

PROYECTO FIN DE CARRERA

GRADO EN INGENIERÍA EN LAS
TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

DESARROLLO DEL SISTEMA DE CONTROL Y
PUESTA EN FUNCIONAMIENTO DE UNA
COLUMNA DE DESTILACIÓN

Autor: José Antonio Souto Alemán

Tutor: D. Daniel Limón Marruedo

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

Sevilla, 2016



Proyecto Fin de Carrera
Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

**DESARROLLO DEL SISTEMA DE
CONTROL Y PUESTA EN
FUNCIONAMIENTO DE UNA COLUMNA
DE DESTILACIÓN**

Autor:

José Antonio Souto Alemán

Tutor:

D. Daniel Limón Marruedo

Profesor titular

Dep. de Ingeniería de Sistemas y Automática

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2016

Proyecto Fin de Carrera: DESARROLLO DEL SISTEMA DE CONTROL Y PUESTA EN
FUNCIONAMIENTO DE UNA COLUMNA DE DESTILACIÓN

Autor: José Antonio Souto Alemán

Tutor: D. 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, 2016

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis maestros

Agradecimientos

Mi más sincero agradecimiento a mi tutor, D. Daniel Limón Marruedo, por toda la atención y la ayuda prestadas a lo largo de todo el año de trabajo en este proyecto.

Agradecer también a mi familia, en especial a mi padre, D. José Antonio Souto Rubiales, por el apoyo recibido, así como por la motivación y ayuda necesarias para acometer este proyecto.

Y por último, agradecer a Patricia Fernández Díaz por todos los ánimos que me ha mandado, y por toda la ayuda prestada a lo largo de todo el proceso de maquetación y formato de la memoria.

Espero que todos podáis estar orgullosos de este proyecto en el que tanto esfuerzo he puesto.

José Antonio Souto Alemán

Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

Sevilla, 2016

Resumen

En los laboratorios de nuestra escuela se pueden encontrar varias plantas de procesos a las que se le da poco o ningún uso.

El objetivo de este proyecto es el de poner en funcionamiento una de ellas, concretamente una planta de destilación, para darle uso académico tanto en futuros proyectos fin de carrera como en prácticas de asignaturas en las que resulte de interés.

Para ello se ha logrado desarrollar toda la puesta en funcionamiento de la misma: Ubicación, montaje, canalizaciones, conexionado, desarrollo de un sistema de control en tiempo real, y testeo.

Gracias al sistema de control en tiempo real desarrollado, ahora se dispone de un software accesible y fácil de comprender, donde se recogen todas las señales de la planta y se tratan para eliminar el ruido y poder trabajar con las mismas. Esto permite poder implementar fácilmente controladores que se desarrollen en futuros proyectos con lazos de control que requieran la lectura de cualquiera de las señales de la planta, y que además actúen sobre la misma.

Se ha obtenido, por tanto, un entorno de trabajo nuevo para el departamento que ofrece muchas posibilidades para los alumnos que estén interesados en experimentar con el control automático de sistemas reales y de procesos químicos.

Abstract

There are a considerable number of process plants in our school laboratories which are nearly no used at all.

The objective of this project is to put one of them back in use, specifically a distillation plant, for academic purpose in future final degree projects and practical lessons, also.

For that reason, it has been achieved to develop all the fine tuning: Location, building, pipelines, connection, real time control system, and testing.

Due to the real-time control system developed, an accessible and understandable software is already available, in which all plant signals are collected and processed to eliminate the noise in order to work with them. This allows to easily implement controllers developed in future projects that may require the lecture of any of the plant signals, and even operate the plant with them.

Therefore, a new work environment has been achieved for the department, which offers many possibilities for the students interested in the control of real-time systems and chemical processes.

Índice

| | |
|---|-----------|
| Agradecimientos | 9 |
| Resumen | 11 |
| Abstract | 13 |
| Índice | 14 |
| 1. Introducción al proyecto | 16 |
| 1.1 <i>Antecedentes, objetivos y descripción del proyecto.</i> | 16 |
| 2. Descripción técnica de la planta de destilación | 17 |
| 2.1 <i>Descripción general de la planta.</i> | 17 |
| 2.2 <i>Descripción de los equipos de la planta.</i> | 19 |
| 2.3 <i>Descripción de los dispositivos de control de la planta.</i> | 31 |
| 2.4 <i>Seguridad.</i> | 34 |
| 2.5 <i>Mantenimiento.</i> | 34 |
| 3. Descripción técnica del montaje físico realizado | 35 |
| 3.1 <i>Descripción del sistema planteado.</i> | 36 |
| 3.2 <i>Conexión eléctrico.</i> | 37 |
| 3.3 <i>Sistema de alimentación de agua.</i> | 42 |
| 4. Descripción técnica del sistema de control en tiempo real | 43 |
| 4.1 <i>Software de control.</i> | 43 |
| 4.2 <i>Interfaz de usuario.</i> | 51 |
| 5. Ensayos realizados | 54 |
| 5.1 <i>Representación de datos obtenidos tras un ensayo.</i> | 54 |
| 5.2 <i>Ensayo con mezcla de etanol y agua.</i> | 56 |
| 6. Conclusiones y consideraciones futuras | 60 |
| 7. Referencias | 62 |

1. Introducción al proyecto

1.1 Antecedentes, objetivos y descripción del proyecto.

El proyecto realizado consiste en la puesta a punto de la planta de destilación que se encontraba en los laboratorios del Departamento de Automática para su futuro uso con fines académicos, tales como la realización de proyectos fin de carrera o prácticas de laboratorio en asignaturas en las que el aprendizaje sobre procesos químicos o control de procesos en tiempo real sea de interés.

Para lograr se ha trabajado durante todo el curso académico realizándose las siguientes tareas:

1. Relocalización y limpieza de la planta, la cual se encontraba almacenada en malas condiciones tras el incendio de los laboratorios hace años. Se decidió como emplazamiento de la misma el Laboratorio de Proyectos de Automática, situado en la planta 1 del edificio de los laboratorios del Departamento de Control y Automática, por ser el único lugar con el espacio suficiente del que se disponía y que cumpliera con las normas de seguridad.
2. Investigación y aprendizaje sobre destilación y procesos químicos, para facilitar posteriormente el manejo y el uso de la planta.
3. Análisis del estado general de la planta a través del propio armario de control del que dispone, montaje del sistema de alimentación de agua con conexión a las tomas de los laboratorios, y testeado de la planta con agua para comprobar que todos los dispositivos siguen funcionando y operando correctamente.
4. Montaje completo de un sistema de adquisición de datos y de control en tiempo real a través del software Labview, donde se incluye en el trabajo realizado todo el conexionado eléctrico, que es donde más problemas se encontraron a la hora de tratar el ruido en la señal, y el desarrollo del software que permite operar la planta en tiempo real, visualizando todos los datos de interés y almacenándolos luego para su posterior análisis en Matlab.
5. Pruebas finales con una solución de etanol y agua y análisis general de los resultados obtenidos. Se adelanta que la planta presentará futuros problemas a un control automático que se tendrán que resolver en los siguientes proyectos que se realicen sobre la misma.

2. Descripción técnica de la planta de destilación

2.1 Descripción general de la planta

La planta está montada sobre una estructura vertical formada por tubos de acero soldados, que está diseñada para permitir el uso de un elevador de horquilla para maniobrar con la unidad y colocarla en su posición inicial (Foto 1).

El elemento principal de la planta es una torre de platos perforados de 50mm de diámetro, fabricada en vidrio y dividida en dos series de cuatro platos cada una, dando lugar a un total de ocho platos. Las dos series de platos están divididas por una sección central donde se introduce la alimentación de producto. La disposición vertical de los mismos permite el flujo en contracorriente de vapor y líquido cuando la columna está en funcionamiento. La torre en su totalidad estaba forrada en material aislante, para intentar minimizar las pérdidas de calor que sufre el vapor a lo largo de su recorrido por la misma (Figura 1).

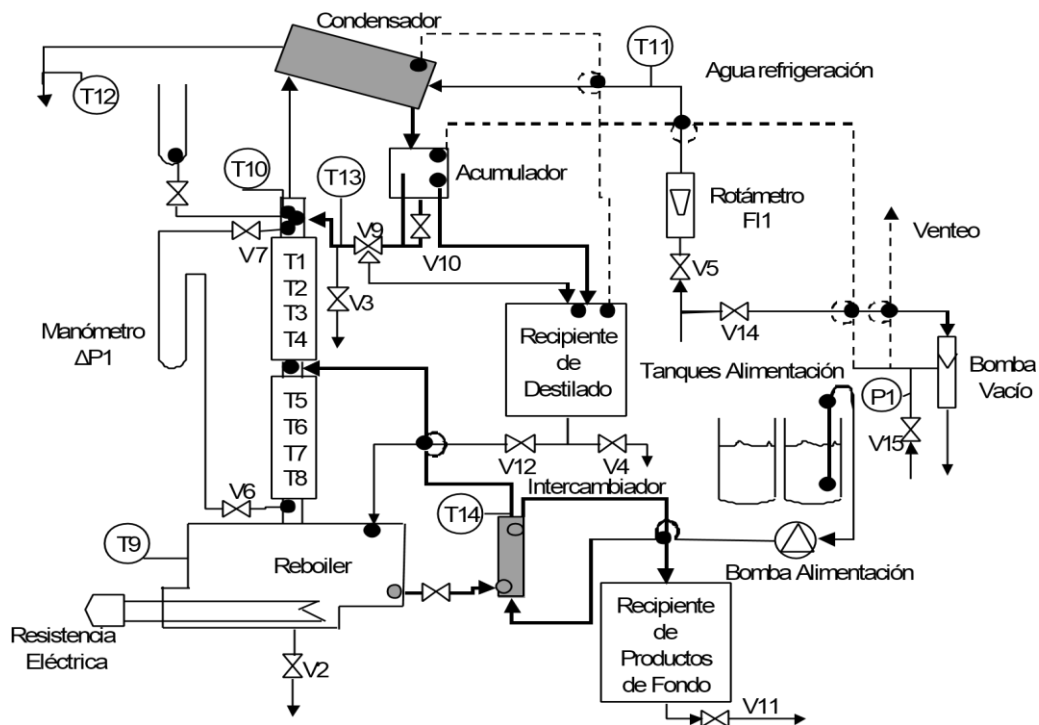


Figura 1. Esquema funcional de la planta

La alimentación llega a la sección central gracias a una bomba peristáltica que la impulsa desde uno de los dos tanques de almacenamiento de 5 litros disponibles.

La mezcla se calienta en el reboiler, y los vapores que ascienden por la torre de platos se enfrían en el condensador de tipo inundado que está situado en la parte superior.

El condensado cae hacia el acumulador por gravedad, y una vez allí se dirige a la válvula de reflujo, la cual puede mandar el condensado de vuelta a la columna o sacarlo como destilado hacia su tanque de almacenamiento.

Se dispone además de un recipiente para almacenar un azeótropo (por si se trabaja con mezclas azeotrópicas), una bomba de vacío (por si se quiere trabajar a presiones reducidas), un intercambiador de calor para los productos de fondo, un manómetro y toda la instrumentación necesaria para el correcto funcionamiento de la planta.

En cuanto a los dispositivos de control, se incluye un armario de control y los termopares, para medir la temperatura.



Foto 1. Vista general de la planta

2.2 Descripción de los equipos de la planta

2.2.1 El reboiler

El reboiler es un recipiente cilíndrico de acero inoxidable, situado en la base de la columna (Foto 2), que incluye un elemento calefactor a prueba de fuegos que, mientras está en uso, debe estar sumergido.



Foto 2. Reboiler

El reboiler incorpora un sensor de nivel para asegurarnos de que está condición de seguridad se cumple: Cuando la resistencia no está totalmente sumergida,

un Led se enciende en el armario de control para indicarnos que no se debe operar el reboiler en esas condiciones.

El nivel mínimo es de unos 6,5L.

Una vez que esta condición se cumple, podemos operar el mismo mediante el armario de control, pulsando el botón ON correspondiente al reboiler, y seleccionando la potencia que queremos.

La resistencia es capaz de suministrar un máximo de 2,0 KW, lo que se corresponde a un nivel de tensión de 240V.

Merece la pena destacar que, en nuestro caso, el voltaje máximo disponible es de 220V, lo que corresponde a una potencia máxima de 1,5 KW.

Para realizar el llenado inicial del reboiler basta con usar la apertura colocada en la parte superior del mismo, y volver a cerrarla una vez se vaya a utilizar para evitar pérdidas de vapor.

2.2.2 El intercambiador de productos de fondo

Si queremos operar en régimen de destilación continua, debemos abrir la válvula situada en la parte inferior lateral del reboiler (Válvula V1), que envía los productos de fondo a través del intercambiador de los productos de fondo (Foto 3), hacia su tanque de almacenamiento correspondiente.

El flujo de la corriente de fondos viene fijado por el nivel al que esté colocada la válvula V1, funcionando ésta a modo de rebosadero.

El intercambiador de productos de fondo (Foto 3), tiene la función de enfriar dicho producto, que abandona el reboiler en su punto de ebullición. El enfriamiento se produce bien por un agua refrigerante, o bien a través de la misma alimentación de producto. De esta última forma aprovechamos el calor que aporta la corriente de fondo para precalentar la alimentación, lo cual mejora el balance térmico de la columna.

Dicho intercambiador consiste en un cilindro de acero inoxidable en cuyo interior se encuentra un tubo en espiral por donde pasa la alimentación o agua refrigerante.

El producto almacenado en el tanque de productos de fondo se puede recoger a través de la válvula V11, que se encuentra en la base del recipiente de almacenamiento de los productos de fondo.

Cuando se opera de forma discontinua, la válvula V1 permanece cerrada, no obteniéndose, por lo tanto, ningún producto de fondo.



Foto 3. Intercambiador de productos de fondo

2.2.3 La bomba de alimentación

La alimentación es aspirada de los tanques de almacenamiento de alimentación e impulsada hacia la columna a través del intercambiador de productos de fondo gracias al uso de una bomba peristáltica.

Dicha alimentación puede ser insertada en tres puntos:

1. A través de la sección intermedia que separa las zonas superior e inferior de la columna.
2. Por encima del plato superior (en cuyo caso tendríamos una torre de agotamiento).
3. Por debajo del plato inferior (en cuyo caso se tendría una torre de enriquecimiento).

La bomba de alimentación incluye un tubo de Viton que es adecuado para el uso de todas las mezclas aconsejadas por el vendedor. Si se utilizaran otras habría que comprobar que fueran compatibles con dicho material (Foto 4).

Dicha bomba está diseñada para un flujo de alimentación de aproximadamente 1ml/min por cada revolución del eje.

Puesto que la velocidad de giro puede variar de 0 a 300rpm, la alimentación varía entre 0 y 300 ml/min.

Para alcanzar una mayor precisión en la medida del flujo de la corriente de alimentación, es necesario obtener la curva de calibración de la bomba, que representa el flujo real de alimentación frente a la velocidad de giro del motor, fijada ésta en el armario de control mediante el correspondiente selector.

