



**UNIVERSIDAD  
DE ANTIOQUIA**

**RE-ESTRUCTURACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL  
DE LA TORRE DE DESTILACIÓN EMPACADA DEL  
LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS DE  
LA UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA**

Autor(es)

**VICTOR CAMILO CUAICAL ARCINIEGAS**

Universidad de Antioquia  
Facultad de Ingeniería, Departamento de ingeniería  
química  
Medellín, Colombia  
2019



RE-ESTRUCTURACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL DE LATORRE DE DESTILACIÓN  
EMPACADA DEL LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS DE LA  
UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA.

VICTOR CAMILO CUAICAL ARCINIEGAS

Trabajo de grado  
como requisito para optar al título de:  
Ingeniero químico.

Asesores

Profesor MILTON MEJÍA OSPINA  
Profesora SILVIA OCHOA CÁCERES

Universidad de Antioquia  
Departamento de ingeniería química.  
Medellín, Colombia  
2019.

## **Agradecimientos**

A mis padres y toda mi familia por haberme brindado todo el apoyo que me permitió culminar mi pregrado de Ingeniería química.

A todos los profesores que hicieron parte de mi formación no solo académica, sino que también personal, en especial a mis asesores de trabajo de grado, Milton Mejía Ospina y Silvia Ochoa Cáceres, quienes me orientaron y brindaron su acompañamiento para la elaboración y culminación del presente trabajo.

## Tabla de Contenido

1. Resumen.....	6
2. Introducción.....	7
3. Objetivos.....	8
Objetivo general.....	8
Objetivos específicos.....	8
4. Marco teórico.....	8
4.1. Destilación.....	9
4.2. Destilación continua con reflujo (rectificación).....	9
4.3. Destilación en Batch.....	10
4.4. Estrategia de control en una columna de destilación.....	10
4.4.1. Objetivos de control.....	10
4.4.2. Variables controladas y manipuladas.....	12
4.4.3. Control de balance de materia (MB).....	13
4.4.4. Control de balance de energía (ME).....	16
4.4.5. Control de rehervidor y condensador.....	17
4.4.6. Control de temperatura y composición.....	18
4.4.7. Controladores de nivel.....	20
4.4.8. Sistema de control en destilación batch.....	20
4.5. Controladores por retroalimentación (feedback).....	21
4.5.1. Tipos de controladores por retroalimentación.....	21
4.6. Función de transferencia.....	23
4.7. Sintonización de controladores por retroalimentación.....	24
4.7.1. Criterios de calidad de respuesta.....	24
4.7.2. Métodos de sintonización de controladores PID.....	25
4.8. Controladores lógicos programables (PLC).....	28
4.9. Sistema SCADA.....	31
4.10. Interfaz Hombre-Máquina (HMI).....	32
5. Metodología.....	33
6. Desarrollo.....	33
6.5. Interfaz Hombre-Máquina de sistema SCADA.....	56

<b>6.6. Interfaz Hombre-Máquina de panel de control.</b> .....	75
<b>7. Resultados y Análisis</b> .....	87
<b>7.1. Curvas de reacción.</b> .....	87
<b>7.2. Sintonía de Controladores y evaluación del desempeño</b> .....	96
<b>8. Conclusiones.</b> .....	124
<b>9. Anexos y recomendaciones.</b> .....	125
<b>10. Referencias bibliográficas.</b> .....	126

# RE-ESTRUCTURACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL DE LATORRE DE DESTILACIÓN EMPACADA DEL LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS DE LA UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA.

.

## **1. Resumen.**

Este trabajo tiene como finalidad re-estructurar el sistema de control de la torre de destilación empacada ubicada en el laboratorio de operaciones unitarias de la Universidad de Antioquia, mediante la implementación de lazos de control PID apropiados y que garanticen el correcto funcionamiento de diferentes modos de operación pre-definido, que corresponde a operación en continuo, batch con y sin reflujo, los cuales pueden operar con dos medios diferentes de suministro de calor en el rehervidor, vapor y resistencia.

