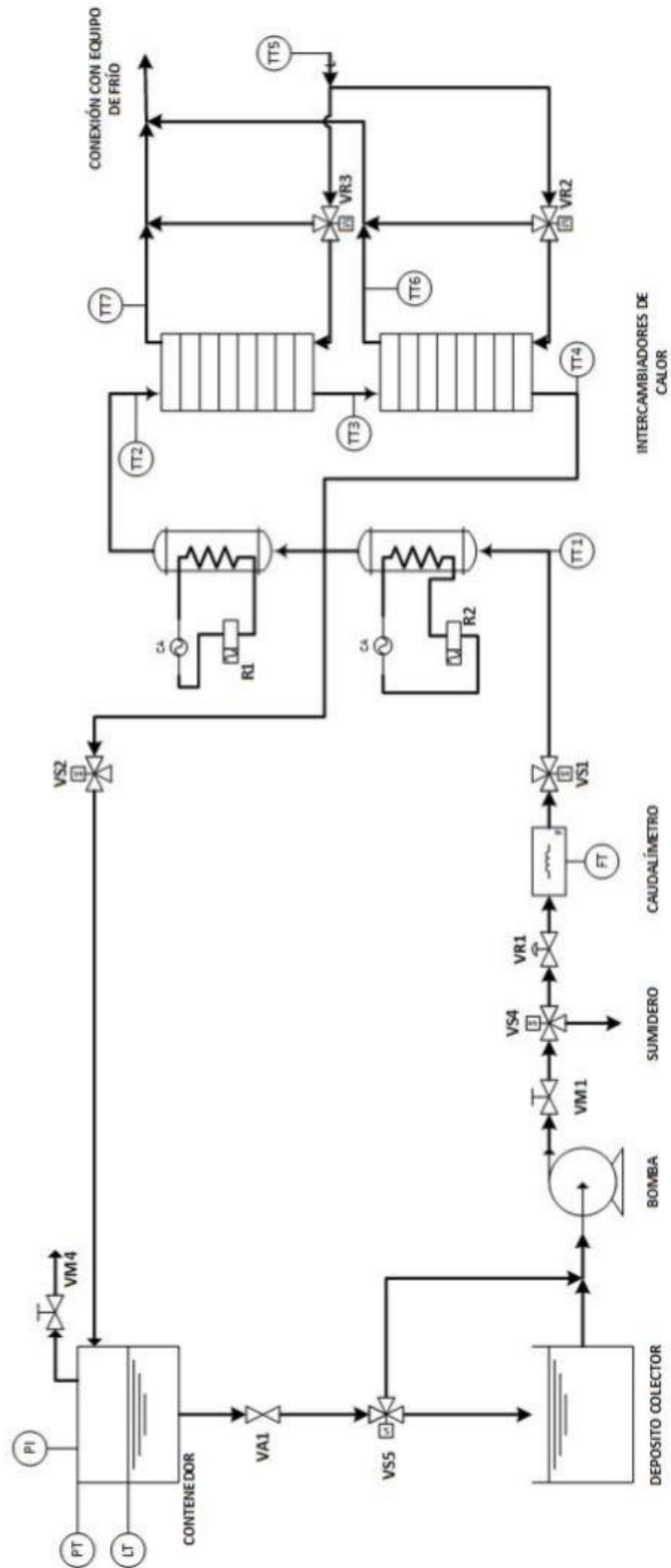


Figura 1.2 – Esquema de la planta multiprocesos y su instrumentación.

La relación de instrumentos instalados en la planta y su nomenclatura se detalla en la siguiente tabla:

FT	Caudalímetro
PT	Sensor de presión
LT	Sensor de nivel
TT1	Sensor de temperatura (PT100 Endress-Hauser)
TT2	Sensor de temperatura (PT100 Endress-Hauser)
TT3	Sensor de temperatura (PT100 Endress-Hauser)
TT4	Sensor de temperatura (Sonda CAREL)
TT5	Sensor de temperatura (Sonda CAREL)
TT6	Sensor de temperatura (Sonda CAREL)
TT7	Sensor de temperatura (Sonda CAREL)
TT8	Sensor de temperatura (PT100 Endress-Hauser)
TT9	Sensor de temperatura (PT100 Endress-Hauser compartida)
VM1	Válvula manual de la bomba
VM2	Válvula manual de evacuación de agua
VM3	Válvula de entrada al rotámetro
VM4	Válvula de cierre del depósito contenedor al ambiente
VSi	Válvulas de solenoide de configuración
VR1	Válvula de regulación (Samson neumática de asiento lineal)
VR2	Válvula eléctrica regulable (Johnson Control eléctrica 3 vías)
VR3	Válvula eléctrica regulable (Johnson Control eléctrica 3 vías)
R1	Resistencia de 2 kW
R2	Resistencia de 4 kW

Tabla 1.1 – Relación de instrumentos instalados en la planta y nomenclatura.

La planta permite dos configuraciones diferentes para operar:

- Configuración 1 (C1): En esta configuración, la planta nos permite realizar un control de nivel (LT) mediante la válvula neumática (VR1) que regula el caudal. En este caso, el agua no circulará por la parte del sistema dedicada al control de temperatura, como son las resistencias e intercambiadores de calor.

Esta configuración está pensada para poner en práctica los conceptos y conocimientos básicos del control automático, siendo posible únicamente realizar ensayos de control monovariable.

- Configuración 2 (C2): En la configuración C2, el sistema permitirá, además del control de nivel (LT), un control de temperatura del agua circulante. Para ello, el líquido circulará por las resistencias y por los intercambiadores de calor, de modo que se podrá regular la temperatura.

Esta última configuración es en la que nos vamos a centrar, pues permite poner en práctica técnicas de control más avanzado, como el control multivariable.

Todas las señales de instrumentación se conectan a las tarjetas de entrada-salida de un autómata programable Schneider M340, donde se implementa el sistema de control de la planta que permite su operación desde una pantalla de explotación Magelis o desde un PC con los que se comunica vía Ethernet.

Las entradas manipulables de la planta (salidas del autómata) son VR1, VR2, VR3, R1, R2, así como las válvulas de configuración VSi. Las salidas de la planta (entradas del autómata) son las sondas de temperatura TT1-TT8, LT, FT, PT.

El sistema de control permite acceder a todas las entradas y salida de la planta en Matlab/Simulink vía OPC gracias al servidor OPC OFS de Schneider.

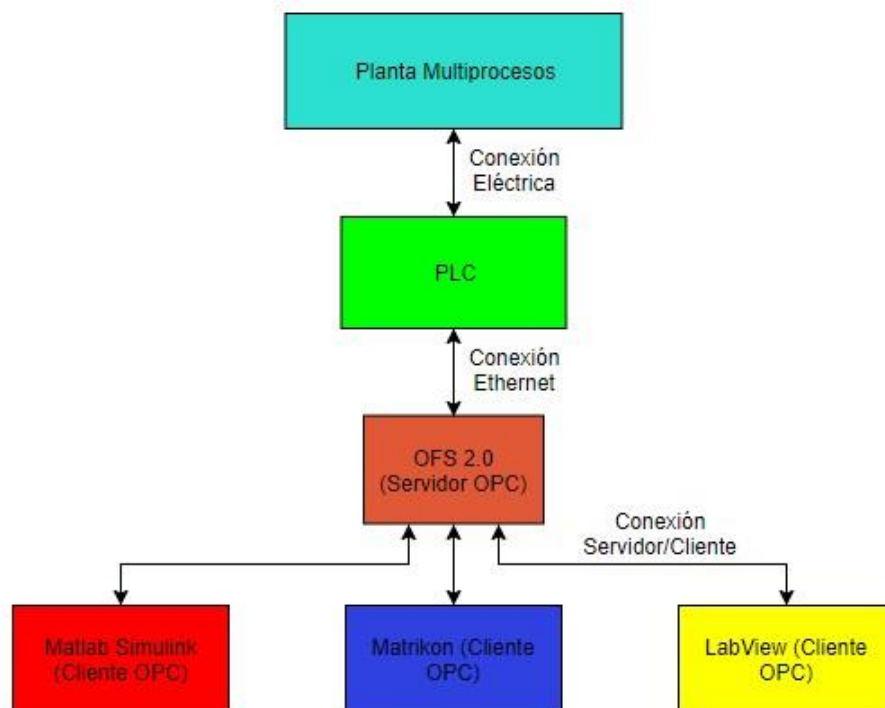


Figura 1.3 – Diagrama del sistema de control de la planta.

1.3.2. Descripción del funcionamiento de la planta.

La bomba aspira el agua del depósito colector y la impulsa a través de una válvula de regulación de asiento (VR1) pasando por un caudalímetro magnético (FT) hacia el resto de la planta donde se llevan a cabo los procesos que se pretenden controlar. El agua de salida del caudalímetro magnético FT circula a través de 2 resistencias eléctricas, R1 y R2, las cuales están dispuestas en serie, y cuya potencia eléctrica es manipulable mediante la modulación de anchura de pulso (PWM) de la tensión de cada resistencia. El agua calentada pasa a través del circuito primario de 2 intercambiadores de calor también en serie, donde se enfría el agua. Desde allí, el agua se conduce al tanque acumulándose, mientras se vacía por gravedad sobre el depósito colector

completando un circuito cerrado.

El caudal de agua fría de entrada en el secundario de cada intercambiador se manipula por una válvula de 3 vías de regulación, VR2 y VR3, que divide el agua proveniente de una fuente de agua fría entre una tubería de bypass al intercambiador, y la entrada al secundario del intercambiador. La fuente de agua fría es una enfriadora de agua, que enfría el agua de un depósito desde el cual se impulsa a caudal constante hacia los intercambiadores.

Toda la información técnica necesaria sobre la planta se puede encontrar en la Guía de Usuario de la planta que complementa este documento.

1.3.3. Análisis del comportamiento de la planta de frío.

La fuente de agua fría consiste en un depósito de agua cuya temperatura se regula mediante una enfriadora controlada con un control por relé. Por lo tanto, la temperatura de la fuente fría experimenta un comportamiento oscilatorio cuya amplitud y frecuencia puede variar con la carga térmica de la planta. En la siguiente imagen se muestra lo que se comenta:

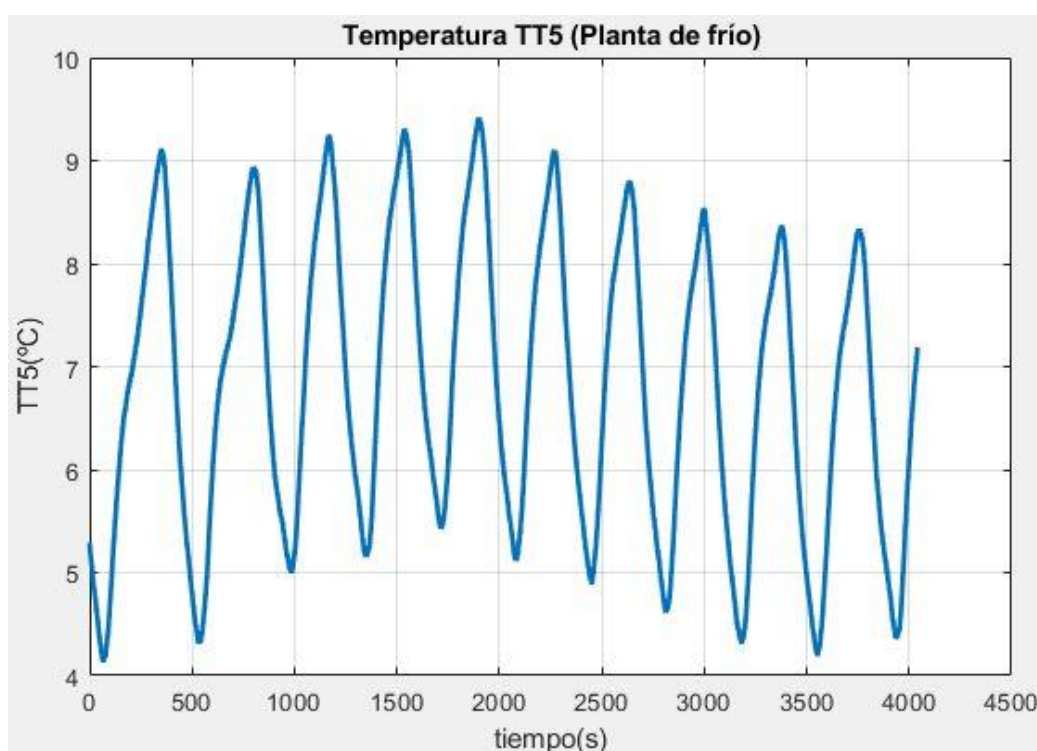


Figura 1.4 – Temperatura de la planta de frío (TT5).

El comportamiento del agua de refrigeración induce oscilaciones en la evolución de la temperatura del agua de la planta, lo cual puede ser indeseable.

Al ser una perturbación medible, se pueden diseñar estrategias de control avanzadas como puede ser una estructura de control anticipativo. Para ello sería necesario estimar un modelo de perturbaciones que ayudaría a contrarrestar el efecto sobre otras temperaturas, como se verá más adelante.

Se debe destacar que, dependiendo de lo que ocurra en el resto del sistema, el comportamiento que se observa en la Figura 1.4 puede ir cambiando. Esto se debe a que la temperatura del agua que circula por la planta de frío se ve afectada por la temperatura del agua con la que se intercambia calor en los intercambiadores.

En la Figura 1.4 se muestra el comportamiento de TT5 cuando la planta se encuentra en un cierto punto de funcionamiento. Si la planta se opera en torno a dicho punto, se espera que la evolución de TT5, en términos de amplitud y frecuencia, sea semejante a la anterior.

1.3.4. Calibración del sensor de nivel.

El sensor de nivel del depósito en un sensor de tipo capacitivo que requiere calibración.

Para ello, se ha ido modificando el nivel del agua contenido en el tanque y se han tomado los valores en puntos (sensor) y en centímetros (a partir de la regla vertical que hay situada en el depósito).

Según el manual del sensor de nivel, no se recomienda tomar medidas en niveles demasiado bajos (menos de 6cm) ni demasiado altos (más de 43cm). Teniendo esto en cuenta, el punto de operación del nivel debería ser un valor intermedio, en el que la medida del sensor sea aceptable.

Los valores de nivel medidos en puntos y en centímetros son los que se muestran en la siguiente tabla:

Nivel (cm)	Nivel (Puntos)
6	2442
7	2750
8	3020
9	3280
10	3530
11	3825
12	4085
13	4307
14	4550
15	4780
16	4990
17	5190
18	5383
19	5610
20	5805
21	6015
22	6225
23	6431
24	6623
25	6795
26	6985

27	7170
28	7328
29	7416
30	7596
31	7764
33	8050
35	8390
37	8746
39	9085
41	9405
43	9672

Tabla 1.2 – Nivel medido en puntos y en centímetros para la calibración del sensor de nivel.

Con estos resultados se puede calcular una recta de calibración, en este caso, basada en un ajuste por mínimos cuadrados:

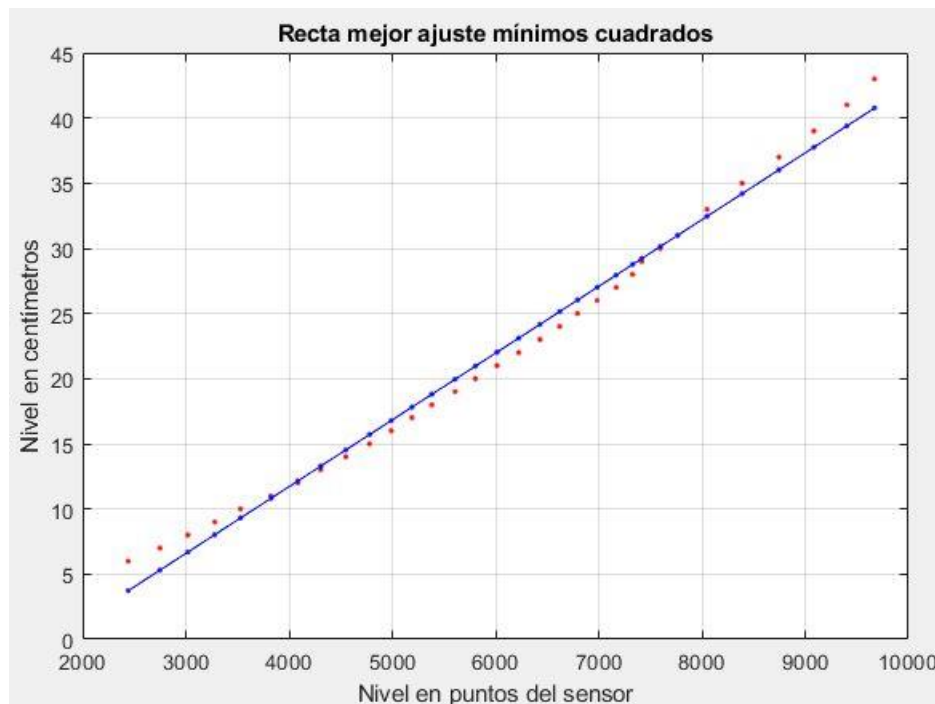


Figura 1.5 – Recta de calibración del sensor de nivel LT.

La recta de calibración mostrada en la Figura 5 tiene la siguiente ecuación:

$$\text{Nivel en cm} = \text{Nivel en ptos.} * 0.0051 - 8.7743.$$

2 CASO DE ESTUDIO: CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL PROPUESTO

Para realizar el laboratorio virtual se propone un sistema de control que permite regular el nivel del depósito LT, las temperaturas TT2-TT1 (incremento de temperatura) y TT4, manipulando VR1, VR2, VR3, R1 y R2.

Entre las posibles estructuras y objetivos de control que se pueden realizar, se ha elegido para el laboratorio virtual el problema que se detalla a continuación.

2.1. Objetivo de control.

El objetivo es controlar un sistema multivariable 2x2 sencillo, que permita realizar ensayos largos. Para ello, se ha elegido controlar el nivel del tanque (LT) y el incremento de temperatura que producen las resistencias (TT2-TT1), manipulando la válvula de regulación VR1 y el PWM de las resistencias (tomando $R1=R2$).

Al ser la planta un circuito cerrado de agua a través del depósito de acumulación, la variación de TT2 puede producir una deriva de la temperatura del depósito (TT1), y, por lo tanto, de la temperatura de toda el agua que circula por la planta. Para evitar esta deriva y lograr así unos ensayos de larga duración, se regula la temperatura del depósito colector, TT1, controlando la temperatura TT4 mediante las válvulas $VR2=VR3$. La idea es que el salto térmico que se da en las resistencias se compense con la planta de frío, manteniendo aproximadamente constante la temperatura del depósito.

Si bien esto puede solucionar este problema, a su vez añade otro al inducir oscilaciones en las temperaturas, derivadas de las oscilaciones de TT5 anteriormente explicadas. El sistema de control de TT4 se diseñará de forma que este efecto sea tan reducido como sea posible. Además, para reducir su efecto en el sistema a controlar, se ha tomado como variable de salida TT2-TT1 (salto térmico) en vez de TT2, pues experimenta una menor sensibilidad a las oscilaciones de TT5.

2.2. Estrategia de control a diseñar.

Aislado el problema de control de TT4 mediante las válvulas VR2 y VR3, se puede considerar que el sistema posee:

- Dos entradas:
 - Porcentaje de apertura de la válvula VR1 (Entrada 1, es decir, u_1).
 - Duty Cycle de las resistencias R1 y R2 (Entrada 2, es decir, u_2).

- Dos salidas:
 - Nivel del tanque LT (cm) (Salida 1, es decir, y_1).
 - Salto de temperatura TT2-TT1 (°C) (Salida 2, es decir, y_2).

Puesto que, a efectos prácticos, el problema posee únicamente dos entradas y dos salidas, es conveniente emparejar las variables para realizar un control adecuado de las salidas.

A continuación, se muestra cómo se modela este tipo de sistemas en la teoría de control:

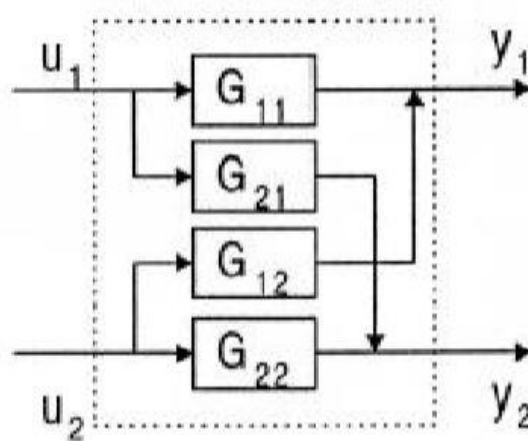


Figura 2.1 – Modelo de sistema multivariable (2 entradas, 2 salidas).

Las salidas cumplen estas ecuaciones:

$$y_1 = G_{11} * u_1 + G_{12} * u_2 \quad (2.1)$$

$$y_2 = G_{21} * u_1 + G_{22} * u_2 \quad (2.2)$$

En dichas ecuaciones hay cuatro funciones de transferencia, las cuales representan lo siguiente:

- $G_{11}(s)$: Modela el efecto que produce en el nivel LT (y_1) un cambio en VR1 (u_1).
- $G_{12}(s)$: Modela el efecto que produce en el nivel LT (y_1) un cambio en el Duty Cycle de R1 y R2 (u_2). Dado que la densidad del agua es prácticamente constante con la temperatura, se considera $G_{12}(s) = 0$.
- $G_{21}(s)$: Modela el efecto que produce en el salto de temperatura (y_2) un cambio en VR1 (u_1).
- $G_{22}(s)$: Modela el efecto que produce en el salto de temperatura (y_2) un cambio en el Duty Cycle de R1 y R2 (u_2).

2.3. Elección del punto de operación: Acoplamiento de entradas y salidas.

A priori, se han elegido dos puntos de operación distintos para el porcentaje de apertura de la válvula VR1, pues de esto depende el caudal de agua que circulará por el sistema. El primero tendrá un caudal más elevado, mientras que el segundo será más reducido. Cada uno de estos puntos de operación tendrá unas ventajas y unas desventajas desde el punto de vista del control.

2.3.1. Punto de operación de las variables del sistema.

Puesto que las resistencias R1/R2 dan una potencia media según el Duty Cycle (DC) que poseen, se ha elegido como punto de operación el 55% para ambas, ya que esto producirá un salto de temperatura intermedio del rango disponible.

Manteniendo constante el DC de R1/R2, si se van aplicando escalones al porcentaje de apertura de la válvula VR1, se obtiene la siguiente característica estática del incremento de temperatura TT2-TT1:

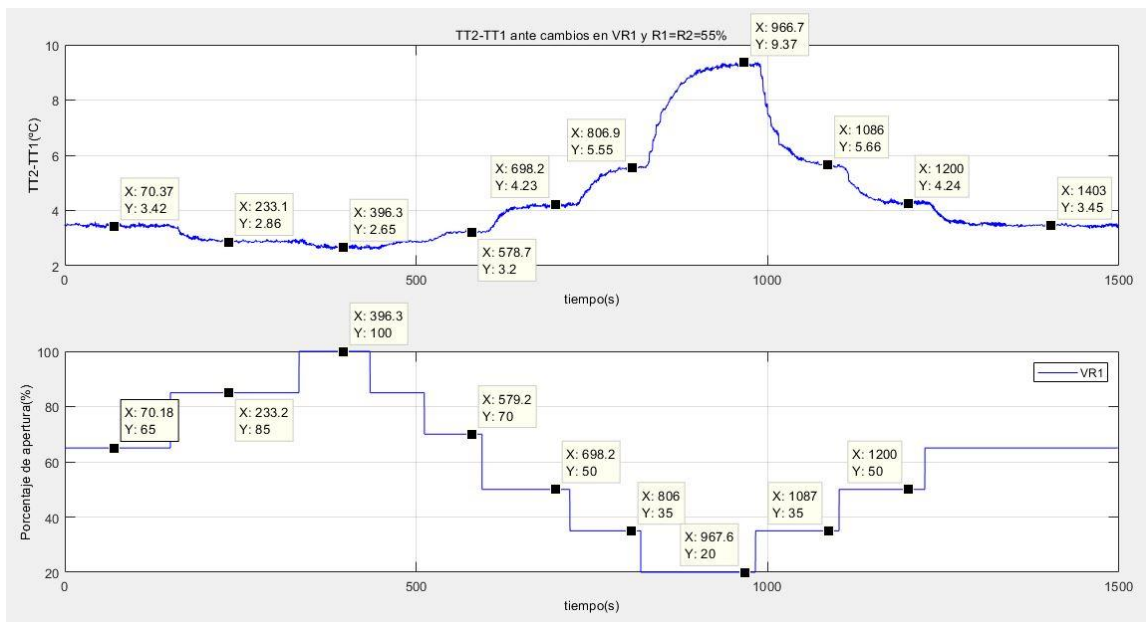


Figura 2.2 – Característica Estática de TT2-TT1 ante cambios en VR1, con R1=R2=55%.

Si se observa detalladamente la figura 2.2, se puede apreciar que cuando el caudal es elevado, un cambio en el propio caudal no modifica demasiado el salto de temperatura, por lo que la regulación del nivel mediante VR1 no producirá demasiadas perturbaciones en el control de temperatura.

Esto implica que, con un caudal elevado, el salto de temperatura sea poco sensible a cambios en VR1, y que exista poco acoplamiento entre el control de nivel con VR1 y el control del incremento de temperatura con R1/R2.

Este comportamiento del sistema ha sido determinante a la hora de elegir un punto de operación, pues cuanto mayor acoplamiento exista entre las variables del sistema, más atractivo será el sistema desde el punto de vista del control multivariable.

2.3.2. Ventajas y desventajas de punto de operación con caudal elevado.

Puesto que el caudal es directamente proporcional a VR1, una modificación en la apertura de VR1 modificará el caudal que circula por la planta.

Como punto de operación para el caudal elevado, se ha tomado VR1=65%, lo que da lugar a un caudal de unos 720 litros/hora. Se ha ajustado la válvula manual de descarga VA1 para lograr un nivel de equilibrio intermedio y una constante de tiempo admisible. Estos valores vienen determinados por las ecuaciones que se presentan a continuación:

$$H_0 = \left(\frac{Q_0}{K}\right)^2 \quad (3.1)$$

$$Tau = 2 * A * \frac{Q_0}{K^2} = 2 * A * \frac{H_0}{Q_0} \quad (3.2)$$

,siendo H_0 el nivel en el punto de operación, Q_0 el caudal en el punto de operación, Tau la constante de tiempo, A el área del depósito, y K el coeficiente de descarga (directamente proporcional a la apertura de la válvula VA1).

Basándonos en la ecuación 3.1, deducimos que al aumentar el caudal de equilibrio Q_0 , se debe aumentar K (abriendo la válvula VA1) para conseguir un nivel de equilibrio medio, lo que reduce la constante de tiempo.

Si se toma un caudal Q_0 bajo para aumentar el acoplamiento caudal-temperatura, se debe disminuir K , lo que conlleva a una mayor constante de tiempo (ecuación 3.2) y por lo tanto una respuesta más lenta del nivel ante cambios en VR1.

Por otro lado, si no se disminuye K , entonces disminuirá la altura de equilibrio, lo que reduce el rango de operación del nivel del tanque.

La válvula VA1 se ha ajustado de forma que le logre un buen compromiso entre la altura de equilibrio y la constante de tiempo. Para este caso (caudal elevado), la válvula se ha situado en una posición de 2.75.

Esto tiene ciertas ventajas y desventajas, que se exponen a continuación:

- Ventajas:

- Menor perturbación en el control de temperatura provocadas por el control de nivel (modificaciones de VR1).
- Cambios en VR1 no producirán cambios tan grandes en el nivel, es decir, una pequeña modificación en VR1 no ocupará un rango del nivel tan amplio.
- Permite un control más robusto en el lazo auxiliar (TT4 mediante VR2/VR3).

- Desventajas:

- Menor rango de control de temperatura, pues al circular más cantidad de agua por R1 y R2, ésta no se calienta tanto.
- Cambios más lentos en el nivel al modificar VR1.

2.3.3. Ventajas y desventajas de punto de operación con caudal reducido.

Si se reduce VR1 hasta el 30% de su apertura máxima, se reducirá el caudal que circula por la planta, por lo que será de unos 375 litros/hora. Al tener un caudal menor, se debe reducir el coeficiente de descarga modificando la posición de VA1 hasta conseguir una H_0 intermedia. La válvula VA1 se ha situado en una posición de 1.95. Según las ecuaciones 3.1 y 3.2, esto dará lugar a una Tau más pequeña (control de nivel más rápido), que aumenta con el caudal y disminuye con el cuadrado de K .

Como mostraba la característica estática del salto de temperatura (figura 2.2), ahora un cambio en VR1 provocará cambios importantes en TT2-TT1. Por lo tanto, el salto de temperatura es más sensible a los cambios en VR1 en este punto de operación.

Esto también dará lugar a ciertas ventajas y desventajas, que se exponen a continuación:

- Ventajas:

- Mayor rango en el control de temperatura, ya que al circular menos cantidad de agua por R1 y R2, el agua se podrá calentar más.

- Cambios más rápidos en el nivel al modificar VR1, pues al ser menor el caudal que circula por el sistema, disminuye Tau .
- Desventajas:
- La evolución de las temperaturas presenta una mayor oscilación inducida por la planta de frío. Esto se debe a que la planta trabaja con un rango de temperaturas más altas y presenta un mayor gradiente con la temperatura de agua fría, lo que aumenta la sensibilidad a la misma.
 - El lazo de control auxiliar para controlar TT4 se hace más lento, por lo que resulta conveniente reajustarlo.
 - Cambios pequeños en VR1 producirán cambios grandes en el nivel. Esto dará lugar a que una pequeña modificación de VR1 ocupe casi todo el rango de variación del nivel en el depósito.

Si bien para un caudal menor, la mayor sensibilidad de TT2-TT1 frente a cambios en VR1 se ha considerado una desventaja, también puede considerarse una ventaja, pues supone un problema de control más atractivo para los alumnos que quieren poner en práctica sus conocimientos sobre el control multivariable al existir un mayor acoplamiento entre variables.

De hecho, este será el motivo principal (además de la posibilidad de controlar más rápido el nivel LT) por el que más adelante se decida escoger este punto de funcionamiento con menor caudal.

3 PRIMER PUNTO DE OPERACIÓN: CAUDAL ELEVADO

En este capítulo se presentan el análisis y diseño de los controladores para el caso del punto de operación con caudal elevado. En particular se va a trabajar con unos valores de las entradas de VR1=65%, que tiene un caudal asociado de 720 litros/hora aproximadamente.

3.1. Implementación del sistema de control en Simulink.

Para trabajar con la planta multiprocesos, ha sido necesario realizar el sistema de control en Matlab Simulink.

En primer lugar, configurando bloques OPC Write y OPC Read, y el bloque de configuración “OPC Config Real-Time”, se ha establecido la comunicación entre nuestro programa y Matrikon (conexión cliente/cliente, detallado en secciones futuras), tal y como muestra la siguiente figura:

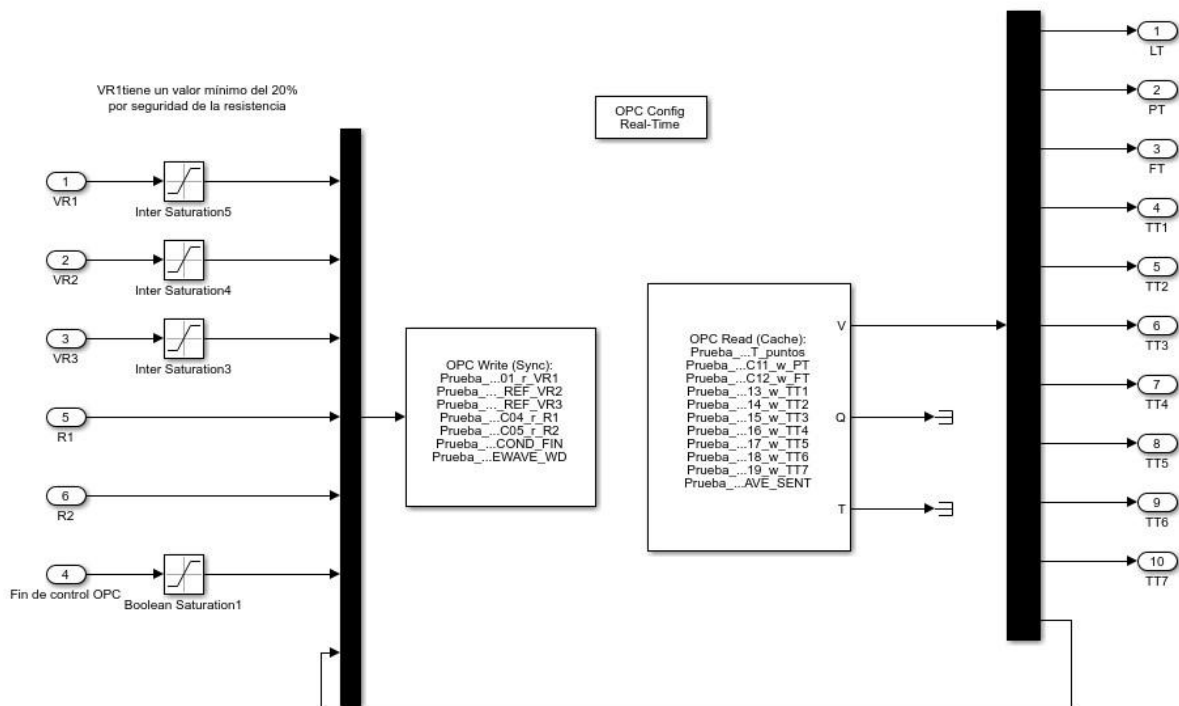


Figura 3.1 – Bloques OPC en Simulink.

Tras configurar todas las señales de lectura y escritura, y configurar un tiempo de muestreo de 0.1 segundos, se ha creado un subsistema a partir de lo mostrado en la figura 3.1. Dicho bloque, el cual se muestra a continuación, será considerado como la planta real a la hora de implementar los controladores:



Figura 3.2 – Bloque de la planta real en Simulink.