Dicho selector es una ruedecilla que puede girar hasta diez vueltas completas, cada una de ellas dividida en 100 segmentos. Basta con medir cada una de las diez posiciones de vuelta completa para obtener la curva.

Para ello se desconecta el tubo de alimentación que va a la columna y lo insertamos en un recipiente para depositar los productos que son impulsados por la bomba. Medimos cuánto se tarda en llenar aproximadamente 90ml en cada una de las posiciones (Tabla 1).



Foto 4. Bomba de alimentación

| Posición selector | Velocidad motor (rpm) | Líquido recogido (ml) | Tiempo (min) | Curva Experimental (ml/min) | Curva Teórica (ml/min) |
|-------------------|-----------------------|-----------------------|--------------|-----------------------------|------------------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 30 | 88 | 3,25 | 27,07 | 30 |
| 2 | 60 | 91 | 1,66 | 54,82 | 60 |
| 3 | 90 | 94 | 1,03 | 91,26 | 90 |
| 4 | 120 | 85 | 0,74 | 114,86 | 120 |
| 5 | 150 | 88 | 0,60 | 146,67 | 150 |
| 6 | 180 | 96 | 0,53 | 181,13 | 180 |
| 7 | 210 | 90 | 0,43 | 209,30 | 210 |
| 8 | 240 | 95 | 0,40 | 237,50 | 240 |
| 9 | 270 | 103 | 0,38 | 271,05 | 270 |
| 10 | 300 | 98 | 0,33 | 296,97 | 300 |

Tabla 1. Calibración de la bomba de alimentación

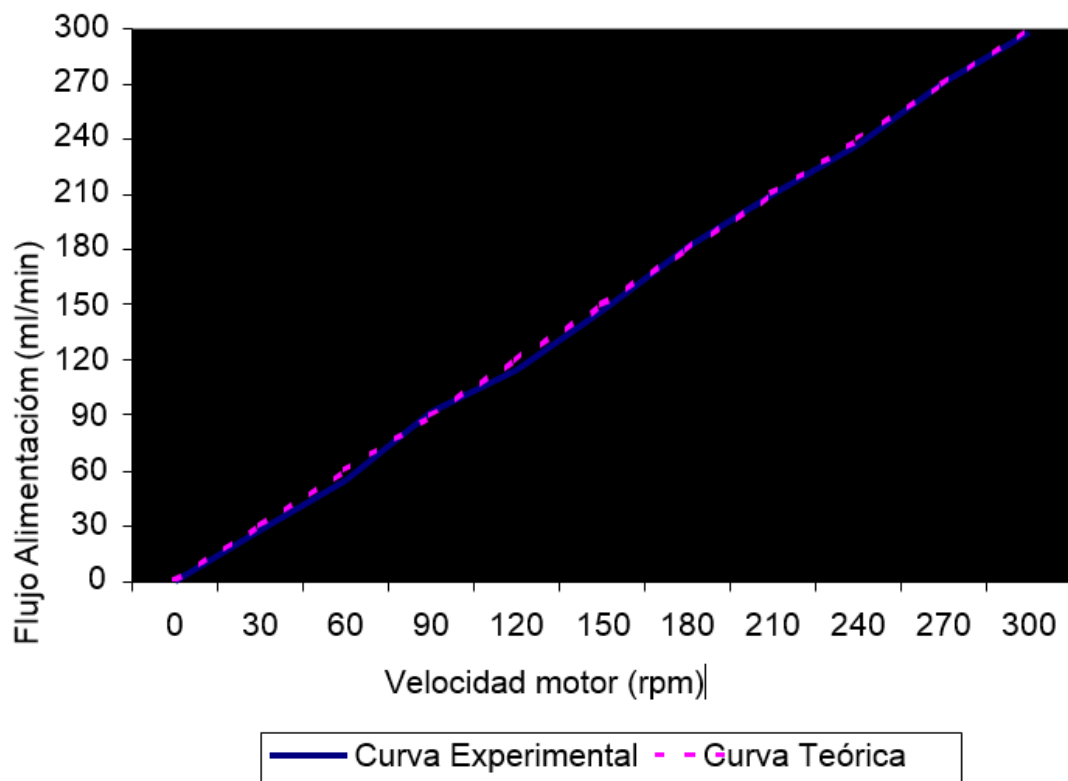


Figura 2. Calibración de la bomba de alimentación

2.2.4 La torre de platos

Como ya se ha comentado, la columna de cristal incorpora ocho platos divididos en dos secciones de cuatro platos cada uno, unidos mediante una varilla central que sirve de soporte (Foto 5).

Actualmente no se encuentran visibles, puesto que la columna está forrada en material aislante para prevenir las pérdidas de calor.

Dichos platos son platos perforados, para permitir el paso ascendente del vapor, que a su vez incorporan un rebosadero con un tubito de descarga hacia el plato inferior para permitir el paso descendente del líquido. Por tanto, el contacto líquido-vapor se produce en contracorriente.



Foto 5. Torre de platos

En la Figura 3 podemos ver un esquema del conjunto de platos y del camino que siguen los flujos. Se puede observar también la posición de los termopares que permiten la medición de la temperatura en los platos.

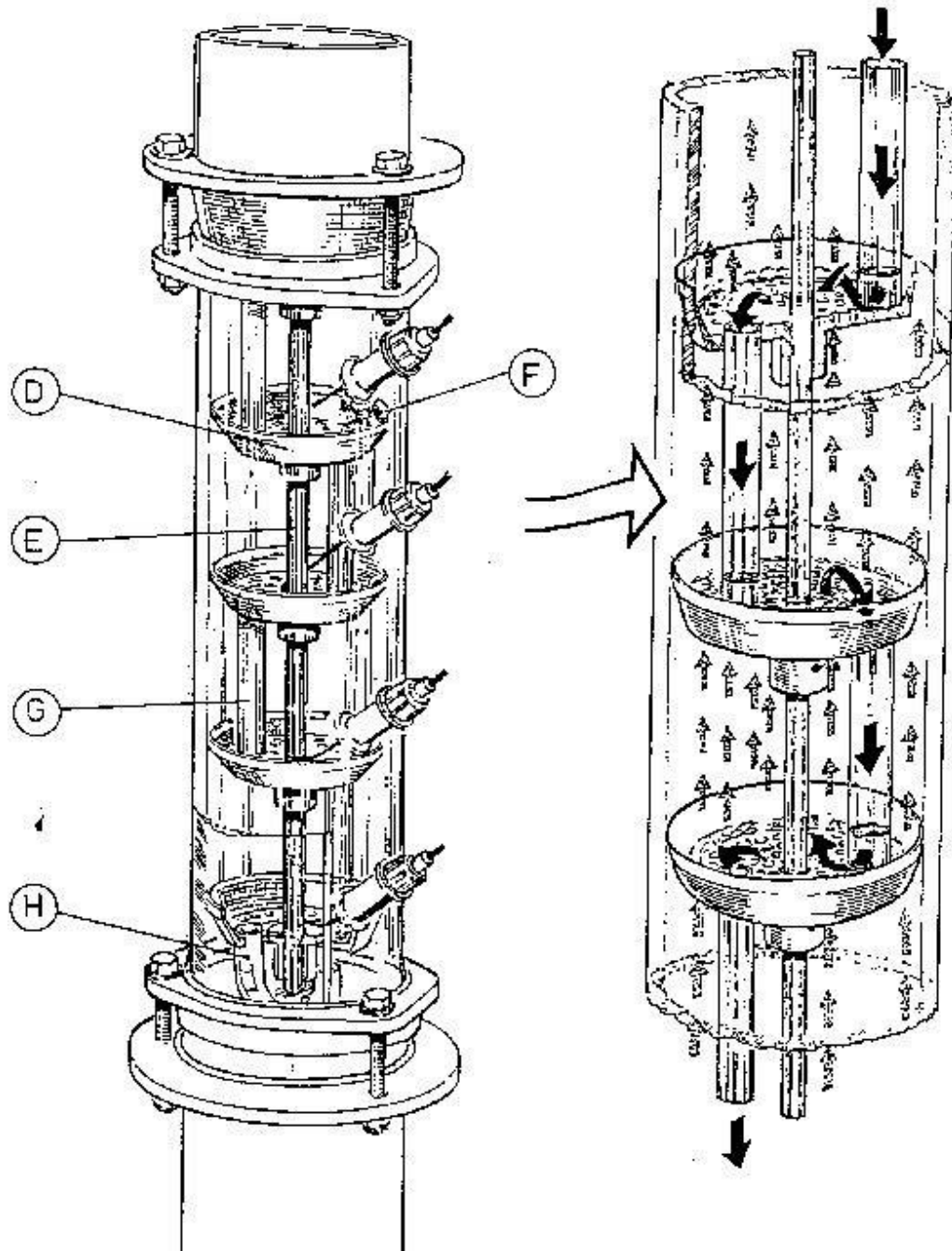


Figura 3. Torre de platos

2.2.5 Condensador

El vapor que abandona el plato superior llega a un condensador refrigerado con agua (Foto 6).

Se trata de un condensador de tipo inundado, donde el agua de refrigeración circula por un serpentín.

La carcasa incorpora una válvula de alivio de presión para proteger al sistema de un posible bloqueo en el sistema de venteo o de un fallo en la refrigeración.

El agua de refrigeración entra al condensador regulada mediante la manipulación de una válvula de diafragma (Válvula V5), y el flujo se mide mediante un rotámetro. El caudal ideal debe estar ligeramente por encima de los 3 L/min.

El condensado se recoge en un decantador de vidrio, que actúa a modo de acumulador, aunque al cerrar la válvula V10 puede actuar como decantador, obteniendo una fase ligera y una pesada, cada una con una salida distinta, aunque normalmente solo se usa así en caso de tener azeótropos.

En nuestro caso, el condensado entra en el acumulador y sale por gravedad siempre que se supere el nivel del rebosadero, que conecta directamente el acumulador con la válvula de reflujo.



Foto 6. Condensador

2.2.6 La válvula de reflujo

La válvula de reflujo es una válvula de solenoide de tres vías, que recibe las órdenes de control del contador de reflujo situado en el armario de control. (Foto 7).

Esta válvula dirige el condensado bien al recipiente de productos de cabeza o bien de nuevo a la columna como reflujo en la cabeza de la misma.



Foto 7. Válvula de reflujo

El tiempo que permanece en cada posición se fija a través del armario de control.

Cuando el condensado vuelve como reflujo podemos usar la válvula V3 para medir el flujo de vapor que llega al condensador o para drenar el tubo por el que pasa dicho condensado.

El contenido del tanque de productos de cabeza puede ser drenado directamente al reboiler mediante la válvula V12 o bien extraerlo de la planta mediante la válvula V4.

2.2.7 Los termopares

Para controlar las calidades de los productos, se deberán usar inferencias por temperatura, para lo cual es necesario, pues, medirlas y monitorizarlas. Para ello disponemos de un conjunto de catorce termopares situados en puntos estratégicos de la planta. Los que están situados en los platos miden la temperatura del líquido retenido en dicho plato (que coincidiría con la del vapor que lo abandona si se llegase a alcanzar el equilibrio), y los termopares del resto del proceso dan la temperatura de la corriente en la que están inmersos.

En la Tabla 2 se enumeran los termopares, así como el punto de medida en el que se encuentran.

| Tipo | Número Termopar | Punto de medida |
|---------------------|-----------------|--|
| Temperatura plato | T1 | Plato superior de la columna. |
| | T2 | Segundo plato. |
| | T3 | Tercer plato. |
| | T4 | Cuarto plato. |
| | T5 | Quinto plato. (Alimentación) |
| | T6 | Sexto plato. |
| | T7 | Séptimo plato. |
| | T8 | Octavo plato. (Último). |
| Temperatura proceso | T9 | Líquido del rebolier. |
| | T10 | Vapor que llega al condensador. |
| | T11 | Entrada del agua de refrigeración. |
| | T12 | Salida del agua de refrigeración. |
| | T13 | Corriente de reflujo. |
| | T14 | Alimentación tras pasar por el intercambiador de fondos. |

Tabla 2. Termopares

Los termopares de los platos son fijos, pero los de proceso se pueden mover si interesa más conocer la temperatura de algún otro punto.

2.2.8 Venteo al exterior

Todos los recipientes del equipo están conectados a un conducto de venteo común situado en la parte superior del tanque de almacenamiento del destilado. Se ha conectado dicho conducto a un tubo que va hacia la ventana del laboratorio para poder sacar los posibles vapores a la atmósfera de forma segura (Foto 8).



Foto 8. Venteo

2.2.9 La bomba de vacío

El equipo permite también trabajar a presiones reducidas mediante una bomba de vacío que lleva incorporada. Para trabajar en este modo, el tubo flexible que actúa de venteo se conecta a la bomba de vacío en lugar de estar abierto a la atmósfera, a la vez que se mantiene abierta la válvula V14 para permitir el paso de agua de refrigeración a través de la bomba. Mediante la válvula de tobera V15 regularíamos el nivel de vacío que se quiere alcanzar en la torre, que quedará marcado en un manómetro de aguja que también va incorporado a la bomba.

2.2.10 Válvulas

Por último, enumeramos el conjunto de válvulas especificando su localización en el equipo y su posición (abierta o cerrada), que debe mantener según el régimen de operación que se imponga. Se puede ver dicha clasificación en la Tabla 3.

| Número Válvula | Localización / Función | Posición |
|----------------|--|--|
| V1 | Lateral del reboiler. Su función es permitir o bloquear la salida de fondos. | Se mantendrá cerrada mientras realizamos la operación de llenado del reboiler y mientras operamos en discontinuo. En régimen de destilación continua debe permanecer abierta. |
| V2 | Fondo del reboiler. Sirve para drenar el contenido del reboiler o tomar muestras del mismo. | Debe permanecer cerrada en todo momento. Se puede abrir brevemente para obtener muestras (prestar especial atención a la temperatura). |
| V3 | Conducto de reflujo. Sirve para drenar dicho conducto o tomar muestras del reflujo. | Debe permanecer cerrada en todo momento a menos que se quiera tomar una muestra o drenar el conducto. |
| V4 | Fondo del recipiente de destilado. Nos permite drenar el recipiente o tomar muestras. | Debe permanecer cerrada a menos que se quiera realizar alguna de las operaciones mencionadas. |
| V5 | Suministro de agua de refrigeración. Bloquea o permite el paso de agua de refrigeración al condensador. | Debe permanecer abierta siempre que el equipo esté funcionando. |
| V6 | Fondo de la columna. Permite la medida de la caída de presión. | Debe permanecer siempre cerrada. Abrir poco tiempo, y siempre antes que V7. |
| V7 | Cabeza de la columna. Permitía la medida de la caída de presión. | Debe permanecer siempre cerrada. Abrir poco tiempo. |
| V8 | Fondo del recipiente de dosificación de azeótropos. | Mantener cerrada salvo que se lleve a cabo una destilación con mezcla azeotrópica. |
| V9 | Válvula de reflujo. Controla la dosificación entre reflujo y destilado. | Cuando está cerrada todo el condensado vuelve como reflujo a la torre. Si se abre va a hacia el tanque de productos de destilado. |

| | | |
|------------|---|--|
| V10 | Fondo del decantador. Determina si el recipiente actúa como decantador o simplemente como acumulador. | La válvula sólo se mantendrá cerrada en destilaciones con mezclas azeotrópicas. |
| V11 | Base del recipiente de productos de fondo. Permite drenar su contenido o tomar muestras del mismo. | Se debe mantener cerrada salvo en caso de querer realizar alguna de las operaciones mencionadas. |
| V12 | Base del recipiente de productos de destilado. Permite drenar su contenido o tomar muestras del mismo. | Debe permanecer cerrada mientras el equipo esté funcionando. |
| V13 | No instalada. | |
| V14 | Suministro de agua fría. Permite o bloquea el paso de agua fría hacia la bomba de vacío. | Debe permanecer cerrada a no ser que realicemos una destilación a presión reducida. |
| V15 | Bomba de vacío. Permite trabajar o no a presión reducida y controlar el nivel de vacío. | Debe permanecer cerrada a no ser que realicemos una destilación a presión reducida. |

Tabla 3. Válvulas

2.3 Descripción de los dispositivos de control de la planta

La planta cuenta con un armario de control proporcionado por el fabricante que se encarga del suministro eléctrico de la misma con sus protecciones, de la adquisición, tratamiento y visualización de las señales de los sensores de la planta y de la manipulación de las variables de actuación. También implementa un sistema de seguridad funcional de la planta.