En la fase inicial se llevó a cabo la revisión del estado del arte, por medio de la búsqueda en literatura acerca de las estrategias de control más convenientes para operar una columna de destilación, diseño de sistemas de control, métodos de sintonización de los parámetros de un controlador PID y evaluación de su desempeño. De esta forma se establecieron lazos de control de temperatura en la zona empacada de la columna, control de temperatura de la alimentación y control de temperatura del condensado, también se estableció un lazo de control de nivel de líquido en el rehervidor.

En la segunda fase se realizó la identificación del equipo, qué elementos y estructuras conforman todo el sistema, para posteriormente complementar el diagrama P&ID existente del proceso.

En la tercera etapa se elaboró y desarrolló el programa del sistema SCADA, para la adquisición de datos. En esta etapa también se actualizó el programa de la interfaz gráfica HMI del panel touch, por medio de la cual se puede operar el sistema.

En la etapa final se sintonizó los controladores PID establecidos en el sistema de control, haciendo uso de los métodos de Ziegler-Nichols, Cohen-Coon y Ciancone. Finalmente se evaluó el desempeño del sistema de control, en el cual los parámetros de los controladores estimados por el método de Ziegler-Nichols presentaron un mejor desempeño en la mayoría de los modos de operación y lazos de control.

La concentración resultante al destilar una mezcla agua-etanol (30 %V/V de etanol) para los modos de operación en continuo con vapor y resistencia, fue de 92%-95% V/V de etanol en producto de tope. Para el producto de fondo la concentración obtenida fue de 1%-4% V/V de etanol. En los modos de operación batch con reflujo con vapor la concentración promedio al finalizar la prueba, fue de 94 %V/V de etanol, para el producto descargado del rehervidor se tuvo una concentración de 2%V/V de etanol. En los modos de operación batch con reflujo con resistencia la concentración promedio al finalizar la prueba fue de 93 %V/V de etanol, para el producto descargado del rehervidor se tuvo una concentración de 4%V/V de etanol. Por lo tanto, se concluyó que la reestructuración del sistema de control implementado, logró mejoras significativas con respecto a lo que se encontraba previamente instalado.

## **2. Introducción.**

El laboratorio de Operaciones unitarias del Universidad de Antioquia cuenta con una torre de destilación empacada, la cual se usa con propósitos académicos. Actualmente, el equipo cuenta con un sistema de control el cual fue diseñado e instalado por la empresa fabricante y proveedora del mismo. Sin embargo, debido a la configuración entre las variables controladas y manipuladas establecidas, se presentan dificultades en la operación de la torre, generando problemas tales como: no es posible alcanzar el estado estacionario, mala regulación de la temperatura del condensado, variación permanente del flujo medido de condensado (dificultan su lectura y registro). Es por ello que en el presente trabajo se pretende reestructurar el sistema de control, para garantizar el correcto funcionamiento de la torre de destilación. Esto se logrará por medio de una fase inicial de búsqueda en literatura, que permita establecer la estructura de control más adecuada para este tipo de equipos, seguido de la reprogramación del sistema SCADA y de la

implementación en el PLC. El correcto funcionamiento del sistema de control se evaluará mediante el indicador de desempeño de las variables controladas.

En la columna de destilación en mención, se realizan prácticas especialmente durante el curso transferencia de masa. Para propósitos académicos, se requiere trabajar la torre bajo diferentes modos de operación, correspondientes a: destilación continua, batch con y sin reflujo y el modo de operación manual. Con el desarrollo del presente trabajo se pretende mejorar la operación de la columna de destilación, lo cual facilitará el desarrollo de las prácticas de laboratorio realizadas en dicho equipo, especialmente en los modos de operación mencionados.

### **3. Objetivos.**

#### **Objetivo general.**

Reestructurar el sistema de control de la torre de destilación empacada ubicada en el laboratorio de operaciones unitarias de la Universidad de Antioquia, implementando lazos de control PID apropiados para el correcto funcionamiento de cada modo de operación pre-definido.

#### **Objetivos específicos.**

- Establecer los lazos de control requeridos por el equipo que garanticen los objetivos de control correspondientes a: seguridad, protección del equipo, operación suave, calidad, rentabilidad y protección con el medio ambiente; para cada uno de los modos de operación pre-definidos.
- Programar el sistema SCADA para supervisar y controlar la torre desde un PC.
- Actualizar el programa HMI del panel de control touch.
- Sintonizar los controladores implementados para garantizar buen desempeño.
- Evaluar el desempeño del sistema de control establecido.