Se debe destacar que todos los controladores han sido implementados en tiempo continuo en Simulink, de modo que los datos se envían y se reciben cada 0.1 segundos. Puesto que este tiempo es mucho menor que las dinámicas del sistema, esto no debe ocasionar problemas. En la siguiente figura puede verse un ejemplo de la implementación del sistema de control:

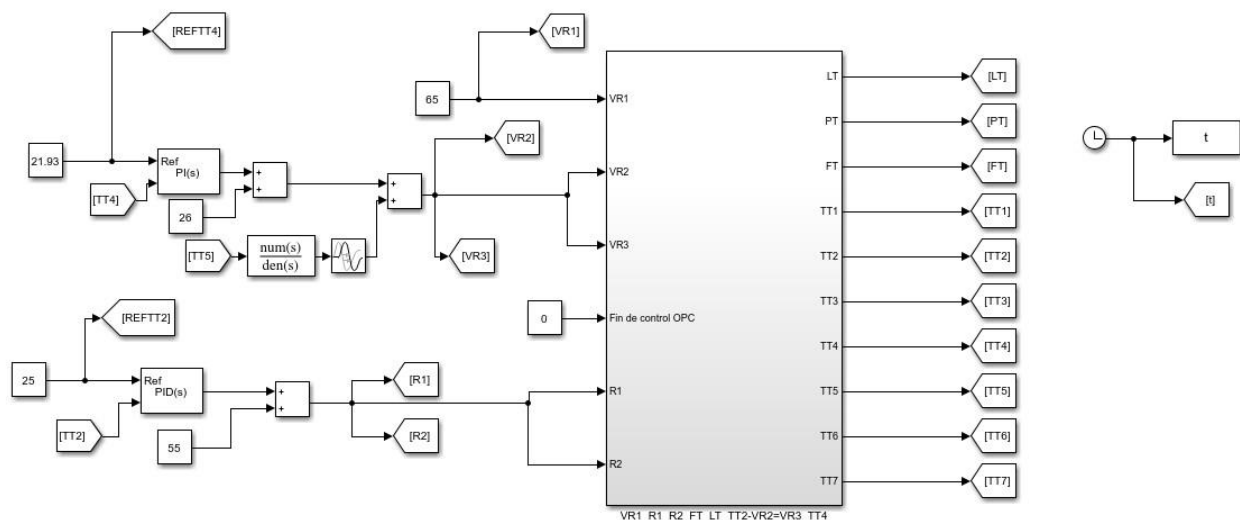


Figura 3.3 – Ejemplo de estructura de control en Simulink.

3.2. Lazo auxiliar de control.

Como se comentó anteriormente, la evolución de la temperatura del sistema de refrigeración TT5 depende de la potencia térmica aportada en las condiciones de funcionamiento de la planta, y por lo tanto del punto de operación elegido.

Esto hace que el lazo de control auxiliar se deba ajustar de forma que tenga un comportamiento aceptable en cada uno de los puntos de operación elegidos, pues no tiene por qué ser válido para ambos puntos de funcionamiento.

3.2.1. Ensayo ante escalón y modelo.

A continuación, se muestra el experimento que se ha realizado para obtener un modelo de TT4 frente a cambios en las válvulas VR2/VR3:

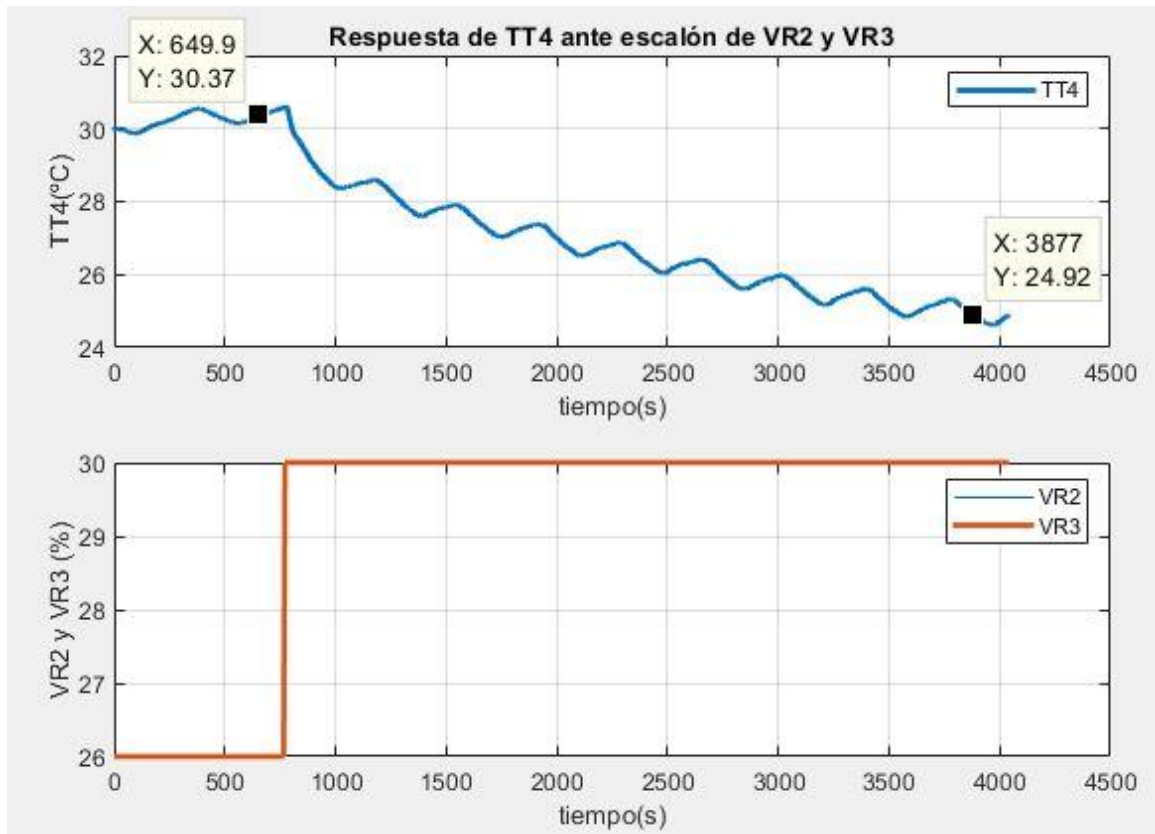


Figura 3.4 – Temperatura de regreso al tanque (TT4) frente a escalón en válvulas VR2 y VR3 con caudal elevado.

En la figura 3.4 se pueden apreciar las oscilaciones producidas en TT4 debido a TT5. Además, se observa que la temperatura de TT4 en régimen permanente con un DC del 55% en R1 y R2 y una apertura del 26% en VR2 y VR3 es de unos 30°C.

Dando un escalón del 4% a las válvulas VR2 y VR3, se observa la respuesta de TT4, que se puede identificar (sin tener en cuenta las oscilaciones producidas por la planta de frío) como un sistema de primer orden con retraso.

El modelo calculado es el siguiente:

$$G_{TT4}(s) = -\frac{1.55}{1601.8s + 1} * e^{-10.8s}.$$

Si introducimos el mismo escalón como entrada al modelo, se obtiene la siguiente respuesta:

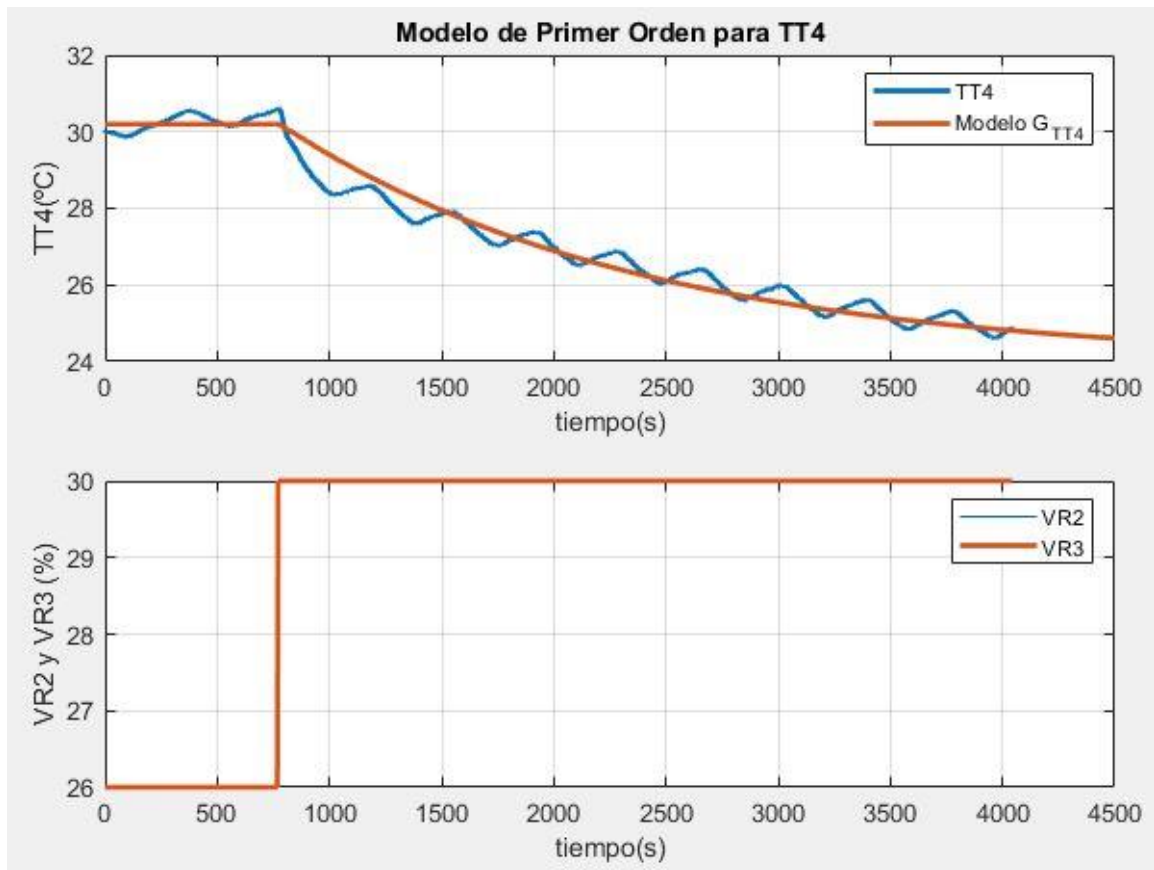


Figura 3.5 – Modelo de primer orden con retraso de TT4 frente a VR2 y VR3 con caudal elevado.

Como se muestra en la figura 3.5, la respuesta del modelo es similar a la salida real. A partir de $G_{TT4}(s)$, se diseñarán controladores para regular la temperatura TT4.

3.2.2. Control de TT4 mediante VR2 y VR3.

Debido a que la respuesta es muy lenta, se ha decidido controlar esta temperatura con un controlador de tipo Proporcional-Integral (PI), diseñado mediante una aplicación de Matlab Simulink. Dicho controlador tiene la siguiente ecuación:

$$C_{TT4}(s) = -5.65 * \left(1 + \frac{1/333.33}{s} \right).$$

El objetivo de este controlador es regular la temperatura del depósito de acumulación para que mantenga un valor constante. Por ello, se fija el valor de TT1 medido al comienzo del ensayo, con el fin de que, durante el mismo, esta temperatura permanezca aproximadamente constante.

De este modo, siempre se resta el calor aportado al agua por R1 y R2 mediante la planta de frío.

A continuación, se muestra cómo funciona el controlador en rechazo a las perturbaciones de TT5, con una referencia de 21.93°C, que era la temperatura que se obtuvo en la medida de TT1 al llegar al laboratorio:

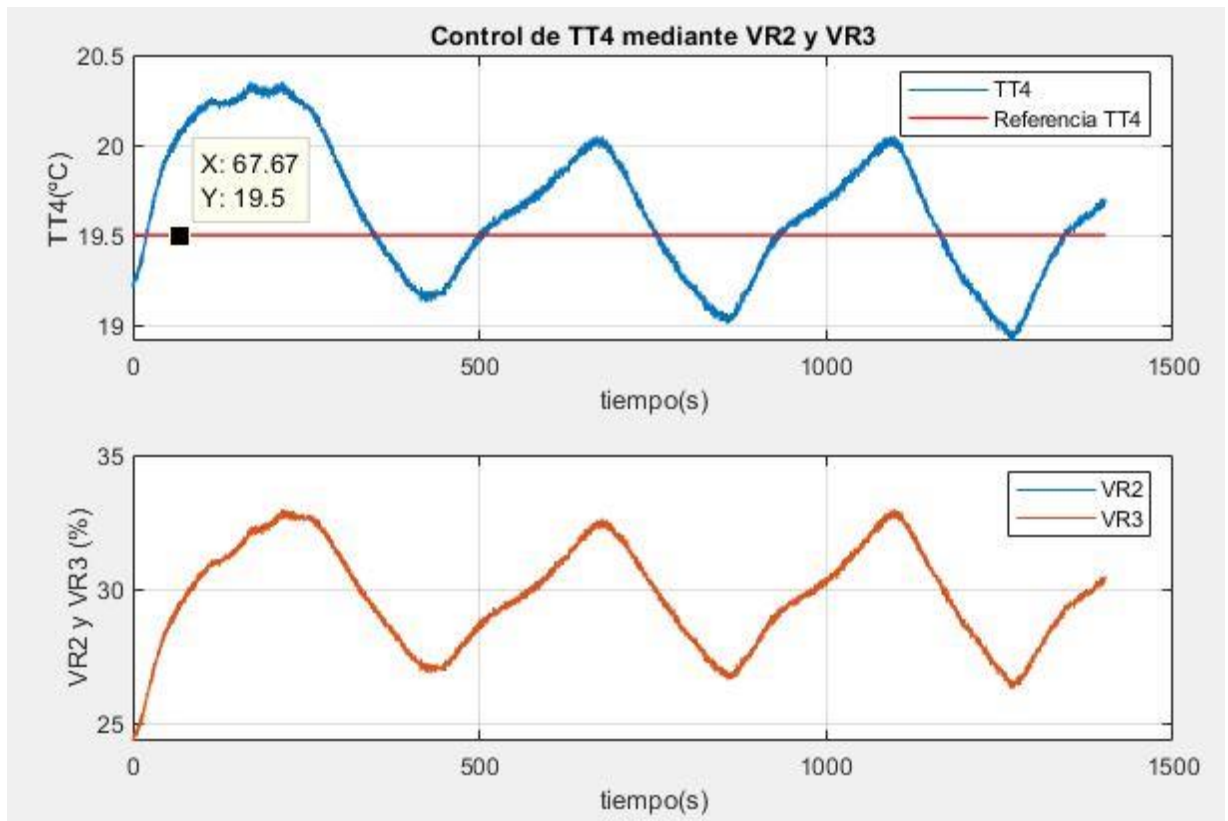


Figura 3.6 – Control de TT4 mediante válvulas VR2 y VR3 con caudal elevado.

Como se puede observar en la figura 3.6, la salida del sistema controlado, TT4, presenta unas oscilaciones inducidas por la evolución de TT5. Dado que esta perturbación se mide, se puede aprovechar esta información para compensar su efecto mediante una estrategia de control anticipativo o control FeedForward.

3.2.3. Control anticipativo de TT4.

Según la teoría de control, la estructura de control anticipativo es la siguiente:

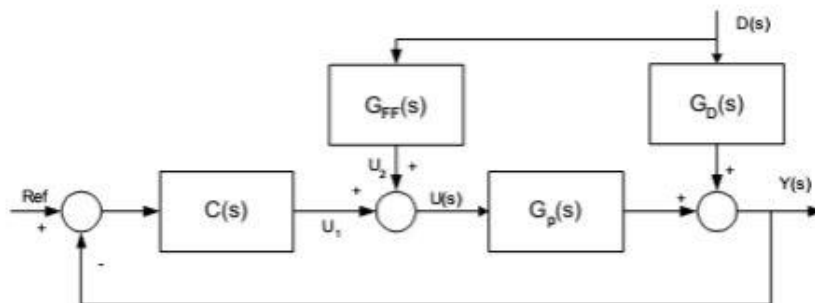


Figura 3.7 – Estructura de Control Anticipativo o FeedForward.

Como el sistema está realimentado, se debe considerar el lazo:

$$Y(s) = S(s) * (G_d(s) + G_p(s) * G_{FF}(s)) * D(s)$$

,siendo $S(s) = 1/(1 + G_p(s) * C(s))$

Para compensar el efecto de $G_d(s)$ (Perturbación), se debe cumplir que:

$$(G_d(s) + G_p(s) * G_{FF}(s)) * D(s) = 0,$$

Por lo que:

$$G_d(s) + G_p(s) * G_{FF}(s) = 0.$$

Entonces, $G_{FF}(s)$ se puede despejar como:

$$G_{FF}(s) = -\frac{G_d(s)}{G_p(s)}.$$

Puesto que ya se ha identificado un modelo para la planta, $G(s)$ ó $G_p(s)$, el siguiente paso será identificar un modelo de perturbaciones $G_d(s)$.

Se ha determinado una función de transferencia de perturbación $G_d(s)$ mediante el efecto producido por la perturbación TT5 en la temperatura TT4:

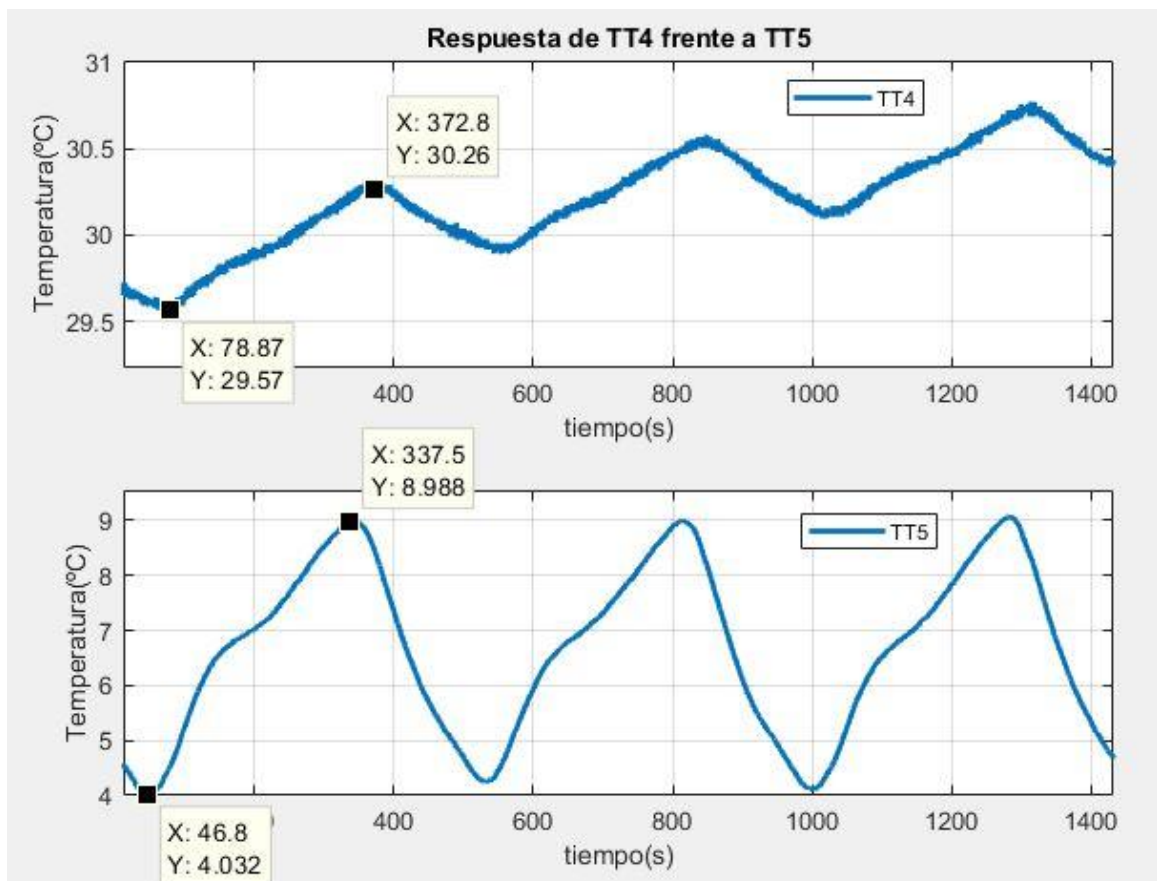


Figura 3.8 – Respuesta de TT4 frente a oscilaciones de TT5.

Aunque en la figura 3.8 se puede comprobar que hay cierta tendencia en el comportamiento de TT4, el modelo se ha determinado mediante una ganancia multiplicada por un retraso. Se ha calculado como:

$$L = 372.8s - 337.5s = 35.3s.$$

$$K = \frac{30.26 - 29.57}{8.988 - 4.08} = 0.14.$$

Por lo tanto, la función de transferencia de perturbación es:

$$G_d(s) = 0.14 * e^{-35.3*s}.$$

Una vez calculadas ambas funciones de transferencia, se puede calcular $G_{FF}(s)$ como:

$$\begin{aligned} G_{FF}(s) &= -\frac{G_d(s)}{G_p(s)} = -\frac{0.14 * e^{-35.3*s}}{-\frac{1.55}{1601.8s + 1} * e^{-10.8s}} = \\ &= \frac{0.14}{1.55} * (1601.8 * s + 1) * e^{(-35.3 - (-10.8))*s} = (144.68 * s + 0.09) * e^{-24.5*s}. \end{aligned}$$

Como se puede comprobar, la función de transferencia no es causal, pues tiene un cero y retraso, pero no tiene polos. Para poder implementarla debe ser causal, por lo que añadiremos un polo de una frecuencia unas 10 veces mayor que la frecuencia del cero. De este modo, la función de transferencia podrá ser implementada sin que su comportamiento se vea demasiado afectado por la adición del polo.

Como conclusión, la función de transferencia implementada será:

$$G_{FF}(s) = \frac{144.68 * s + 0.09}{160 * s + 1} * e^{-24.5*s}.$$

Hay que destacar que $G_{FF}(s)$ multiplicará a la perturbación, TT5, que como se ha indicado, es medible. La salida de dicha función de transferencia (término anticipativo) se sumará a la señal de control dada por el controlador $C_{TT4}(s)$. De este modo, el rechazo a perturbaciones dado por TT5 en TT4 debería verse mejorado.

Tras realizar un ensayo con la estructura de control anticipativo, se obtienen los siguientes resultados:

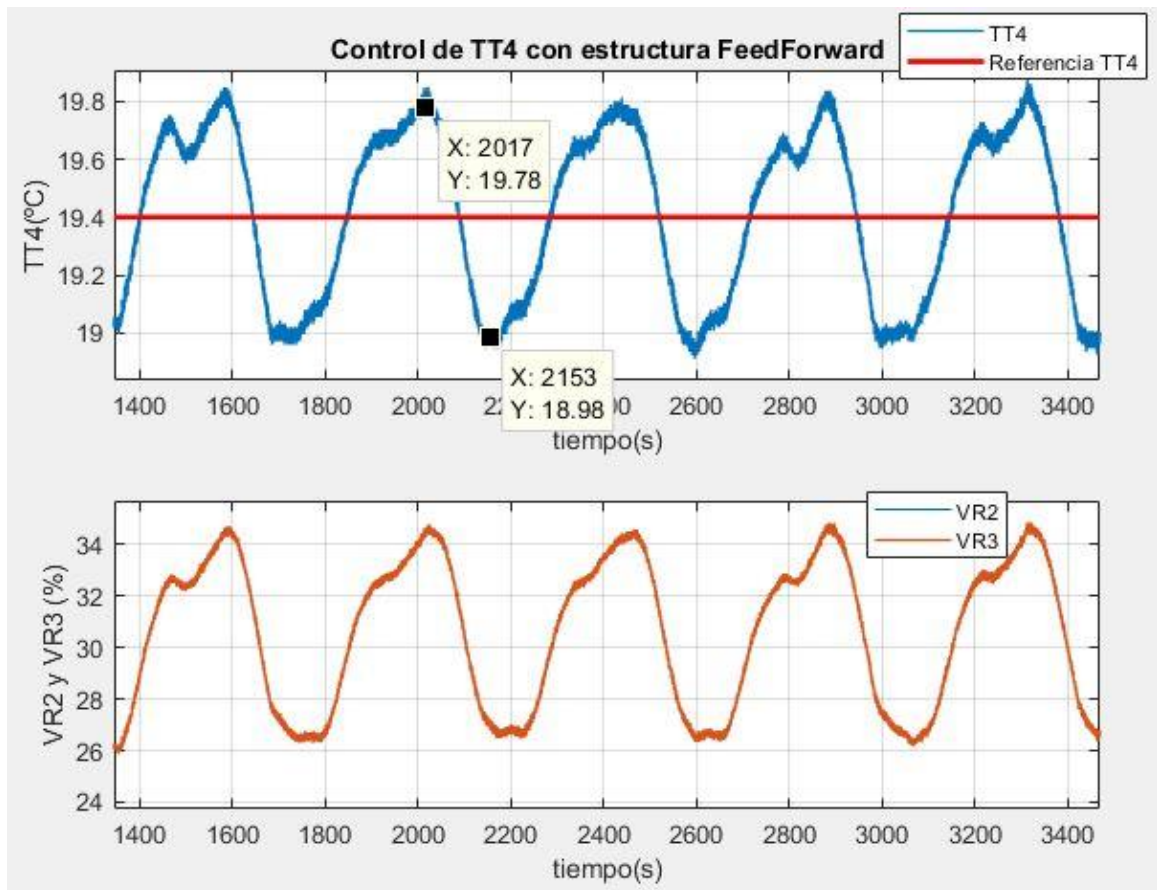


Figura 3.9 – Control de TT4 con estructura FeedForward y caudal elevado.

Comparando las figuras 3.6 y 3.9, se puede apreciar que, en el caso último, la amplitud de las oscilaciones es de 0.8°C , mientras que en el caso en el que no está implementado el control anticipativo, estas oscilaciones son de 1°C .

3.3. Modelo térmico.

Una vez se encuentra funcionando correctamente el lazo auxiliar de control, ya se puede acometer la identificación del modelo dinámico del caso de estudio.

El punto de operación elegido para el DC de las resistencias es, como ya se ha explicado, del 55%, pues es un valor intermedio dentro del rango del salto de temperatura. Si se aplica un escalón del 55% al 70%, el sistema responde de la siguiente forma:

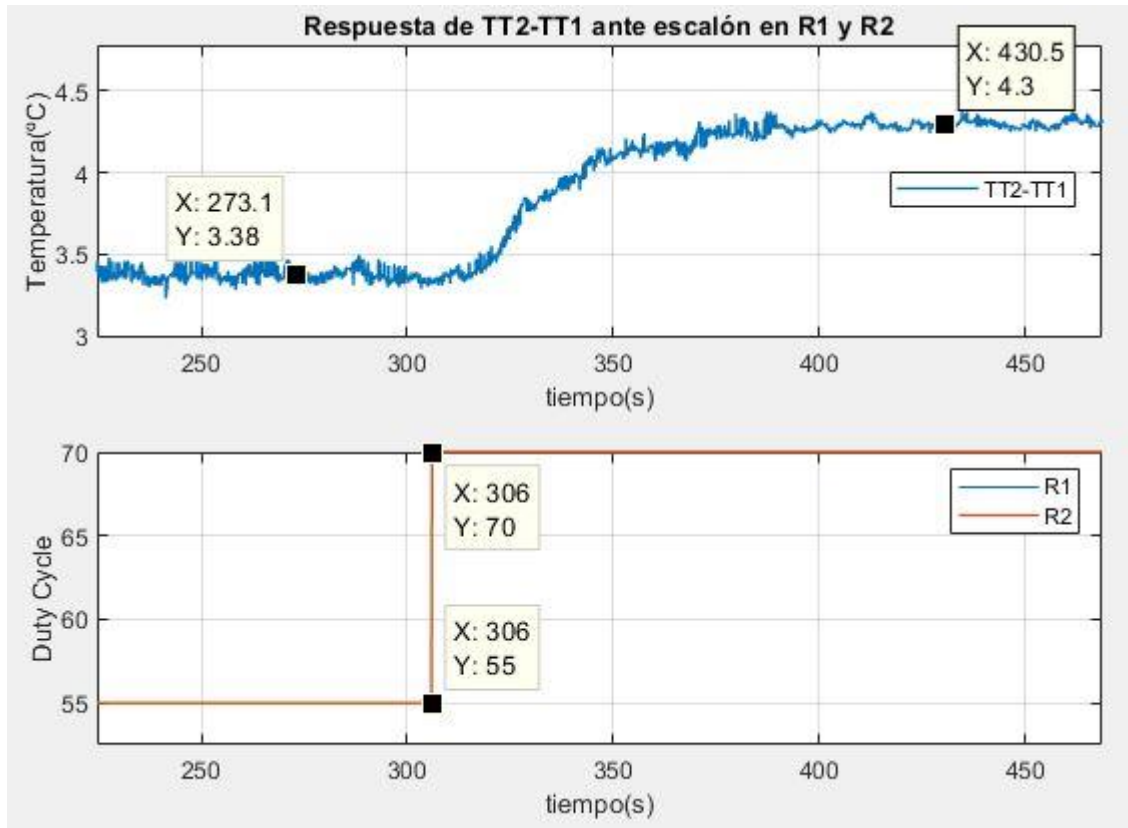


Figura 3.10 – Respuesta de TT2-TT1 ante escalón en R1 y R2 con caudal elevado.

Como se puede observar en la figura 3.10, las oscilaciones mencionadas no son perceptibles en el incremento de temperatura. Como consecuencia, damos por válido el control de TT4.

A partir del ensayo mostrado, se puede identificar un modelo de primer orden con retraso para el salto térmico.

Se ha calculado un modelo con la siguiente función de transferencia:

$$G_{TT2-TT1}(s) = \frac{0.0633}{25 * s + 1} e^{-8.5*s}.$$

Aplicando el mismo escalón a la entrada de este modelo, se obtiene la siguiente respuesta:

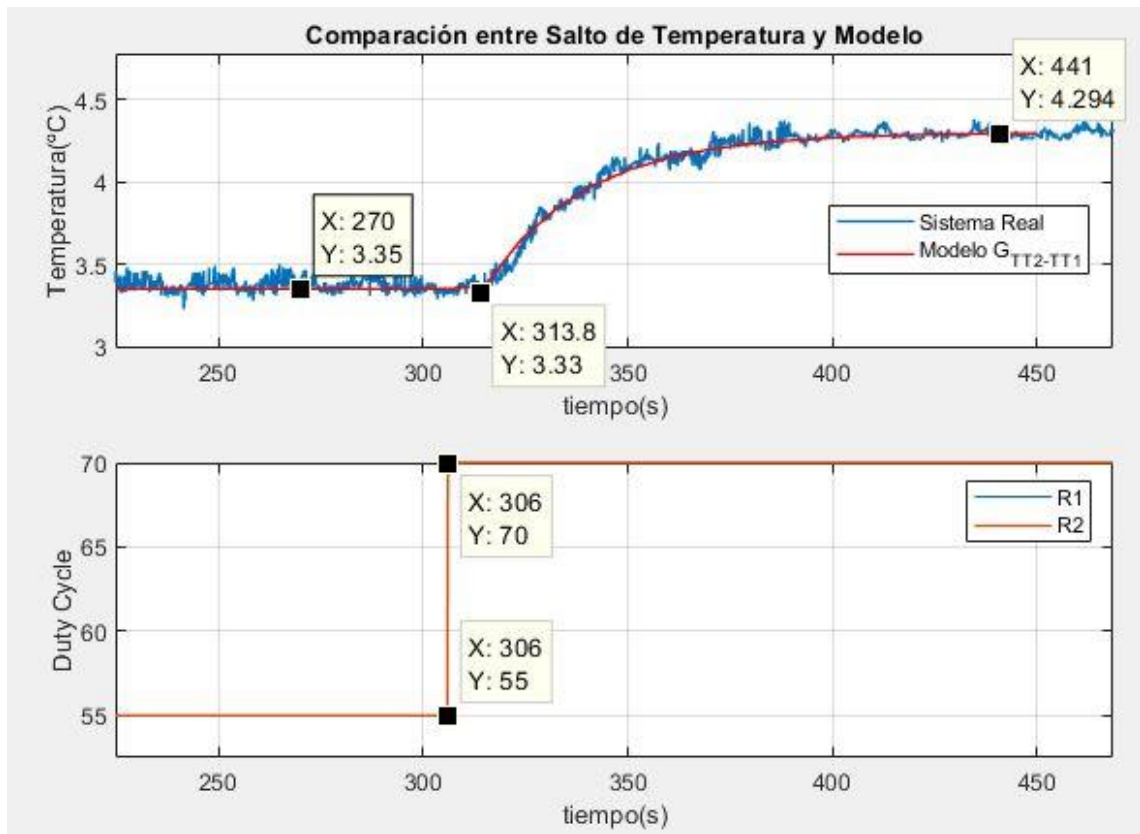


Figura 3.11 – Modelo de primer orden con retraso $TT2-TT1$ frente a escalón en DC de R1 y R2 y caudal elevado.

Como se puede comprobar en la figura 3.11, el modelo calculado para el salto térmico frente a cambios en el DC de R1/R2 tiene un comportamiento similar al que tiene la salida real.

3.4. Modelo de nivel.

Además de un modelo para $TT2-TT1$, también se ha obtenido un modelo del nivel LT ante cambios en VR1. Para la identificación del modelo, se ha introducido un escalón en VR1 del 5% desde el punto de operación, que como se había mencionado, es el 65% de apertura. Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente figura:

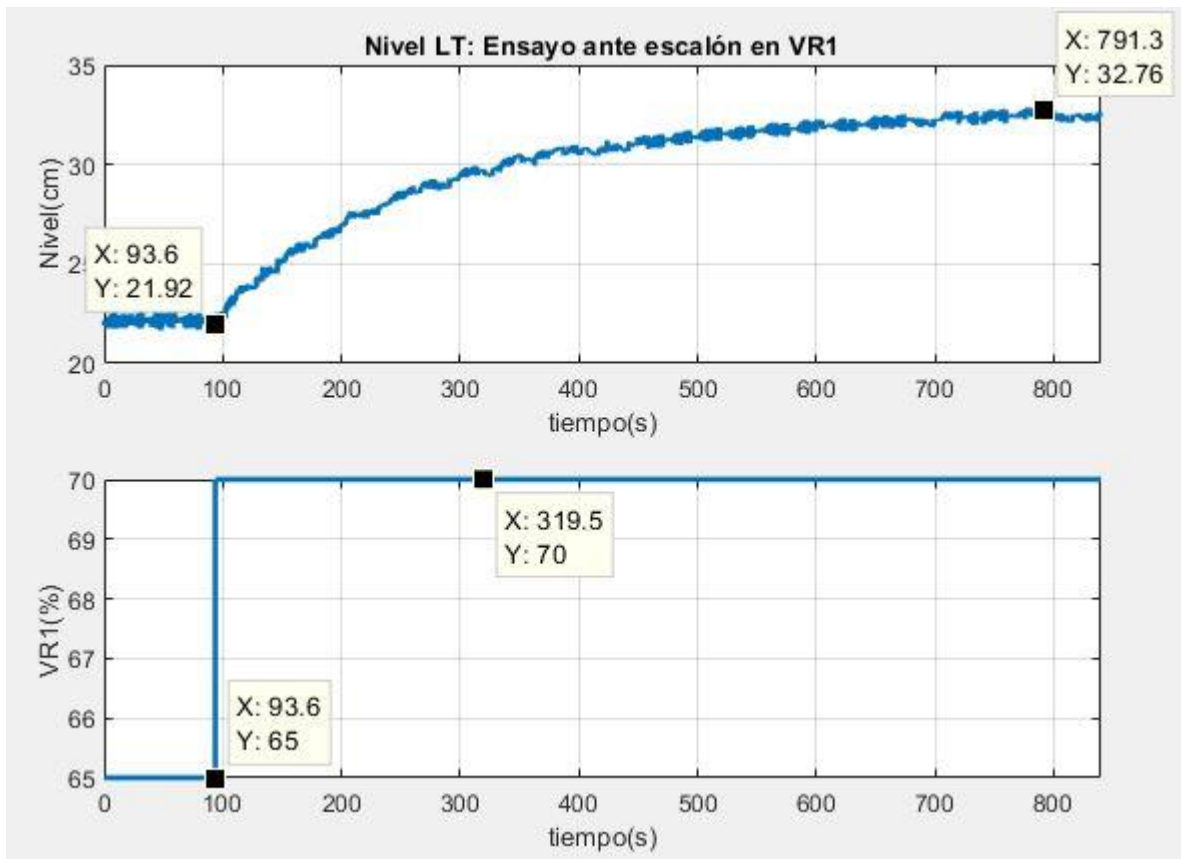


Figura 3.12 – Nivel LT ante escalón en válvula VR1.