Todas las señales son transmitidas por el armario de control a través del cableado que conecta el armario con la planta (Foto 9).

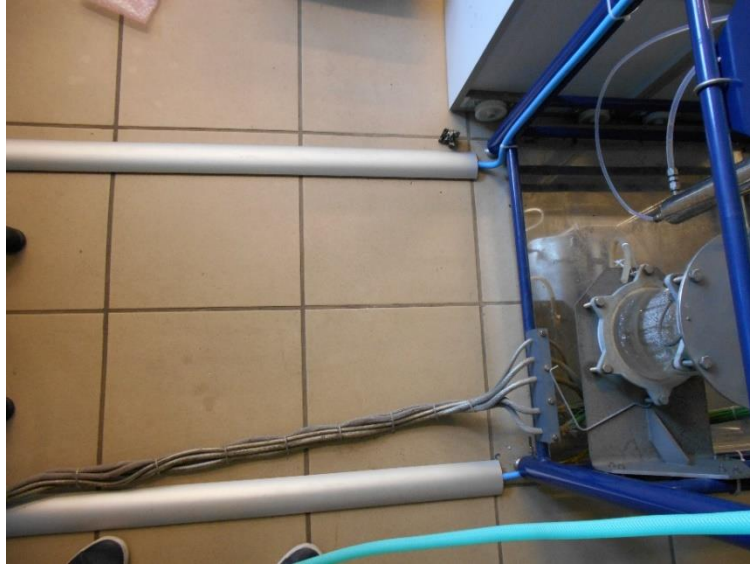


Foto 9. Cableado de la planta

2.3.1 El armario de control

La primera característica notable del armario de control es que nos permite trabajar en cuatro modos de funcionamiento diferentes según la posición del selector que hay bajo cada columna del mismo (Figura 4):

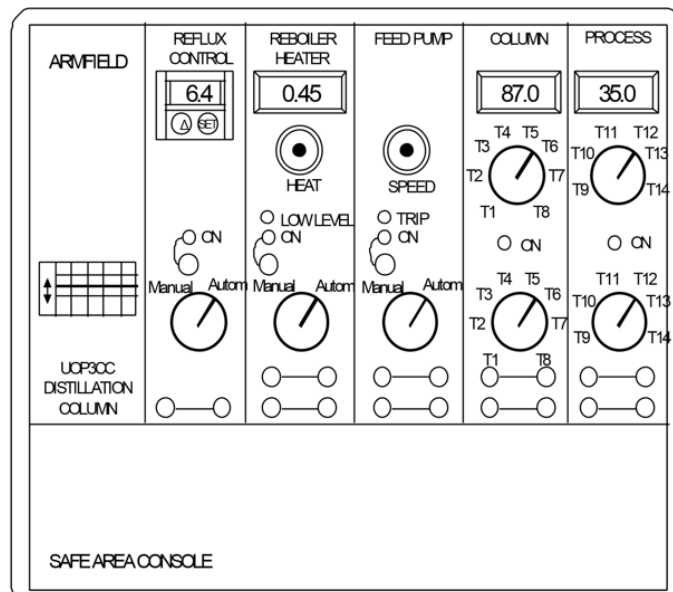


Figura 4. Armario de control

- Manual: Para cuando se quiera operar la planta directamente desde el armario de control usando los potenciómetros de cada columna y los botones ON.
- ON/OFF Control: Para operar con un control tipo “Todo/Nada” a través de los conectores inferiores de cada columna usando, por ejemplo, un PLC.
- Input Socket: Para operar la planta directamente a través de los conectores que se encuentran justo encima de los ON/OFF mediante señales con un rango de 0 a 5V usando, por ejemplo, un PLC.
- I/O Port: Para operar la planta a través del puerto de entrada/salida situado en la parte posterior del armario. Es el que conectaremos al PC para usar el sistema de control en tiempo real que se ha desarrollado. Tanto las señales que transmite como su conexión se detalla más adelante en el Capítulo 3.

Los elementos que podemos controlar a través del armario son los siguientes:

- La válvula de reflujo.
- La potencia del reboiler.
- La velocidad del motor de la bomba.

También se pueden monitorizar las temperaturas de los catorce termopares de la planta (Foto 10).

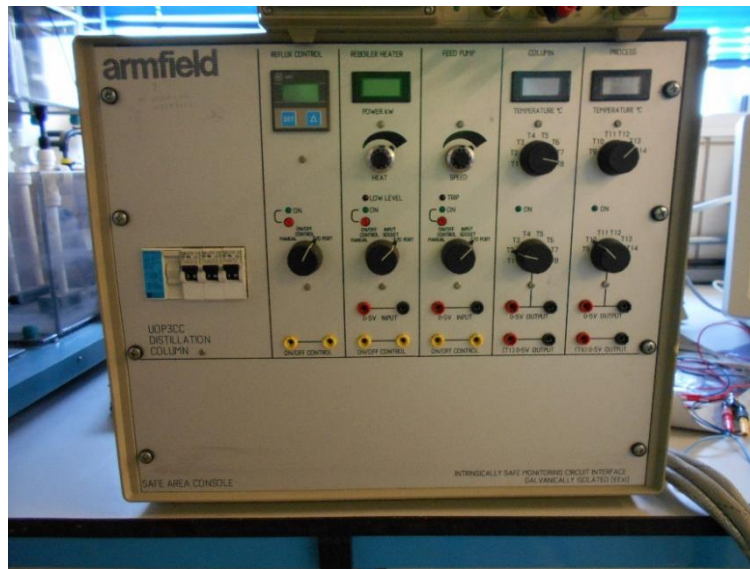


Foto 10. Armario de control

Para el control de reflujo, debemos introducir los segundos para los que, en cada ciclo, debe estar abierta la válvula o cerrada (reflujo o destilado). Se explica mejor con un ejemplo, tal y como ocurre en el manual de la planta:

- Lo primero que se debe hacer es fijar la duración del ciclo, que es la suma de los tiempos que permanece la válvula cerrada y abierta. Por ejemplo: 10 segundos.
- Luego se fija la relación de reflujo, que es la relación de tiempos de la válvula (entre posición cerrada y abierta). Por ejemplo: 2 segundos.
- Por tanto, tenemos dos ecuaciones simples: $L+D=10$ y $L/D=2$, de donde obtenemos fácilmente que $L=6,67$ segundos y $D=3,33$ segundos.

Ahora debemos introducir dichos valores en el armario de control. Para ello hacemos lo siguiente:

- Pulsamos el botón SET tres veces.
- Aparecen unos dígitos parpadeantes que se ajustan con el botón Δ . Al pulsar dicho botón, el dígito que parpadee aumentará en una unidad. Para cambiar de dígito habrá que pulsar el botón SET. Mientras en la esquina del display aparezca el símbolo CY- estaremos introduciendo el tiempo que está la válvula abierta (reflujo), y si aparece CY+ estaremos introduciendo el tiempo que está la válvula cerrada (destilado).
- Para hacer efectivo este control, deberemos colocar el selector en la posición MANUAL, y darle al botón de ON. Si estuviera apagado, la válvula permanecería todo el tiempo abierta. Si se quisiera controlar desde el software Labview, habría que colocar el selector en la posición AUTOMÁTICO.

Este selector también está presente en las columnas del reboiler y la bomba de alimentación.

En el caso del reboiler disponemos de un display donde se muestra la potencia aportada por la resistencia eléctrica, y un potenciómetro para variarla. Si el indicador de Low Level se enciende, querrá decir que la resistencia no está totalmente sumergida y, por lo tanto, la operación ha dejado de ser segura.

En la columna de la bomba controlaremos la velocidad por medio de un selector de diez vueltas completas, y un indicador que nos avisa si el motor de la bomba tiene algún problema (TRIP).

Las dos últimas columnas nos permiten ver cada una de las temperaturas obtenidas por los termopares, pudiendo cambiar la que se muestra por medio de un selector.

2.4 Seguridad

Aunque la columna está diseñada para mantener una operación segura, cualquier equipo de laboratorio implica procesos o procedimientos que pueden ser potencialmente peligrosos. Los peligros potenciales más importantes asociados al equipo son los siguientes:

- Heridas por shocks debidos a descargas eléctricas.
- Fuegos o explosiones causados por el uso de productos altamente inflamables, tanto en fase líquida como en vapor.
- Envenenamiento por la utilización de materiales tóxicos.
- Quemaduras por tocar elementos del equipo a altas temperaturas.
- Quemaduras por entrar en contacto con líquidos o vapores a altas temperaturas.
- Daños causados en los ojos.

Estos accidentes pueden ser evitados si el equipo es regularmente supervisado, y el personal y los estudiantes conocen perfectamente los riesgos potenciales que derivan del uso de la planta.

Es importante que la planta esté siempre colocada a más de dos metros de cualquier llama, fuente de chispas o zona de alta densidad de cargas electromagnéticas, sobre todo si los productos utilizados son fácilmente inflamables.

2.5 Mantenimiento

Para obtener una vida más larga del equipo se requiere llevar a cabo un buen mantenimiento del mismo. Alguno de los aspectos más importantes a la hora de realizarlo son:

- Desconectar el equipo del suministro eléctrico cuando no se vaya a utilizar.
- Comprobar cada cierto tiempo todas las conexiones de tubos (las roscas) para evitar fugas de vapores que pueden ser tóxicos o inflamables.
- Después de usar el equipo, abrir la cabeza de la bomba peristáltica para que no se mantenga presionado el tubo de Vitón, y así alargar la vida del mismo.
- Revisar todos los tubos de plástico rígido del equipo para que no mantengan posiciones que dan lugar a estrangulamientos.
- Si el equipo no va a ser usado durante un largo período de tiempo, drenar todos los productos que se encuentren en el mismo, y almacenarlos correctamente.
- Comprobar que los termopares están realmente inmersos en el líquido cuya temperatura tratan de medir.

3. Descripción técnica del montaje físico realizado

3.1 Descripción del sistema planteado

El objetivo es desarrollar un sistema de control que realice la adquisición de todas las señales de la planta, realice el tratamiento de señal que sea necesario, y las presente en un entorno accesible para que cualquier alumno pueda luego implementar controladores en el mismo.

La solución empleada para desarrollar el sistema de control consiste en el uso de un PC para controlar, mediante un software que se ha diseñado, toda la planta. En el diseño se piensa también en dejar libre una posible conexión hacia un PLC.

El montaje elegido consiste en la conexión del puerto I/O del armario de control hacia unos módulos, a través de un cable de banda, que permiten separar cada una de las señales y posibilitan la derivación al PLC ya mencionada. La conexión final al PC se realiza mediante dos tarjetas PCI que se han instalado en el PC, proporcionadas por el departamento.

Después de varias pruebas, se decidió conectar las señales de temperatura, que son las más críticas, en diferencial, debido a los problemas de ruido en la señal que se encontraron a lo largo de las mismas. Este tipo de conexión limita la cantidad de señales que podemos usar, pues necesita del doble de pines que una conexión tipo single-ended, pero disminuye sustancialmente el ruido. Las tarjetas PCI elegidas aceptan este tipo de conexión, una de ellas incluso de forma nativa, y ambas proporcionan una cantidad de pines suficiente como para poder conectar todas las señales de las que disponemos.

Para el software de control se ha elegido el entorno de desarrollo Labview, ya que proporciona un entorno de trabajo eficiente, compatible con las tarjetas PCI utilizadas, y fácilmente comprensible por los alumnos de la escuela debido al uso que se hace del mismo en distintas asignaturas.

Hay que destacar que ya se realizaron pruebas funcionales de una derivación hacia un PLC. Se encontraron serios problemas de ruido en la señal cuando se trabajaba con una conexión simultánea PC/PLC desde los cables de los módulos intermedios. Mi recomendación para un futuro intento, sería instalar un dispositivo en la sección intermedia a modo de interruptor que sólo permitiera el flujo eléctrico hacia uno de los dos dispositivos. Otra solución es conectar el PLC directamente al PC, y que el PLC lea las señales desde el software de control que se ha realizado.

3.2 Conexión eléctrico

Para montar todo el sistema de adquisición de datos, se ha realizado todo el conexionado de señales eléctricas que parten del armario de control hacia el pc.

Se ha hecho uso de un módulo intermedio para facilitar todo el cableado y la manipulación posterior del mismo, pues se ha planteado para que sea fácilmente accesible. Además, este modelo de conexionado permite una futura ramificación hacia un PLC, la cual sería necesaria aislar eléctricamente de la conexión hacia el PC mediante un interruptor, pues ya se comprobó que había serios problemas de ruido en la señal si ambos trabajaban simultáneamente.

Explicaremos ahora cada tramo del conexionado y sus elementos:

Las señales parten del armario de control desde dos puertos distintos, situados en la cara trasera del mismo, a través de su correspondiente cable de banda (Foto 11).



Foto 11. Puertos I-O

El cable de banda se conecta al módulo intermedio, el cual está dividido en dos secciones, para facilitar una posible ramificación hacia un PLC (Foto 12).

Cada sección se compone, de un módulo de conexión para cada conjunto de señales, y confluyen en un cajetín de plástico con la tapa extraíble, que facilita el almacenaje del cableado.

La primera sección (modelo ADAM-3950 50P TERMINAL BOARD) es donde se conecta el cable de banda, y es utilizada para poder sacar cada señal de forma independiente, fácilmente distinguible y que permita una manipulación sencilla a la hora de posibles ajustes.

Cada una de esas señales se podría usar ahora para dos derivaciones:

- Derivación hacia un autómeta.
- Derivación hacia un PC.