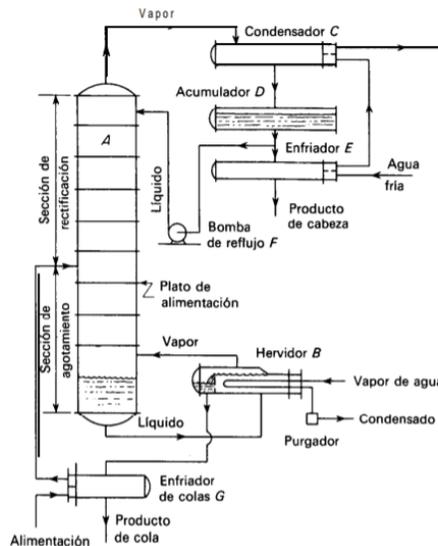
### **4. Marco teórico.**

## 4.1. Destilación.

La destilación ha sido ampliamente utilizada para la separación, purificación y eliminación de productos en las industrias de procesos químicos. El proceso de destilación se puede dividir en dos categorías: destilación Batch, que se usa principalmente en las industrias químicas especializadas, bioquímicas y farmacéuticas; y la destilación continua, que se implementa principalmente en las industrias petroquímica y química [1].

## 4.2. Destilación continua con reflujo (rectificación).

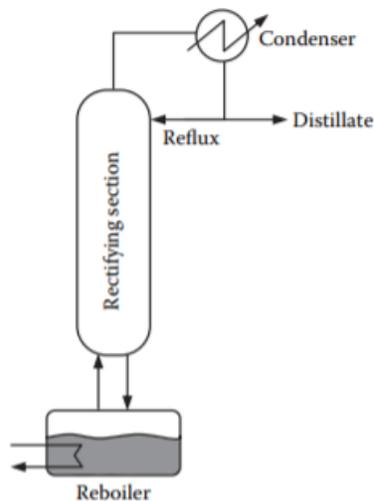
La rectificación continua, o fraccionamiento, es una operación de destilación a contracorriente en varias etapas. En la destilación continua, la alimentación se suministra constantemente a la columna, y los productos se obtienen simultáneamente en la parte superior e inferior, bajo una operación de estado estable. La sección superior del punto de alimentación se conoce como la sección de rectificación, ya que se enriquece un componente de baja temperatura de ebullición. La sección inferior se conoce como la sección de agotamiento, ya que se despoja de la mezcla, un componente de baja temperatura de ebullición. En la Figura 1 se representa una columna típica de fraccionamiento continuo equipada con los accesorios necesarios y que contiene secciones de rectificación y agotamiento.



**Figura 4.1.** Columna de fraccionamiento continuo con secciones de rectificación y agotamiento [2].

### 4.3. Destilación en Batch.

La Figura 2 muestra una columna de destilación Batch convencional, donde la alimentación se carga inicialmente en el rehervidor al comienzo de la operación. Después de una operación de reflujo total, el destilado se extrae continuamente, mientras que en el residuo del fondo se concentra un componente de alta temperatura de ebullición, la carga del rehervidor en la destilación por lotes se agota con el tiempo, por lo que el proceso tiene una naturaleza de estado no estacionario [1].



**Figura 4.2.** Columna de destilación Batch [1].

Una columna batch convencional puede operarse bajo las siguientes condiciones [1]:

- Reflujo constante y composición variable del producto.
- Reflujo variable y composición constante del producto.
- Reflujo óptimo y composición óptima del producto.

### 4.4. Estrategia de control en una columna de destilación.

#### 4.4.1. Objetivos de control.

El punto principal de cualquier proyecto de diseño es una definición de objetivos. Para la destilación hay muchos enfoques posibles, sin embargo, se han reportado tres aspectos principales: (1) control de balance de materia, (2) control de calidad del producto, y (3) satisfacción de restricciones. Como se aplica específicamente a las columnas de destilación, esta filosofía sugiere lo siguiente [3]:

#### 1. Control del Balance de materia:

El sistema de control debe garantizar que la suma promedio de los flujos de productos sea exactamente igual al flujo alimentado en régimen permanente. Los ajustes resultantes en los flujos del proceso deben ser suaves y graduales para evitar alterar la columna o el equipo de proceso aguas abajo alimentado por la columna, en la mayoría de los casos, el balance de materia se controlará mediante los llamados controles de presión o nivel de líquido.