Con el comportamiento observado en la figura 3.12, podemos concluir que se trata de una respuesta propia de un sistema de primer orden. Por ello, la función de transferencia que se ha calculado tiene la siguiente ecuación:

$$G_{LT65}(s) = \frac{2.06}{163.1 * s + 1}$$

A diferencia de la temperatura, el nivel no presenta retardo cuando se modifica VR1, por lo que el modelo es más sencillo.

Si se aplica la entrada de la figura 3.9 al modelo calculado, y se compara el resultado obtenido con el nivel, se obtienen los siguientes resultados:

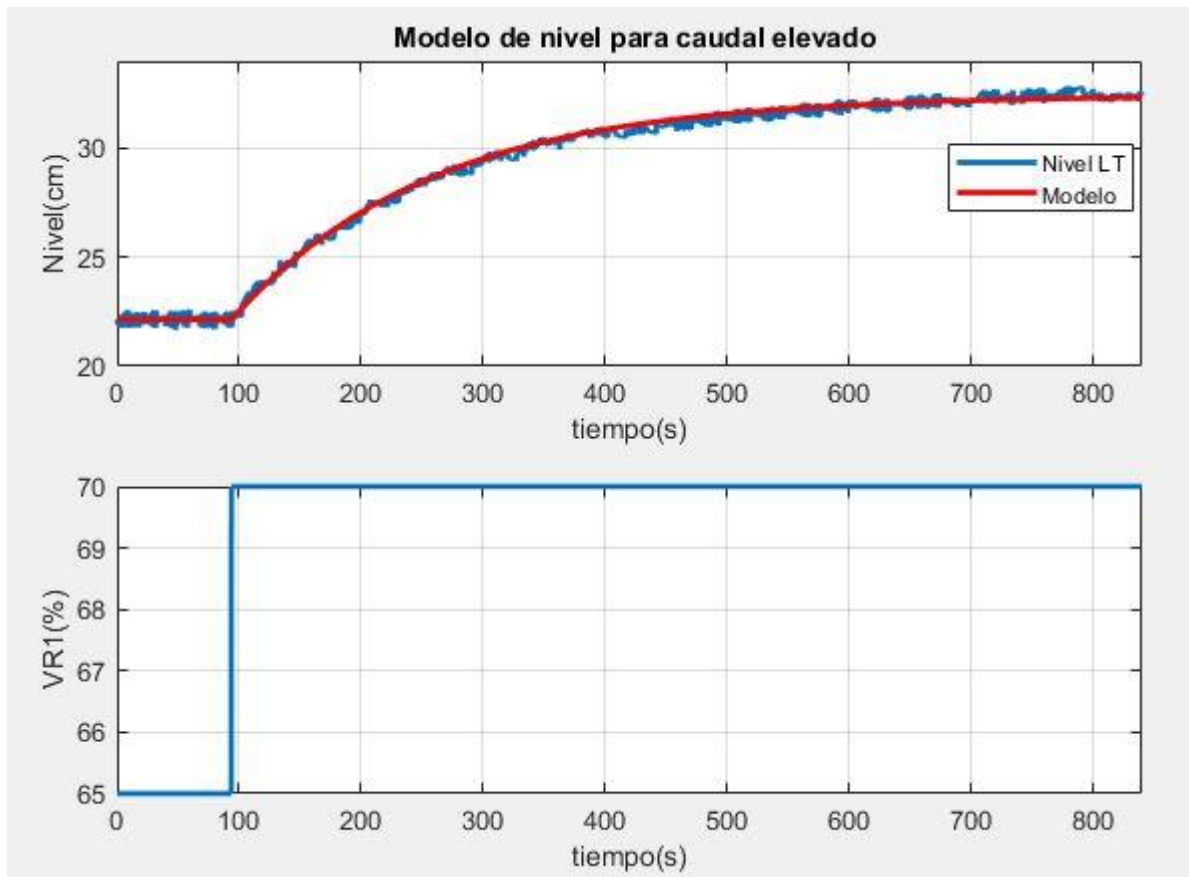


Figura 3.13 – Modelo de nivel LT ante escalón en VR1 con caudal elevado.

Tal y como se muestra en la figura 3.13, el modelo presenta una respuesta ante escalón muy similar a la del sistema real, por lo que también lo consideraremos adecuado.

3.5. Control de salto de temperatura.

A partir del modelo mostrado en la figura 4.8, se ha diseñado un controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID) ajustado mediante PID Tunner, el cual tiene la siguiente estructura:

$$C_{TT2-TT1}(s) = 18.63 * \left(1 + \frac{1}{\frac{24.75}{s}} + 0.081 * s \right).$$

Debido a que es un controlador PID, el término derivativo añadirá términos muy elevados y que no deseamos. Esta señal de control podría haberse filtrado mediante el filtro de referencias, pero en este caso no se ha utilizado, fijando tanto b como c igual a 1.

La respuesta del sistema controlado puede observarse a continuación:

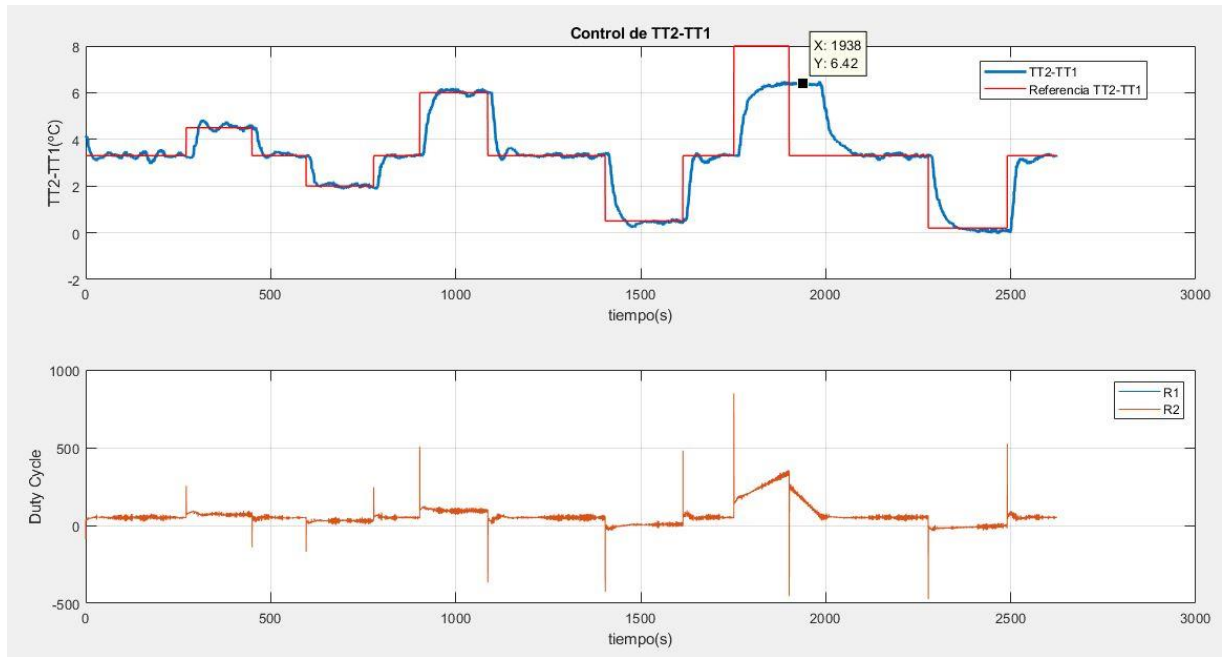


Figura 3.14 – Control de TT2-TT1 con caudal elevado.

Como se puede comprobar en la figura 3.14, la salida sigue a la referencia correctamente. Como se ha indicado, el término derivativo ha introducido valores no deseados en la señal de control calculada por el PI (DC de R1 y R2), pero en realidad el DC de las resistencias se encuentra saturado entre 0 y 100, por lo que la señal de control se envía al sistema ya saturada.

Con el fin de comprobar cuál es el incremento máximo de temperatura que se puede obtener con este caudal, es de decir, de unos 720 litros/hora, y VR1 al 65% de apertura, se ha introducido una referencia de 8°C, la cual es no alcanzable.

Vemos que el máximo salto de temperatura es de 6.42°C, y que, como se espera, se produce WindUp debido a que el controlador implementado no posee anti-WindUp.

3.6. Control de nivel.

Basado en el modelo calculado en 4.3., se ha diseñado un controlador para el nivel LT mediante la válvula VR1 con caudal elevado. Dicho controlador ha sido calculado mediante cancelación de dinámica, de forma que se ha especificado un tiempo de subida en bucle cerrado de unos 70 segundos.

Para el diseño de éste, se ha hecho uso de la siguiente expresión:

$$C(s) = \frac{K_c}{s} * \frac{1}{G(s)}$$

,tomando K_c aproximadamente igual a 3 dividido entre el tiempo de subida en bucle cerrado especificado, y siendo $1/G(s)$ la inversa del modelo calculado.

Teniendo esto en cuenta, la ecuación del controlador para el nivel LT mediante VR1 tiene la siguiente expresión:

$$C_{LT65}(s) = 3.39 * \left(1 + \frac{1}{s} \frac{142.71}{s} \right)$$

Como se puede comprobar en la ecuación anterior, al tratarse de un modelo de primer orden sin retraso, y al haber utilizado como método de diseño la cancelación de dinámica, se obtiene un controlador de tipo Proporcional-Integral, que en forma ideal tiene una ganancia K_p de 3.39, y un tiempo integral de 142.71 segundos.

Tras implementar este controlador en el sistema real, se obtienen los resultados mostrados en la siguiente figura:

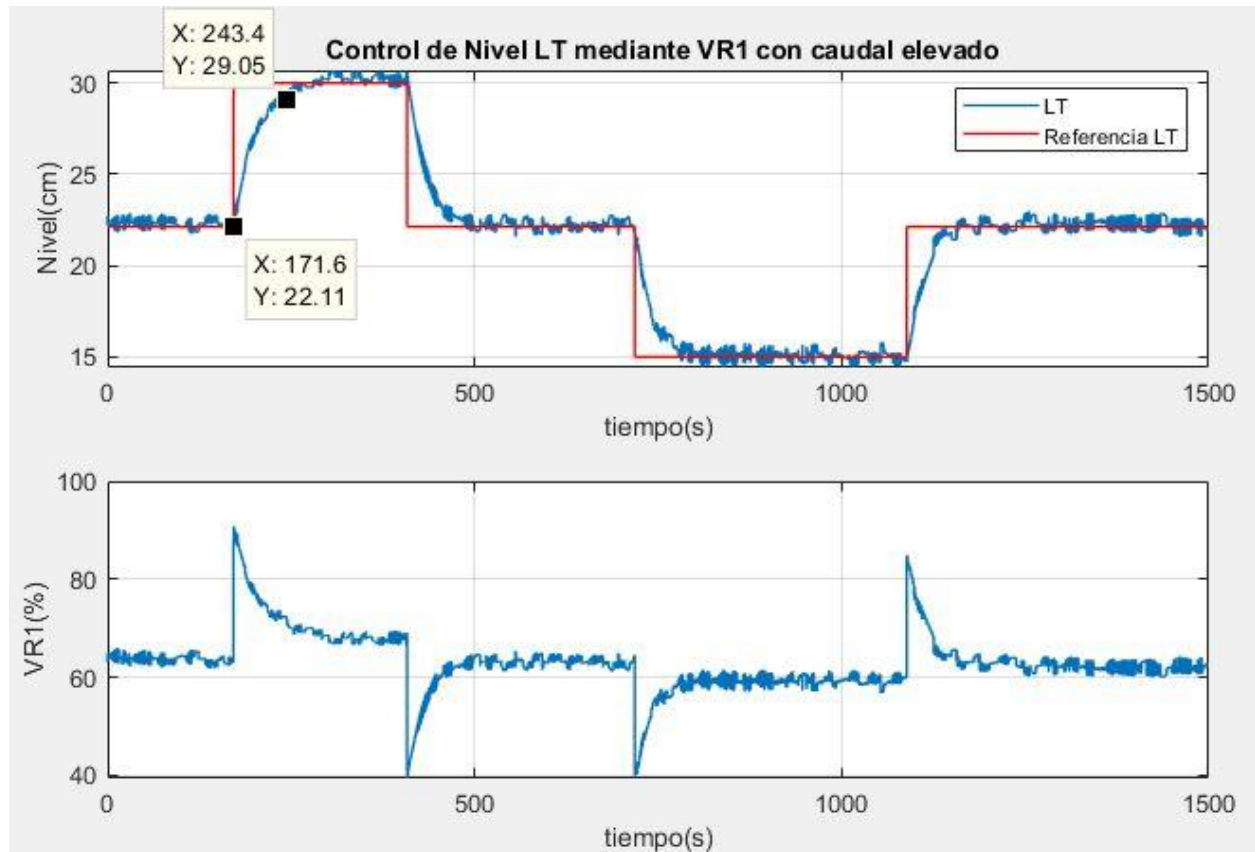


Figura 3.15 – Control de nivel LT mediante válvula VR1 con caudal elevado.

Tras la realización de un ensayo con escalones tanto positivos como negativos en la referencia de nivel, se comprueba que la salida del sistema sigue a la referencia de forma suave, sin sobreoscilación, y en el tiempo de subida especificado. Además, no presenta error de régimen permanente, ya que el controlador posee término integral. Por lo tanto, se puede considerar que el controlador es adecuado.

4 SEGUNDO PUNTO DE OPERACIÓN: CAUDAL REDUCIDO

El quinto capítulo se basa en el análisis y el diseño de los controladores para el caso del punto de operación con caudal reducido. Debido a que un caudal menor hace que el control sea más rápido en general, y exista mayor acoplamiento entre ambos problemas de control, se ha optado por elegir como punto de operación definitivo $VR1=30\%$.

En este caso, el punto de operación del DC de R1 y R2 se mantiene en el 55%, siendo el punto de equilibrio de $TT2-TT1$ igual a 6.42°C .

Además, se ha modificado la posición de VA1 a 1.95, de forma que el nivel del depósito en el equilibrio será unos 24.5cm.

4.1. Lazo auxiliar de control.

Al cambiar el punto de operación, cambia la dinámica de la temperatura de $TT4$, por lo que habrá que comprobar si el controlador diseñado mantiene un comportamiento aceptable.

En la figura 5.1 se muestra la respuesta poniendo de manifiesto que presenta un desempeño peor, pero adecuado a los requerimientos:

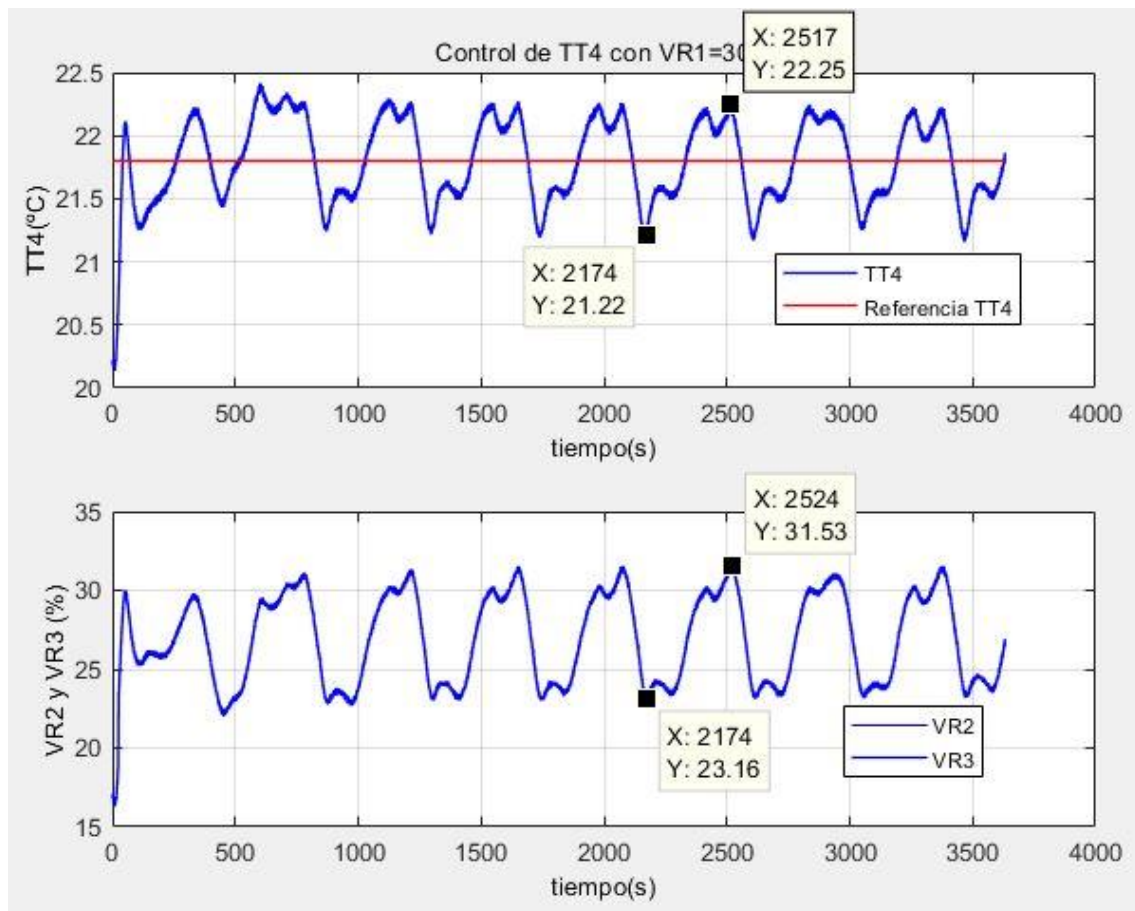


Figura 4.1 – Control de la $TT4$ con estructura FeedForward y caudal reducido.

Se ha mantenido la misma estructura de control anticipativo o FeedForward, pues la función de transferencia de perturbación $G_d(s)$ sigue siendo la misma, sólo cambia la función de transferencia $G_{TT4}(s)$, y como

consecuencia, $G_{FF}(s)$.

Si bien es interesante mantener la temperatura TT4 (en valor medio) similar a la temperatura TT1 al inicio de los experimentos, debemos comprobar qué ocurre con el valor de TT1:

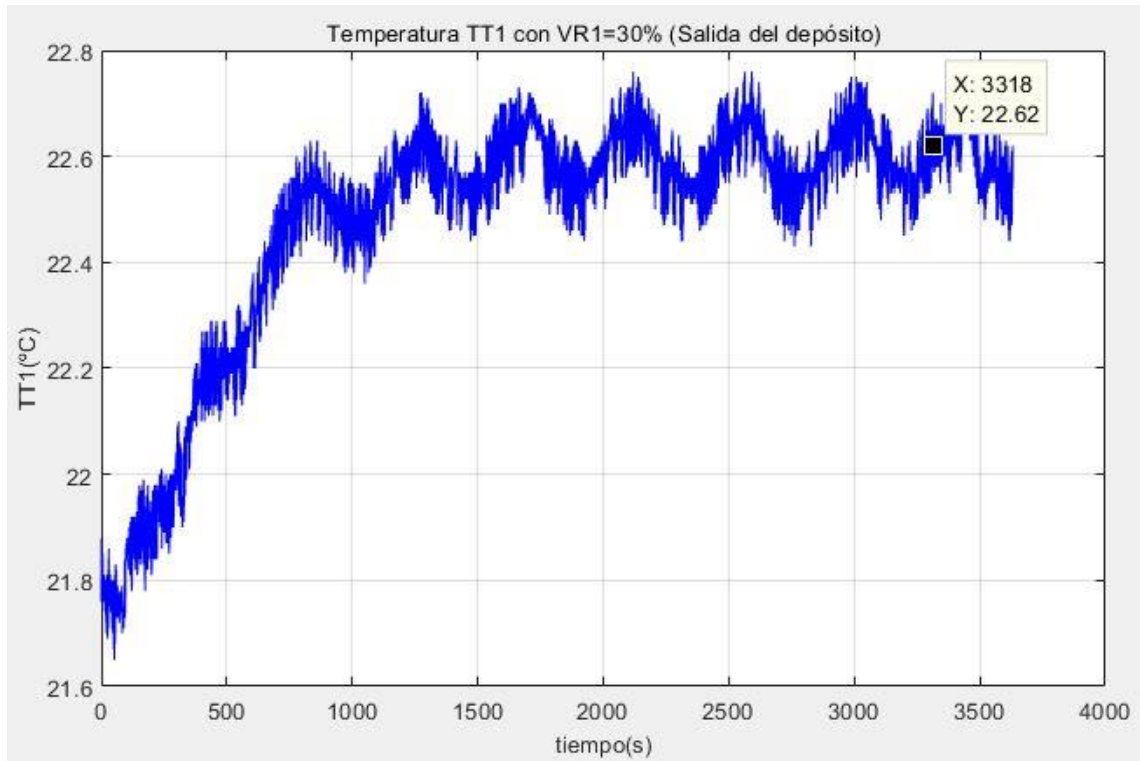


Figura 4.2 – Temperatura TT1 con control FeedForward en TT4 y caudal reducido.

En la figura 4.2, al inicio del experimento, la temperatura TT1 tenía un valor de 21.8°C aproximadamente. Este valor fue el que se eligió como referencia para el control de TT4.

Aunque el controlador de TT4 se comporta de forma aceptable y mantiene en valor en torno a 21.8°C, la temperatura TT1 se va a un valor medio en régimen permanente de unos 22.6°C, lo cual nos indica que hay cierta discrepancia entre la medida del sensor TT1 y la medida del sensor TT4.

Una solución es calibrar los sensores, o bien, conociendo que este error es fijo (suponiendo que el valor medio de TT4 controlada en régimen permanente es aproximadamente el valor de la referencia de TT4), se puede calcular como:

$$Error = \overline{TT1}_{Rég. Permanente} - \overline{TT4}_{Rég. Permanente} = \overline{TT1}_{Rég. Permanente} - Ref_{TT4}$$

, siendo:

$\overline{TT1}_{Rég. Permanente}$: Valor medio de TT1 en régimen permanente.

$\overline{TT4}_{Rég. Permanente}$: Valor medio de TT4 en régimen permanente.

Ref_{TT4} : Referencia de TT4.

Se puede deducir entonces de las Figuras 5.1 y 5.2 que:

$$Error = 22.6^{\circ}C - 21.8^{\circ}C = 0.8^{\circ}C.$$

Entonces, la nueva referencia corregida se puede calcular como:

$$Ref'_{TT4} = Ref_{TT4} - Error = Ref_{TT4} - 0.8^{\circ}C.$$

, siendo:

Ref'_{TT4} : Referencia corregida de TT4.

De este modo, si se introduce la referencia corregida, se compensará el error de 0.8°C que tenía TT1 en valor medio cuando se encuentra en régimen permanente sobre el valor medio de TT4 en régimen permanente.

4.2. Modelo térmico.

Puesto que el lazo auxiliar de control funciona correctamente, se puede identificar un modelo térmico para TT2-TT1 mediante un ensayo ante escalón en el DC de R1/R2, tal y como muestra la siguiente figura:

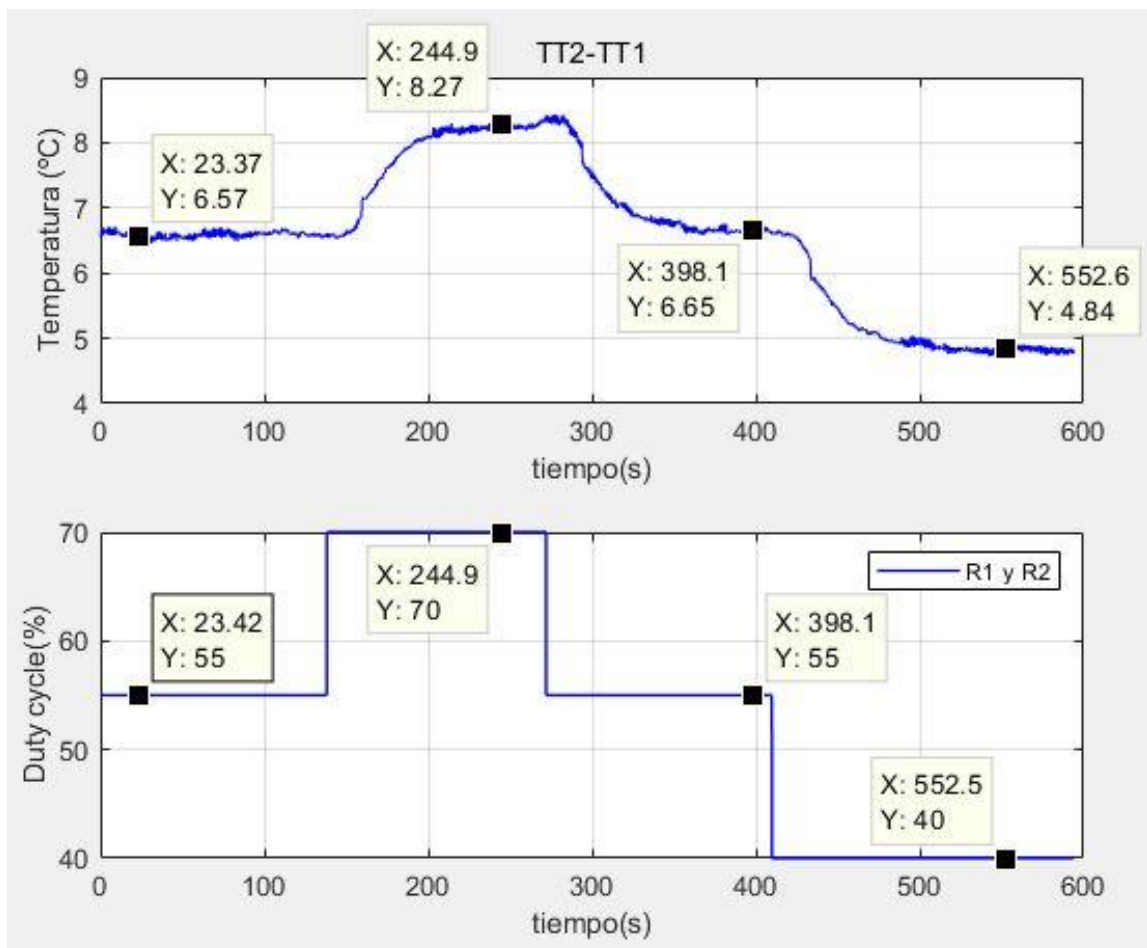


Figura 4.3 – Respuesta de TT2-TT1 ante escalones en R1 y R2 con caudal reducido.

Hay que destacar que en la respuesta de la planta vista en la figura 4.3, no se aprecian oscilaciones provocadas por la planta de frío, por lo que el control de TT4 se puede seguir considerando adecuado.

A partir del ensayo de la figura anterior, se puede identificar un modelo de primer orden con retraso. Debido a que se ha aplicado un escalón positivo y otro negativo, se puede buscar una función de transferencia que tenga un comportamiento intermedio entre ambas respuestas.

El modelo identificado tiene la siguiente función de transferencia:

$$G_{22}(s) = \frac{0.115}{28.25 * s + 1} * e^{-11.55*s}.$$

Si se aplica la misma entrada a esta función de transferencia, y comparamos el resultado con la salida obtenida anteriormente, se tiene:

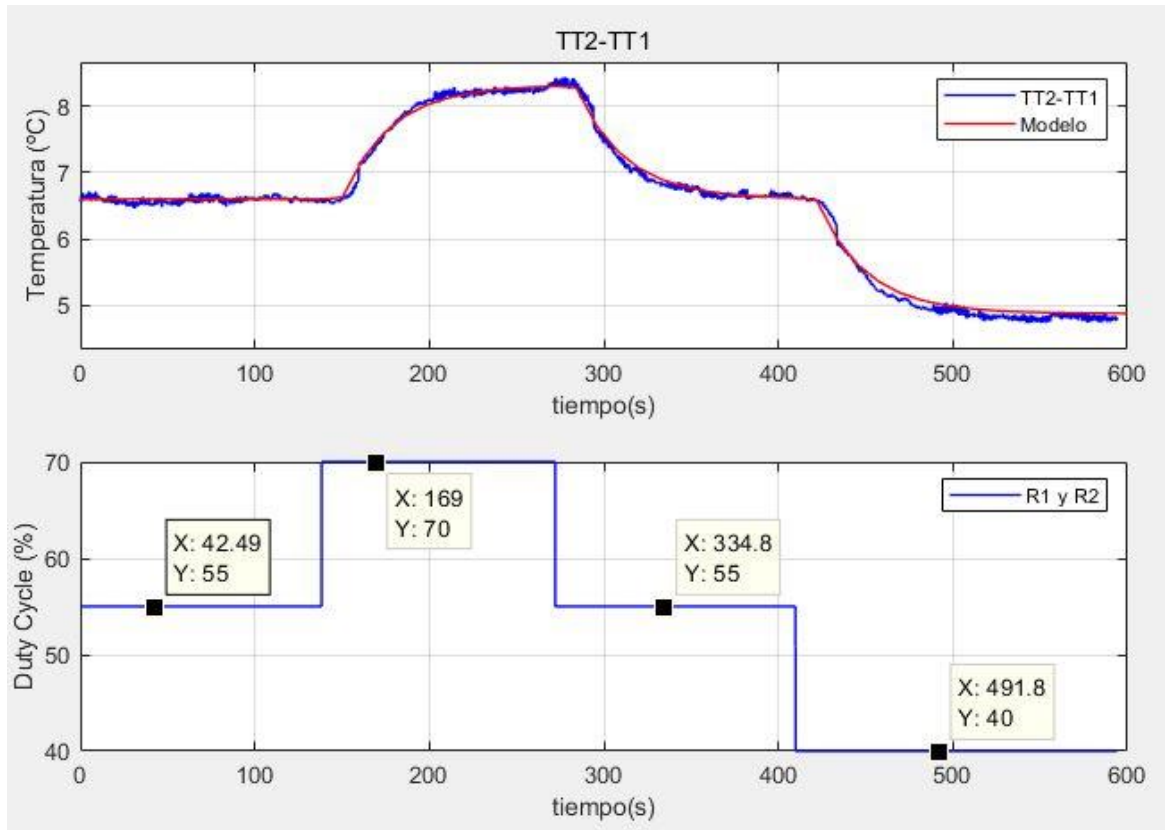


Figura 4.4 – Modelo de salto de temperatura de TT2-TT1 ante escalón en R1 y R2 con caudal reducido.

Se comprueba entonces en la figura 4.4 que el modelo tiene un comportamiento similar ante una entrada en escalón que el salto de temperatura real. Además, se considera aceptable el modelo tanto para un escalón positivo como para uno negativo.

4.3. Modelo térmico ante escalón en VR1.

Será necesario identificar un modelo que caracterice el comportamiento que tiene el incremento de temperatura ante cambios en la válvula VR1. Con este fin, se ha realizado un ensayo con escalones positivo y negativo al porcentaje de apertura de VR1, como se muestra en la siguiente figura:

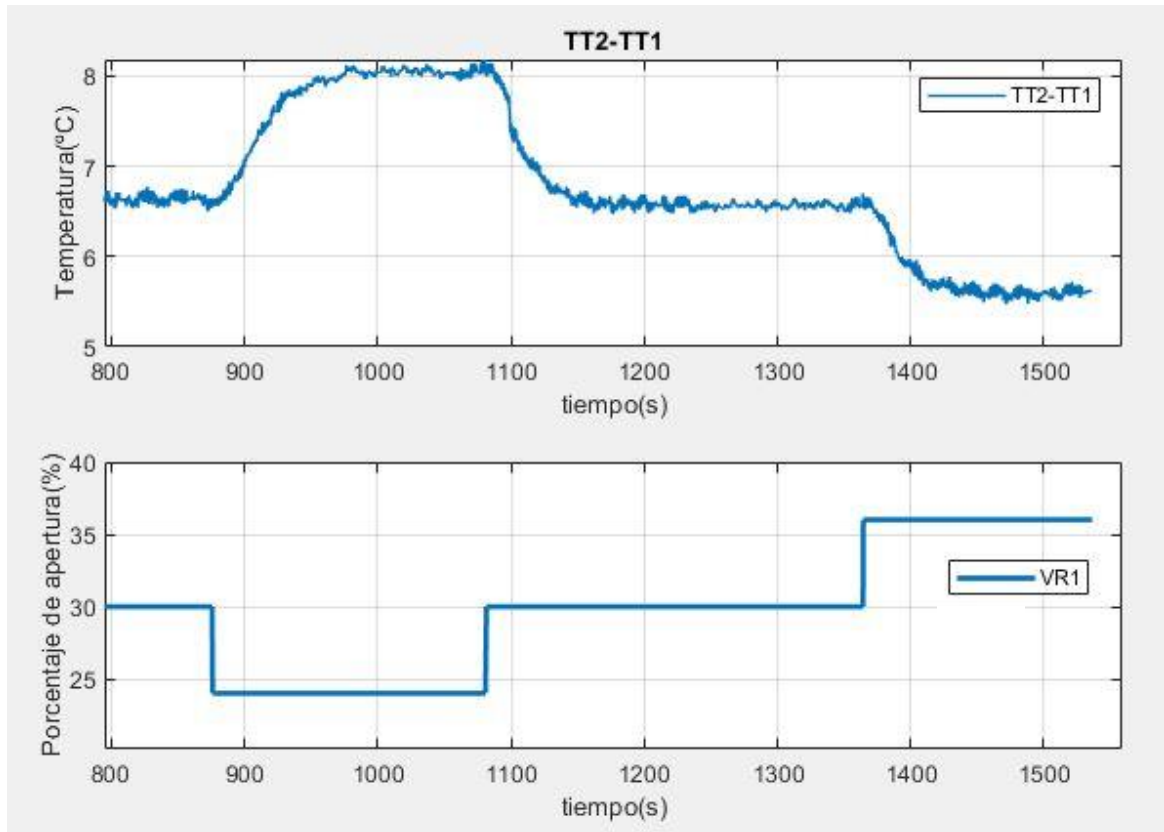


Figura 4.5 – Respuesta del Salto de Temperatura ante escalones en VR1.