Nos hemos centrado en la segunda, ya que ha llevado bastante tiempo solucionar todos los problemas de ruido en la señal y de configuración de las tarjetas de adquisición de datos junto al software Labview. Ya se han comentado arriba las sugerencias a la hora de realizar una futura derivación hacia un PLC.

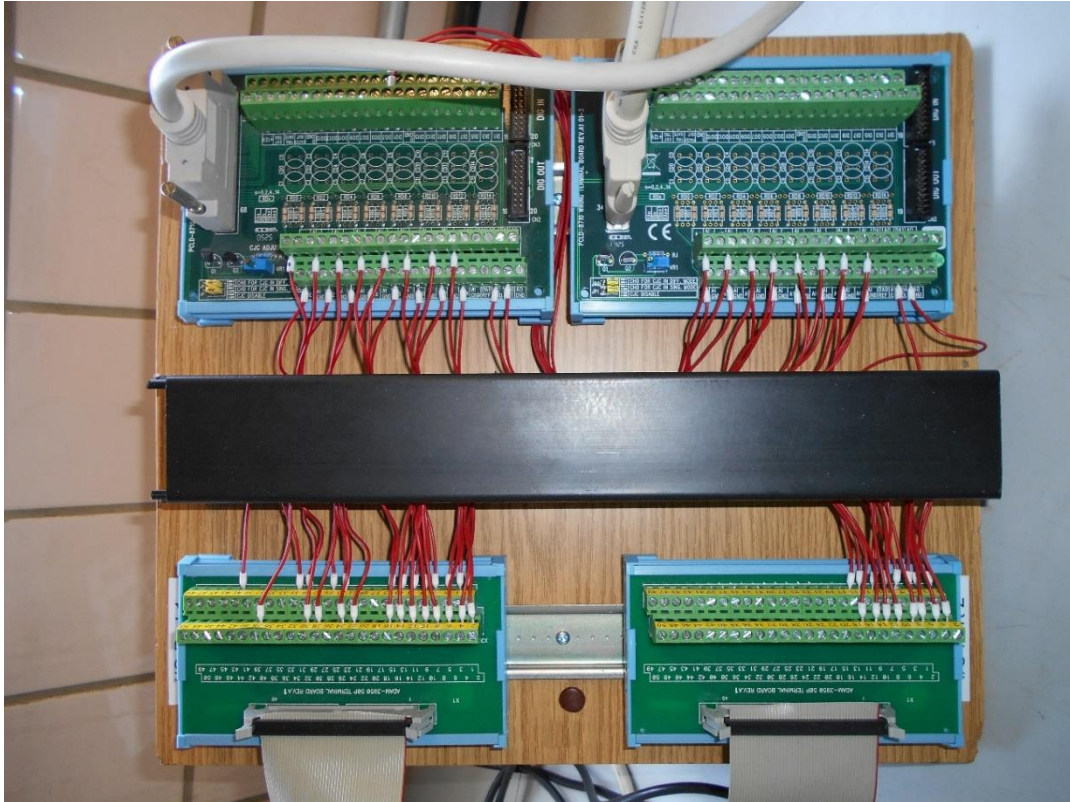


Foto 12. Módulos de conexionado

La segunda sección (modelo PCLD-8710 WIRING TERMINAL) recoge las señales para enviarlas hacia las dos tarjetas DAQ que están instaladas en los módulos PCI del PC.

Hay que destacar que la conexión de las señales de temperatura de los platos, que son las más críticas, se ha realizado en diferencial, lo cual permite disminuir drásticamente el ruido procedente de dichas señales. Este modo de conexión limita la cantidad de señales que se pueden usar, ya que necesita de dos canales para cada señal (en vez de conectar positivo y tierra, se conecta cada componente de la señal a un canal, y se realiza la diferencia de ambas, lo que disminuye el ruido).

Aclarar también que la planta precisa de una señal de watchdog a modo de comprobación de seguridad de que el sistema de control funciona (debe cambiar de valor entre 0 y 1 cada segundo). Sin ella, la planta no acepta órdenes del sistema de control.

Las tarjetas que se han utilizado son los modelos 1741-U y 1711 de Advantech, y cumplen las siguientes características:

- 16 canales de entrada analógica single-ended, lo que da lugar a 8 si se usan en modo diferencial.
- 2 canales de salida analógica.
- 2 módulos de 8 bits para entradas/salidas digitales.
- Son compatibles con Labview tras instalar el paquete y drivers adecuados.

A continuación se incluye una tabla con la lista de señales y el conector al que van, de ambos módulos, y fotos en detalle de dichos módulos de conexión.

| DATA PORT 1 TO ADAM-3950 50P TERMINAL BOARD 1 | | | |
|--|------------------------------------|-------------------------|-----------------------|
| ADAM-3950 50P TERMINAL BOARD 1 | PCLD-8710 WIRING TERMINAL 1 | | |
| ANALOG INPUT | ANALOG INPUT | DESCRIPTION | DESCRIPTION |
| PINS 1 , 2 | PINS AI0 , AI1 | REBOILER TEMP | (T9) 0-150 DEG C |
| PINS 3 , 4 | PINS AI2 , AI3 | TOPS TEMP | (T10) 0-150 DEG C |
| PINS 5 , 6 | PINS AI4 , AI5 | COLD WATER IN TEMP | (T11) 0-150 DEG C |
| PINS 7 , 8 | PINS AI6 , AI7 | COLD WATER OUT TEMP | (T12) 0-150 DEG C |
| PINS 9 , 10 | PINS AI8 , AI9 | REFLUX TEMP | (T13) 0-150 DEG C |
| PINS 11 , 12 | PINS AI10 , AI11 | FEED TEMP | (T14) 0-150 DEG C |
| PINS 13 , 14 | PINS AI12 , AI13 | FEED PUMP SPEED/FLOW | (F1) 0-300 RPM |
| PINS 15 , 16 | PINS AI14 , AI15 | REBOILER POWER | (PWR) 0-2.0 KW |
| ANALOG OUTPUT | ANALOG OUTPUT | DESCRIPTION | DESCRIPTION |
| PINS 22 , 23 | PINS DA0 OUT, A0 GND | SET REBOILER POWER | (SETPWR) 0-2.0 KW |
| PINS 24 , 25 | PINS DA1 OUT, A0 GND | SET FEED PUMP SPEED | (SETPMP) 0-300 RPM |
| DIGITAL INPUTS | DIGITAL INPUTS | DIGITAL INPUTS | DIGITAL INPUTS |
| PIN 28 | PIN DI0 | LOW LEVEL SWITCH DETECT | |
| PIN 29 | PIN DI1 | POWER SWITCH DETECT | |

| | | | |
|------------------------|------------------------|------------------------------|------------------------|
| PIN 30 | PIN DI2 | SPEED CONTROL SWITCH DETECT | |
| PIN 31 | PIN DI3 | REFLUX CONTROL SWITCH DETECT | |
| DIGITAL OUTPUTS | DIGITAL OUTPUTS | DIGITAL OUTPUTS | DIGITAL OUTPUTS |
| PIN 38 | PIN DO0 | REFLUX VALVE OPERATION | |
| PIN 41 | PIN DO1 | WATCHDOG | |

Tabla 4. Esquema de conexionado

| DATA PORT 2 TO ADAM-3950 50P TERMINAL BOARD 2 | | | |
|--|------------------------------------|--------------------|--------------------|
| ADAM-3950 50P TERMINAL BOARD 2 | PCLD-8710 WIRING TERMINAL 2 | | |
| ANALOG INPUT | ANALOG INPUT | DESCRIPTION | DESCRIPTION |
| PINS 1 , 2 | PINS AI0 , AI1 | TRAY 1 TEMP | (T1) 0-150 DEG C |
| PINS 3 , 4 | PINS AI2 , AI3 | TRAY 2 TEMP | (T2) 0-150 DEG C |
| PINS 5 , 6 | PINS AI4 , AI5 | TRAY 3 TEMP | (T3) 0-150 DEG C |
| PINS 7 , 8 | PINS AI6 , AI7 | TRAY 4 TEMP | (T4) 0-150 DEG C |
| PINS 9 , 10 | PINS AI8 , AI9 | TRAY 5 TEMP | (T5) 0-150 DEG C |
| PINS 11 , 12 | PINS AI10 , AI11 | TRAY 6 TEMP | (T6) 0-150 DEG C |
| PINS 13 , 14 | PINS AI12 , AI13 | TRAY 7 TEMP | (T7) 0-150 DEG C |
| PINS 15 , 16 | PINS AI14 , AI15 | TRAY 8 TEMP | (T8) 0-150 DEG C |

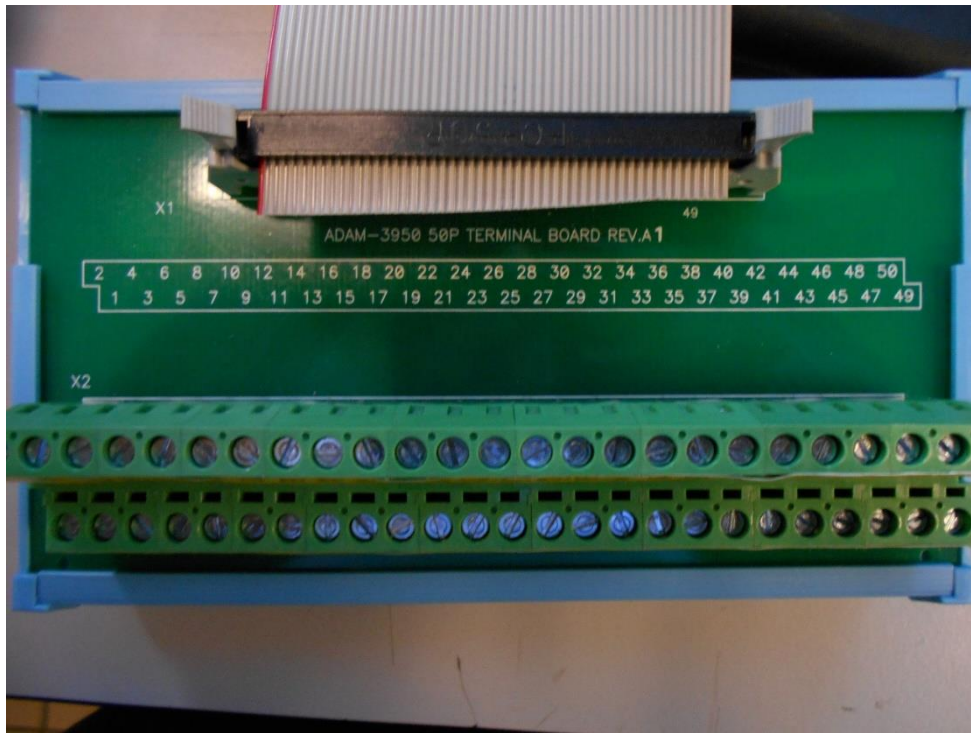


Foto 13 .ADAM-3950 50P TERMINAL BOARD

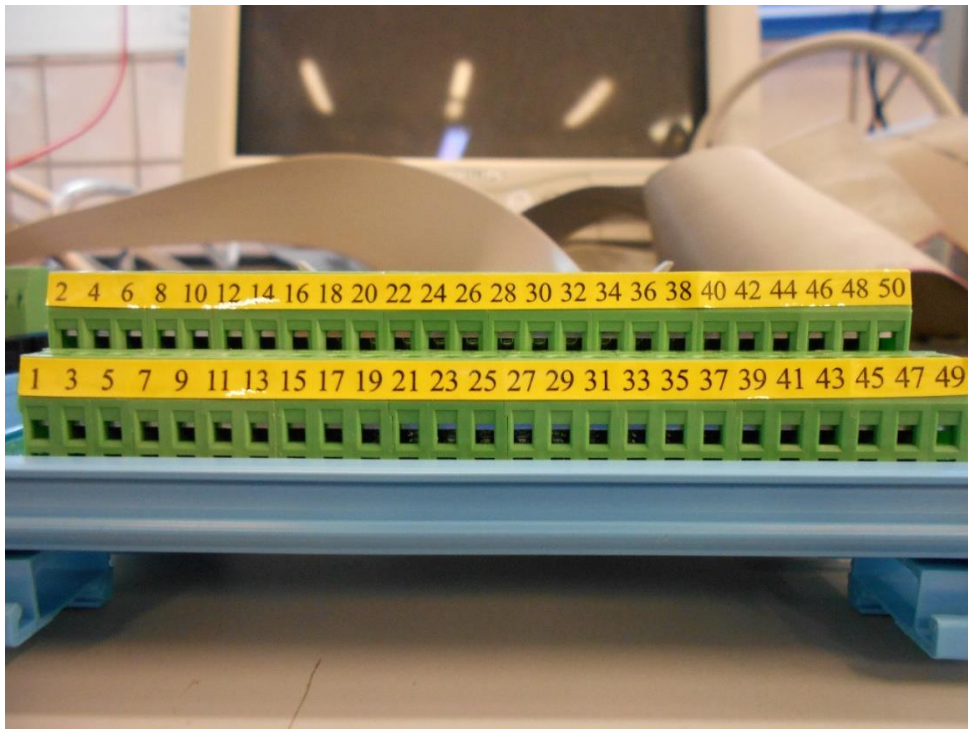


Foto 14. ADAM-3950 50P TERMINAL BOARD (Vista frontal)

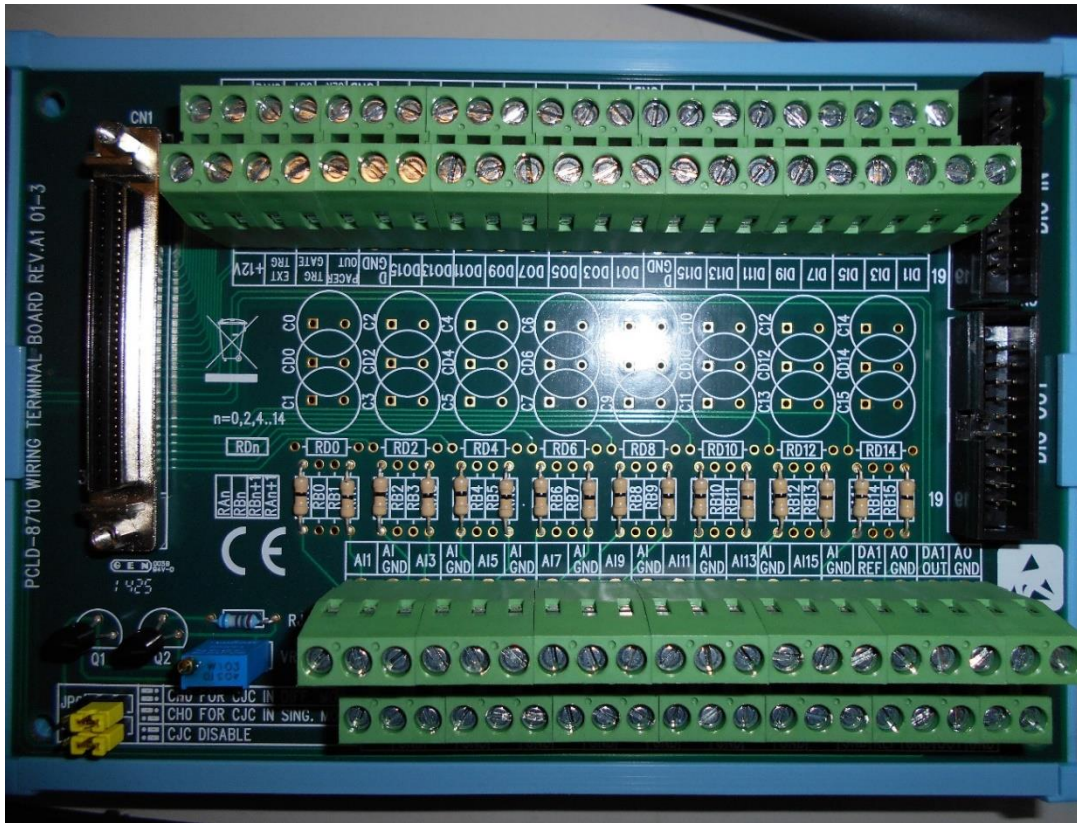


Foto 15. PCLD-8710 WIRING TERMINAL

Tras varios meses, gracias al uso de este montaje, el correcto aislamiento y conexionado de los cables, la conexión en diferencial y la correcta configuración de las tarjetas DAQ a través de la herramienta de configuración que incluyen los drivers, se consiguieron solucionar los problemas de ruido que aparecían en las señales, los cuales pasaron a ser de sólo una décima, cuando al principio aparecía un ruido de más del 100% de la señal, que se fue reduciendo progresivamente tras cada paso de avance en el trabajo práctico.