#### 2. Control de calidad del producto.

El sistema de control debe mantener la concentración de un componente en el tope o en el fondo a un valor específico. Por lo general, los costos operativos mínimos se logran cuando los productos se controlan con una pureza mínima aceptable, debido a que la relación entre el trabajo termodinámico de separación y la pureza, no es lineal. Para algunas columnas, las composiciones pueden variar en un extremo, y en ocasiones en ambos extremos, para satisfacer ciertas restricciones económicas.

Los controles de balance de materia y composición deben funcionar satisfactoriamente ante posibles perturbaciones como:

- Flujo y Composición de la alimentación
- Condición térmica de la alimentación
- Presión de alimentación del equipo.
- Temperatura de los fluidos de servicio empleados en el condensador y rehervidor.

#### 3. Restricciones de operación.

Para un funcionamiento seguro y satisfactorio de la columna, se deben observar ciertas restricciones. Por ejemplo:

- La columna no se debe inundar.
- La caída de presión de la columna debe ser lo suficientemente baja como para mantener una operación efectiva de la columna, y de esta forma evitar problemas como el denominado lagrimeo en columnas de platos.

#### **4.4.2. Variables controladas y manipuladas.**

- **Variables controladas.**

Las variables típicamente controladas en una columna de destilación, incluyen presión, nivel de los fondos, nivel en el tanque de condensado, concentración del compuesto de interés en el tope, concentración del compuesto de interés en el fondo. El control de la concentración puede ser directo (usando instrumentos de medida de la concentración en las corrientes de producto), o indirecto (usando propiedades físicas representativas de la composición del producto). Las propiedades físicas típicas usadas son: índice de refracción, densidad, presión de vapor, punto de congelación, y la más común, la temperatura en un plato o sección de la columna.

Estas pueden ser clasificadas en dos grupos [4]:

1. Variables de lazo simple (Single loop variables): Estas incluyen presión y nivel. Estas son controladas con el propósito de alcanzar el primer objetivo de control, es por ellos que el set point de estas variables son establecidos únicamente por consideraciones de estabilidad, sin tener en cuenta las especificaciones del producto.
2. Variables objetivo (Unit objective variables): estas incluyen la concentración del compuesto de interés en tope y fondo. Son reguladas para alcanzar el segundo objetivo, su set point está determinado solo por las consideraciones de pureza del producto.

- **Variables manipuladas.**

Las variables manipuladas usadas en una columna de destilación son los flujos de determinadas corrientes, las cuales son manipuladas variando la apertura de su correspondiente válvula de control. Existen cinco corrientes a manipular, las cuales son: flujo de producto de fondo y tope, flujo de la corriente de servicio en el condensador y rehervidor y finalmente el flujo de reflujo [4].

#### 4.4.3. Control de balance de materia (MB).

El sistema de control del balance de materia permite controlar la composición del producto, manipulando los flujos que entran y salen de la columna, además garantiza el cumplimiento del balance de materia del sistema.

Existen 2 tipos de control de balance de materia, directo e indirecto. En el primero la composición o temperatura, es controlada regulando una de las corrientes de salida del producto, mientras que la otra se regula para controlar el nivel o presión. En el control indirecto la composición o temperatura se controla mediante la regulación del reflujo o carga calórica en el rehervidor, y las corrientes de producto son usadas para controlar nivel o presión. En tabla 4.1 se muestran algunos esquemas de control MB más comunes [4].

**Tabla 4.1.** Esquemas de control de balance de materia más comunes.

<b>Figura</b>	<b>TIPO</b>	<b>Nivel tanque condensado</b>	<b>Nivel de fondo de columna</b>	<b>Composición/Temperatura</b>	<b>Presión</b>	<b>Libre</b>
4.3	Indirecto 1	D	B	H	C	R
4.4	Indirecto 2	D	B	R	H	C
4.5	Directo	R	B	D	C	H

Donde:

D: Flujo de destilado.