En este caso, es especialmente interesante obtener un modelo que sea la media entre ambas respuestas (escalón positivo y negativo), pues se comporta de forma distinta para cada entrada debido a que cambia el caudal, y, por lo tanto, la cantidad de agua que circula por la planta.

Se ha estimado un modelo de primer orden con retardo, con la siguiente función de transferencia:

$$G_{21}(s) = -\frac{0.20165}{30.6 * s + 1} * e^{-7.85*s}.$$

Si se aplican los mismos escalones a esta función de transferencia, y se compara con la salida real del sistema, se puede observar lo siguiente:

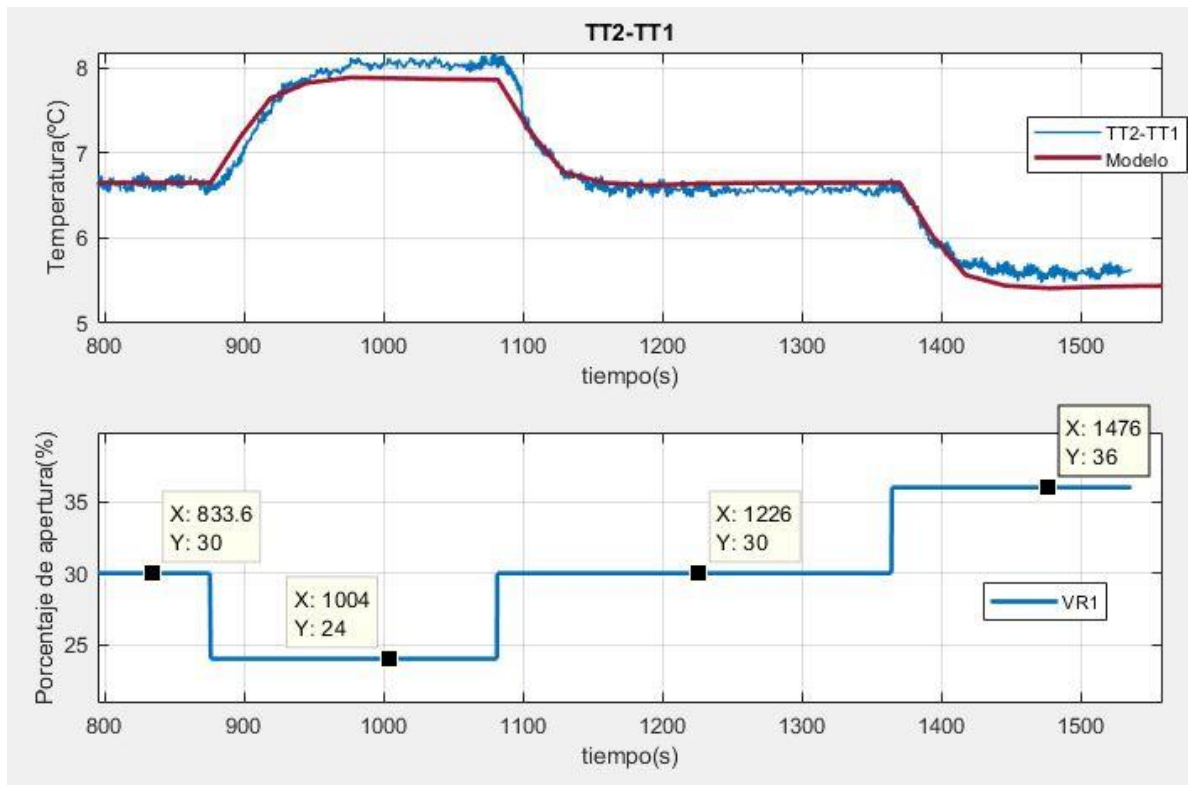


Figura 4.6 – Respuesta del modelo G21(s) ante escalones a la entrada.

En la figura 4.6, al ser un modelo promedio entre el escalón positivo y el negativo, éste no se ajusta perfectamente a ninguno de los dos comportamientos, pero se ha considerado que el modelo es aceptable e intermedio.

4.4. Modelo de nivel.

Se quiere obtener un modelo de nivel ante cambios en VR1 con el nuevo punto de funcionamiento. Aplicando una entrada en escalón a la válvula VR1, la respuesta del nivel LT es la siguiente:

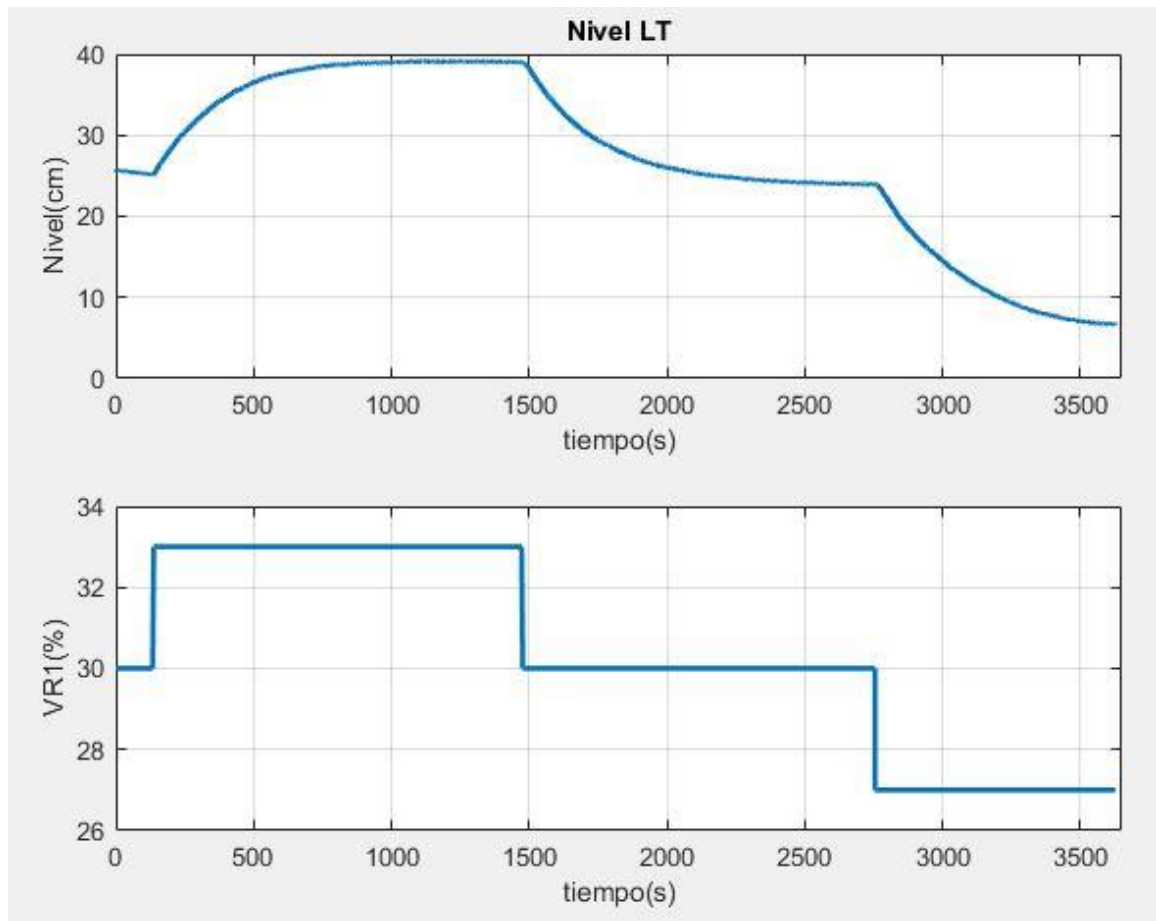


Figura 4.7 – Nivel LT ante ensayo en escalón en válvula VR1.

Con los resultados obtenidos, mostrados en la figura 4.7, la respuesta ante escalón del nivel se puede estimar como un modelo de primer orden. Se puede apreciar que el nivel se mueve en prácticamente todo el rango disponible habiéndose modificado VR1 relativamente poco.

La función de transferencia calculada es la siguiente:

$$G_{11}(s) = \frac{5.515}{250 * s + 1}.$$

Se debe destacar que esta función de transferencia es la media entre el comportamiento producido por el escalón positivo y el escalón negativo.

Si se aplica la misma entrada a este modelo, y se compara el resultado con la salida real del sistema, se observa lo siguiente:

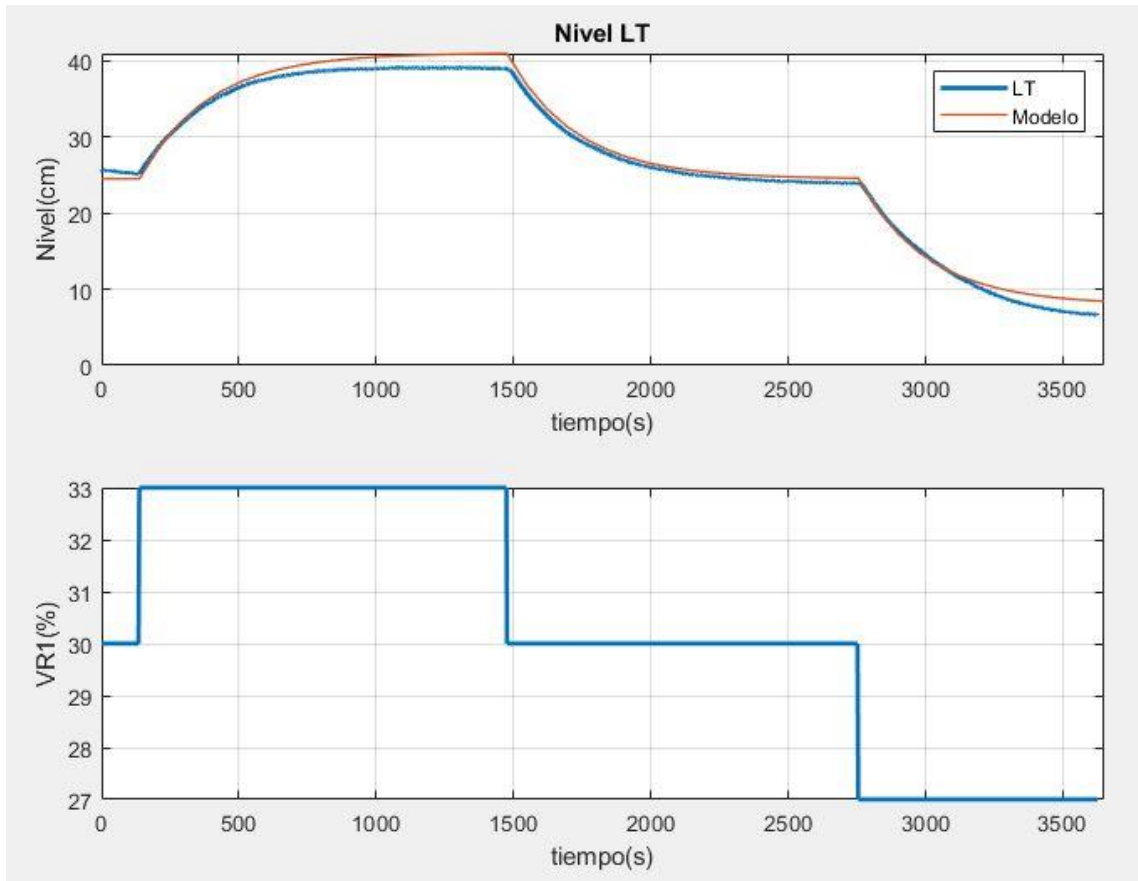


Figura 4.8 – Modelo de primer orden de nivel ante escalón en VR1.

En la Figura 4.8 se puede comprobar cómo se comporta el modelo. Si bien su respuesta no es tan similar a ninguna de las dos respuestas del sistema (escalón positivo y escalón negativo), es lo suficientemente parecida a ambas como para ser considerado un modelo aceptable.

4.5. Control de salto de temperatura.

Tras identificar un modelo del comportamiento del salto de temperatura, se ha diseñado un controlador PI ajustado mediante PID Tunner, con la siguiente función de transferencia:

$$C_2(s) = 9.35 * \left(1 + \frac{1}{\frac{28.385}{s}} \right).$$

El comportamiento del salto de temperatura con el controlador diseñado es el siguiente:

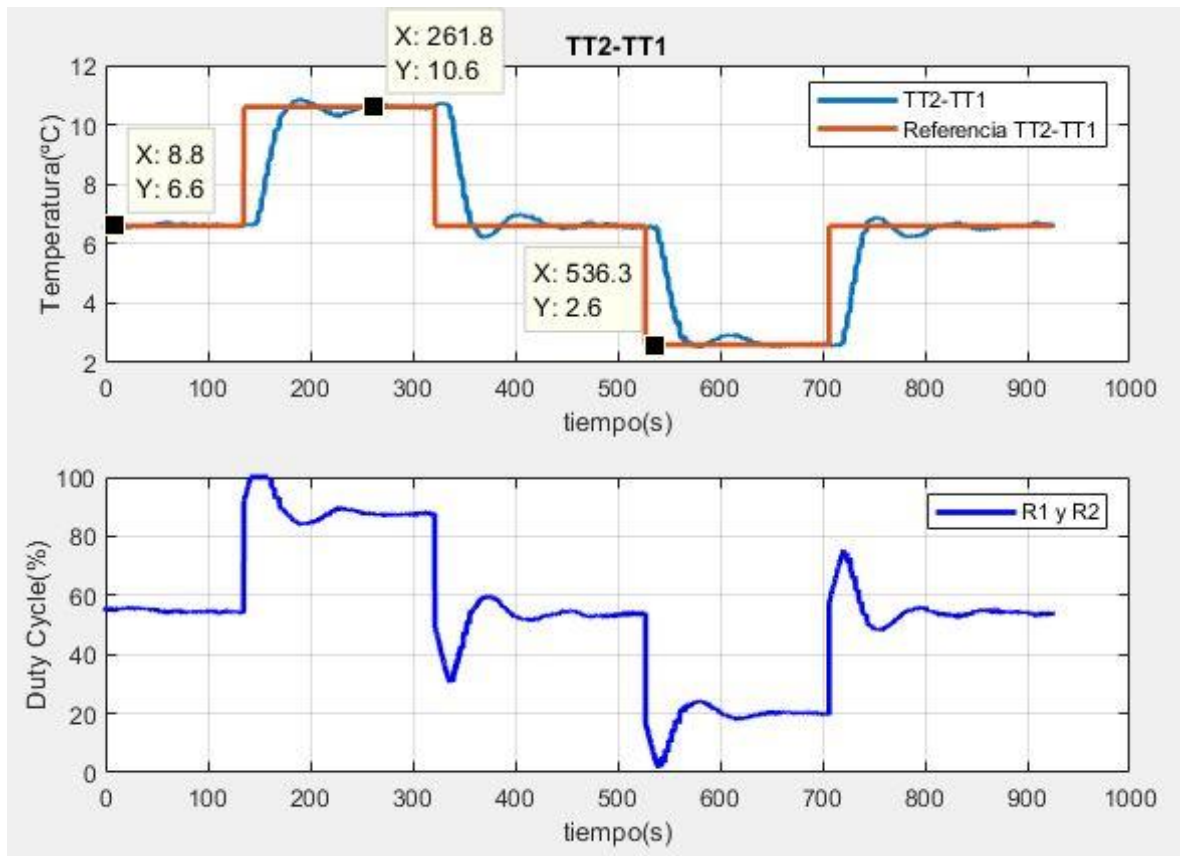


Figura 4.9 – Control del salto de temperatura mediante R1 y R2 con caudal reducido.

Tras implementar el controlador en la planta, se observa que el comportamiento obtenido (Figura 5.9) es suave, con cierta sobreoscilación, y sigue satisfactoriamente a la referencia. En cuanto a la señal de control, se puede considerar que no es demasiado brusca.

4.6. Control de nivel.

A continuación, se ha diseñado un controlador de tipo PI ajustado mediante PID Tunner, basado en dicho modelo. Tal controlador presenta la siguiente función de transferencia:

$$C_1(s) = 1.6 * \left(1 + \frac{1}{150s} \right).$$

Implementando este controlador en el sistema real, se obtienen los siguientes resultados:

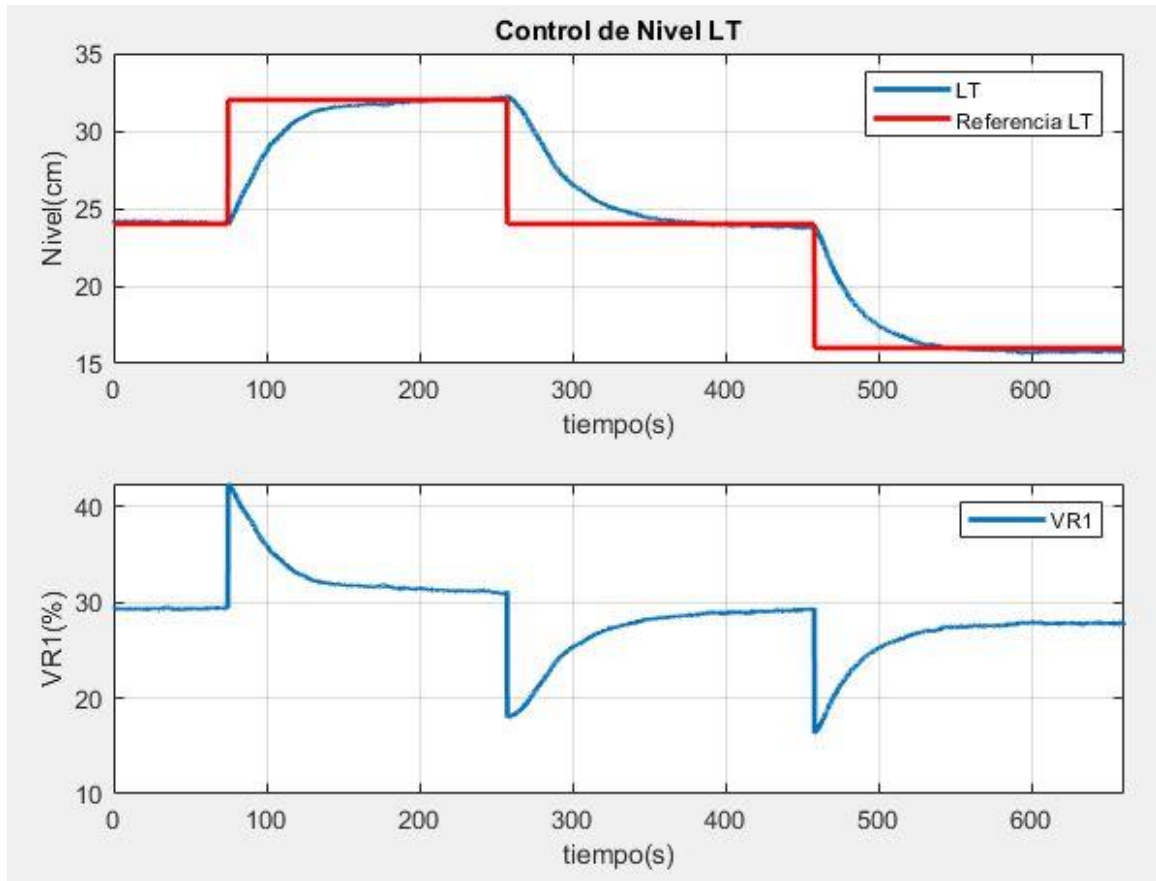


Figura 4.10 – Control de nivel LT mediante válvula VR1 con caudal reducido.

En la figura 4.10, se puede comprobar que el nivel sigue a la referencia de forma adecuada, ya que es un control suave, lo suficientemente rápido y sin error de régimen permanente, debido a la acción del término integral.

5 CONTROL DESCENTRALIZADO: CONTROL DE NIVEL Y SALTO TÉRMICO SIMULTÁNEAMENTE

Hasta ahora se ha realizado un control de nivel y un control del salto de temperatura de forma independiente, manteniendo el resto del sistema en el punto de funcionamiento.

Tal y como se comentó en el apartado 2.2., un cambio en el DC de las resistencias R1 y R2 (Entrada 2) no producirá cambios apreciables en el nivel del agua (Salida 1) al ser la densidad del agua prácticamente constante ante tales cambios en la temperatura de la misma. Por lo tanto, la función de transferencia $G_{12}(s)$ puede considerarse nula.

Esto implica que sólo exista una opción para emparejar las variables al tratarse de un sistema triangular. Dicha opción consiste en controlar el nivel LT (Salida 1) mediante VR1 (Entrada 1) y el salto de temperatura (Salida 2) mediante el DC de las resistencias (Entrada 2).

Como mostraba la figura 4.5, un cambio en la válvula VR1 produce cambios en el salto de temperatura al modificarse el caudal que circula por la planta. A efectos prácticos, los cambios que se producen en VR1 para el control de nivel pueden verse como perturbaciones en el control del incremento de temperatura.

Para comprobar el correcto funcionamiento de la planta, se ha programada un ensayo de control en el que se pueda visualizar el efecto de cada entrada en cada salida.

Dicho ensayo es el siguiente:

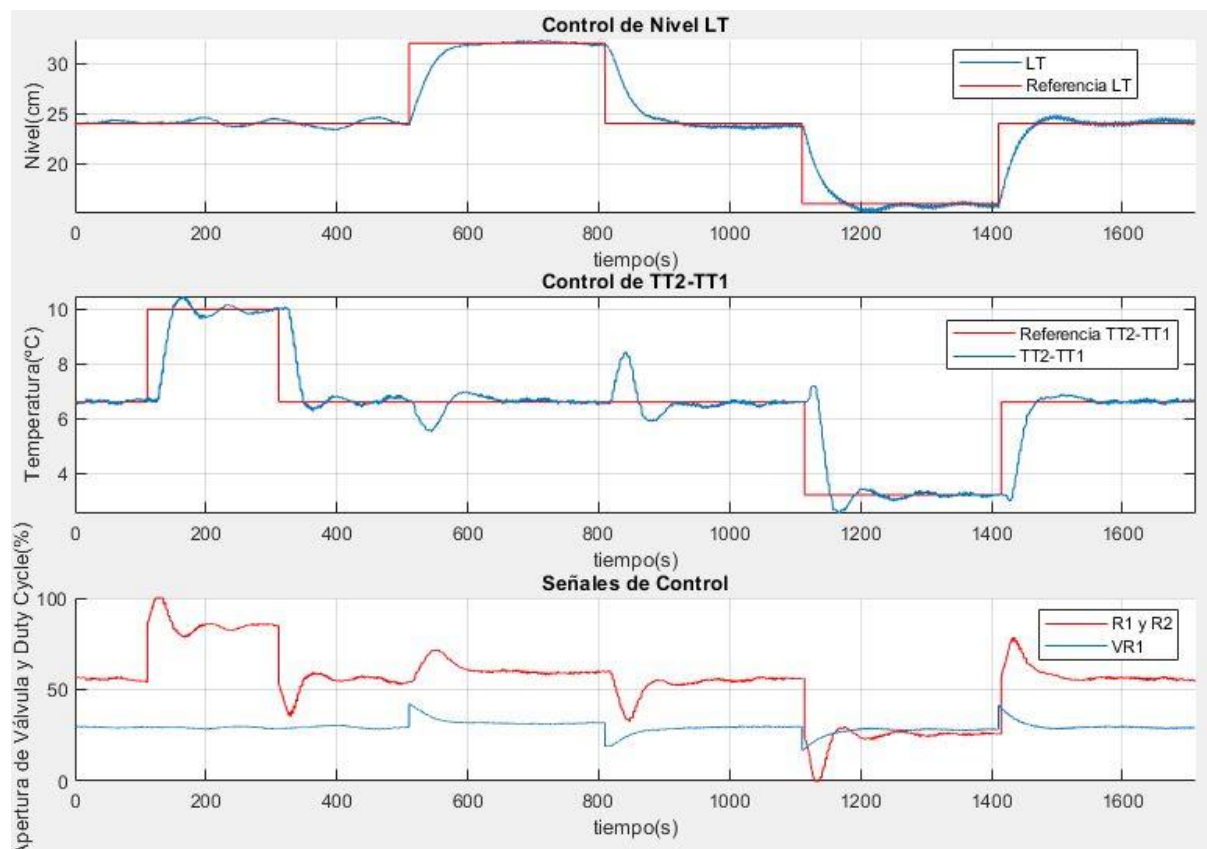


Figura 5.1 – Ensayo de control multivariable descentralizado.

Analizando los resultados del experimento de la figura 5.1, se puede comprobar que, tal y como se ha visto en los modelos calculados, el control de temperatura no afecta al control de nivel, mientras que el control de nivel sí que afecta al control de temperatura, pues cambia el caudal que circula por la planta. Esto corrobora que se

trata de un sistema triangular.

Por otro lado, puede observarse que las salidas siempre siguen a las referencias, y que el control de salto de temperatura es adecuado incluso cuando hay modificaciones en VR1 debido al control de nivel, ya que supone perturbaciones en el incremento de temperatura.

6 IMPLEMENTACIÓN EN LABVIEW: CONTROL SIMULADO

Tras haber obtenido modelos lineales de la planta y haber realizado las pruebas de control oportunas sobre el sistema real mediante Matlab Simulink, se procederá a implementar dichos modelos en el software LabView.

De este modo, se pretende crear un simulador para identificación y control con una interfaz sencilla, cuyo objetivo será que los alumnos puedan conocer a grandes rasgos cómo se comportará la planta y realizar el control sobre los modelos de forma previa a los ensayos sobre la planta real.

Ya que se trata de un simulador, tendrá la ventaja de que los ensayos se podrán realizar de una forma mucho más rápida que en la planta real, pues en ésta requieren, en general, un tiempo considerable.

6.1. Introducción a LabView.

Como sabemos, LabView es un software muy útil desde el punto de vista de control debido a que permite interactuar y comunicarnos con los sistemas de forma gráfica e intuitiva, además de darnos la posibilidad de programar ensayos e implementar controladores, observando los resultados en tiempo real si así se desea.

Al ejecutar LabView, podemos observar que presenta dos pantallas básicas:

- Block Diagram: Será donde se programe el código de los modelos y los controladores a bajo nivel, desde el punto de vista del desarrollador. Esta pantalla no será accesible para el usuario final. Presenta el siguiente aspecto:

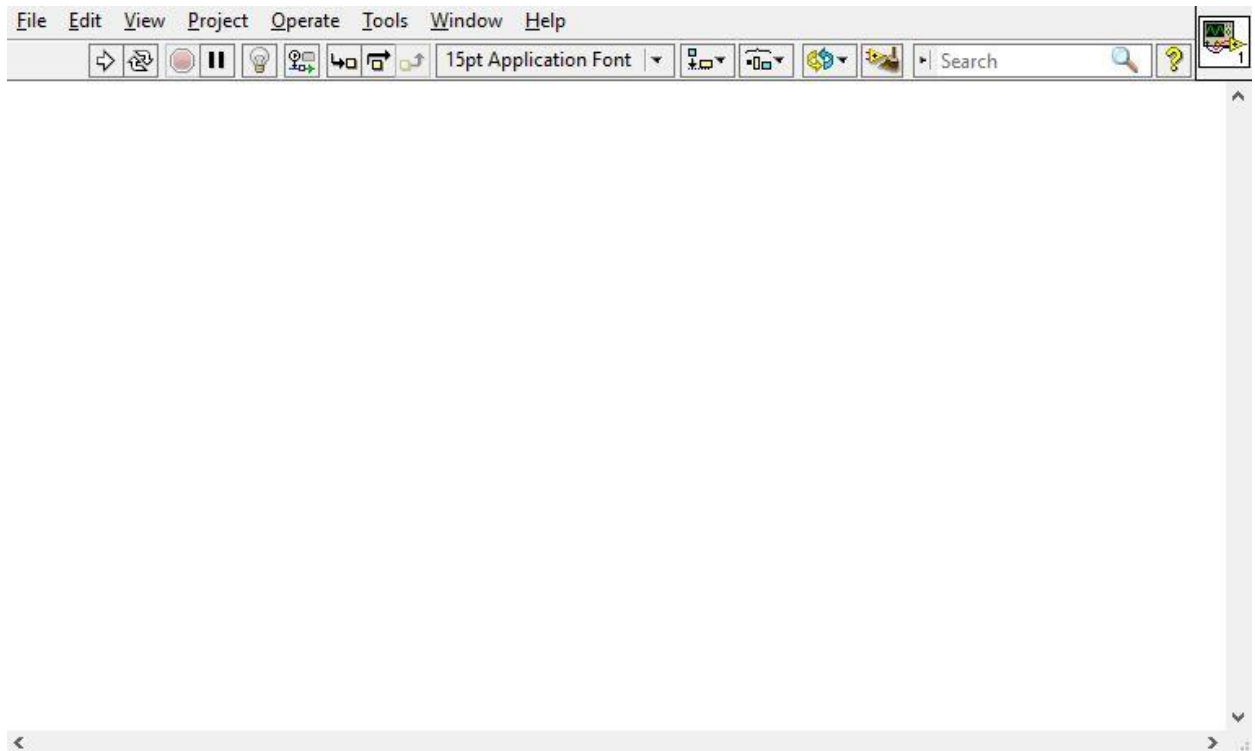


Figura 6.1 – Pantalla Block Diagram.

- Front Panel: En esta pantalla se desarrollará la interfaz gráfica, que sí será accesible para el usuario final, y donde se podrá interactuar con los controles y mandos disponibles. Presenta el siguiente aspecto:

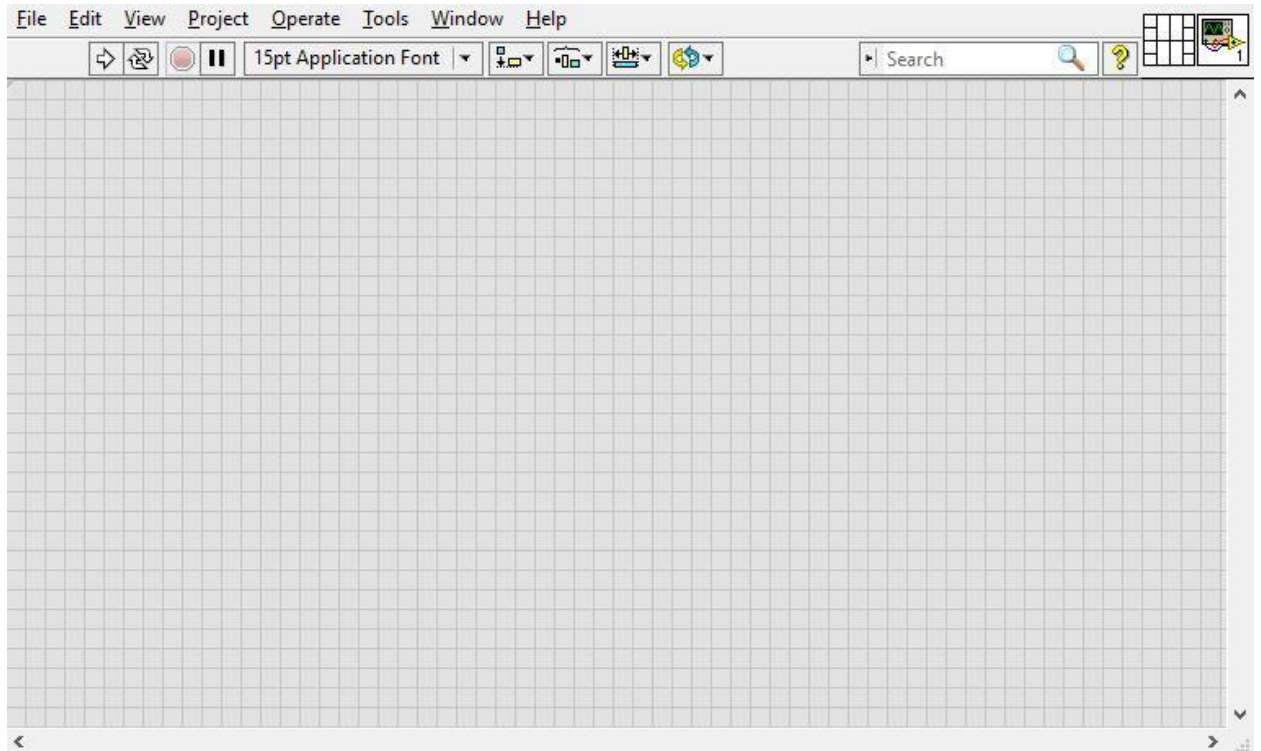


Figura 6.2 – Pantalla Front Panel.

6.2. Esquema general del Block Diagram para el programa basado en modelos.

Como veremos en este apartado, la forma más adecuada de programar en el Block Diagram en este caso, es siguiendo un orden secuencial. Para ello, se hace uso del bloque Flat Sequence”, disponible en el menú “Programming”>>>” Structures”. Éste se encargará de ejecutar cada franja de izquierda a derecha, de forma que no haya problemas de compatibilidad debido al orden de ejecución.

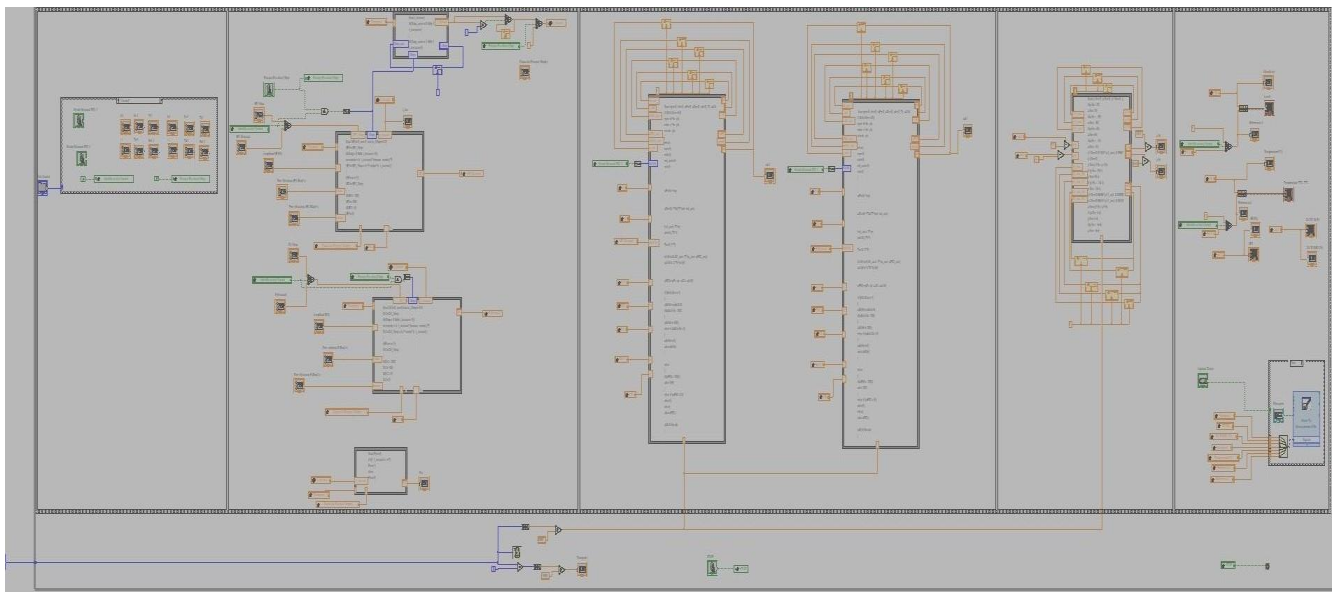


Figura 6.3 – Block Diagram del programa basado en modelos.