3.3 Sistema de alimentación de agua

El sistema de alimentación de agua está realizado de la siguiente manera:

- Conexión desde la toma de agua de las instalaciones de la escuela hacia la entrada del rotámetro de la planta, usando como solución a la primera una terminación en grifo metálico rosca macho, que permite la unión hembra de la manguera que va hacia la planta, sujeta con una abrazadera, haciendo uso de teflón en las uniones para garantizar que no haya pérdidas de agua.
- La conexión de la manguera a la entrada del rotámetro hace uso de la misma terminación en grifo, abrazadera y teflón, así como la conexión de la segunda manguera, que une la salida de agua del condensador con la toma de desagüe de la escuela.
- Para la toma de desagüe de la escuela, se hace uso del conjunto de piezas que se ven en la Foto 16, que permiten el cambio de sección de la terminación de grifo a la sección de la tubería de desagüe. Se vuelve a hacer uso de abrazaderas para asegurar la conexión externa, así como de juntas internas para evitar las pérdidas entre las piezas del conjunto.



Foto 16. Alimentación y desagüe de agua de refrigeración

4. Descripción técnica del sistema de control en tiempo real

4.1 Software de control

El sistema de control que ha sido diseñado cumple con la función de adquirir todas las señales procedentes de la planta, realizar el tratamiento de señales necesario para eliminar el ruido, convertir dichas señales a magnitudes referentes a la planta (grados centígrados, revoluciones por minuto, posición de la válvula...) y por último volcarlas sobre un archivo de texto plano con un formato específico para que, mediante el uso del software Matlab, se puedan mostrar fácilmente unas gráficas con todos los datos recogidos por el sistema de control durante el tiempo que la planta ha estado en marcha.

A continuación detallaremos cada parte del programa apoyándonos en el uso de capturas de pantalla del mismo, pues Labview es un entorno de trabajo con una programación gráfica a base de bloques interconectados. Hay que destacar que, al menos en la versión instalada en los laboratorios, Labview no permite hacer zoom en su entorno de trabajo, por lo que las capturas muestran toda la información que se puede conseguir sin alejar la vista.

Para no incurrir en un detalle excesivo sobre cada bloque, lo que se hará es explicar la idea detrás de cada parte del programa, ya que una vez se entienda, si se quiere replicar alguna de las funcionalidades en un proyecto distinto, bastará con adquirir los bloques que se necesiten usando este software como ejemplo. Para cualquier otro será necesario acceder a la librería, accesible tras pulsar clic derecho sobre el programa y acceder a la opción "User libraries".

Distinguiremos cada uno de los bucles de los que se compone nuestro programa, que se ejecutan cada 200ms (salvo watchdog y reflujos).

4.1.1 Bucle de temperaturas

Es el encargado de recoger todas las señales procedentes de los termopares que están colocados en la planta. Como vienen a través del armario de control, la compensación por unión fría de los termopares está resuelta (CJC).

Como se puede apreciar en la Foto 17, los bloques que se están usando no son los usuales en Labview. Esto se debe a que las tarjetas DAQ utilizadas son algo antiguas, puesto que se ha trabajado con el material que había disponible en el departamento, y precisan de su propia librería para el correcto funcionamiento de las mismas con Labview.

En esta imagen se muestra la recogida de las señales de temperatura. Los tres bloques iniciales que aparecen conectados entre sí (el azul con una puerta y los dos verdes) sirven para acceder al dispositivo conectado (la tarjeta DAQ en el puerto PCI), y mandar la orden de recogida de múltiples señales, respectivamente.

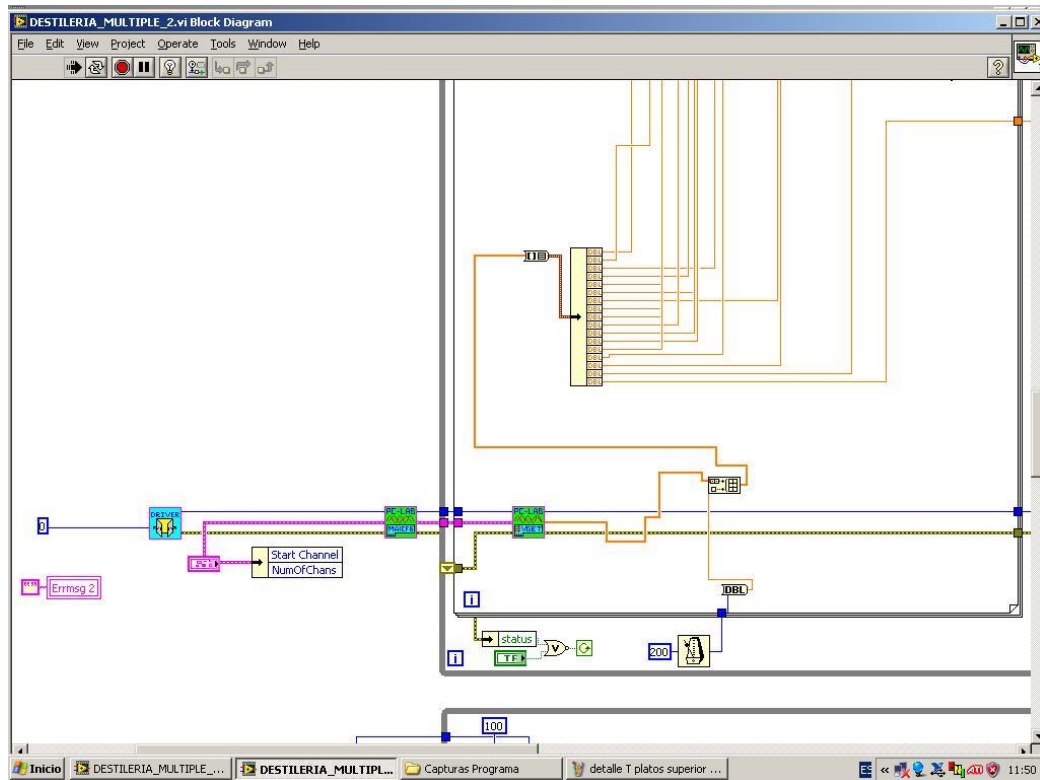


Foto 17. Adquisición de señales

Esto nos proporciona un array con todas las señales. A continuación lo que se hace es añadir a ese array la señal del tiempo, para que podamos situar posteriormente la gráfica que exportemos en un intervalo de tiempo.

En la zona superior se muestra cómo se separa cada una de las señales del array para poder trabajar con ellas de forma independiente. Luego se volverán a unir para el volcado al archivo de texto.

Nótese que hay 2 bucles while: El exterior es el que envuelve todo el proceso de la señal, y el interior es el que nos va a permitir realizar un filtro de la media usando 100 muestras.

En la Foto 18 se muestra el tratamiento de cada una de las señales. Como se toma la medida en diferencial, nuestra señal es la diferencia entre el canal que lleva el positivo y el que lleva el negativo. Como nuestra tarjeta está configurada para aceptar señales entre $\pm 5V$, en Labview la operación que hay que realizar es la suma. El siguiente proceso es escalar la señal de voltios a grados. Teniendo en cuenta que la resultante es una señal entre 0 y 5V para una escala de 0 a 150°C, el factor por el que hay que multiplicar es 30. La resta de 0.2 resulta de un factor de corrección obtenido de forma experimental.

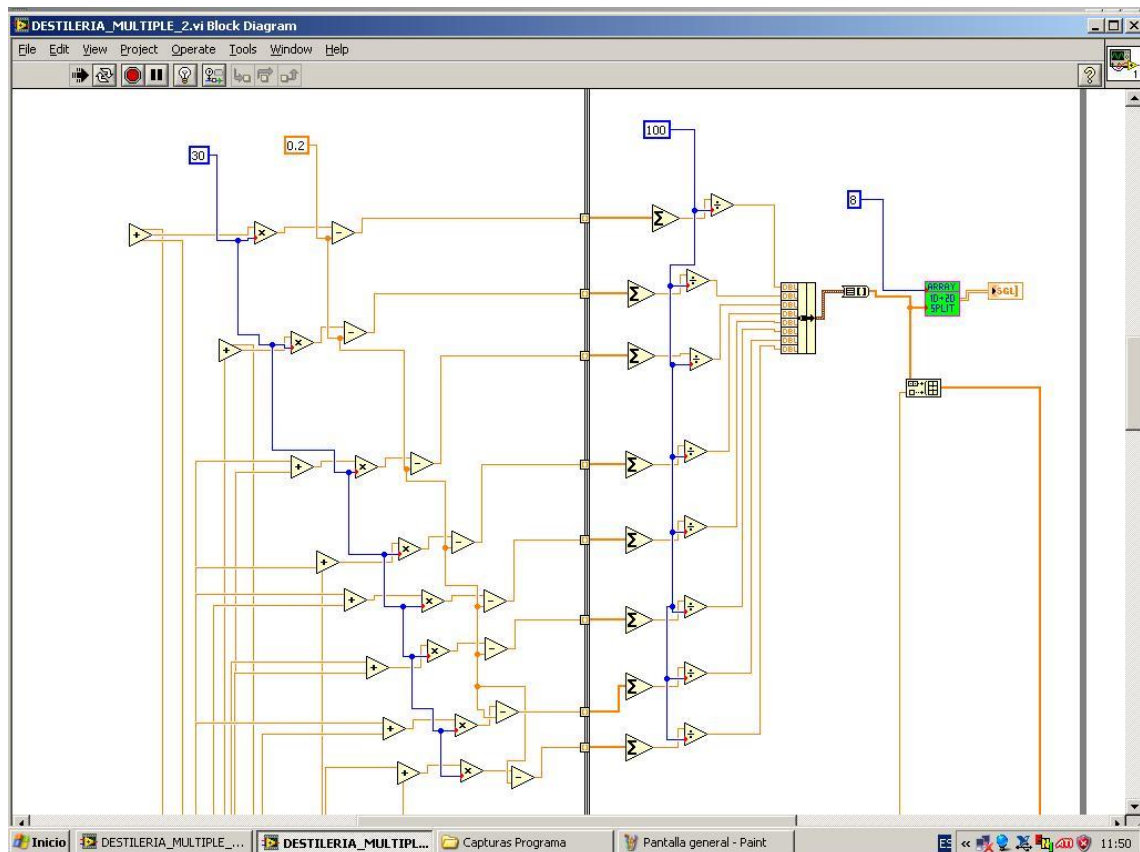


Foto 18. Tratamiento de señales

A la salida del primer bucle while, se realiza la media de las 100 muestras de medida tomadas para cada una de las temperaturas. Esto permite reducir considerablemente el efecto de ruido que pueda producirse en momentos puntuales (en forma de picos), así como disminuir en menor medida el ruido a lo largo de intervalos más amplios de tiempo.

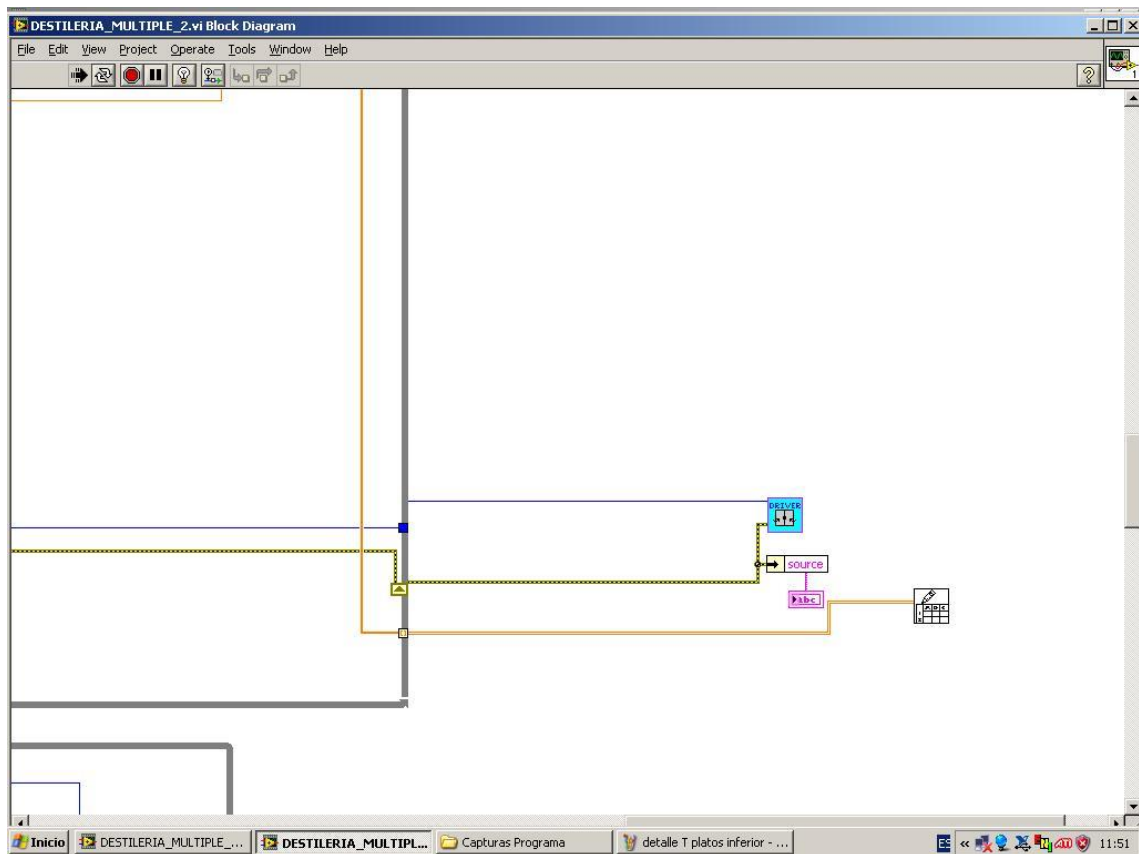


Foto 19. Volcado al archivo de texto

Una vez que ya tenemos todas las señales tratadas y convertidas a las magnitudes que nos interesan (en este caso grados centígrados), volvemos a formar el array completo de temperaturas para mostrarlo en la gráfica de la pantalla de operador, y luego le volvemos a añadir el del tiempo para volcarlo finalmente al archivo de texto (Foto 19). Este archivo se detalla en el siguiente capítulo, junto con los resultados obtenidos en los ensayos.