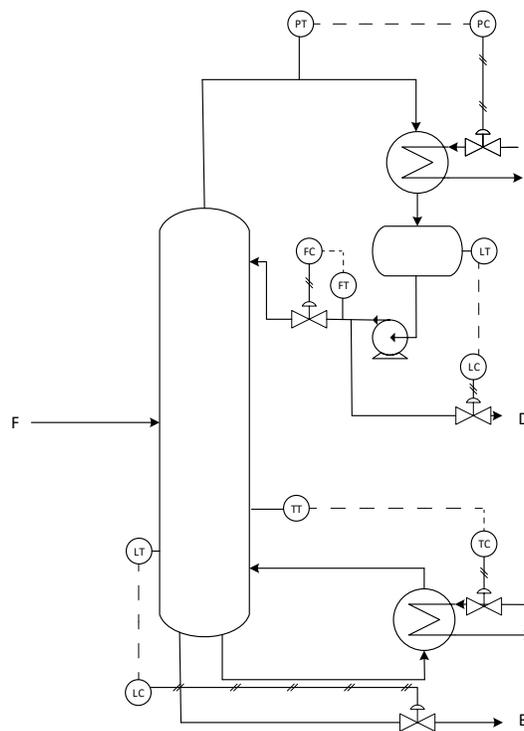
B: Flujo de fondo.

H: Flujo de vapor suministrado a rehervidor.

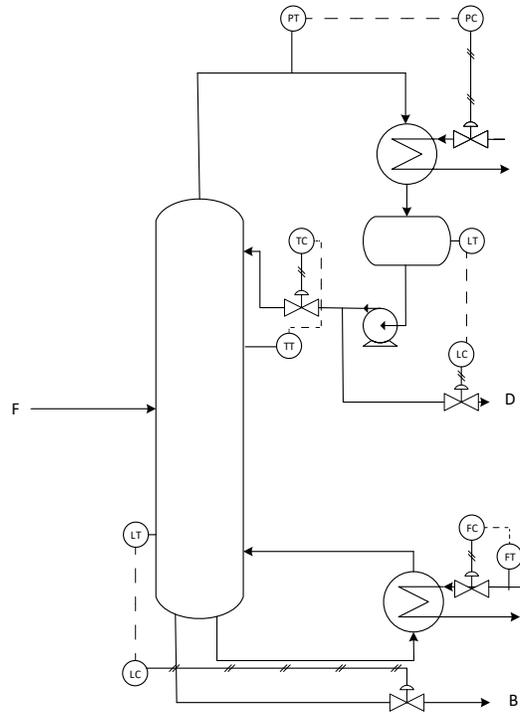
C: Flujo de Fluido refrigerante suministrado a condensador.

R: reflujo.

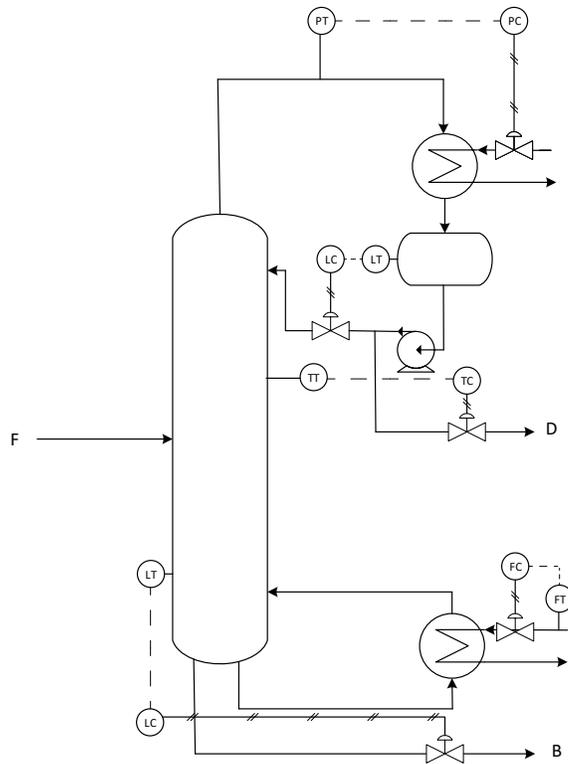
En las figuras 4.3-4.5 se muestra los esquemas de control ilustrados en la tabla 4.1.