Como se puede comprobar en la figura 6.3, en la primera franja se decide mediante el Tab Control si el programa está en modo identificación o control.

En caso de estar en modo identificación, se generarán las señales en escalón o Chirp según se desee, las cuales se irán introduciendo en la entrada manual de los controladores. En caso de estar en modo Control, también se generará la señal del modo manual con los bloques de la segunda franja, para después decidir si se aplica o no según esté activo el modo manual o automático de los controladores de la tercera franja.

En la cuarta franja se introduce la señal de control calculada mediante las franjas anteriores en el modelo.

Por último, en la quinta franja se grafican los resultados, y se graban los datos en un archivo de tipo "LabView Measurement File".

6.3. Implementación de modelos lineales mediante ecuaciones en diferencias.

En apartados anteriores, se obtuvieron modelos lineales de la planta en tiempo continuo en forma de funciones de transferencia. Hay que destacar que el punto de funcionamiento elegido es el de caudal reducido, en el que VR1 tiene una apertura del 30% como punto de operación, pues daba lugar a un mayor rango para el salto térmico TT2-TT1.

Como ya se ha comentado, el lazo de control auxiliar (control de TT4 mediante VR2/VR3 para mantener TT1 constante) será invisible para el usuario final, por lo que no se tendrá en cuenta en la implementación de los modelos. Por lo tanto, los modelos implementados serán los obtenidos en los puntos 4.2., 4.3. y 4.4.

Éstos están caracterizados mediante funciones de transferencia en tiempo continuo, que habrá implementar en tiempo discreto con un tiempo de muestreo determinado.

Para elegir un tiempo de muestreo adecuado, debe tenerse en cuenta que éste debe ser lo suficientemente pequeño como para no perder información de los modelos, y lo suficientemente grande como para que el computador sea capaz de ejecutar un ciclo de control completo en un tiempo de muestreo.

En los modelos obtenidos, las constantes de tiempo más pequeñas son del orden de 28 segundos. Teniendo en cuenta que el tiempo de subida de un sistema es de aproximadamente 3 veces el de su constante de tiempo, esto implica que la subida tome un tiempo de unos 90 segundos. Un criterio aceptable sería que el tiempo de subida presente unas 30 o 40 muestras, por lo que un tiempo de muestreo de hasta 2 segundos podría considerarse aceptable.

En nuestro caso, se ha escogido un tiempo de 0.5 segundos, pues resulta suficiente para realizar un ciclo completo de control, y nos asegura tener suficientes muestras (información) en la evolución de los sistemas.

6.3.1. Ecuaciones en diferencias del modelo térmico ante cambios en DC de R1/R2.

En primer lugar, se implementará la función de transferencia $G_{22}(s)$, que como se comentó en el punto 4.2., modela la respuesta de TT2-TT1 ante cambios en el DC de R1 y R2. Dicho modelo presenta la siguiente función de transferencia:

$$G_{22}(s) = \frac{0.115}{28.25 * s + 1} * e^{-11.55*s}.$$

Mediante el comando `c2d` de Matlab, con un tiempo de muestreo de 0.5 segundos, se obtiene la siguiente función de transferencia discreta:

$$G_{22}(Z) = Z^{-24} * \frac{0.001817 * Z + 0.002}{Z - 0.9825}.$$

Se sabe que $G_{22}(z) = \frac{Y_2(z)}{U_2(z)}$, por lo que:

$$\frac{Y_2(z)}{U_2(z)} = Z^{-24} * \frac{0.001817 * Z + 0.002001}{Z - 0.9825}.$$

Operando, y multiplicando por Z^{-1} a ambos lados de la igualdad, se obtiene:

$$U_2(Z) * Z^{-24} * (0.001817 * Z + 0.002001) * Z^{-1} = Y_2(Z) * (Z - 0.9825) * Z^{-1}.$$

De este modo, los exponentes de Z serán negativos, que implican retrasos que son implementables en LabView. Ahora, se puede pasar del dominio Z a ecuaciones en diferencias de forma sencilla. Se obtiene entonces la siguiente ecuación:

$$y_{22}(k) = 0.9825 * y_{22}(k - 1) + 0.001817 * u_2(k - 24) + 0.002001 * u_2(k - 25).$$

6.3.2. Ecuaciones en diferencias del modelo térmico ante cambios en VR1.

Este modelo, descrito en el apartado 4.3., tiene la siguiente función de transferencia continua:

$$G_{21}(s) = -\frac{0.20165}{30.6 * s + 1} * e^{-7.85*s}.$$

Utilizando el comando c2d con el tiempo de muestreo elegido, se obtiene la siguiente función de transferencia en el dominio Z :

$$G_{21}(Z) = \frac{Y_2(Z)}{U_1(Z)} = Z^{-16} * \frac{-0.0009861 * Z - 0.002282}{Z - 0.9838}.$$

Aplicando el mismo procedimiento que en el apartado anterior, se obtiene la siguiente ecuación en diferencias:

$$y_{21}(k) = 0.9838 * y_{21}(k - 1) - 0.0009861 * u_1(k - 16) - 0.002282 * u_1(k - 17).$$

6.3.3. Ecuaciones en diferencias del modelo de nivel ante cambios en VR1.

A continuación, se calcula la ecuación en diferencias correspondiente al modelo de nivel frente a cambios en VR1, el cual se describe en el apartado 4.4.:

$$G_{11}(s) = \frac{5.515}{250 * s + 1}.$$

Utilizando nuevamente el comando c2d, con el mismo tiempo de muestreo, se obtiene lo siguiente:

$$G_{11}(Z) = \frac{Y_1(Z)}{U_1(Z)} = \frac{0.01102}{Z - 0.998}$$

De lo que se deduce la siguiente ecuación en diferencias:

$$y_{11}(k) = 0.01102 * u_1(k - 1) + 0.998 * y_{11}(k - 1).$$

6.3.4. Implementación de las ecuaciones en diferencias en LabView.

Como se puede comprobar en las ecuaciones, las salidas dependen de muestras anteriores de las entradas y de las propias salidas, lo cual implica tener que implementar retrasos. Éstos se pueden implementar mediante *FeedBack Nodes* en LabView, como el que se muestra a continuación:

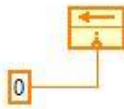


Figura 6.4 – FeedBack Node en LabView.

En esta figura se puede observar que presenta un terminal de entrada con una constante, el cual hace referencia a la condición inicial del nodo. Además, se puede configurar el número de retrasos que proporciona este bloque en el apartado *Properties*.

Puesto que se trata de un sistema triangular, la primera salida (nivel) sólo depende de VR1, por lo que la ecuación en diferencias que la define es tal que:

$$y_1(k) = y_{11}(k) + y_{12}(k) = 0.01102 * u_1(k - 1) + 0.998 * y_{11}(k - 1)$$

, siendo $y_{12}(k) = 0$.

La segunda salida será:

$$y_2(k) = y_{21}(k) + y_{22}(k) = 0.9838 * y_{21}(k - 1) - 0.0009861 * u_1(k - 16) - 0.002282 * u_1(k - 17) + 0.9825 * y_{22}(k - 1) + 0.001817 * u_2(k - 24) + 0.002001 * u_2(k - 25).$$

A continuación, se muestra la implementación de los modelos, realizada en la pantalla Block Diagram de LabView:

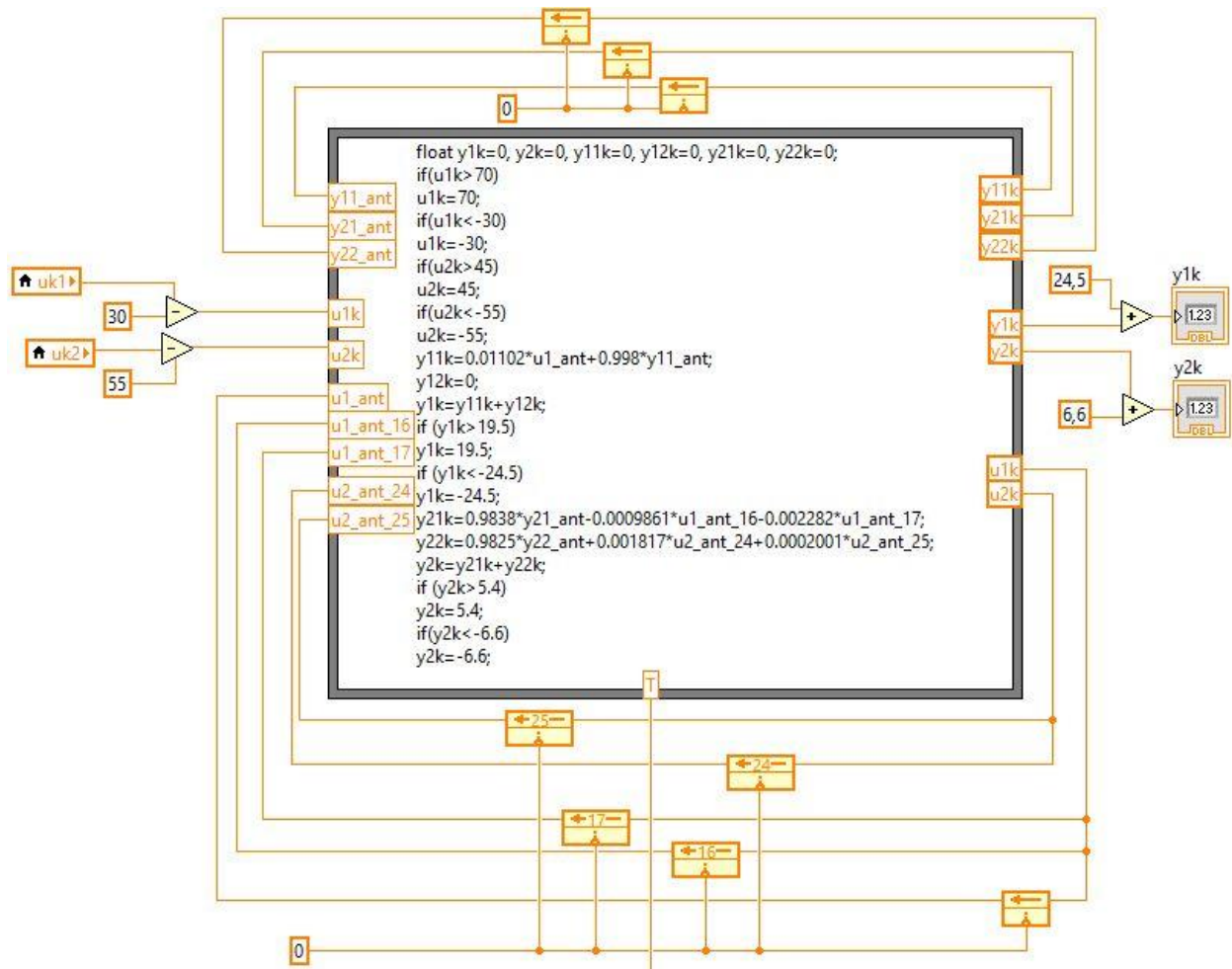


Figura 6.5 – Modelo de la planta implementado en LabView mediante ecuaciones en diferencias.

En la figura 6.5, si observamos el código interno del bloque, se puede comprobar que las entradas han sido saturadas, de modo que ambas estarán entre 0 y 100. También se ha limitado el valor de las salidas, pues el nivel tiene un rango de entre 0 y 44cm, y el salto térmico tiene un rango de entre 0 y 12°C.

Además, se puede comprobar que, ya que se trata de un modelo incremental de la planta, se debe restar el punto de operación a las entradas para introducir en el bloque el valor incremental de las mismas. Así, se obtiene el valor incremental de las salidas, que después se sumarán a sus respectivos puntos de operación.

6.4. Implementación de modos de identificación y control mediante Tab Control.

El programa constará de dos modos diferentes, que se deben seleccionar según el objetivo que tenga el usuario. Estos modos son “Identificación” y “Control”. Para implementarlos de la forma más sencilla posible, y simplificar así el manejo del programa, ambos modos compartirán las mismas gráficas, pudiendo cambiar de modo mientras el programa se encuentra en ejecución.

La implementación se basa en fijar en modo manual los controladores de nivel y temperatura mientras se está en modo Identificación. De esta forma, las señales generadas (señal en escalón o Chirp) se introducirán en el modelo mediante el modo manual de los controladores.

Cuando se elige el modo de Control, los controladores estarán en modo manual por defecto, pudiendo pasar cada controlador de forma individual a modo automático en cualquier instante. Es recomendable esperar cierto tiempo en modo manual antes de pasar al modo automático, de forma que los controladores se inicialicen correctamente y se consiga así una transición suave entre estos modos sin que afecte el término de anti-WindUp a la señal de control.

Esto es posible gracias al bloque "Tab Control", disponible en LabView, el cual se conecta a un bucle case, como muestran las dos siguientes imágenes:

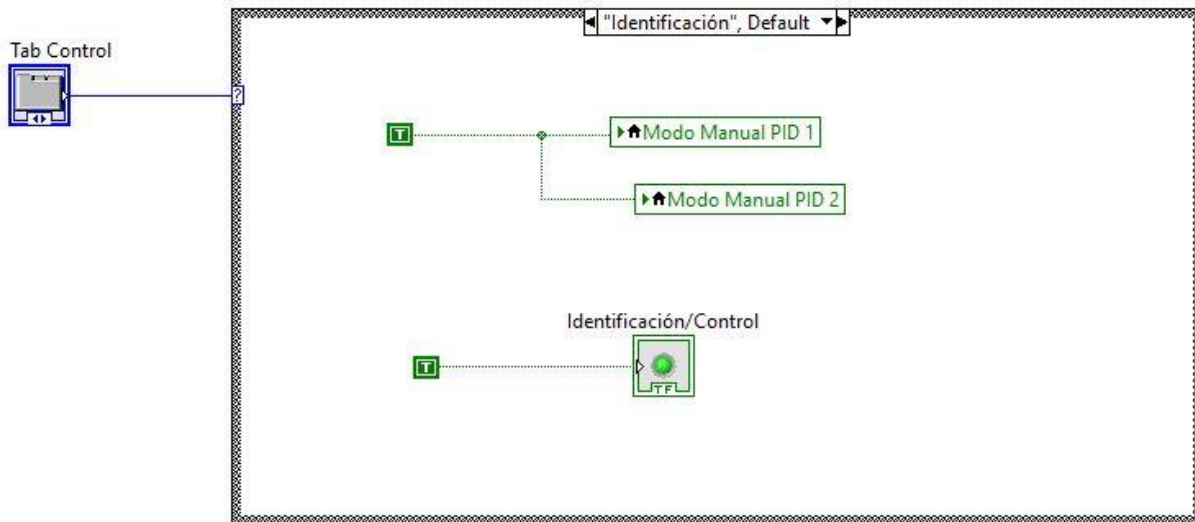


Figura 6.6 – Modo Identificación usando Tab Control.

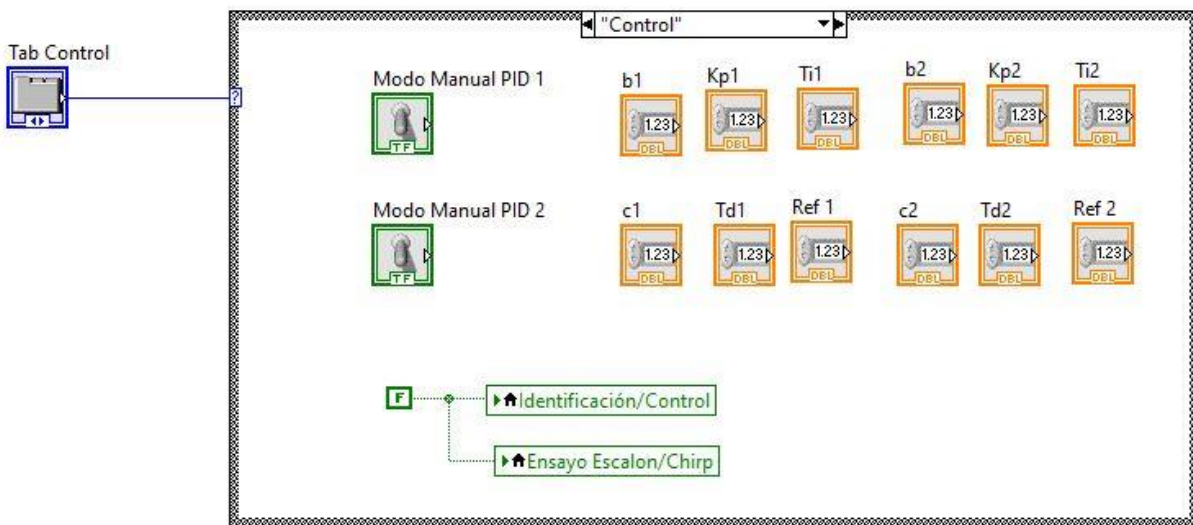


Figura 6.7 – Modo Control usando Tab Control.

6.5. Programación de señales para ensayos de identificación en LabView.

La programación de estos ensayos para la primera entrada (VR1) se muestran en la siguiente imagen:

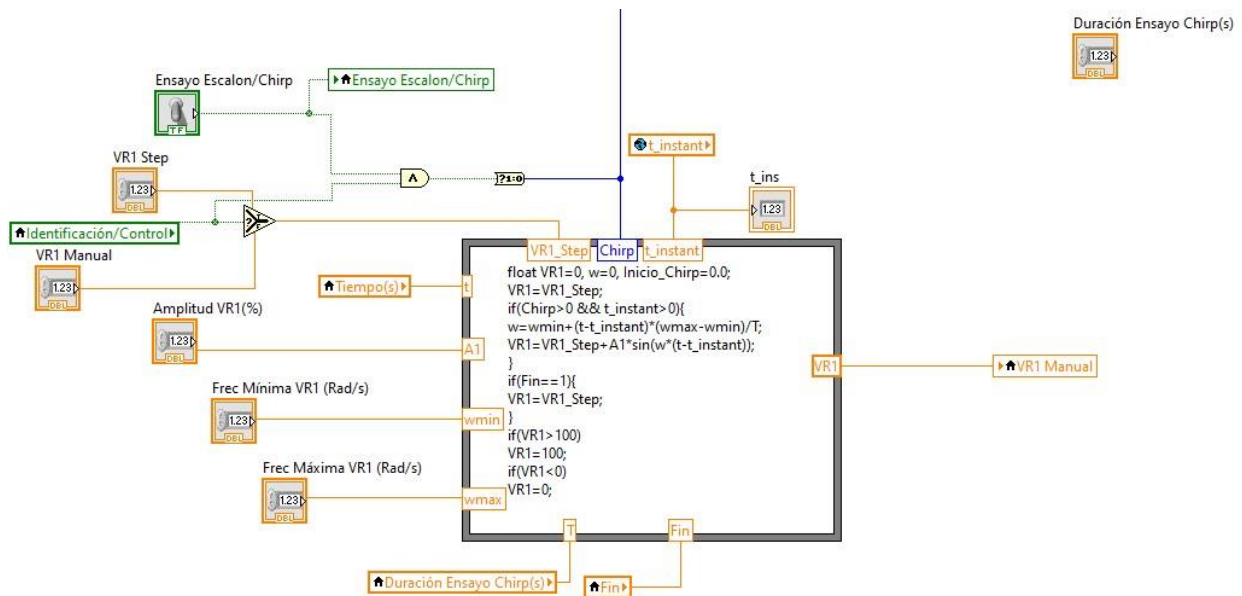


Figura 6.8 – Programación de las señales para identificación de VR1.

Como se puede ver en la figura 6.8, si el usuario elige el modo de Identificación, la señal VR1 se introducirá en el modo manual del controlador, que, como se ha comentado, siempre se encontrará en este modo en ensayos de identificación.

Si mediante el selector se elige introducir una señal en escalón (mediante el selector Escalón/Chirp), el modelo recibirá como entrada el valor introducido en su correspondiente “Step”.

Si por el contrario elige como entrada la señal Chirp, se introducirá dicha señal sumada al valor introducido en su correspondiente Step. Esta señal sigue la siguiente ecuación:

$$y = A * \text{sen} \left((w_{\min} + (t - t_i) * \frac{w_{\max} - w_{\min}}{T}) * (t - t_i) \right).$$

,siendo A la amplitud de la señal, w_{\min} la frecuencia inicial, w_{\max} la frecuencia máxima, T la duración del ensayo, y t_i (equivalente a t_{instant} de la Figura 7.8) el tiempo instantáneo en el que comenzó el ensayo.

La señal “Fin” que se puede apreciar en la Figura 7.8 valdrá 1 si el ensayo Chirp ya ha terminado, como muestra la siguiente imagen:

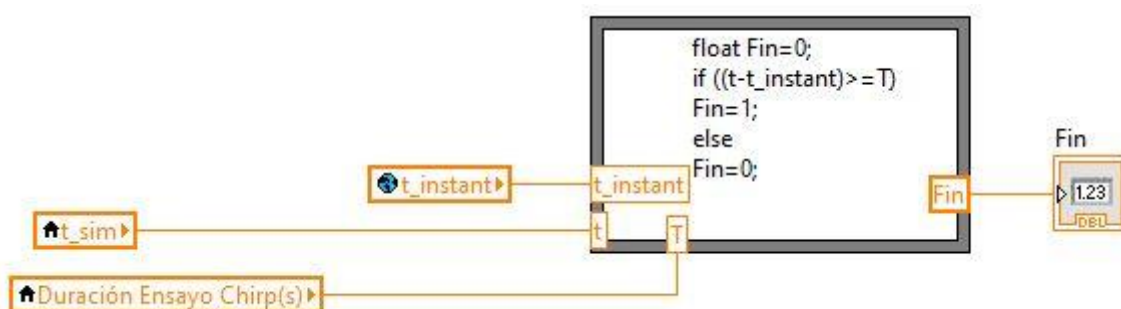


Figura 6.9 – Señal Fin de ensayo Chirp.

Dicha señal se encargará de introducir únicamente el valor que haya en el Step cuando termine el ensayo Chirp.

Por último, hay que destacar que para poder iniciar la señal Chirp correctamente en cualquier instante, es necesario poder capturar el valor instantáneo del tiempo en el momento en el que se selecciona el ensayo Chirp. Esto podría hacerse con una variable estática, por ejemplo, pero en LabView no existe tal opción. Por lo tanto,

se ha hecho uso de un selector, como se muestra en la siguiente imagen:

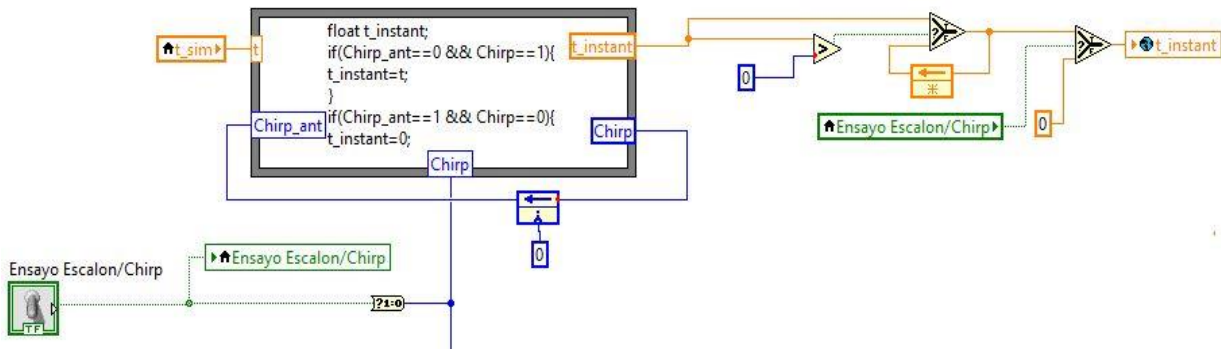


Figura 6.10 – Captura del valor instantáneo del tiempo ante un flanco de subida en Escalón/Chirp.

Tal y como muestra el código de la figura 6.10, este valor se reiniciará cuando se desactive la señal Chirp.

La programación de las señales de entrada del DC de las resistencias R1 y R2 es análoga a la mostrada en la figura 6.8 para VR1.

6.6. Programación de interfaz gráfica para ensayos de identificación.

Basado en los modelos y ensayos programados en la pantalla Block Diagram de LabView, se ha creado una interfaz gráfica en el Front Panel con el objetivo de que los usuarios puedan realizar ensayos de identificación con señales típicas usadas para este fin, tales como las señales en escalón y Chirp.

La interfaz gráfica para la identificación se muestra a continuación:

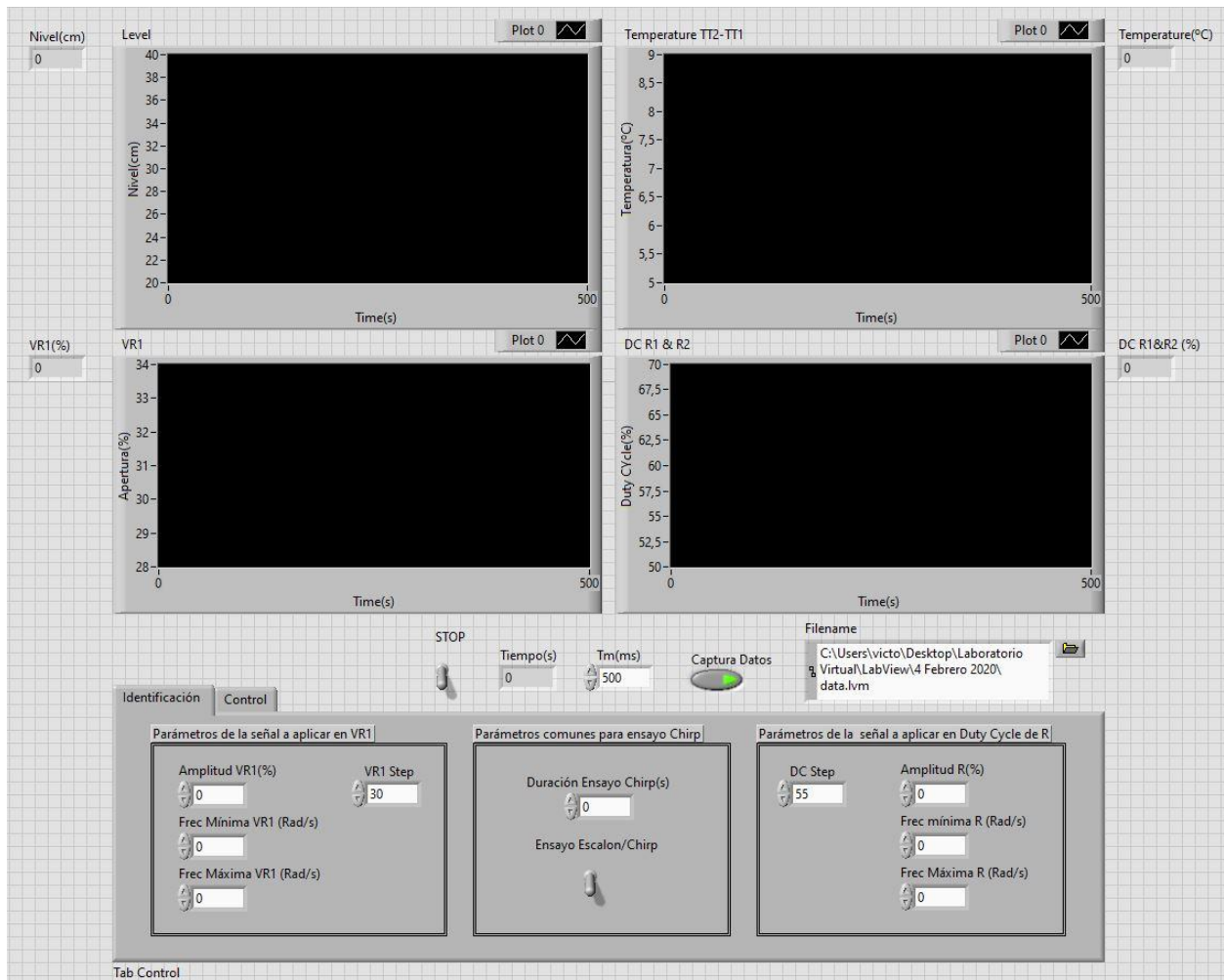


Figura 6.11 – Interfaz gráfica del programa de identificación sobre modelos lineales.

6.7. Pruebas de funcionamiento sobre el programa.

A continuación, se mostrarán ejemplos del funcionamiento del programa diseñado para la identificación.

6.7.1. Ensayos ante escalón sobre modelos lineales.

En caso de que el usuario decida introducir escalones a los modelos, éstos deben comportarse de la forma esperada. Por ejemplo, los cambios positivos producidos en VR1 producirán incrementos en el nivel, y decrementos en el salto térmico, mientras que un cambio positivo en el DC de las resistencias no afectará al nivel de forma apreciable y producirá un incremento en el salto térmico.

Además, es interesante comprobar que las funciones de transferencia con retardo también se comportan de la forma esperada, es decir, las salidas no se ven afectadas por las variaciones en las entradas de forma inmediata.

A continuación, se muestran ensayos realizados sobre el programa:

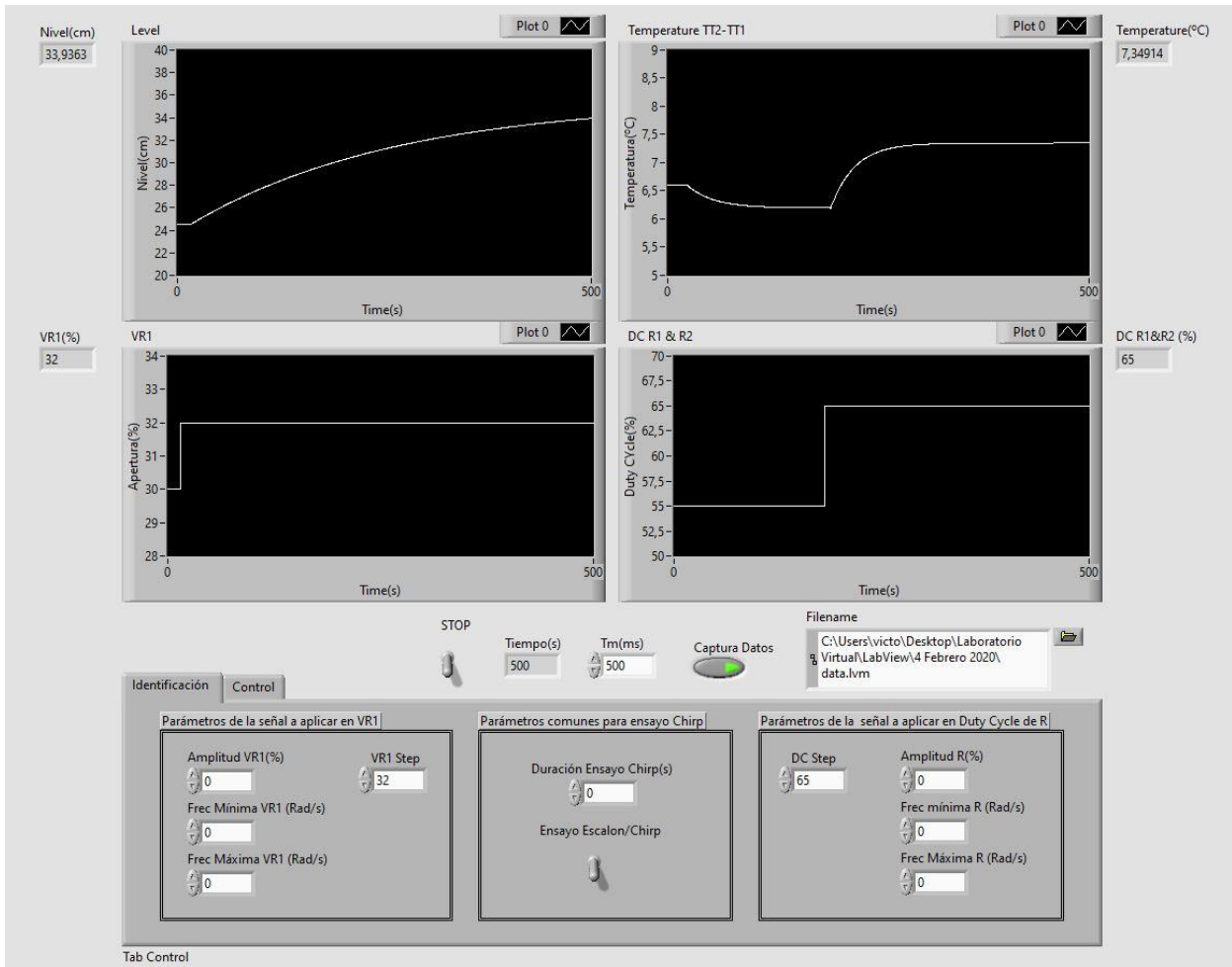


Figura 6.12 – Pruebas de ensayos ante encalón sobre modelos lineales simulados.

Si en lugar de realizar escalones positivos, hubiesen sido negativos, las salidas hubiesen reaccionado de forma contraria a lo que se muestra en la figura 6.12, tal y como se espera.

6.7.2. Ensayos Chirp sobre modelos lineales.

Si el usuario decide realizar un ensayo introduciendo una señal Chirp, lo podrá realizar de forma sencilla introduciendo los parámetros destinados para ello y modificando el selector Ensayo Escalón/Chirp, que permite alternar entre los dos tipos de entrada disponibles.

Para el primer ejemplo, la señal Chirp será generada en VR1. Ésta tendrá una duración de 400 segundos, una frecuencia mínima de 0.001 rad/s, una frecuencia máxima de 0.05 rad/s, y una amplitud de un 10%.

Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente figura:

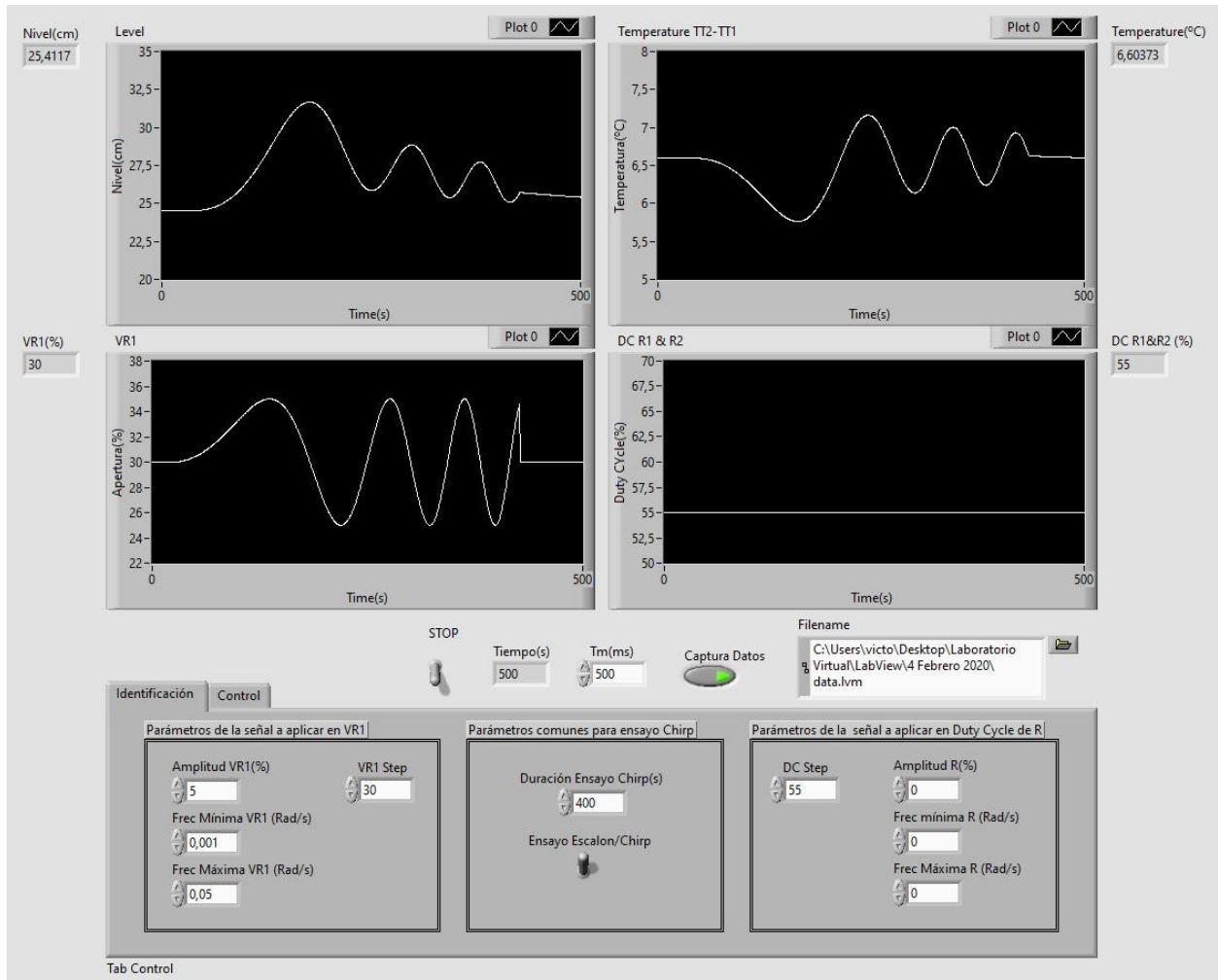


Figura 6.13 – Ensayo Chirp en VR1 sobre modelos lineales.

Si, por el contrario, se genera una señal de las mismas características en el DC de R1/R2, el modelo responde de la siguiente forma:

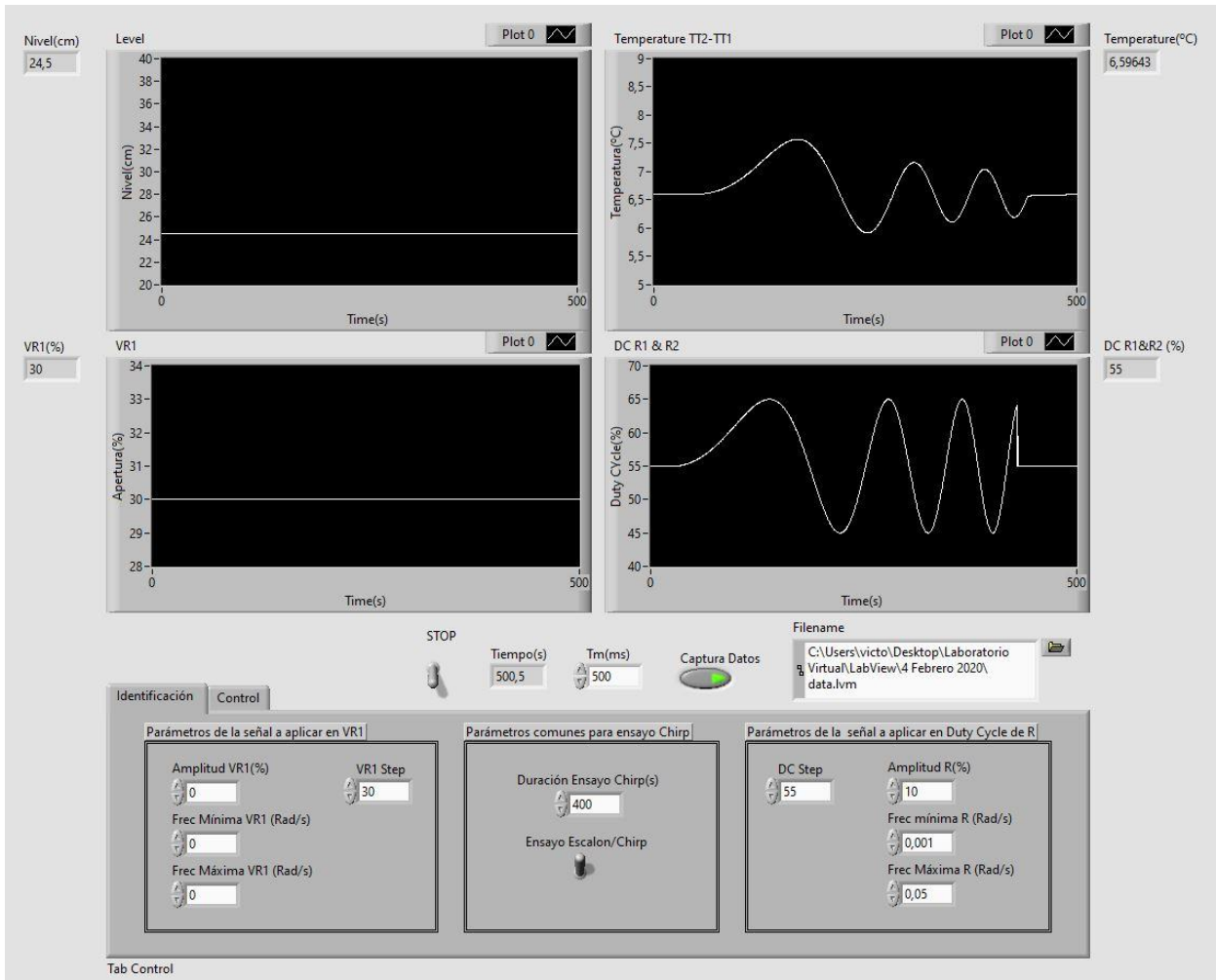


Figura 6.14 – Ensayo Chirp en DC de R1 y R2 sobre modelos lineales.

De los ensayos de las figuras 6.13 y 6.14 se puede destacar que, tal y como ocurría en el ensayo de la Figura 6.12, la señal Chirp generada en VR1 modifica ambas salidas, mientras que la señal Chirp generada en el DC sólo tiene efecto sobre la salida del incremento de temperatura. Además, se comprueba que cuando la señal Chirp alcanza el límite de tiempo establecido, automáticamente vuelve al valor introducido en la casilla Step.

6.8. Programación de controladores en LabView.

Los controladores que se implementarán en LabView tendrán modo manual/automático y anti-WindUp. Para simplificar la programación y el funcionamiento del programa, se ha decidido introducir las señales de identificación en el modo manual del controlador, de modo que sólo existirá la posibilidad de activar el modo automático de éstos cuando el programa se encuentre en el apartado de Control.

A continuación, se muestra el controlador 1, el cual es análogo al controlador 2:

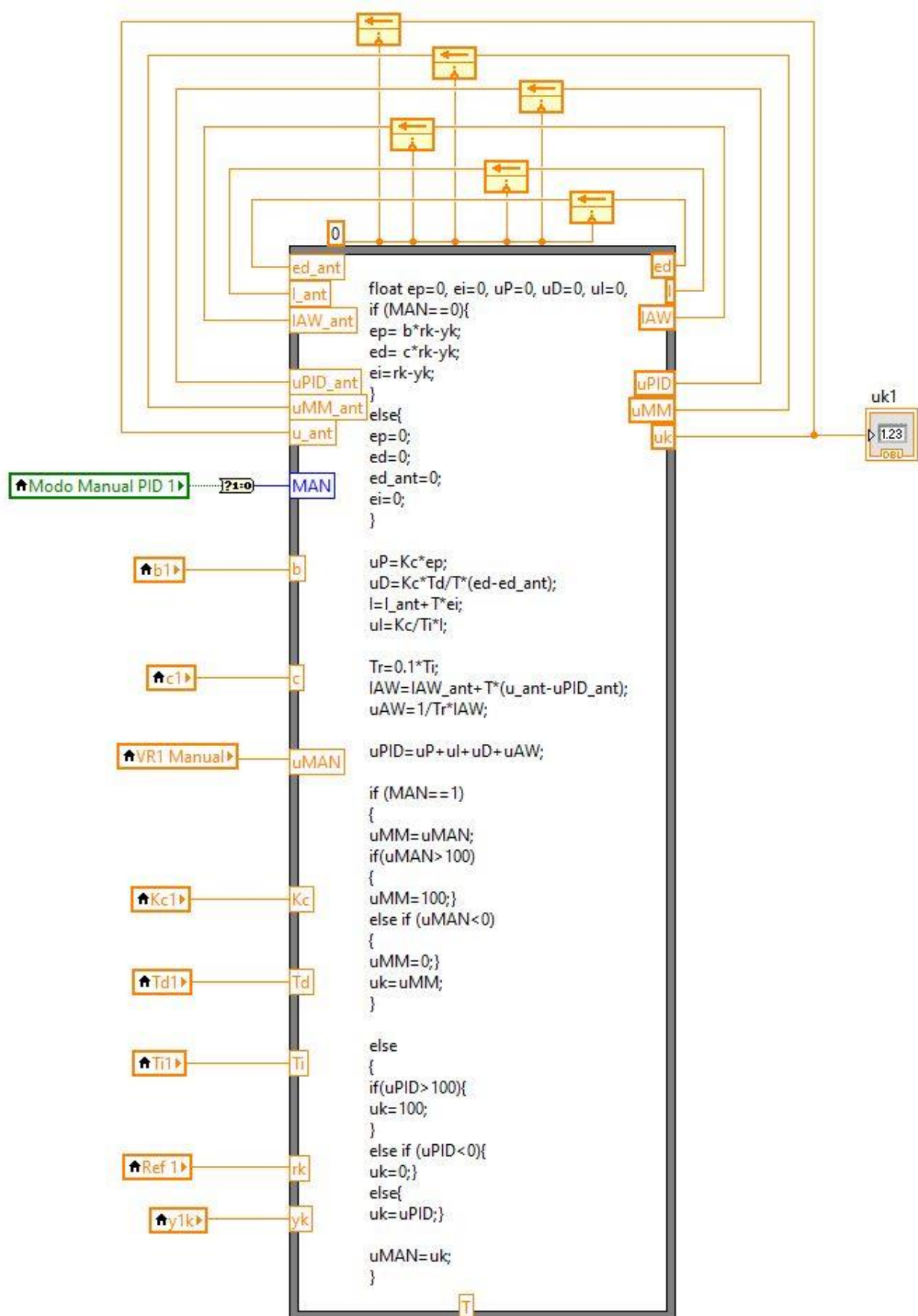


Figura 6.15 – Bloque de controlador con selección manual/automático y anti-Windup programado en LabView.

Hay que destacar que en el código implementado en el bloque de la figura 6.15 sigue la ecuación ideal, lo cual debe tenerse en cuenta al momento de introducir los parámetros. También ha tenido en cuenta la saturación de la señal de control, la cual debe estar entre 0 y 100.

Además, se comprueba que en el código el controlador incluye término de anti-Windup, el cual se encargará de evitar este efecto mediante la saturación del término integral, de modo que la salida no permanecerá saturada tras una referencia no alcanzable.

6.9. Programación de interfaz gráfica para ensayos de control.

El siguiente paso realizado ha sido programar una interfaz gráfica en la que el usuario pueda poner a prueba los controladores basados en los modelos identificados previamente.

La interfaz gráfica para la prueba de controladores sobre los modelos se muestra a continuación:

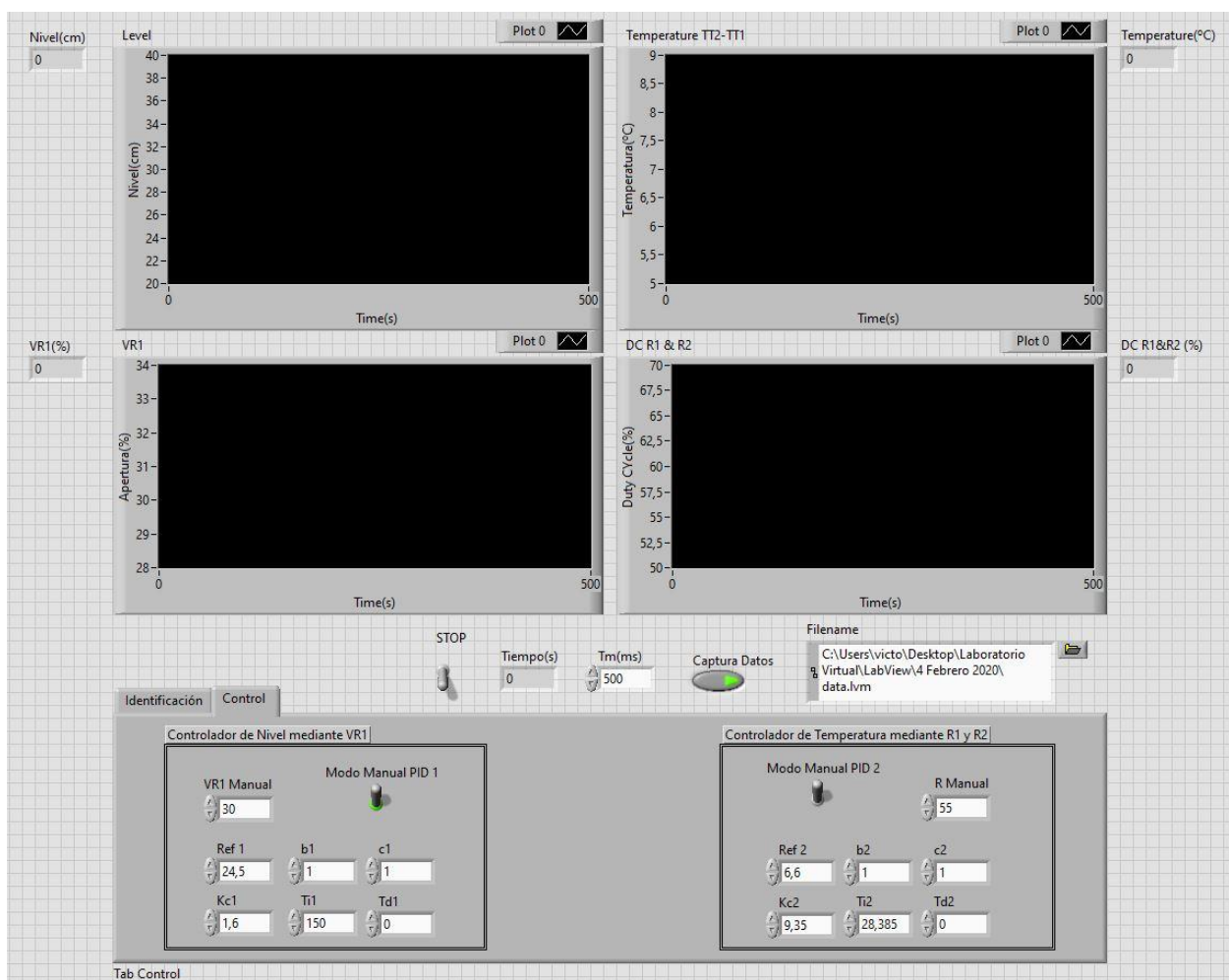


Figura 6.16 – Interfaz gráfica para la prueba de controladores sobre modelos lineales.

6.10. Pruebas de funcionamiento sobre el programa.

El siguiente paso será comprobar que los controladores que habían sido diseñados funcionan de la forma esperada en los modelos implementados. Para ello, se mostrarán ejemplos de funcionamiento.

6.10.1. Modo manual.

Como ya se ha comentado, el modo manual permite elegir al usuario la entrada que desee, y modificarla. Esto se muestra en la siguiente imagen:

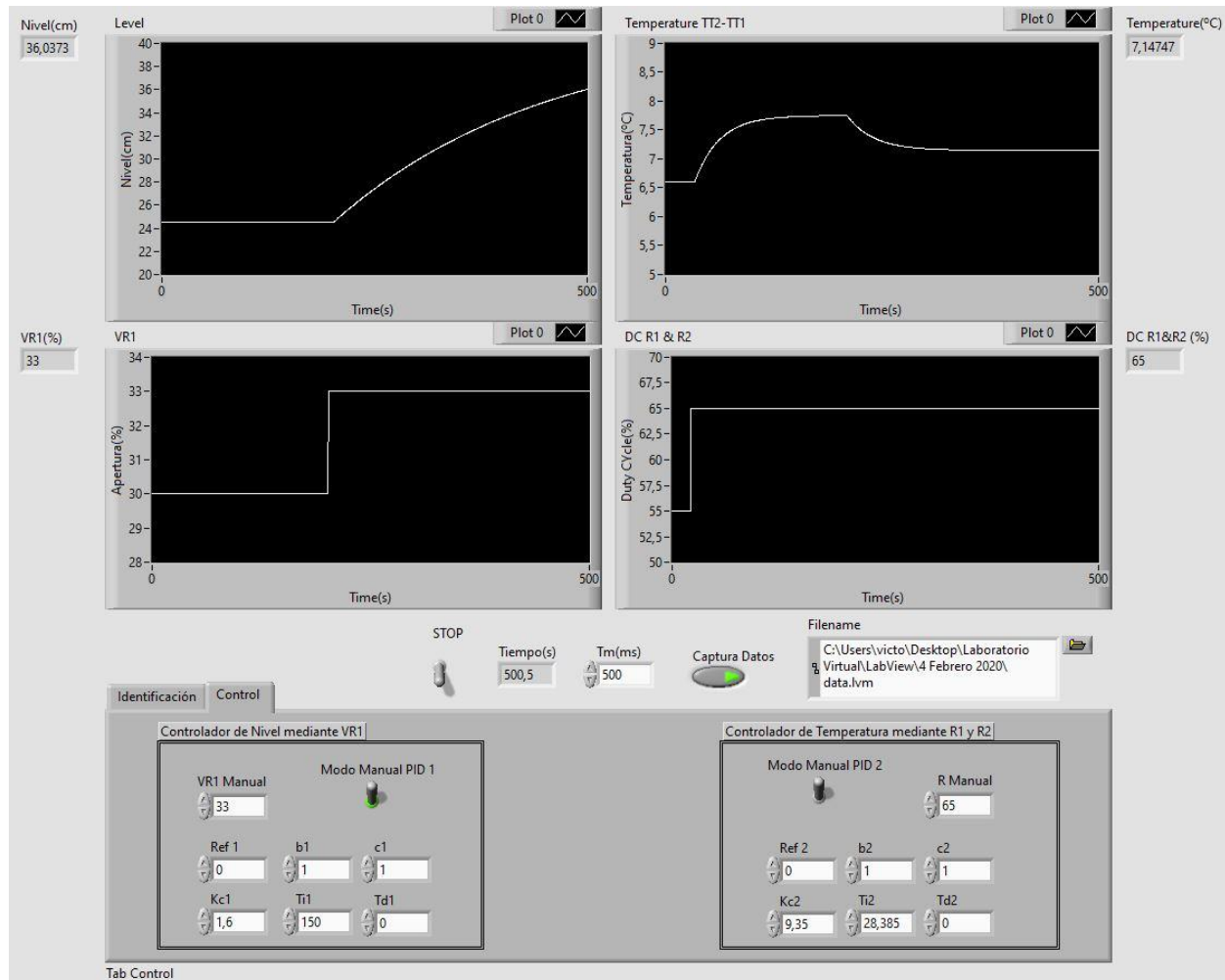


Figura 6.17 – Funcionamiento del modo manual en la interfaz de control sobre modelos.

En la figura 6.17 se puede comprobar que, con el modo manual activado, puede elegirse la entrada deseada. En el modo de control del programa será especialmente importante mantener el controlador en modo manual un tiempo después de empezar a ejecutar el programa para que el término de anti-WindUp no impida una transición suave entre los modos manual y automático.

6.10.2. Modo automático.

Previo al cambio del modo manual al modo automático (desactivación del modo manual), se han introducido los parámetros del controlador. El controlador ha sido implementado siguiendo la ecuación en forma ideal, por lo que debe tenerse en cuenta al introducir los parámetros.

Colocando los parámetros de los controladores diseñados en los apartados 5.5. y 5.6., y realizando un ensayo con cambios en las referencias, se obtienen los resultados que muestran en la siguiente figura:

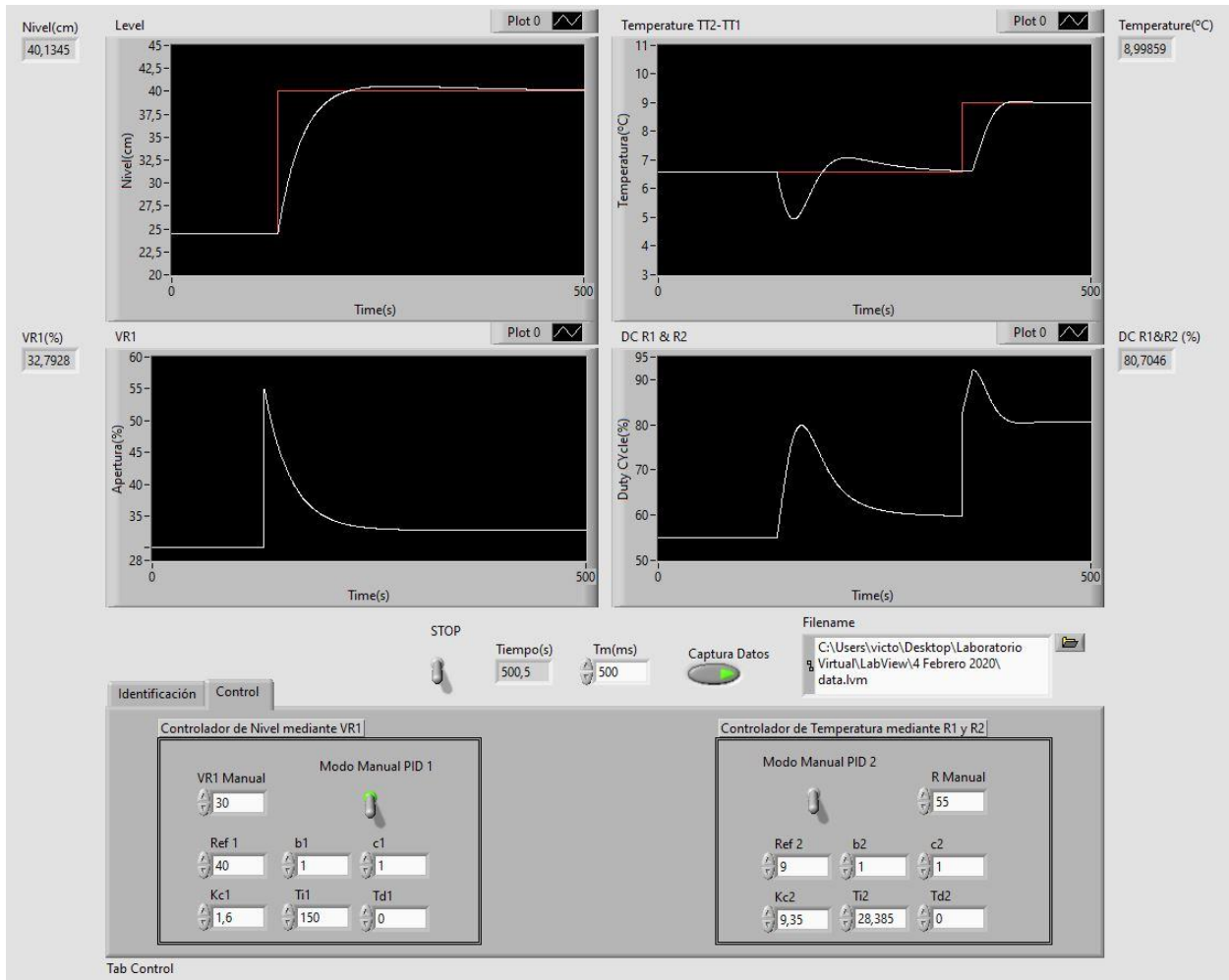


Figura 6.18 – Funcionamiento del modo automático en la interfaz de control sobre modelos.

Como puede observarse en la figura 6.18, las salidas (líneas blancas) siguen correctamente a las referencias (líneas rojas), y el controlador 2 consigue contrarrestar el efecto que produce los cambios en VR1 al modificarse la referencia de nivel. Esto es comparable a lo que se observaba en la figura 5.1.

7 IMPLEMENTACIÓN EN LABVIEW: CONTROL SOBRE PLANTA REAL

En el apartado 7 se han desarrollado programas para la identificación y control sobre el modelo lineal. Este punto consistirá en la sustitución de dichos modelos por el sistema real, de forma que cuando el usuario realice un ensayo, estará obteniendo resultados de la planta en tiempo real. Como veremos en este punto, será necesario realizar la comunicación entre LabView y el sistema vía OPC.

A diferencia del caso anterior, existirán numerosas no-idealidades, tales como el ruido producido por los sensores, o las oscilaciones provocadas por la planta de frío. Esta última se intentará mitigar, al igual que en los puntos 3 y 4, mediante el lazo auxiliar de control de TT4 regulando la apertura de las válvulas VR2 y VR3.

Además, será especialmente importante que la planta se encuentre en el punto de funcionamiento de caudal reducido (descrito en el punto 4) para realizar los ensayos.

7.1. Comunicación vía OPC con la planta desde LabView.

Para realizar ensayos con la planta, será necesario establecer la comunicación entre LabView y el sistema. Dicha comunicación será vía OPC, lo que implica que exista un cliente y un servidor OPC.

A continuación, se muestra un esquema jerárquico de conexión entre la pantalla de explotación de LabView y la planta:

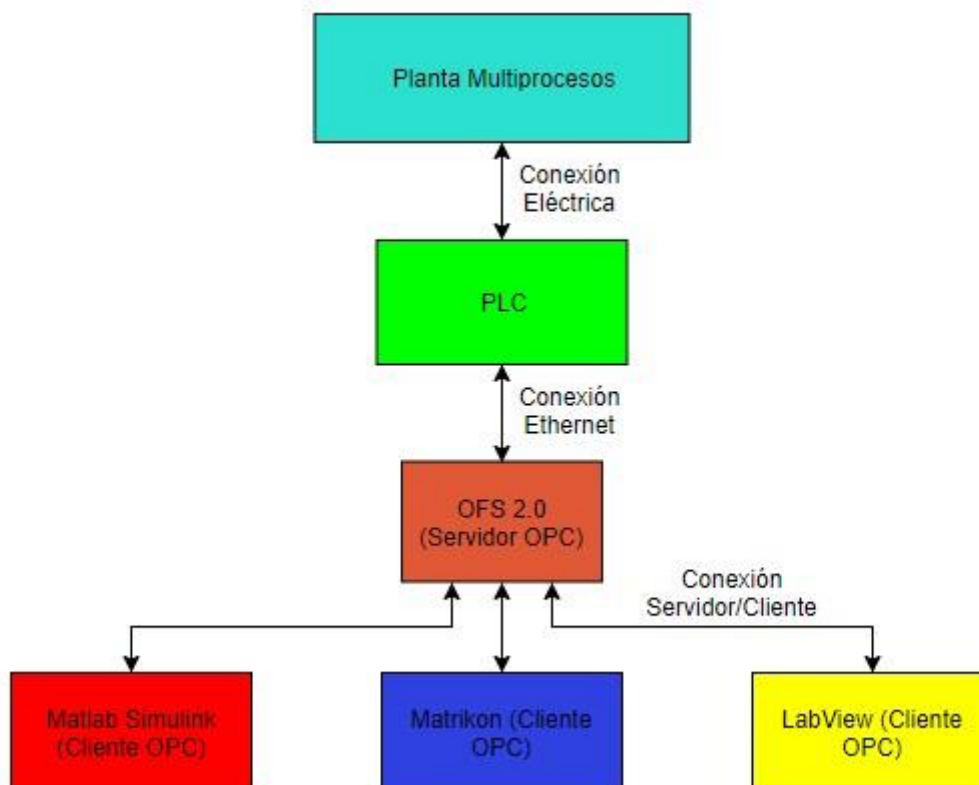


Figura 7.1 – Esquema jerárquico de conexión vía OPC.

7.1.1. Conexión Cliente/Servidor OPC.

Como se puede observar en la figura 7.1, el sistema se comunica con el PLC de Schneider Electric, el cual

trabaja con señales eléctricas. Mediante un programa implementado en Unity Pro, se transformarán estas señales eléctricas en valores numéricos y viceversa de sensores y actuadores.

Schneider proporciona un servidor OPC llamado OFS 2.0, que se comunica con Unity. Dicho servidor tiene el siguiente aspecto:

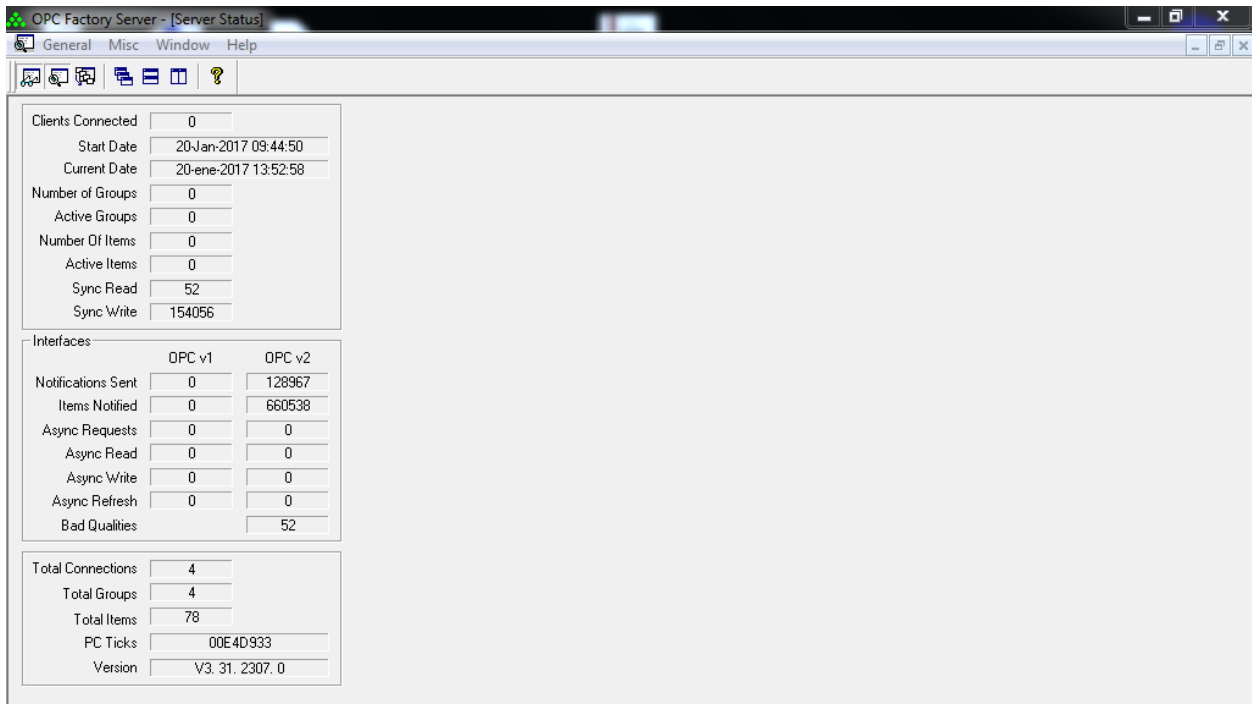


Figura 7.2 – Interfaz de OPC Factory Server (OFS 2.0).

Para conectarnos como clientes al servidor OPC desde LabView, se ha hecho uso de un software adicional llamado MatrikonOPC. Éste ofrece una solución sencilla, pues establece una comunicación Cliente/Servidor con OFS 2.0.

El aspecto de Matrikon es el siguiente:

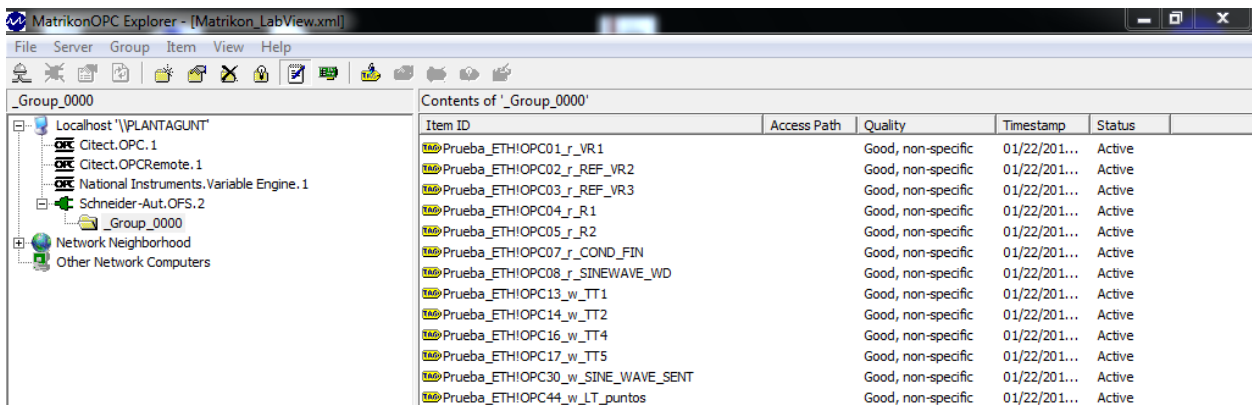


Figura 7.3 – Interfaz de MatrikonOPC.

Como puede observarse en la figura 7.3, se han configurado en Matrikon todas las señales necesarias para LabView, las mismas que se utilizaban para la comunicación de la planta con Matlab Simulink. Éste programa nos permite verificar los valores numéricos que toman las señales y comprobar que la conexión es correcta.

También se ha establecido una conexión Servidor/Cliente con el servidor desde LabView, donde se ejecutarán los algoritmos de control.