Hay otro bucle exactamente igual a este para captar las señales procedentes de la otra tarjeta PCI (las que vendrían del módulo 2).

Tras esto, se cierra el dispositivo.

4.1.2 Bucle de reboiler y bomba de alimentación

Es el encargado de manejar las señales de salida hacia la bomba y el reboiler (Foto 20). El proceso es parecido al del bucle anterior. Se abre el dispositivo al que se quiere enviar la señal, y se usa el bloque que da la orden de enviar dicha señal al canal por el canal especificado. Para introducir tanto la potencia del reboiler como las revoluciones del motor de la bomba se usan selectores que se manipulan desde la interfaz de usuario. En el caso del reboiler, la potencia se introduce en KW, pero la señal hay que enviarla en voltios. Como la potencia varía entre 0 y 2 KW y la señal entre 0 y 5V, basta con multiplicar por un factor de 2.5 para obtener la conversión a voltios.

En el caso de la bomba, se trabaja entre 0 y 300 rpm, por lo que al dividir por un factor de 60 obtenemos la conversión a voltios.

Finalmente se cierran los dispositivos.

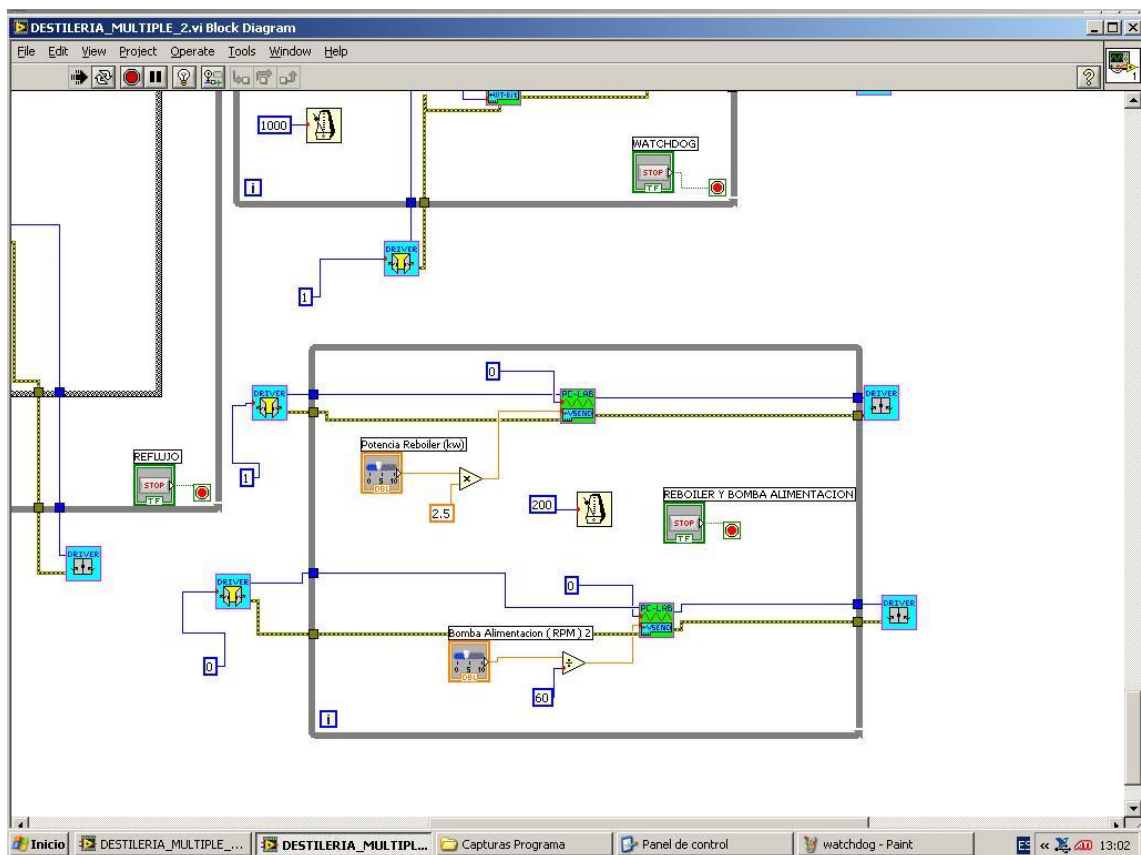


Foto 20. Actuación sobre reboiler y bomba de alimentación

4.1.3 Bucle de watchdog

Es el encargado de manejar la señal de seguridad de la planta. Se debe cambiar el valor de la señal (verdadero/falso) cada segundo (Foto 21), para lo que se ejecuta un código simple en cada iteración que cambia el valor de la variable. Es el mismo método que se ha implementado en el bucle de la válvula de reflujo.

El resto del bucle sigue el mismo proceso que los anteriores: Abrir el dispositivo, ordenar el envío de señal por el canal especificado y cerrar el dispositivo.

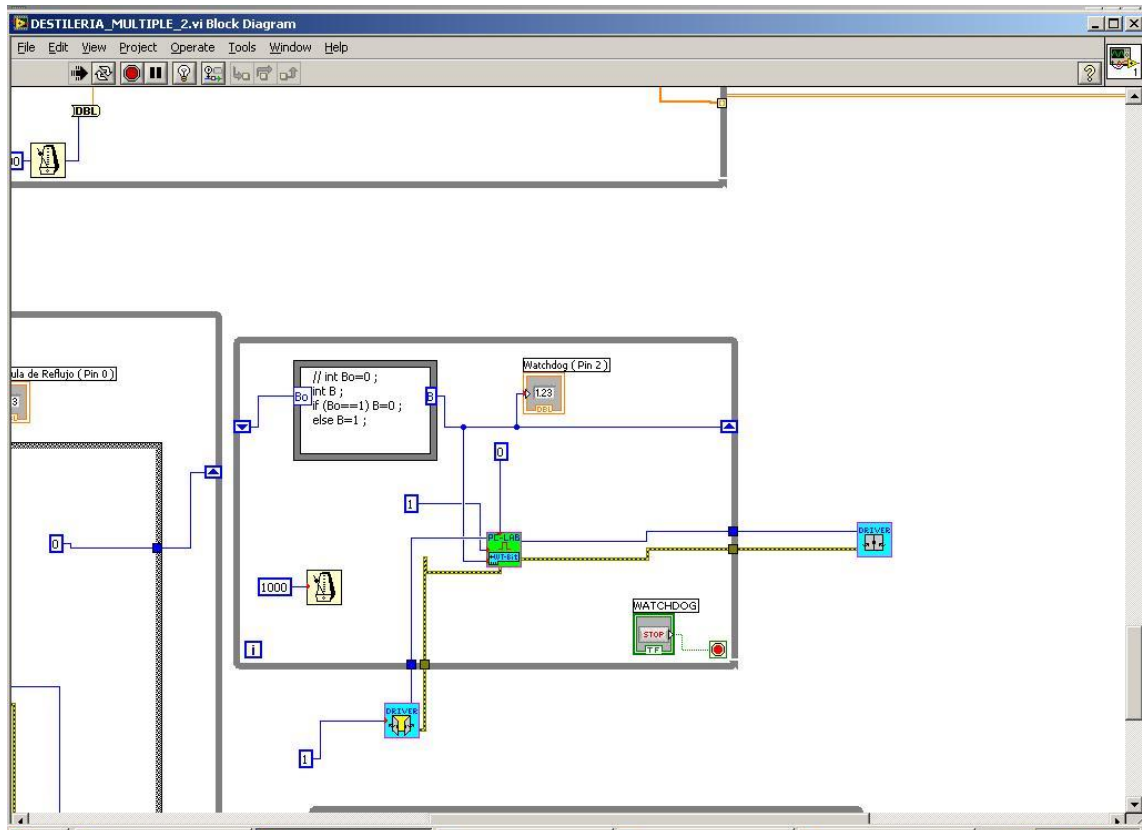


Foto 21. Señal de watchdog

4.1.4 Bucle de control de la válvula de reflujo

Se encarga de manejar el modo de funcionamiento de la válvula (manual o automático, según se quiera o no destilar en modo discontinuo). El ciclo de funcionamiento de este bucle es variable, puesto que coincidirá con el deseado en la válvula de reflujo. Se ha implementado un selector de casos para distinguir los dos modos de funcionamiento.

De esta forma, si está activo el pulsador (caso TRUE) para seleccionar el modo, se trabaja en discontinuo (Foto 22), a través del mismo código que se implementó para el watchdog.

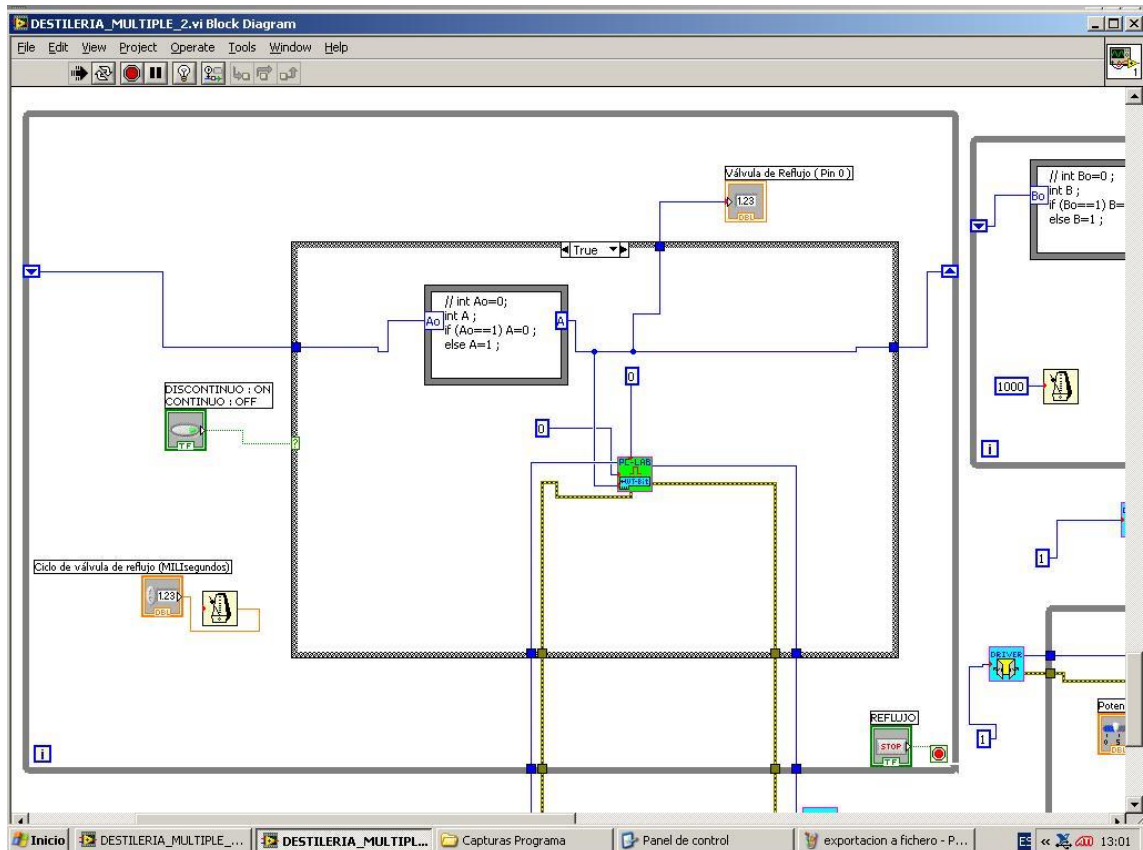


Foto 22. Selector del bucle de reflujo, caso TRUE

En caso de que queramos operar la válvula manualmente, para dejarla siempre abierta o siempre cerrada, se debería dejar sin activar el pulsador (Caso FALSE).
 En este caso se implementa el uso de otro pulsador que sirve para abrir o cerrar la válvula y enviar dicha señal a la planta (Foto 23).

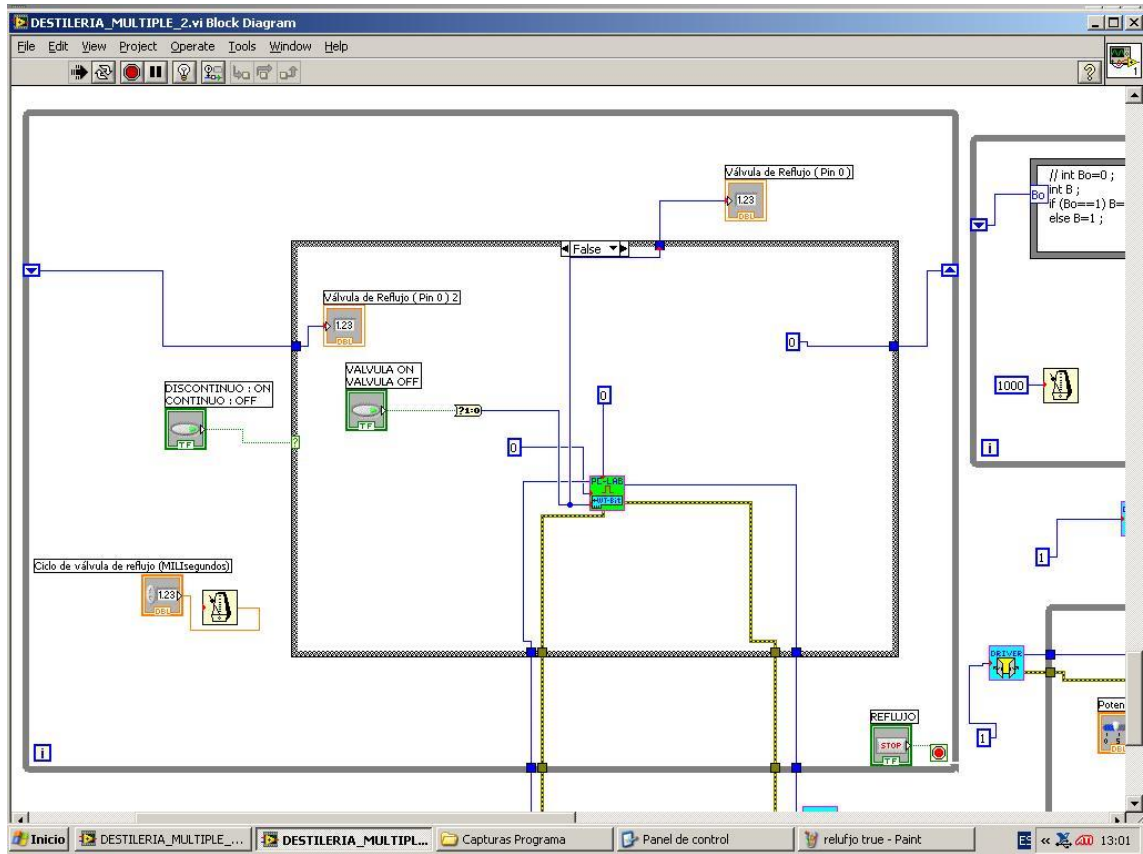


Foto 23. Selector del bucle de reflujo, caso FALSE

4.2 Interfaz de usuario

Se ha realizado una interfaz de usuario a modo de demostración del funcionamiento del sistema. Dicha interfaz ha servido para comprobar el funcionamiento de cada una de las funcionalidades del sistema a lo largo de su desarrollo, y puede seguir siendo utilizada para un manejo sencillo e intuitivo de la planta incluso después de que un alumno haya trabajado sobre el sistema y haya ampliado sus funcionalidades (añadiendo, por ejemplo, controladores).