**Figura 4.3.** Esquema de control de balance de materia indirecto 1.



**Figura 4.4.** Esquema de control de balance de materia indirecto 2.



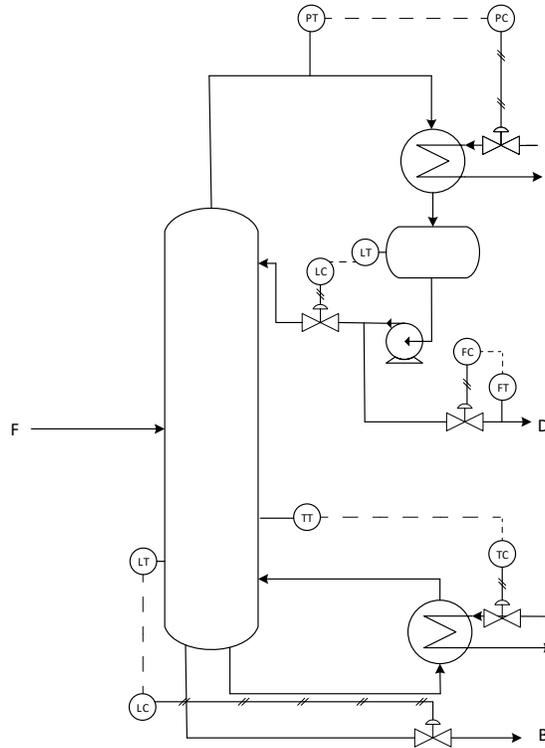
**Figura 4.5.** Esquema de control de balance de materia directo.

El esquema de la figura 4.3 favorece el control de la composición de los fondos, se emplea cuando el producto de interés se obtiene por la corriente de fondo, también presenta una respuesta rápida a las perturbaciones causadas por el cambio de composición en el alimento, lo cual afecta la temperatura en la torre; sin embargo, el flujo de vapor suministrado al rehervidor genera un cambio inmediato en la temperatura, permitiendo que dicha variable se controle de manera rápida. En contraste, los esquemas de las figuras 4.4 y 4.5 implementados en columnas de platos, presentan una respuesta lenta ante este tipo de perturbación, puesto que la temperatura en la torre es regulada mediante el reflujo, el cual produce un cambio en el flujo de líquido en cada plato, sin embargo, dicho cambio se propaga de plato en plato de forma lenta, haciendo que la temperatura en el fondo sea afectada tras un largo tiempo en comparación al esquema de la figura 4.3. A diferencia de las columnas de platos, las columnas empacadas no presentan el inconveniente mencionado para los esquemas de las figuras 4.4 y 4.5, lo cual hace factible su uso en este tipo de columnas, también se recomienda cuando la prioridad del control de la pureza radica en el producto de tope, y el flujo del destilado es mayor que el de la corriente de fondo.

Como principal desventaja en el esquema de la figura 4.3 están las perturbaciones generadas por el medio ambiente, que pueden provocar un cambio en la temperatura del reflujo, esto genera una disminución en la presión de la torre, lo cual hace que el controlador de presión disminuya la capacidad de condensación y por ende también baje el nivel en el tanque de condensado, dando paso a que el controlador de este nivel disminuya el flujo del destilado, sin embargo, el controlador del caudal del reflujo permanecerá constante, retornando el líquido a una temperatura menor, esta perturbación es rechazada por el controlador de temperatura en el fondo de la columna, pero esto conlleva a que la respuesta ante dicha perturbación sea lenta. A diferencia, los esquemas de las figuras 4.4 y 4.5, posibilitan que, ante un cambio en la temperatura del reflujo, el flujo del mismo se vea modificado, puesto que en el primer caso este controla directamente la temperatura, y en el segundo el caudal del reflujo se modifica tras un cambio en el nivel del tanque de condensado [4].

#### **4.4.4. Control de balance de energía (ME).**

En un sistema de control de balance de energía, se controla la composición en la corriente de salida donde se encuentre el producto de interés, mientras que la otra corriente queda libre, la figura 4.6 ilustra un esquema de este tipo de control.