Para establecer esta última conexión, se hace uso de bloques de lectura y escritura en el Block Diagram de LabView, llamados “DataSocket”, disponibles en el menú “Data Communication”. El proceso a seguir es el

siguiente:

1. Abrir conexión fuera del bucle de ejecución, estableciendo la dirección de la señal (previamente añadida en MatrikonOPC) en el puerto "URL" y el modo 2 (lectura/escritura) en el bloque "DataSocket Open". Se ha elegido para el puerto "TimeOut" un valor de 1000ms.
2. Conectar la salida "connection id" de este bloque con uno del tipo "DataSocket Read" (lectura) o "DataSocket Write" (escritura), el cual se situará dentro del bucle de ejecución. Si se trata de un bloque de lectura, habrá que elegir el tipo de dato mediante el puerto "type", y elegir en qué variable se escribe mediante el puerto "data". Si, por el contrario, es un bloque de escritura, únicamente habrá que seleccionar qué señal queremos escribir mediante el puerto data.
3. Conectar el puerto "connection out" de cualquiera de los bloques anteriores al puerto connection id de un bloque del tipo "DataSocket Close", que, al igual que el bloque DataSocket Open, debe encontrarse fuera del bucle de ejecución.

A continuación, se muestra una imagen de los bloques mencionados:

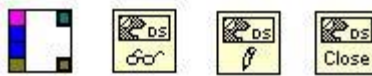


Figura 7.4 – De izquierda a derecha, bloques DataSocket Open, Read, Write y Close.

Siguiendo los pasos descritos anteriormente, se ha configurado la comunicación de cada una de las variables, teniendo en cuenta si son de lectura (sensores) o de escritura (actuadores). En las siguientes figuras se puede ver un ejemplo de lectura y de escritura de variables:

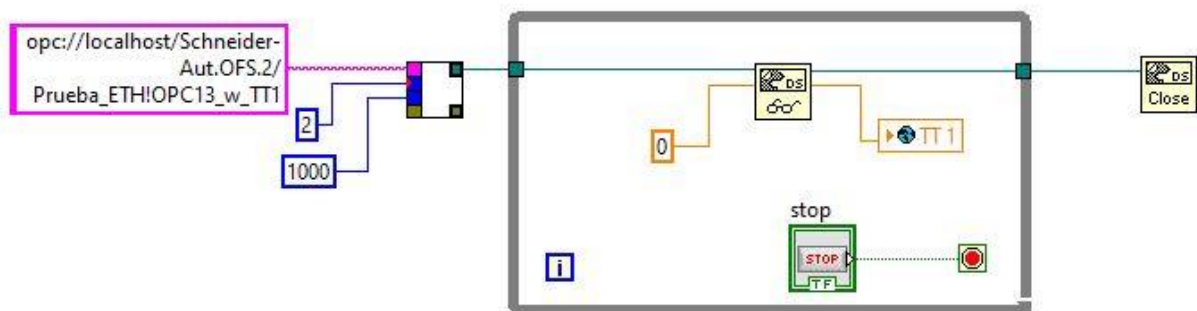


Figura 7.5 – Lectura de la señal del sensor TT1.

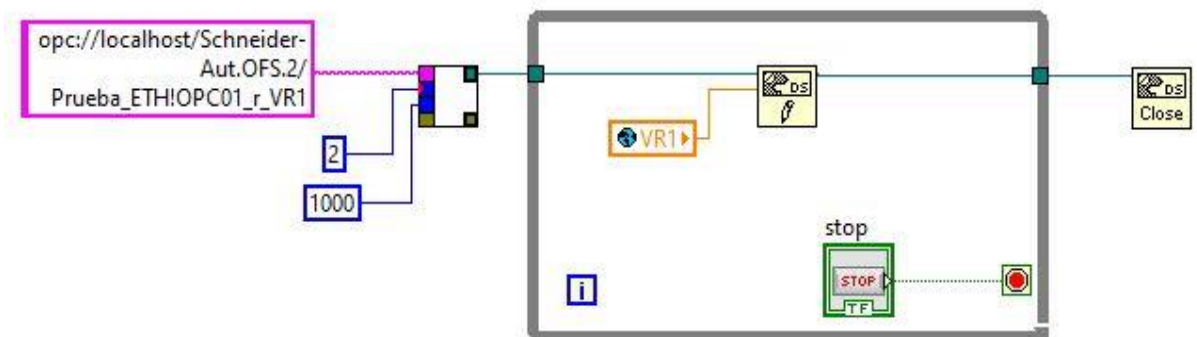


Figura 7.6 – Escritura de la señal del actuador VR1.

7.1.2. Temporización e implementación en orden secuencial en LabView.

Evidentemente, cuando se quiere controlar un sistema mediante un computador, el proceso de control debe seguir un ciclo de ejecución secuencial. De no ser así, todas las acciones necesarias se estarían ejecutando simultáneamente, lo cual podría inducir a error.

El ciclo de control consta de las siguientes etapas:

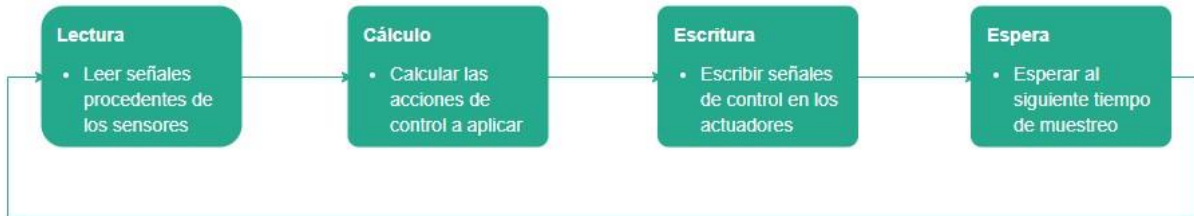


Figura 7.7 – Etapas del proceso de control.

Para asegurar que se sigue este orden, el programa ha sido implementado dentro de un Flat Sequence, de forma que cada una de las etapas de la figura 7.7 será marco o “frame” distinto. Esto puede entenderse mejor viendo la siguiente figura:

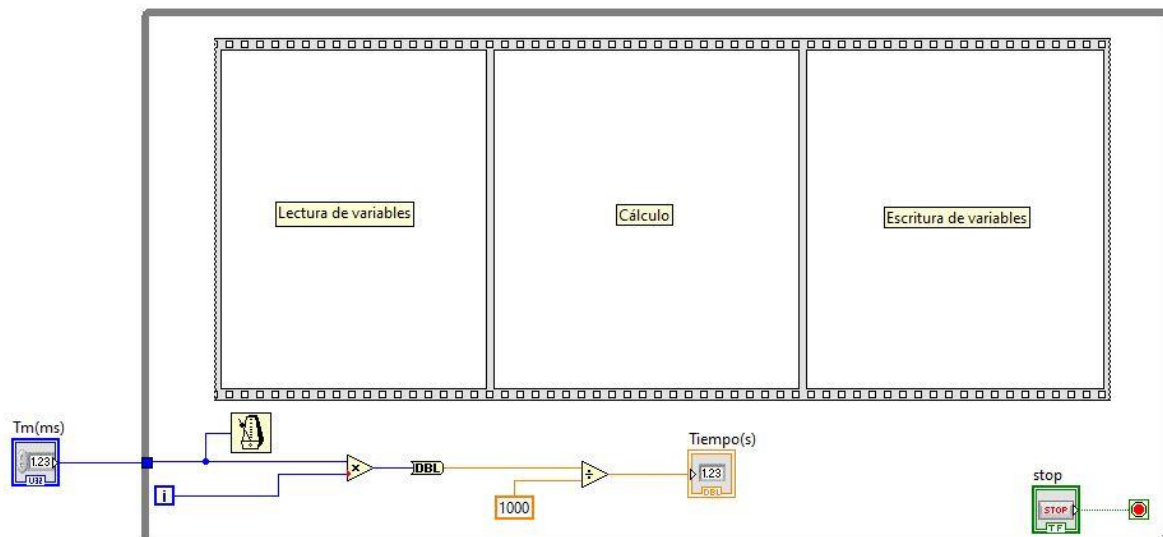


Figura 7.8 – Estructura Flat Sequence implementada en Bucle While.

Este bloque se ejecutará por orden, de izquierda a derecha, dentro de un bucle While que trabaja al tiempo de muestreo. Este tiempo (500ms) debe ser lo suficientemente largo como para que se ejecute completamente la Flat Sequence en cada iteración.

El resto de apartados del punto 7 han sido implementados en la franja destinada al cálculo. Dentro de esta franja se encuentra otro Flat Sequence análogo al descrito en el apartado 6.2, con la diferencia de que ahora se ha introducido el controlador del lazo auxiliar, y la secuencia de puesta en marcha del sistema.

A continuación, se muestra una imagen del esquema general del Block Diagram:

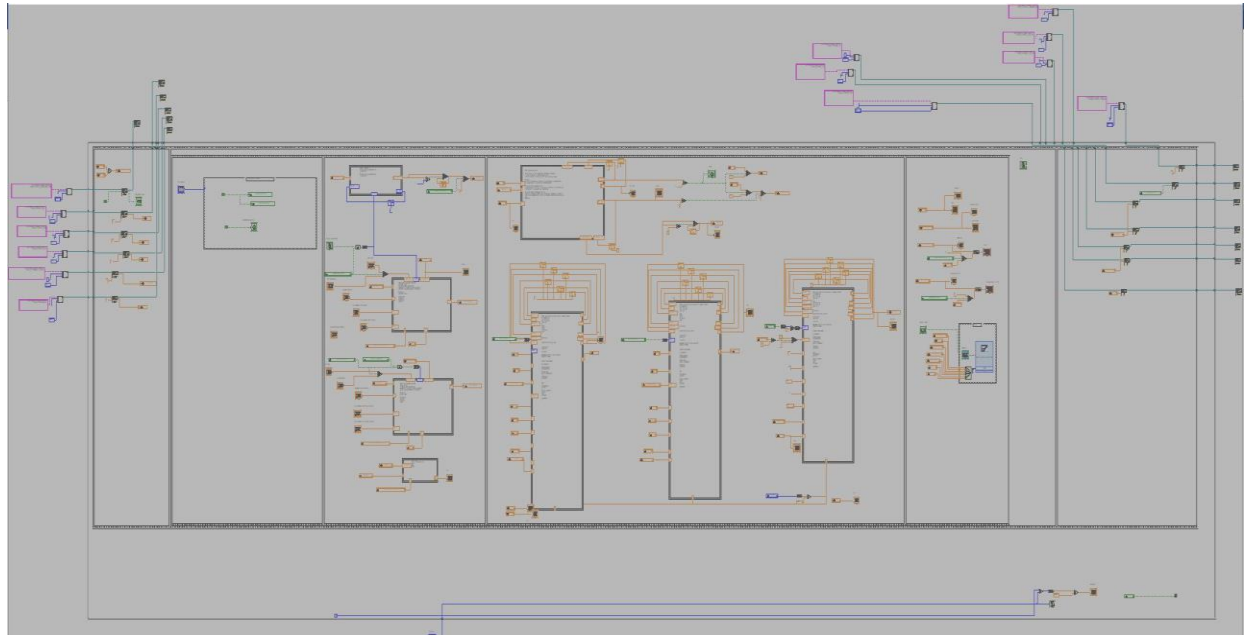


Figura 7.9 – Block Diagram del programa basado en la planta real.

7.2. Arranque y puesta en el punto de operación del sistema.

Como se ha comentado, el punto de operación elegido es el de caudal reducido, en el que VR1 está al 30% de su apertura máxima, y el DC de R1 y R2 está al 55%.

Ya que se trata de un sistema que requiere un tiempo generalmente largo para evolucionar y poder trabajar con él, se han establecido ciertas condiciones para iniciar los ensayos. La puesta en marcha de la planta consta de los siguientes pasos:

1. Circulación de agua durante 15 segundos con todos los actuadores inactivos excepto VR1 (al 30% de apertura). Durante este instante, se medirá TT1 para hacer la media y establecerla como referencia del control de TT4 (lazo auxiliar de control).
2. Una vez pasados los primeros 15 segundos y obtenida la referencia para el control de TT4, el controlador del lazo auxiliar pasará a modo automático. Las resistencias continuarán apagadas hasta que hayan pasado 200 segundos (controlador de TT4 ya “estable” debido al término de anti-Windup) y la temperatura del agua procedente de la planta de frío (TT5) sea inferior a 10°C.
3. Cuando se completa el segundo paso, las variables de entrada del sistema son manipulables, incluidas las resistencias. En caso de que el usuario esté en modo control, los ensayos siempre comenzarán en el modo manual de los controladores, pudiendo activar el modo automático cuando lo desee.

La forma de implementarlo en LabView ha sido la siguiente:

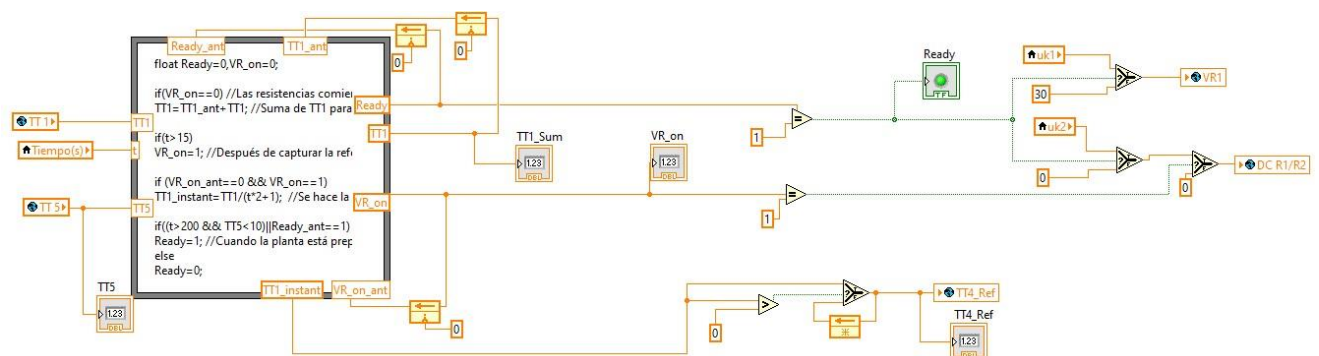


Figura 7.10 – Implementación de puesta en el punto de operación del sistema en LabView.

Prestando atención a la figura 7.10, se observa que, mientras el tiempo sea menor a 15 segundos, se acumula el

valor de la suma de las muestras de TT1 para después dividirla entre el número de muestras y así obtener la media, que pasará a ser la referencia de TT4. Además, los actuadores recibirán como señal un valor nulo excepto VR1. Cuando pasa este tiempo, los actuadores recibirán como señal el valor del punto de operación.

Por último, cuando pasen 200 segundos y TT5 sea inferior a 10°C, los actuadores recibirán el valor calculado por los bloques de generación de señales para la identificación, o por los bloques de los controladores según el modo elegido.

Se puede ver además que se ha incluido un indicador led (“Ready”), que indica al usuario cuándo el sistema ha completado la puesta en marcha y está listo para usarse.

7.3. Lazo auxiliar de control.

Puesto que ahora se empieza a trabajar sobre el sistema real, será necesario implementar el lazo auxiliar de control que se programó en Matlab Simulink. Como se explicó anteriormente, para reducir las oscilaciones producidas por la planta de frío y una deriva térmica de la temperatura del tanque (TT1), se hace un control de TT4 mediante VR2 y VR3.

7.3.1. Implementación en LabView.

En este caso, se ha decidido que los parámetros del controlador no serán modificables, pues este lazo de control será invisible para quien haga uso del sistema. Para simplificar el programa, se ha implementado el controlador descrito en el apartado 4.1.2., el cual no sigue la estructura FeedForward. Éste tenía la siguiente ecuación:

$$C_{TT4}(s) = -5.65 * \left(1 + \frac{1/333.33}{s}\right).$$

Por otro lado, también posee anti-WindUp, y su punto de operación es del 26%. Su salida ha sido saturada, de forma que los valores que llegarán a VR2 y VR3 en la planta estarán contenidos en un rango del 0 al 100%. Los resultados deben ser muy similares a los del apartado 4.1.2 a pesar de que se ha elegido el punto de funcionamiento de caudal reducido.

La implementación en el Block Diagram de LabView se muestra en la siguiente imagen:

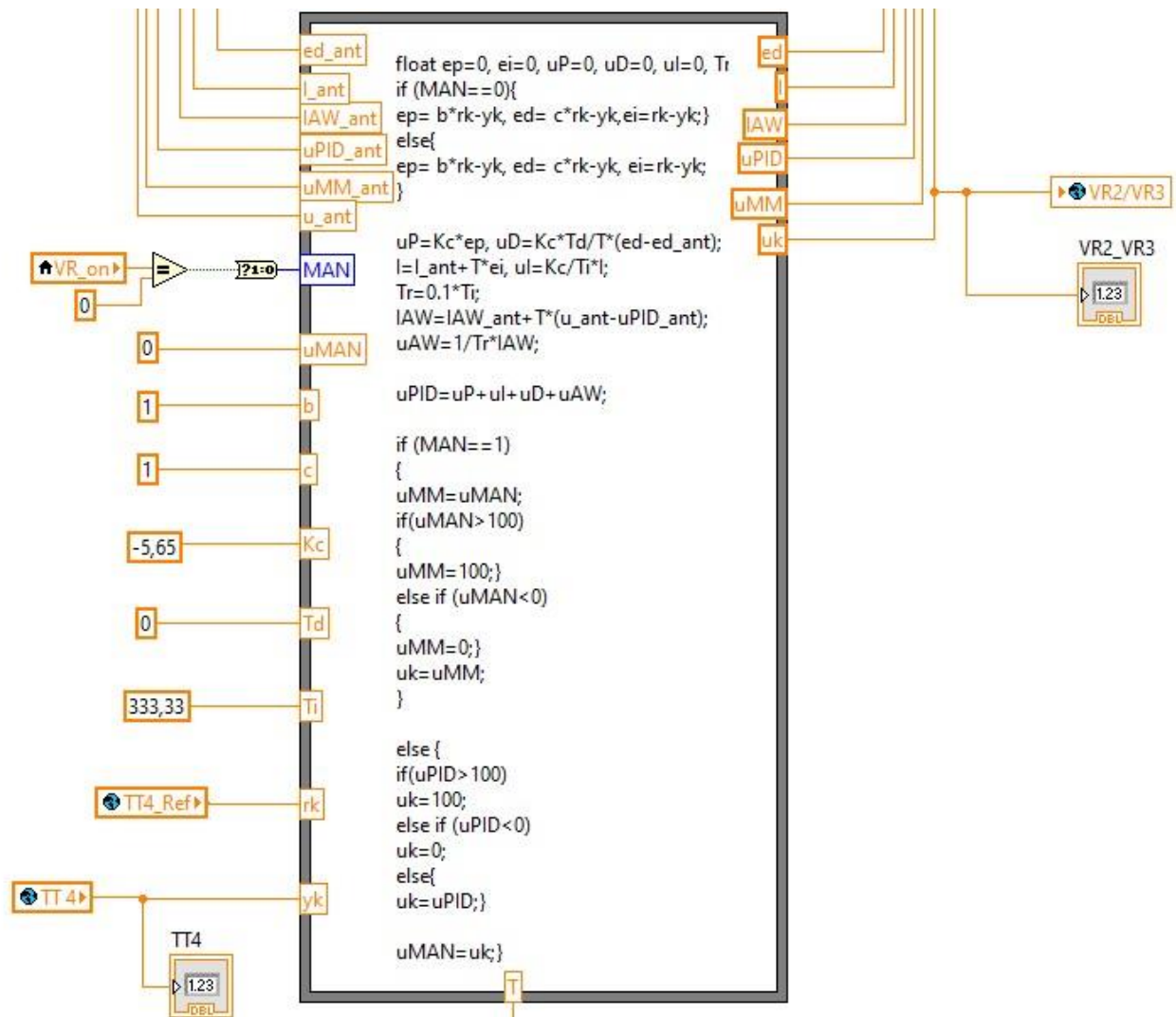


Figura 7.11 – Programación del lazo auxiliar de control.

Podemos comprobar en la figura 7.11 que los parámetros introducidos en el controlador son constantes (no modificables por el usuario).

7.3.2. Pruebas de funcionamiento del lazo de control.

Para realizar las pruebas, se han establecido todos los valores de los actuadores en el punto de operación. Los resultados obtenidos se pueden visualizar en la siguiente imagen:

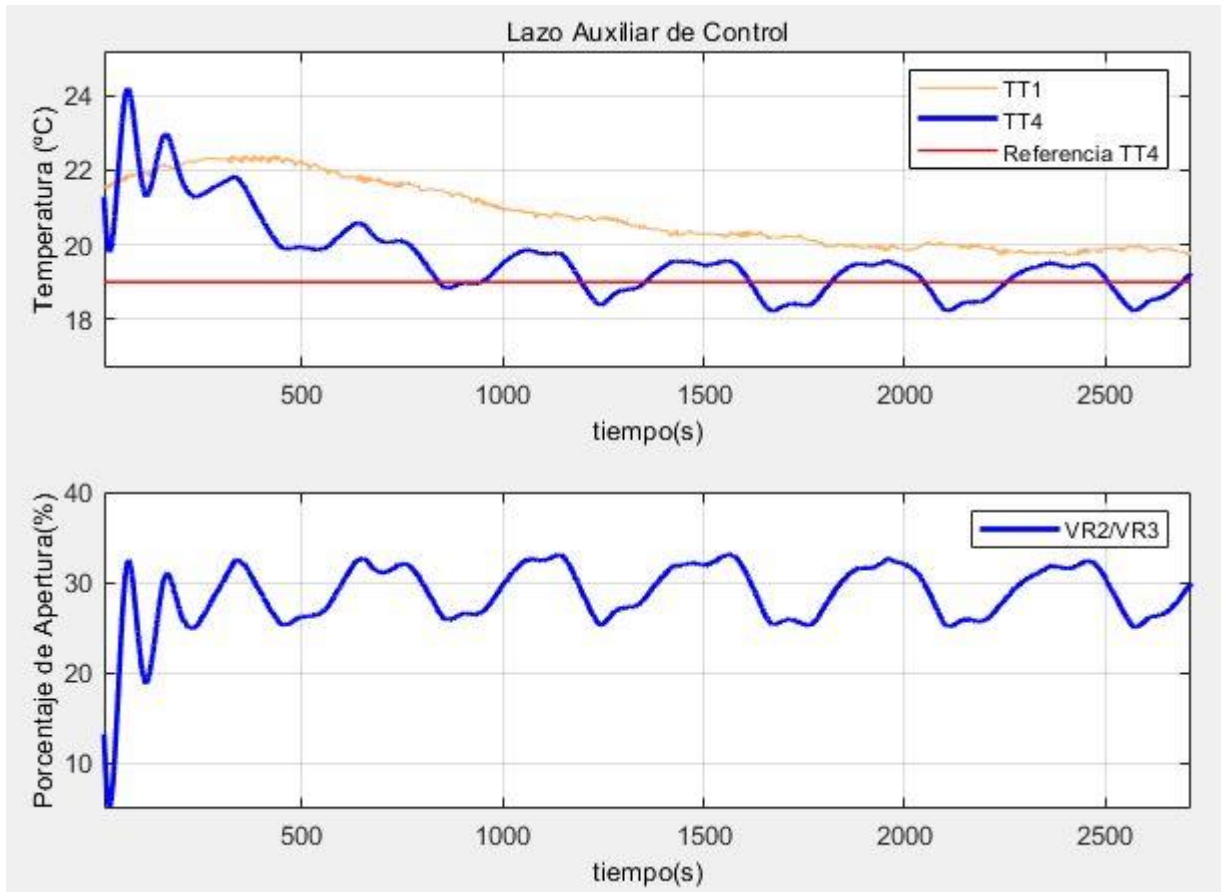


Figura 7.12 – Respuesta del lazo auxiliar de control implementado en LabView.

En la figura 7.12 se observa cómo TT4 oscila en torno a la referencia fijada de 19°C. Además, se ha incluido TT1, que es, en última instancia, la temperatura que más nos interesa.

Se puede apreciar cómo TT1 va lentamente hacia la referencia con oscilaciones muy leves, pero con cierto error. Con este ensayo se demuestra el error de medida de los sensores descrito en el apartado 4.1, de aproximadamente 0.8°C.

7.4. Programación de señales para ensayos de identificación en LabView.

Este punto es muy similar al 6.5., pues apenas hay cambios en las señales programadas. La diferencia más importante es que, ya que VR1 regula el caudal que circula por la planta real, será necesario establecer un mínimo de, por ejemplo, el 10% en VR1.

Esto tiene como objetivo proteger las resistencias R1 y R2, pues de no limitarlo sería posible que en determinados momentos VR1 tenga una apertura del 0%. Si esto ocurriese mucho tiempo, implicaría que no haya caudal de agua y que las resistencias puedan resultar dañadas.

La programación de esta señal se muestra en la siguiente imagen:

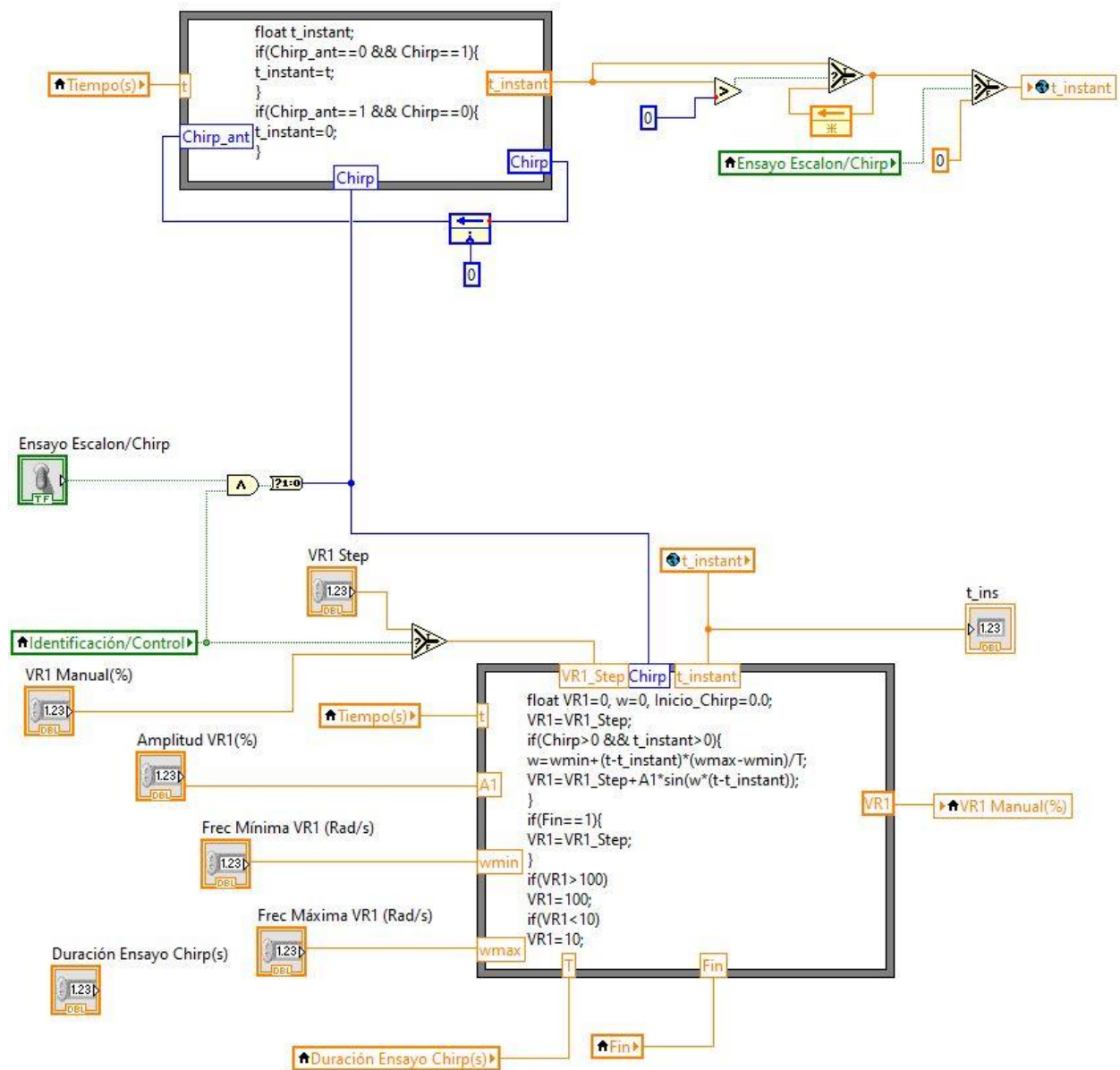


Figura 7.13 – Programación de señales para ensayos identificación con VR1 en planta real.

Hay que destacar que, si el usuario introduce una señal Chirp que en algún instante es inferior a 10 en VR1, se mantendrá en 10, por lo que la señal Chirp se verá alterada y el experimento no será válido.

En cuanto a la señal del DC de R1 y R2, sigue manteniendo su rango de 0 a 100, por lo que la programación es la misma que teníamos en el punto 6.5.

7.5. Programación de interfaz gráfica para ensayos de identificación.

Las interfaces gráficas que actúan sobre la planta real serán muy parecidas a las basadas en modelos del apartado 6.6, aunque habrá leves diferencias. La figura expuesta a continuación muestra la interfaz para ensayos de identificación sobre el sistema real:

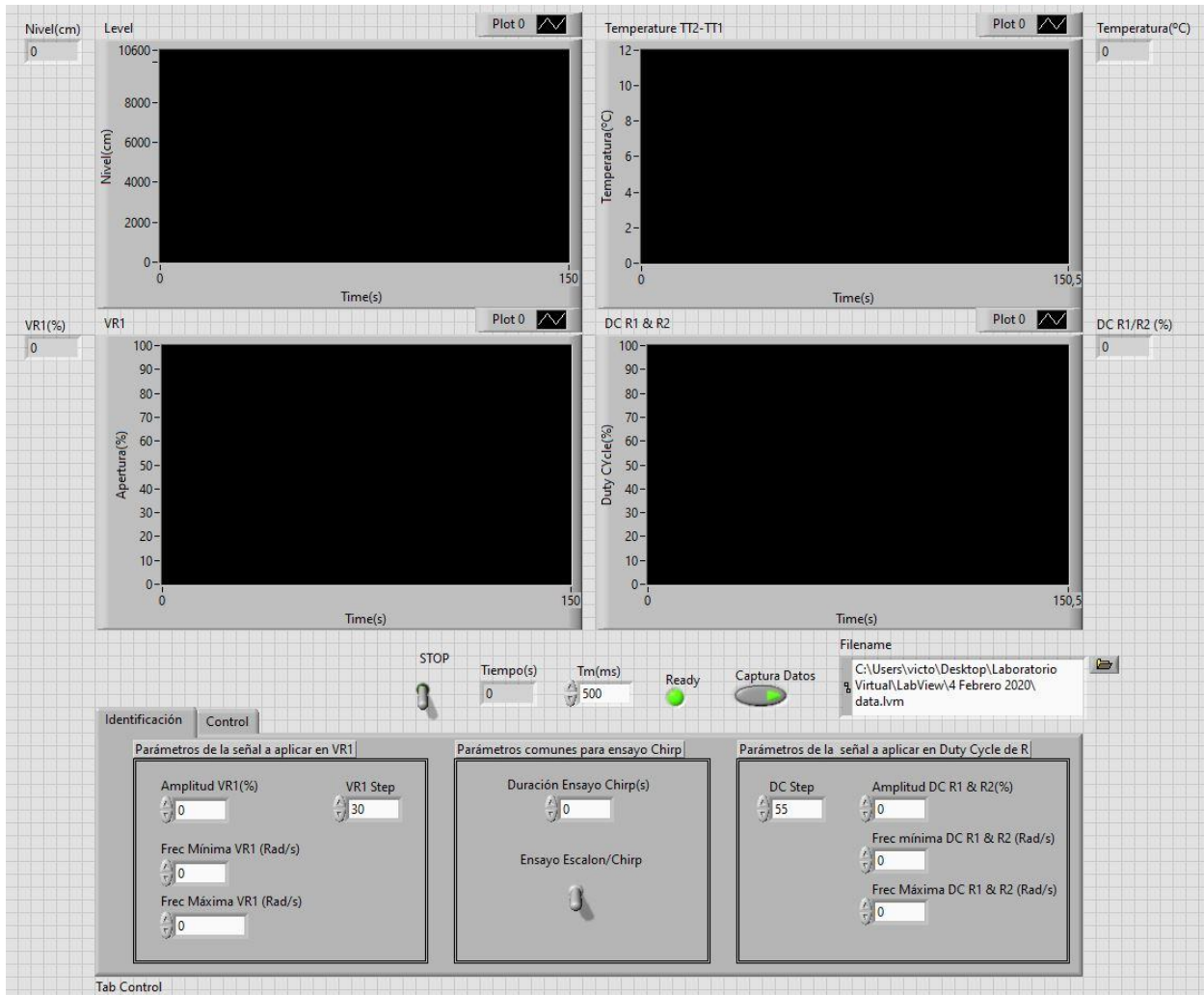


Figura 7.14 – Interfaz gráfica del programa de identificación sobre la planta real.

Como se puede ver en la figura 7.14, la única diferencia notable que existe entre esta pantalla y la que encontramos en el punto 6.6, es la presencia del indicador led (Ready).

7.6. Pruebas de funcionamiento sobre el programa.

A continuación, se muestran ensayos sobre la planta realizados mediante el programa de identificación desarrollado en LabView. Hay que destacar que el sensor capacitivo de nivel dejó de funcionar correctamente, por lo que los ensayos han sido realizados sobre el DC de las resistencias, midiendo el salto térmico TT2-TT1.