Dicha interfaz se contempla en la Foto 24.

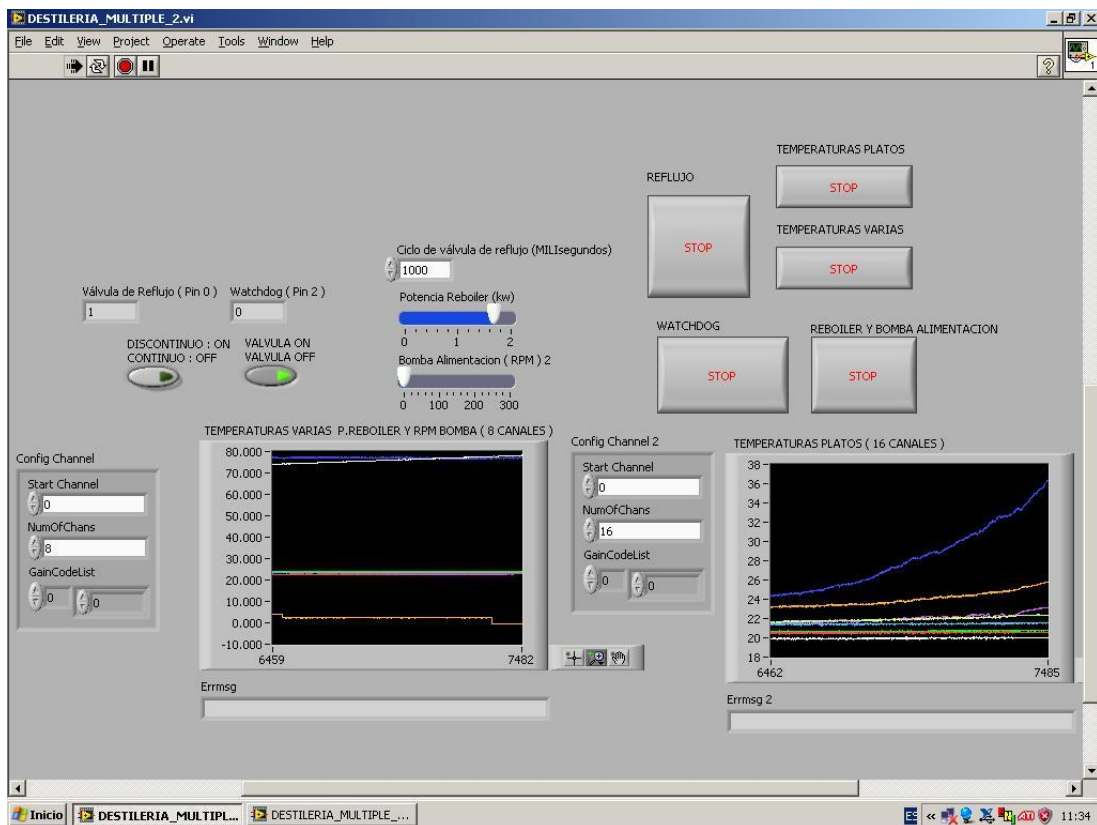


Foto 24. Interfaz de usuario

A continuación se describen los componentes de la interfaz de usuario:

- En la esquina superior derecha encontramos los botones de STOP de cada uno de los cinco bucles que componen nuestro programa:
 - Reflujo: Controla la apertura y cierre de la válvula de reflujo, tanto en modo manual como en modo destilación discontinua.
 - Temperaturas platos: Controla la adquisición de datos de todas las señales procedentes de los termopares colocados en los platos la columnas, ocho en total. Se encarga de la toma de la señal en voltios, la conversión a grados, la presentación en la pantalla de operador y el volcado a un archivo de texto preparado para leer en Matlab tras pulsar el botón STOP.
 - Temperaturas varias: Cumple la misma función del bucle anterior, pero en este caso trata el resto de señales de temperatura (Reboiler, cabezas, agua de refrigeración a la entrada y a la salida, reflujo y alimentación), y además trata también las señales de medida de revoluciones del motor de la bomba y de la potencia del reboiler. De nuevo, un total de ocho señales.
 - Reboiler y bomba de alimentación: Este bucle se encarga de controlar las señales de salida que van hacia la bomba de alimentación y hacia el reboiler. Realiza la conversión de rpm y grados, respectivamente, a voltios.
 - Watchdog: El bucle manda una señal de control necesaria para que la planta acepte las órdenes de nuestro programa. Si la señal de control parara, la planta entiende que nuestro programa se ha quedado bloqueado y deja de aceptar sus órdenes, parándose totalmente, para evitar riesgos.
- En la zona superior central, encontramos una columna con los elementos que usaremos para manipular la bomba, el reboiler, y el ciclo de la válvula de reflujo:
 - El elemento superior se corresponde con el ciclo de la válvula de control: Basta con clicar sobre el recuadro blanco, escribir el valor de ciclo que queramos llevar (tiempo que permanece la válvula en cada posición) en milisegundos, y pulsar el botón ENTER. Notar que debe estar seleccionado el modo “Destilación discontinua” para trabajar con un ciclo de reflujo.
 - El elemento central se usa para regular la potencia suministrada por la resistencia del reboiler. Basta con deslizar el indicador del scroll al valor deseado, que está fijado para variar entre los valores admisibles: De 0 a 2 kW. (Aunque ya se comentó que la potencia real que será capaz de suministrar no podrá superar los 1.5kW).
 - El elemento inferior se usa para regular las revoluciones del motor de la bomba, de nuevo fijado entre los valores admisibles: De 0 a 300 rpm. El modo de uso es exactamente el mismo que el explicado para el reboiler.

- En la esquina superior izquierda nos encontramos los pulsadores que nos permiten cambiar el modo de funcionamiento para la válvula de reflujo, y la operación manual de la misma:
 - El pulsador situado más a la izquierda es el que se corresponde con el modo de funcionamiento:
 - Si se pulsa, se enciende un indicador LED verde. En este caso la válvula se rige por el ciclo que hayamos marcado previamente, funcionando en este caso en modo de “Destilación discontinua”. Podemos volver a pulsar sobre él para desactivarlo.
 - Si se deja sin pulsar (indicador de LED apagado), la válvula se opera manualmente con el pulsador situado más a la derecha:
 - ❖ Si se pulsa, la válvula se mantiene abierta, mandando todo el destilado hacia el tanque de productos de cabeza. Se puede volver a pulsar para cerrarla.
 - ❖ Si se deja sin pulsar, la válvula se mantendrá cerrada, mandando todo el destilado como reflujo de nuevo a la columna.
 - Notar que sobre los pulsadores se encuentran también dos indicadores que muestran la lectura de la señal digital de la válvula de reflujo y del watchdog, y que sirven de comprobación de seguridad de las mismas.

- 1. En la zona inferior se encuentran las dos gráficas que muestran en tiempo real las medidas de todas las señales. Cada vez que se inicie el programa hay que volver a establecer en los recuadros de configuración situados a la izquierda de cada gráfica el valor del número de canales (NumofChans): 8 para la izquierda y 16 para la derecha. La diferencia en los valores se debe simplemente al modo en el que están configuradas las tarjetas desde el driver, pues una de ellas al trabajar con señales en conexión diferencial ya entiende que cada par de canales forma en realidad la medida de una sola señal.

5. Ensayos realizados

Para finalizar el proyecto y comprobar el correcto funcionamiento de todo el montaje realizado sobre la planta, se ha realizado un ensayo de funcionamiento de todo el sistema tratando de destilar una mezcla de etanol y agua.

A continuación se detalla primero cómo obtener y representar los datos de un ensayo realizado a través del sistema de control que se ha desarrollado, y luego se comentan los resultados obtenidos en el ensayo mencionado anteriormente.

5.1 Representación de datos obtenidos tras el ensayo

El sistema de control desarrollado exporta automáticamente los datos obtenidos en un ensayo a un fichero de texto con un formato adaptado a Matlab.

Para ejecutar esta función bastará con pulsar los botones de STOP de los bucles de temperatura que se encuentran en la pantalla de operador. Tras esto, se activa una ventana emergente donde simplemente hay que seleccionar la localización donde se quiera guardar el archivo y el nombre del mismo. Es recomendable acabar el nombre del archivo con “.m” para que sea más sencillo de leer en Matlab.

Una vez que tenemos nuestros dos ficheros “.m” de nuestro ensayo, basta con ejecutar un sencillo script en Matlab para obtener todos los vectores de datos y poder trabajar con ellos desde este software.

Junto con el programa del sistema de control en Labview se facilita también un script sencillo que recoge los datos y los representa en una gráfica, para que sirva de ejemplo.

A continuación se muestra el código del mismo por si se quiere replicar, y luego se comentarán los datos obtenidos en aquel ensayo.

```

%% Platos
test=importdata('alcoholplatos.m');
Plato1=test(:,1);
Plato2=test(:,2);
Plato3=test(:,3);
Plato4=test(:,4);
Plato5=test(:,5);
Plato6=test(:,6);
Plato7=test(:,7);
Plato8=test(:,8);
tiempol=(test(:,9)-test(1,9))/1000;

%% T-Varias
test2=importdata('alcoholvarias.m');
reboilerT=test2(:,1);
EntradaCondT=test2(:,2);
EntradaAguaFriaT=test2(:,3);
SalidaAguaFriaT=test2(:,4);
ReflujoT=test2(:,5);
AlimentacionT=test2(:,6);
RevolucionesBomba=test2(:,7);
PotenciaReboiler=test2(:,8);
tiempo=(test2(:,9)-test2(1,9))/1000;

%% Volvemos a convertir el dato PotenciaReboiler a KW
PotenciaReboiler=((PotenciaReboiler-0.2)/30)/2.5;

subplot(2,1,1);
plot(tiempol,Plato1,tiempol,Plato2,tiempol,Plato3,tiempol,Plato4,tiempol,Plato5,tiempol,Plato6,tiempol,Plato7,tiempol,Plato8);grid;
subplot(2,1,2);
plot(tiempo,reboilerT,tiempo,EntradaCondT,tiempo,EntradaAguaFriaT,tiempo,SalidaAguaFriaT,tiempo,ReflujoT,tiempo,AlimentacionT,tiempo,RevolucionesBomba,tiempo,PotenciaReboiler);
legend('reboilerT','EntradaCondT','EntradaAguaFriaT','SalidaAguaFriaT','ReflujoT','AlimentacionT','RevolucionesBomba','PotenciaReboiler');

```

Figura 5. Código de importación de datos

Como se puede comprobar, basta con leer cada archivo con la sentencia “importdata”.

Los archivos contienen los vectores de datos en forma de vectores columna, y en el mismo orden en el que estaban en el sistema de control. Nótese que coincide el orden con el de la lista de señales de la Tabla 4 (Esquema de conexionado) que se encuentra en el capítulo 3 de esta memoria.

En el caso de las temperaturas de los platos es simplemente el orden de los platos desde el inferior (Plato 1) hasta el superior (Plato 8). La novena columna es para el vector de tiempo.

En el caso del otro fichero, el orden es el siguiente, desde la primera columna:

1. Temperatura del reboiler
2. Entrada de vapor al condensador
3. Entrada de agua de refrigeración
4. Salida de agua de refrigeración
5. Temperatura de la corriente de reflujo
6. Temperatura de la corriente de alimentación
7. Revoluciones del motor de la bomba
8. Potencia del Reboiler
9. Tiempo

Nótese que para el tiempo y para la potencia del reboiler se ha realizado una conversión a las unidades con las que trabajaremos (KW y segundos), pues para el primer caso se estaba entregando en porcentaje y para el segundo en saltos de tiempo en milisegundos, que es la forma en la que lo entrega Labview.

Una vez asignado una variable a cada vector columna de datos, ya podemos trabajar con toda la información del ensayo. Al final del código se muestra un ejemplo de cómo representar en una misma ventana las dos gráficas (una por cada archivo) con su leyenda.

5.2 Ensayo con mezcla de etanol y agua

A continuación vamos a representar los datos obtenidos en el ensayo de funcionamiento realizado con una mezcla de etanol y agua. La mezcla contiene un 40% de etanol y un 60% de agua, aunque como en este ensayo no estamos buscando controlar la pureza del destilado (ni siquiera medirla), tampoco es un dato relevante.

Comentaremos algún problema de diseño que tiene la columna, y que sería recomendable solucionar en un futuro, y visualizaremos que todos los sistemas funcionan correctamente, lo que significa que operar el sistema de control desarrollado efectivamente pone en marcha la planta y produce una actuación sobre la misma.

Para ello representamos en una gráfica la evolución de las temperaturas de los ocho platos a lo largo de todo el ensayo (Figura 6) y otra gráfica con el resto de datos recogidos (Figura 7). Ambas se colocarán al final de este texto, ocupando cada una la totalidad de la carilla, de forma apaisada, para que se puedan visualizar correctamente.

El ensayo se inicia con la bomba de alimentación parada, y un caudal de agua de refrigeración constante.

Básicamente, observamos que al aportar potencia al reboiler, como es lógico, las temperaturas de los platos empiezan a ascender de forma más acusada cuanto más inferior sea el plato (pues están más cercanos). Nótese que la dinámica de la planta es lenta.

El primer dato curioso lo encontramos alrededor del segundo 1800: Las temperaturas de los platos (Figura 6), en concreto de forma más destacada la de los dos platos superiores, se ven disminuidas sustancialmente. Si nos fijamos en la Figura 7, podemos comprobar que coincide con el momento en el que empieza a entrar vapor al condensador.