7.6.1. Ensayo ante escalones sobre el sistema real mediante interfaz gráfica.

Haciendo uso de la aplicación diseñada en LabView, se han introducido escalones de un 15% de amplitud respecto al punto de operación del DC (55%) de R1 y R2. Los resultados obtenidos se muestran a continuación:

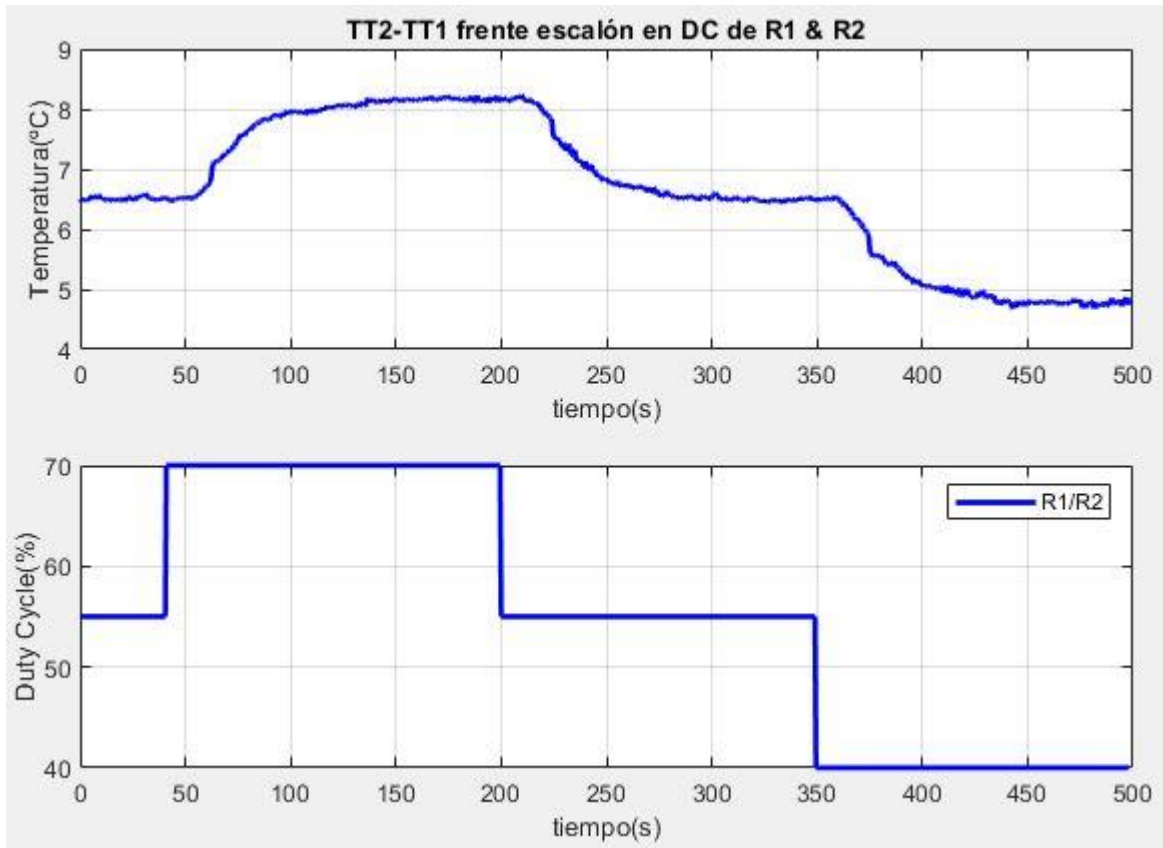


Figura 7.15 – Salto térmico frente a ensayo en escalón en DC mediante interfaz gráfica de identificación en LabView.

7.6.2. Ensayo Chirp sobre el sistema real mediante interfaz gráfica.

En este ensayo se ha aplicado una señal Chirp en el DC de R1 y R2 en torno al punto de operación, con una amplitud de un 20%, una frecuencia mínima y máxima de 0.001 y 0.05 rad/s respectivamente, y una duración de ensayo de 500 segundos. Los resultados obtenidos son los siguientes:

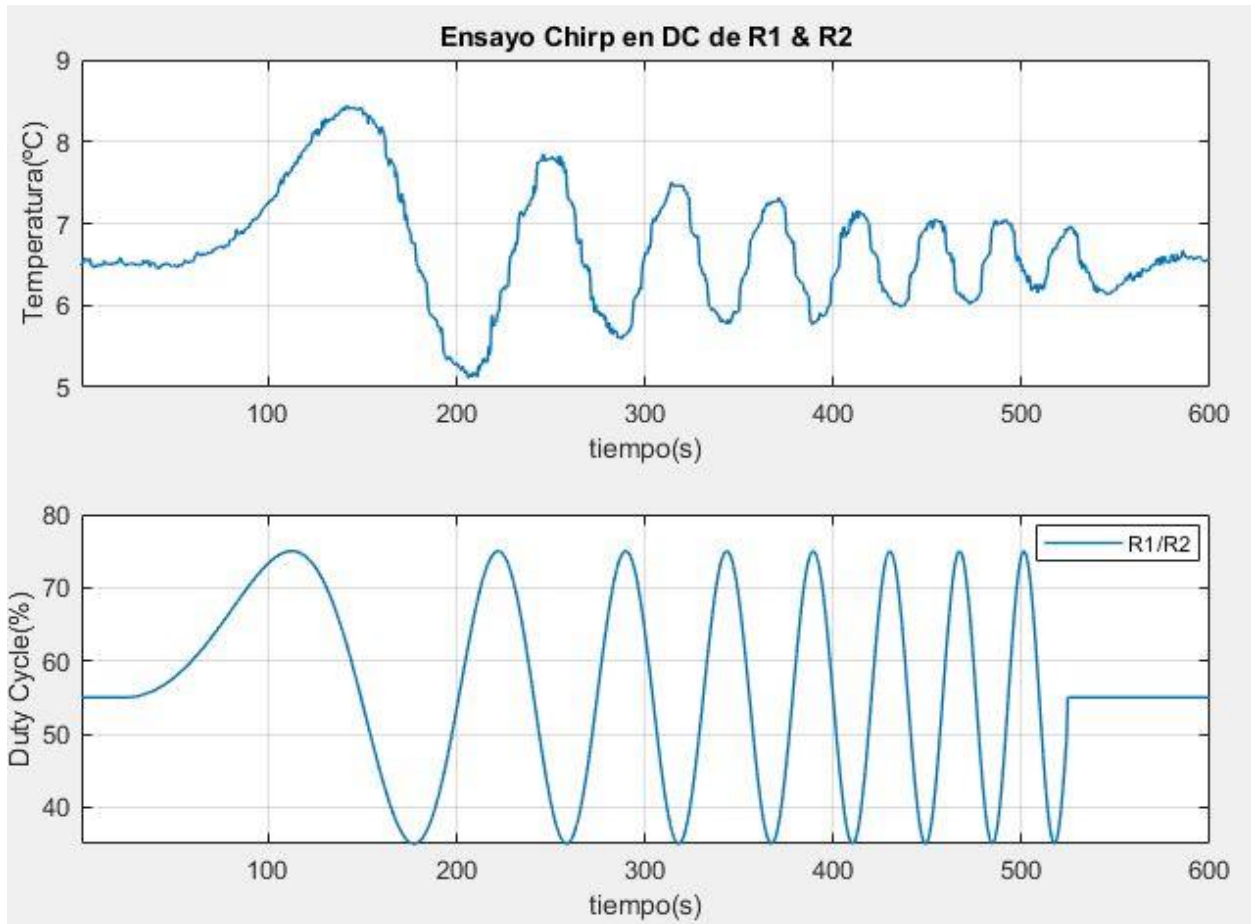


Figura 7.16 – Ensayo Chirp en DC mediante interfaz gráfica de identificación en LabView.

7.7. Programación de controladores en LabView.

La forma de implementación de los controladores se mantiene, teniendo también en cuenta que VR1 tendrá siempre como mínimo un 10% de apertura por cuestiones de seguridad.

7.8. Programación de interfaz gráfica para ensayos de control.

Al igual que en el punto 6.9., también se ha diseñado una pantalla para realizar ensayos de controladores, pero en este caso, sobre la planta real.

Dicha pantalla es la mostrada en la siguiente figura:

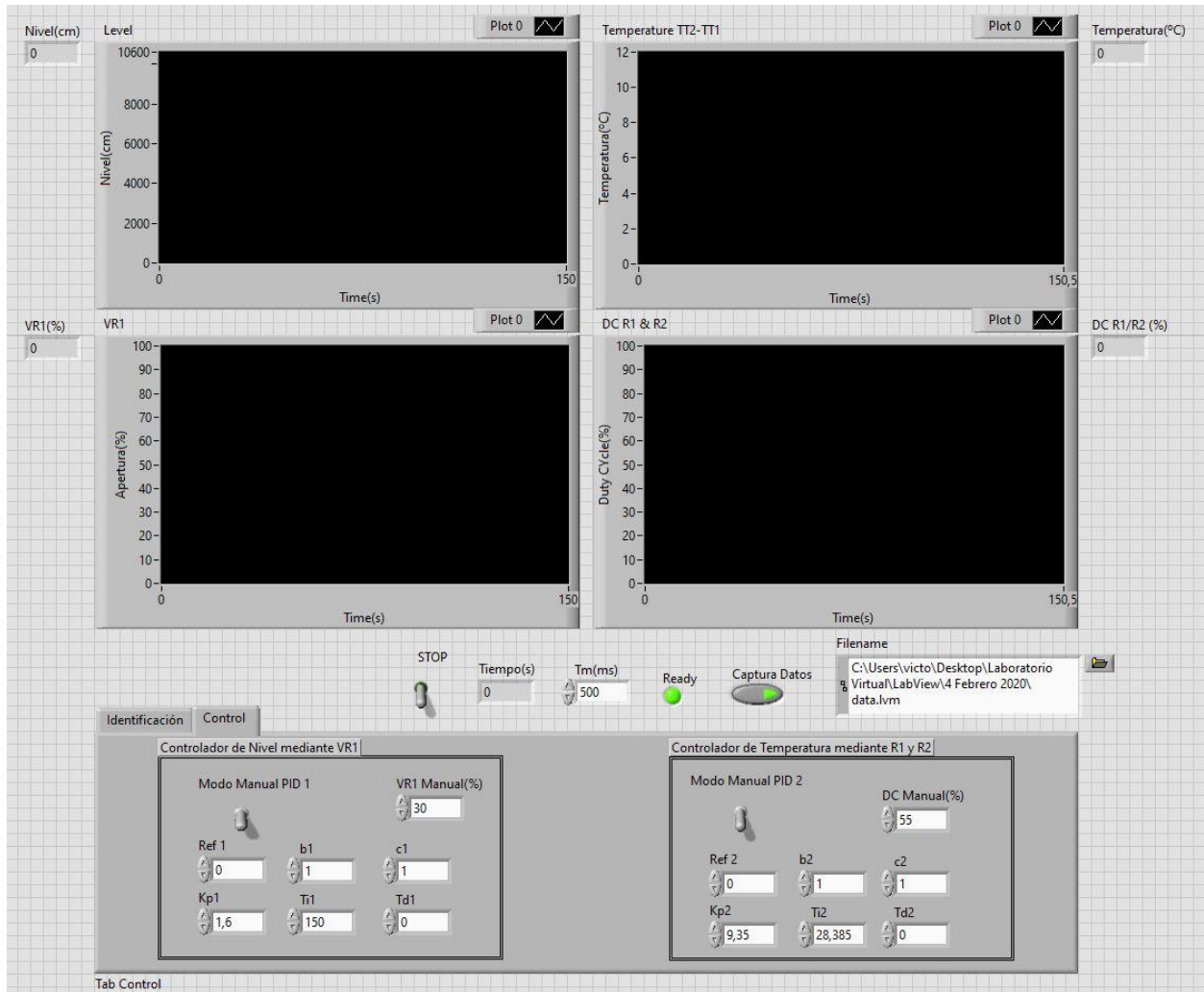


Figura 7.17 – Interfaz gráfica para la prueba de controladores sobre la planta real.

7.9. Pruebas de funcionamiento sobre el programa.

Durante la realización de ensayos de control sobre la planta con la interfaz diseñada en LabView, la resistencia de mayor potencia (R2, de 4kW) dejó de funcionar. Debido a que el relé que se encargaba de producir las conmutaciones para introducir un determinado DC en la resistencia resultó dañado, no ha sido posible realizar ensayos de control de temperatura sobre la planta real.

Como se comentó en el apartado 7.6., el sensor de nivel capacitivo también dejó de funcionar correctamente.

Sólo fue posible comprobar de forma visual que el control de temperatura era correcto, pero no fue posible grabar ningún experimento del mismo.

8 GUÍA DE USO DE LAS INTERFACES GRÁFICAS

8.1. Guía de uso de las interfaces gráficas sobre modelos lineales.

Esta sección estará dedicada a detallar cómo deben usarse las interfaces gráficas de forma correcta. A modo de guía, el usuario deberá seguir los pasos aquí expuestos para realizar los ensayos.

8.1.1. Guía de la interfaz gráfica de identificación.

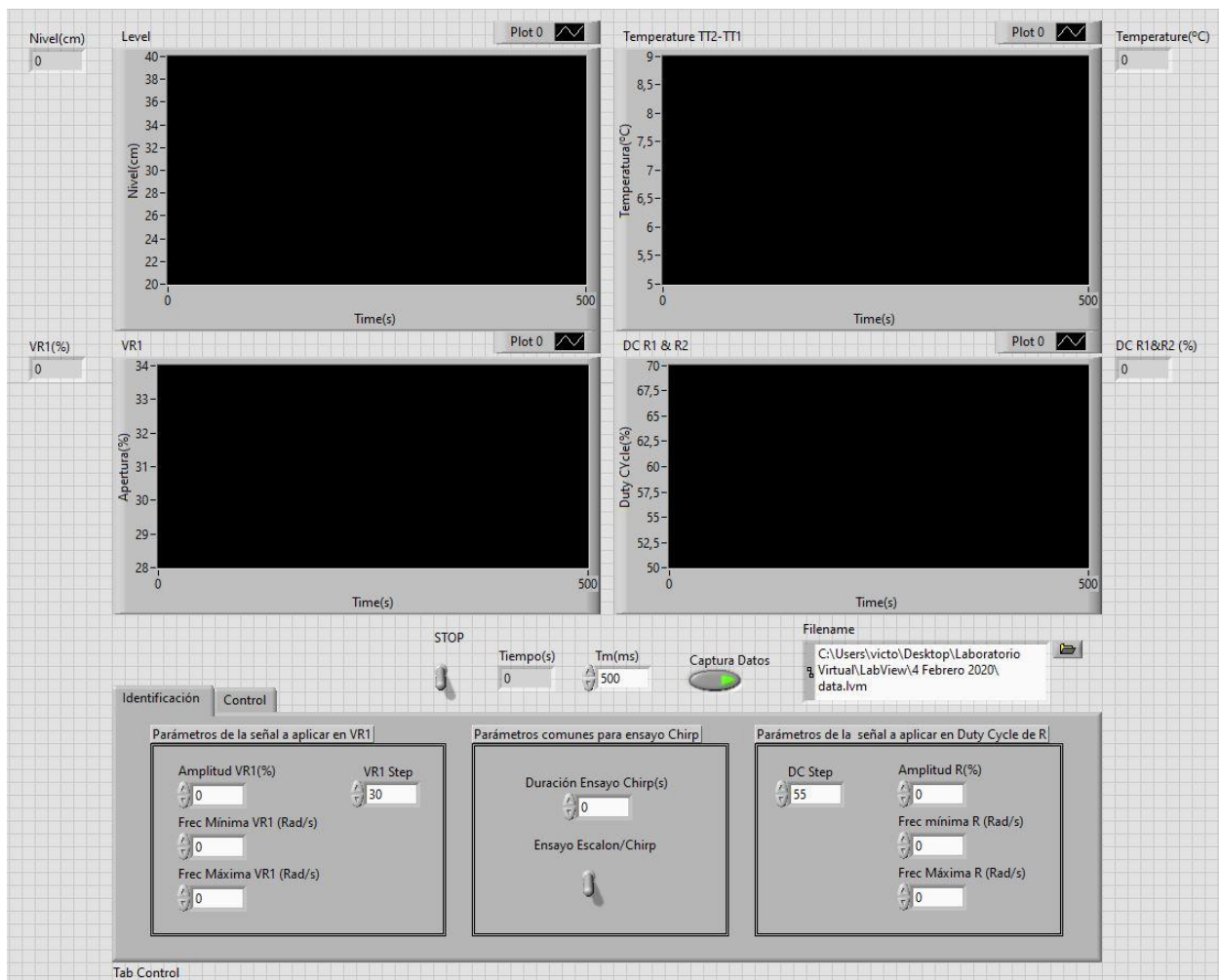


Figura 8.1 – Interfaz gráfica del programa de identificación sobre modelos lineales.

La idea es que el usuario tenga que elegir de forma sencilla entre si desea aplicar a los modelos incrementos en forma de escalón manipulando las entradas desde las casillas “Step”, o si prefiere introducir una señal Chirp parametrizada mediante las casillas disponibles en la interfaz. Esto puede hacerlo mediante el selector “Ensayo Escalon/Chirp” que puede verse en la figura 8.1. Dicho selector es válido para ambas entradas, las cuales serán representadas en las pantallas inferiores respectivamente. Las pantallas superiores mostrarán las respectivas salidas.

En el caso de que desee introducir una señal en escalón, únicamente puede elegir el valor de la entrada introducida. Si este modo (Ensayo Escalón) está activo, no será necesario introducir los parámetros de la señal Chirp.

En el segundo caso (ensayo Chirp), deberá seleccionar previamente la duración del ensayo Chirp, la amplitud

de la señal, y el rango de frecuencias que barrerá la señal senoidal introducida. Estos parámetros son modificables en línea.

En caso de que el usuario introduzca una amplitud de la señal Chirp igual a 0, la entrada seguirá respondiendo a los escalones introducidos. Por otro lado, la señal Chirp no tiene porqué oscilar respecto al punto de operación, sino que lo hará desde el valor introducido en su respectiva casilla de Step.

Además, se puede iniciar y detener el ensayo Chirp en cualquier instante para seguir realizando escalones. Si el usuario espera a que termine el ensayo Chirp, automáticamente vuelve al modo de identificación mediante escalones.

Para exportar los resultados de los experimentos realizados, se ha incluido un selector llamado “Captura Datos”. Mientras éste se encuentre activo, los datos estarán siendo almacenados en un archivo del tipo “LabView Measurement File”, con extensión “.lvm”. El usuario deberá elegir mediante la casilla “Filename” la ubicación donde quiere guardar el archivo, y el nombre del mismo con su correspondiente extensión.

Para graficar los resultados, se facilitarán al usuario dos funciones programadas en Matlab. La primera de ellas, llamada “lvm_import.m”, se encargará de obtener del archivo con extensión .lvm una estructura que contiene, además de cierta información, los datos del ensayo realizado. La segunda función, llamada “data_struct.m”, se encargará de llamar a la función anterior para organizar los datos del ensayo en una nueva estructura, que, además de ser más simple, contiene los nombres de las variables para facilitar la comprensión de qué representa cada fila y la programación de las figuras a representar. El usuario sólo debe hacer uso de la segunda función proporcionada.

A continuación se detalla un ejemplo de cómo hacer uso de las funciones:

Se guarda el archivo, por ejemplo, datos.lvm en la dirección indicada. En el command window de Matlab se escribe: nombre_estructura=data_struct('datos')

Se creará entonces una estructura con 7 filas:

nombre_estructura.t → tiempo

nombre_estructura.VR1 → Apertura de la válvula VR1.

nombre_estructura.R → DC de R1 y R2.

nombre_estructura.Level → Nivel.

nombre_estructura.Temp → Temperatura TT2-TT1.

nombre_estructura.Ref1 → Referencia de nivel.

nombre_estructura.Ref2 → Referencia de temperatura

*Nota: Deben estar en la misma carpeta el archivo .lvm y las funciones lvm_import.m y data_struct.m.

Por último, también se dispone de un botón de Stop para detener la ejecución del programa.

8.1.2. Guía de la interfaz gráfica de control.

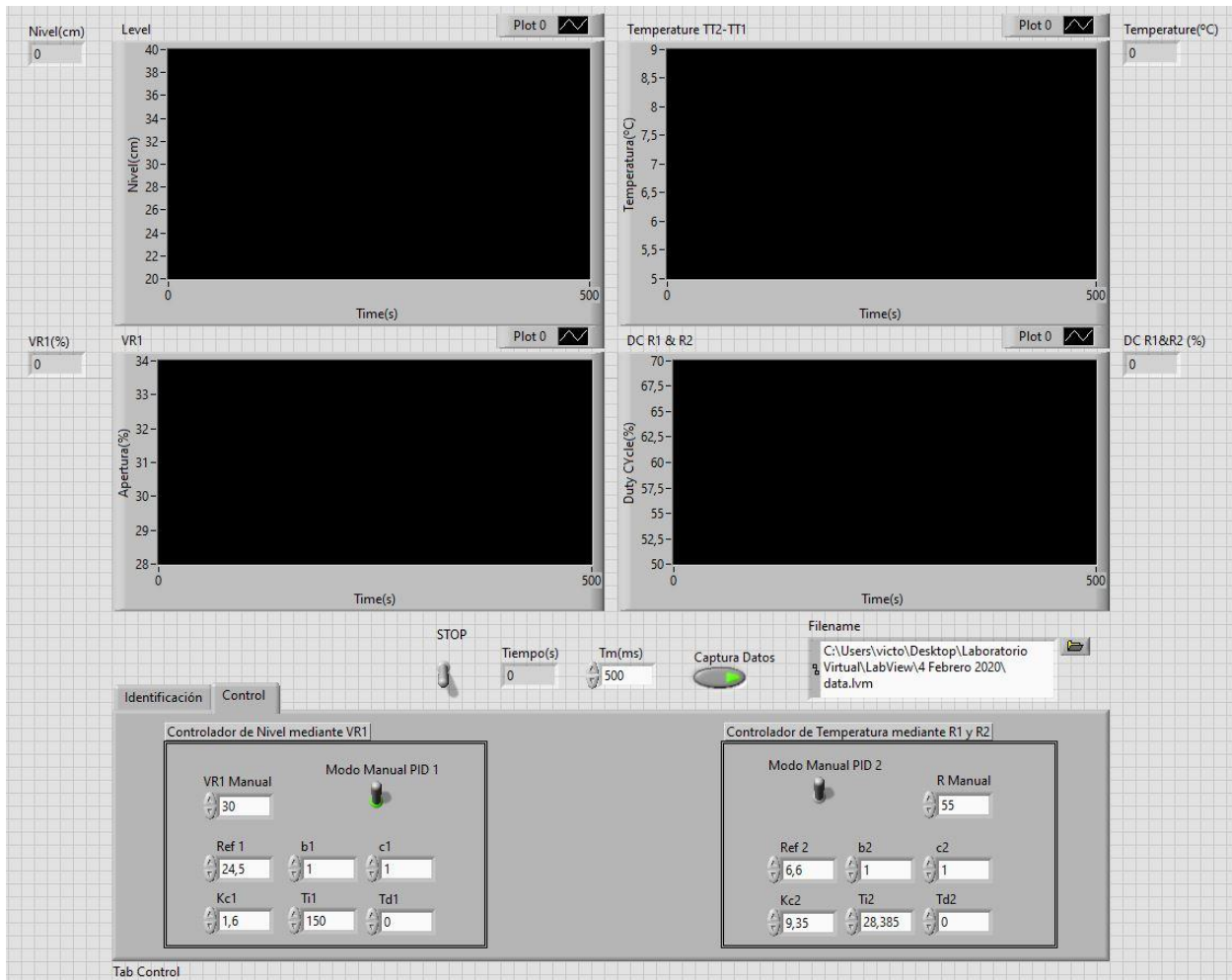


Figura 8.2 – Interfaz gráfica para la prueba de controladores sobre modelos lineales.

La interfaz de control permitirá al usuario introducir los parámetros de los controladores que haya diseñado para ponerlos a prueba sobre los modelos lineales. En cada pantalla superior se mostrarán las respectivas referencias y salidas, mientras que en las pantallas inferiores se graficarán las respectivas entradas.

En la figura 8.2 se puede observar que se da al usuario la opción de elegir entre los modos manual y automático, de forma que los ensayos siempre comenzarán en modo manual para después pasar al modo automático mediante los selectores “Modo Manual PID”.

Cuando el modo manual está activo, es el usuario quien decide qué entrada se aplica al modelo. Una vez activado el modo automático, la señal de control será calculada por el propio controlador.

Para configurar el programa, se debe introducir el valor de la referencia en el control numérico “Ref”, y los parámetros propios del controlador en forma ideal (siempre antes de iniciar la ejecución), tales como los valores del filtro de referencia (b y c) y las constantes del controlador (constante proporcional, tiempo integral y tiempo derivativo).

Se debe destacar que los ensayos nunca deben comenzar con un parámetro T_i (tiempo integral) igual a 0, pues si esto ocurre, internamente se generará una indeterminación numérica debido a la forma de la implementación del controlador.

También deberá mantener un tiempo de muestreo de 500ms para un correcto funcionamiento.

Al igual que en la interfaz de identificación, si se desea exportar los datos en un fichero de tipo LabView Measurement File (.lvm) debe rellenarse el campo Filename con la dirección donde se desea guardar el archivo y activar el botón de captura de datos. Se debe seguir el mismo procedimiento explicado anteriormente para

graficar los datos mediante las estructuras generadas con las funciones de Matlab.

8.2. Guía de uso de las interfaces gráficas sobre la planta real.

A continuación, se expone la parte de la guía en la que se detalla cómo utilizar el programa que interactúa con el sistema real.

8.2.1. Guía de la interfaz gráfica de identificación.

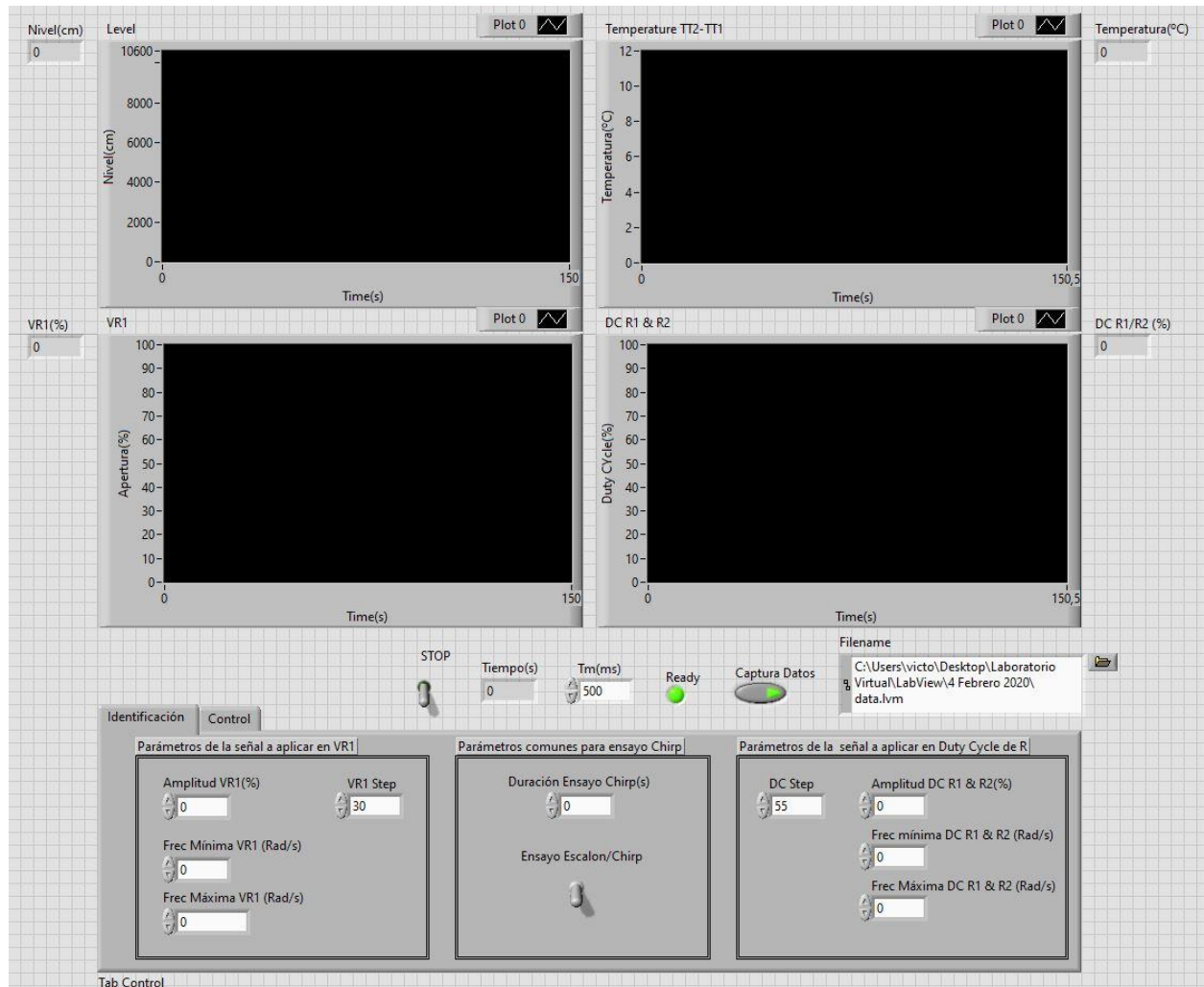


Figura 8.3 – Interfaz gráfica del programa de identificación sobre la planta real.

Para usar este programa, de forma adecuada, se deben seguir las indicaciones descritas en el apartado 8.1.1. con una diferencia, pues en este caso, habrá que esperar a que el led Ready se encienda, lo que indicará que el sistema ya se encuentra listo para trabajar.

Si se realizan modificaciones en los controles disponibles mientras el indicador está apagado, el sistema ignorará esta acción, tal y como se explicó en el apartado 7.2, dedicado al arranque y a la puesta en el punto de operación del sistema.

8.2.2. Guía de la interfaz gráfica de control.

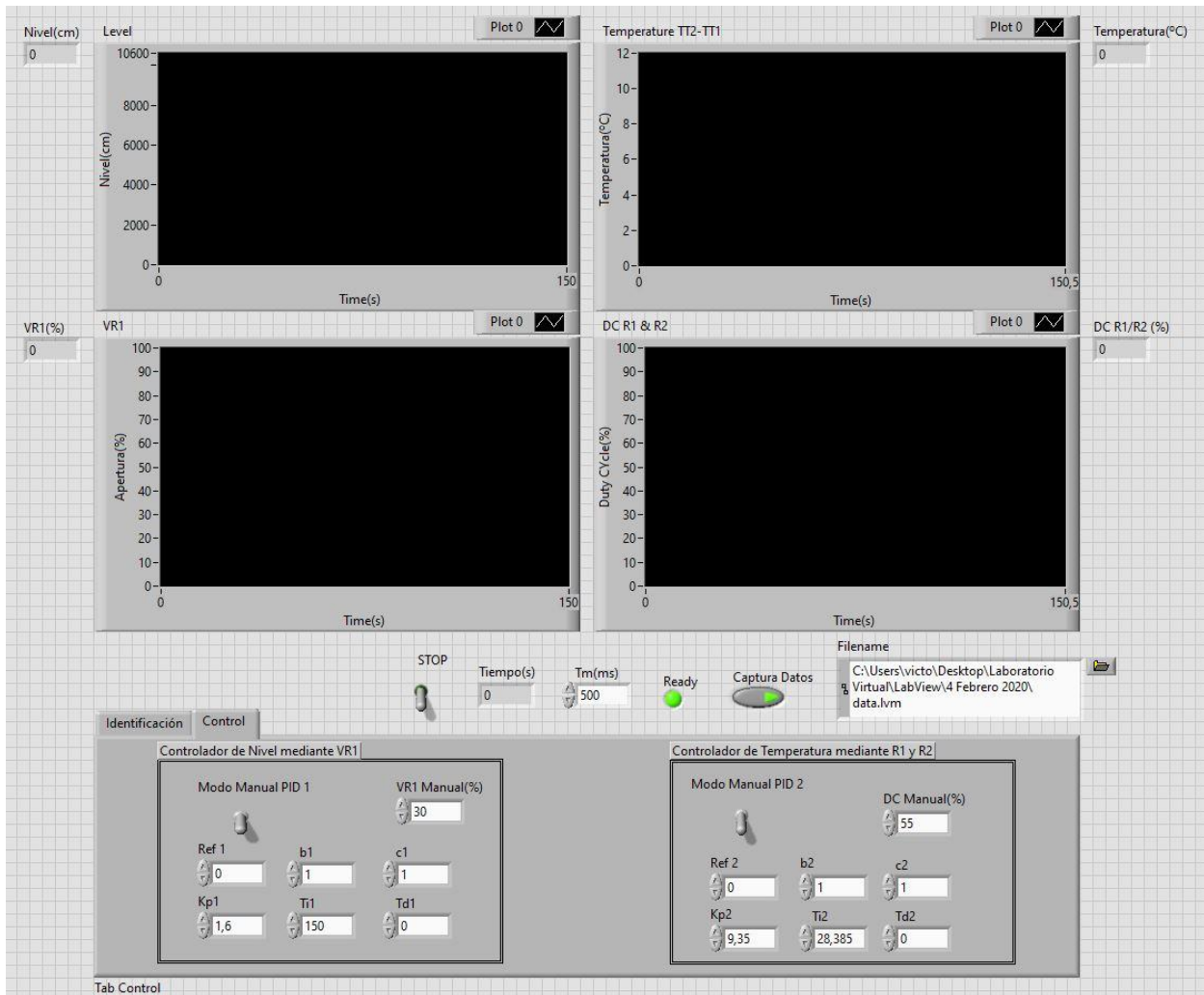


Figura 8.4 – Interfaz gráfica para la prueba de controladores sobre la planta real.

La forma de usar esta interfaz es la misma que la descrita en el apartado 8.1.2., pero como ocurría en el programa de identificación sobre el sistema real, también habrá que esperar a que se encienda el indicador led Ready para empezar a trabajar.

Al igual que en el apartado anterior, VR1 no podrá ser menor al 10%. Esto podría modificar el comportamiento del controlador diseñado en ciertos instantes.

REFERENCIAS

- [1] Alonso Alfaya, J. E. Desarrollo e implementación del sistema de control de la planta multiprocesos. *Trabajo de fin de grado*. 2013.
- [2] Rodríguez González, E. A. Identificación y desarrollo de controladores para planta multiprocesos. *Trabajo de fin de grado*. 2019.
- [3] G.U.N.T. Gerätebau GmbH, Manual de Experimentos del Sistema Didáctico Modular para la Automatización de Procesos RT 450, 2005.
- [4] Mayta Mamani, Luis Alberto, and Edwin Ronald Tintaya Gutierrez. Diseño De Un Controlador PID - Difuso En La Plataforma De LabView Para El Control De Niveles De Agua Aplicados En El Laboratorio De Control Y Automatización De La EPIME. 2018.
- [5] Ruiz, Ángel & Jiménez, Jorge & Sanchez, Jose & Dormido, S.. (2013). Control Basado en Eventos de Sistemas de Primer Orden Con Retardo. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*. 10. 302–312. 10.1016/j.riai.2013.04.003.
- [6] Julian-Laime, Edgar & Almidón Elescano, Ángel. (2018). Manual de programación LabVIEW 9.0. 10.5281/zenodo.2557815.
- [7] National Instruments, Control Design Toolkit User Manual, 2008.
- [8] García, D., Matrikon OPC UA Tunneller - infoPLC. 21 noviembre 2018 [consulta: 3 febrero 2020] Disponible en: <https://www.infopl.net/noticias/item/104781-matrikon-opc-ua-tunneller>.
- [9] Acevedo, H. G., & Galvis, O. G. V. Implementación de un sistema de control para regular la velocidad y posición de motores industriales utilizando el protocolo de comunicación OPC. *Revista UIS Ingenierías*, ISSN-e 2145-8456, ISSN 1657-4583, Vol. 18, N°. 2 (Abril - junio), 2019, págs. 147-158.
- [10] Morilla, F., Garrido, J., Vázquez, F. Control Multivariable por Desacoplo. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, Vol. 10, N°. 1 (Enero - marzo), 2013, págs. 3–17.