La explicación es la siguiente:

El tubo que conecta la parte superior de la columna con el condensador no debería existir. En una torre de platos industrial, el plato superior está por encima del nivel de altura del condensador, y el vapor que sale del mismo, si por casualidad se condensara, caería por gravedad en forma líquida hacia el condensador.

En nuestro caso lo que ocurre es que a lo largo de este tramo de tubo, parte del vapor se condensa debido a las pérdidas térmicas (sigue habiendo aunque este aislado térmicamente), y precipita de nuevo sobre el plato superior. De ahí el descenso en la temperatura del mismo. Esto complicaría los cálculos de la relación de reflujo que se tiene, pues no todo el vapor que asciende desde el plato superior llega al condensador. Además contribuye a crear oscilaciones en las temperaturas de los platos. Experimentalmente se podía comprobar cómo el caudal de líquido que caía de este tramo de tubo hacia el plato superior era bastante acusado.

El segundo dato que nos interesa vuelve a ser un descenso en las temperaturas que podemos apreciar a partir del segundo 3000, más o menos, en la Figura 6. Este fue el momento en el que se activó la válvula de reflujo para devolver el destilado hacia la columna. Podemos ver que además drásticamente, las temperaturas del plato superior, y del inmediatamente inferior, entran un régimen oscilatorio bastante acusado.

La explicación es la siguiente:

El reflujo vuelve a la torre de platos justo encima del plato superior. Esto no debería ser un problema, pues es una opción de diseño aceptable.

En nuestro caso el problema deriva de la temperatura de dicha corriente de reflujo: Si comparamos la temperatura del plato superior antes del descenso, comprobamos que desciende desde los 69°C hasta los 58°C de media, con una oscilación de casi 3°C, mientras que la corriente de reflujo tiene una temperatura de 33°C. Esto da lugar a una diferencia de casi 30°C, siendo la diferencia inicial de casi 40°C. Lo normal es que la corriente de reflujo vuelva unos 10-15°C más baja que la del plato superior.

Esto se debe al tipo de condensador que estamos usando. Enfría demasiado, casi a la temperatura del agua de refrigeración (es de tipo inundado), y esto supone un gran problema.

Ya se ha comprobado experimentalmente que aunque variemos el caudal de agua de refrigeración, no supone prácticamente efecto alguno en la temperatura del condensado (si acaso unos 2-3°C). Por supuesto trabajar sin agua de refrigeración no es recomendable, podría dar lugar a sobrepresión o sobrecalentamiento.

En definitiva, nos encontramos con un régimen oscilatorio que funciona de la siguiente manera:

El reflujo llega a la torre, provocando un descenso rápido de las temperaturas del plato superior, por lo que disminuye la cantidad de vapor que asciende hacia el condensador, lo que provoca, a su vez, que disminuya la corriente de reflujo. Así, la temperatura del plato vuelve a subir, hasta que de nuevo aumenta el vapor que asciende al condensador, aumentando la corriente de reflujo, y provocando de nuevo el mismo efecto.

Alrededor del segundo 5200 se vuelve a enviar todo el condensado como destilado a su tanque de almacenamiento, y se aprecia cómo las temperaturas se vuelven a estabilizar.

Por lo demás, en la Figura 7 se aprecian el resto de variables que se manejan. La potencia del reboiler no se incluye puesto que tampoco interesa meterla en la gráfica, ya que se ha mantenido constante durante todo el ensayo con valor 1.2kW. Con las revoluciones del motor de la bomba ocurre lo mismo, pues el ensayo se realizó sin alimentación, sólo se probó la bomba durante un breve tiempo para comprobar que funcionaba.

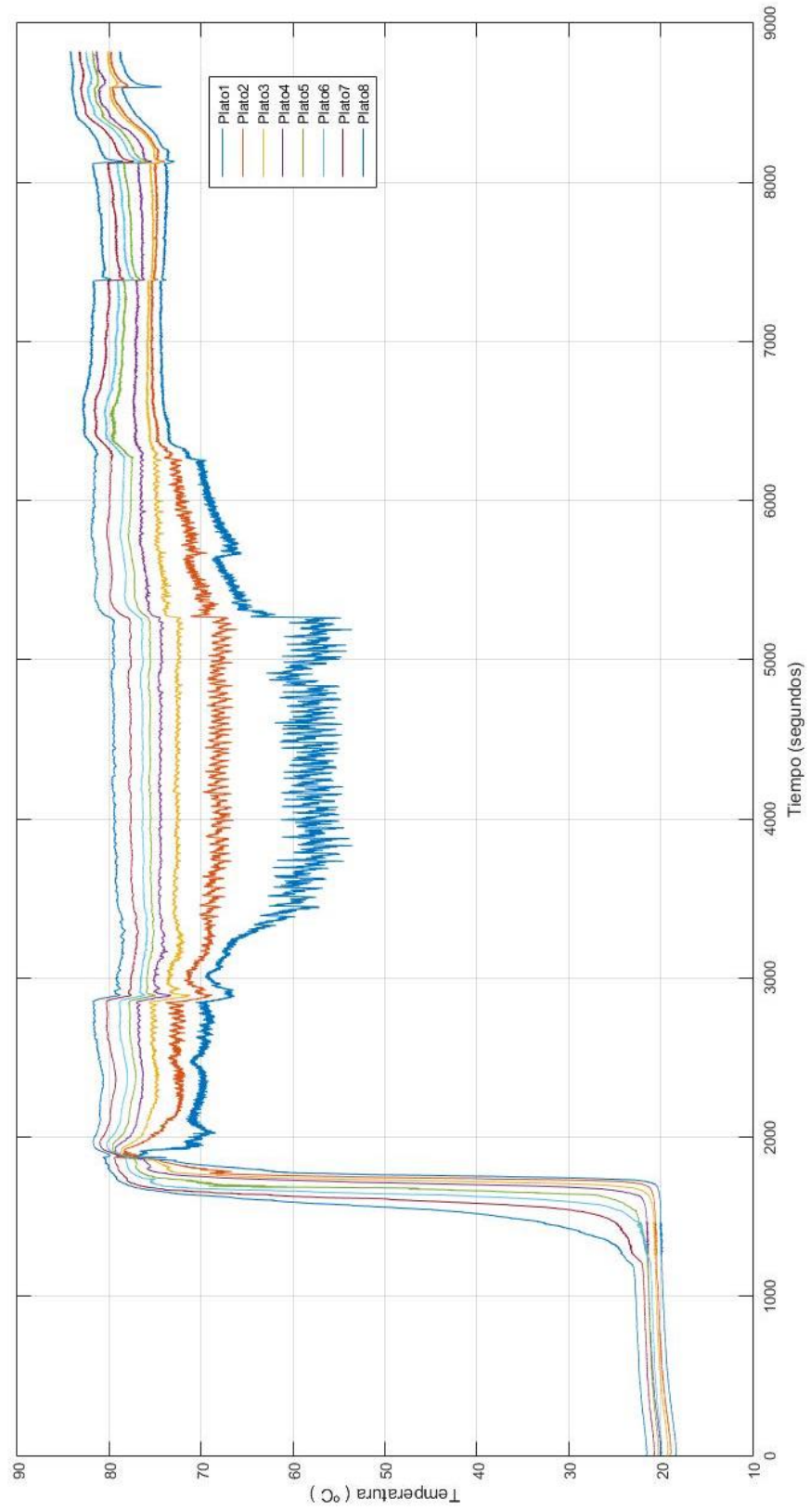


Figura 6. Temperaturas de los platos

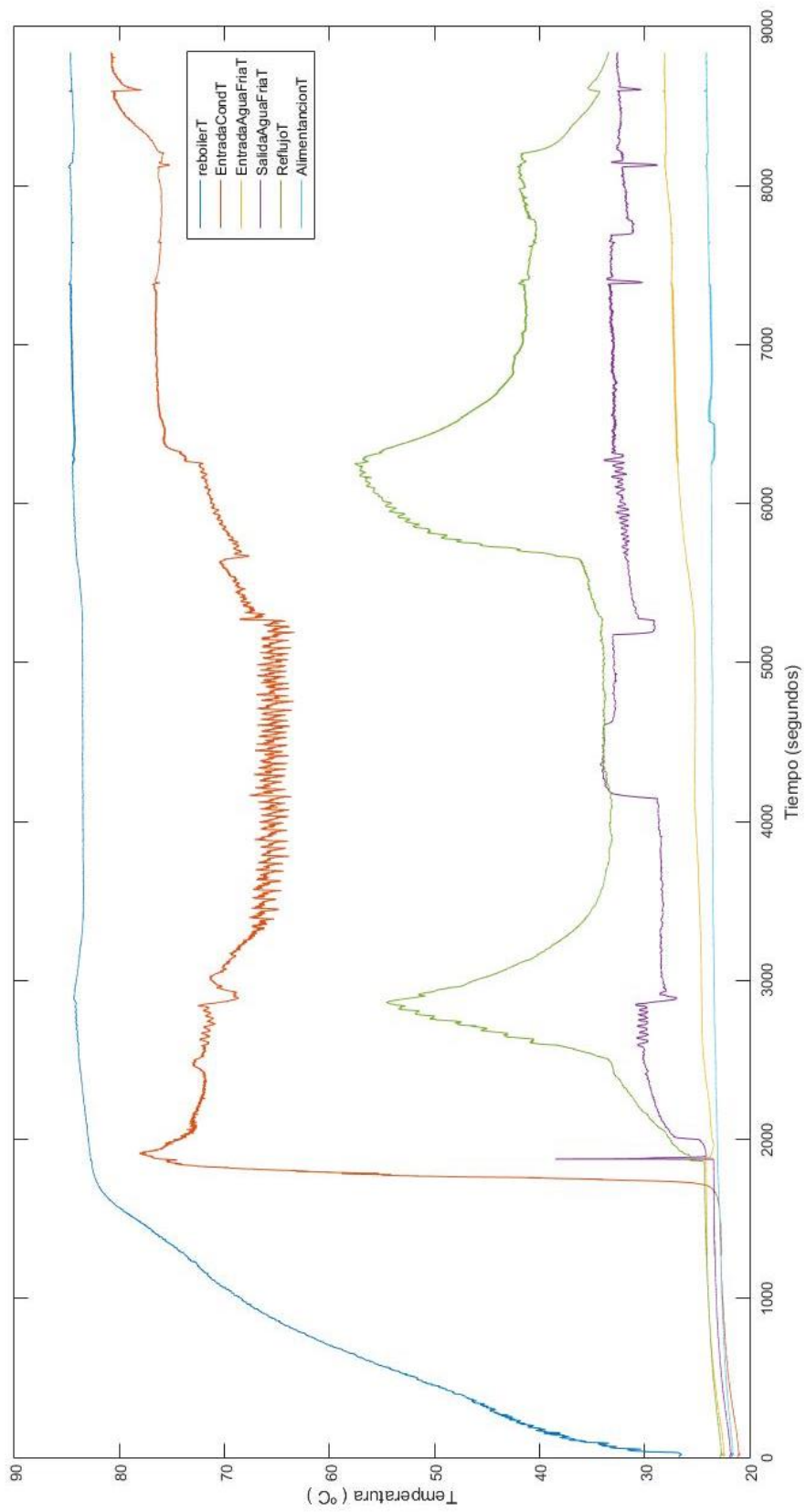


Figura 7. Temperaturas varias

6. Conclusiones y consideraciones futuras

Para finalizar, se redactan una serie de conclusiones obtenidas tras realizar este proyecto:

- El objetivo de este proyecto, desarrollo del sistema de control y puesta en funcionamiento de una planta de destilación, se ha cumplido. Se ha demostrado mediante el ensayo realizado en el capítulo anterior que el sistema de control desarrollado es capaz de actuar sobre la planta, y se han obtenido los resultados que lo evidencian. Además, el sistema de control queda en disposición del departamento para que pueda acceder a él cualquier alumno que quiera realizar futuros trabajos tanto con la planta como con el sistema en sí mismo. Al quedar accesibles todas las señales de la planta a través del software, resulta sencillo modificar el mismo para introducir nuevas modificaciones como, por ejemplo, controladores a la planta a través de las señales de temperatura.
- Para futuros trabajos sobre el sistema de control, sería muy interesante realizar la implementación de controladores a la planta que controlen la pureza del destilado mediante la técnica de inferencia por temperatura.
- Si se quieren realizar modificaciones sobre la planta, sería recomendable empezar por resolver los problemas de diseño que se han encontrado en el ensayo realizado:
 - Para el problema del condensado que precipita sobre el plato superior, una opción podría ser calefactar ese tramo de tubo con una resistencia a su alrededor, lo que evitaría en mayor medida las pérdidas térmicas. Debido al diseño de la columna, eliminar completamente ese tramo de tubo es complicado, pues parece estar colocado para que el resto del proceso desde el condensador hacia abajo vaya por gravedad. Por tanto, si se decidiera eliminar todo ese tramo, habría que cambiar el diseño estructural de la planta y añadir alguna bomba más.
 - Para el problema de la temperatura de la corriente de reflujo existen varias opciones:
 - La primera sería calefactar el tramo de tubo que transporta dicha corriente desde la válvula de reflujo hacia la torre de platos para volver a subir la temperatura a una más cercana a la del plato superior.
 - Otra opción sería cambiar el tipo de condensador a otro que no sea de tipo inundado. Esta opción es más costosa y requeriría de un estudio a fondo de las soluciones disponibles.
 - La última opción que se presenta sería buscar una forma de controlar la temperatura de entrada del agua de refrigeración. Si dicha corriente fuera más caliente, el condensador no enfriaría tanto.

- Por último, y a consideración personal, creo que el proyecto realizado me ha ofrecido una experiencia muy completa y distinta a la que uno está acostumbrado en la escuela: Montar todo un sistema real, desde las conexiones y canalizaciones hasta el sistema de control, requiere enfrentarse a toda una serie de problemas a los que uno no está acostumbrado. Véase que los sistemas no funcionen en un primer momento, que todas las señales sean ruidosas, que el PC no reconozca las tarjetas (y que Labview posteriormente tampoco lo haga), y que incluso en el manual de la planta falte información de cómo operarla a través del puerto I/O. Mención aparte a los montajes de tuberías de agua que acaban reventando, y al chapuzón posterior para cerrar la válvula de agua. Todos estos problemas han requerido de muchas horas para encontrar una solución que, aunque a veces es sencilla, raramente salta a la vista en un primer momento. El hecho de haber aprendido a manejar Labview a un nivel más alto también aporta un gran beneficio, pues es un entorno de trabajo muy usado en el mundo profesional para sistemas de control. En resumen, me parece que un proyecto de este tipo aporta un valor más a toda la educación recibida en los cuatro años de carrera, y una aproximación un poco más cercana a lo que uno se podría encontrar cuando trabaje en una industria.

7. Referencias

[1] Susana Álvarez Peláez, *Proyecto Fin de Carrera: Ingeniería básica de una planta piloto para el control automático de columnas de destilación*, 2003

[2] Manual de operación de la planta: *UOP3CC Issue 38 Instruction Manual*, 2014

[3] Manual de la tarjeta de adquisición de datos: *PC-1741U User Manual*, 2004