**Figura 4.6.** Esquema de control de balance de energía.

El sistema mostrado en la figura 4.6 da prioridad al control de la pureza del producto de fondo, controlando la temperatura en un punto de la sección de despojamiento, manipulando el flujo de vapor suministrado al rehervidor. Como principal inconveniente de este esquema de control se tiene que las variables controladas resultan ser más sensibles a las variaciones en el balance de materia que al balance de energía, es por ello que este tipo de control se usa con poca frecuencia y en casos específicos donde el control de balance de materia no resulta ser satisfactorio [4].

#### 4.4.5. Control de rehervidor y condensador.

El control en el rehervidor y condensador regula el flujo de entrada y salida de energía a la columna. Estos controles deben tener una respuesta adecuada para minimizar la transmisión de

perturbaciones dentro del sistema, su falla causa la generación de inestabilidad y desaprovechamiento energético.

En el control del condensador frecuentemente se integra la regulación de la presión, este control a menudo se considera como el más importante, puesto que no es posible alcanzar un estado estable hasta que la presión en la columna se mantenga constante.

El control en el rehervidor no solo debe proveer de una buena respuesta al sistema ante las perturbaciones tales como el cambio de composición en la alimentación, sino que también debe aislar al sistema de las perturbaciones provocadas por el medio de calentamiento. En la mayoría de casos la carga calórica de la torre es regulada para controlar la calidad del producto, normalmente en la sección de fondos. Con medios de calentamiento que se condensan, la localización de la válvula de control tiene un gran impacto en el desempeño del control del rehervidor, en general la respuesta dinámica de la manipulación del vapor de entrada es superior a la de la manipulación del flujo de condensado. Manipular la válvula de entrada cambia inmediatamente el flujo de vapor, presión en el rehervidor y transferencia de calor. Manipular la válvula de salida de condensados genera un cambio en el nivel de condensados dentro del rehervidor, sin embargo, la repuesta en el flujo de vapor, temperatura y presión es lenta [4] .

#### **4.4.6. Control de temperatura y composición.**

En el control de composición se manipulan variables como el flujo de vapor en el rehervidor, reflujo o flujo de destilado o tope. Existen 2 métodos para el control de composición: control de temperatura o control de análisis. El control de temperatura es menos costoso, más rápido y de uso más común dentro de la industria. Los analizadores proveen de una medida más precisa de la composición, su uso se implementa cuando se requiere un control estricto de calidad y pureza del producto.

El control de temperatura es el medio más popular para controlar la composición, por su fácil implementación, bajo costo de inversión y mantenimiento. Un cambio en la temperatura de la columna representa un cambio en la composición de los componentes claves, de esta forma un

incremento en la temperatura en el tope, genera un aumento de la composición de los componentes más pesados en el producto de tope. La principal desventaja del control de temperatura es que esta variable no siempre se relaciona bien con la composición del producto, o no siempre es lo suficientemente sensible a la variación de la composición de este. El grado en que puede afectar esta desventaja depende de [4]:

1. Localización del sensor-transmisor de temperatura que se usará para cerrar el lazo de control.
2. Efecto de la concentración del componente no clave en el control de la temperatura.
3. Efecto de la presión en el control de temperatura.
4. Fluidos de servicio, diseño de la columna, sistemas de control y fuentes y magnitud de perturbaciones.

#### **4.4.6.1. Criterios para la localización del control de temperatura.**

**Criterio de la máxima pendiente:** consiste en seleccionar la etapa donde hay grandes cambios de temperatura de etapa a etapa. Se traza el perfil de temperatura en las condiciones de diseño, y se examina la "pendiente" del perfil para encontrar la etapa donde está pendiente es mayor. Grandes cambios de temperatura de etapa a etapa indica una región donde las composiciones de los componentes clave están cambiando. Mantener la temperatura de la etapa en esta región, permite mantener el perfil de composición en la columna y evita que los componentes ligeros salgan en el producto de fondo y que los componentes pesados salgan en el producto de tope [3].

**Criterio de sensibilidad:** consiste en encontrar la etapa donde hay el cambio más grande en la temperatura producido por un cambio en la variable manipulada. Se realiza un cambio muy pequeño en la variable manipulada, se examina los cambios de la temperatura en cada etapa, y se observa cual es el cambio más grande, esto mediante la división entre la temperatura de la etapa y la variable manipulada. La etapa con el cambio más grande de temperatura es la más sensible y es la seleccionada para ser controlada [3].

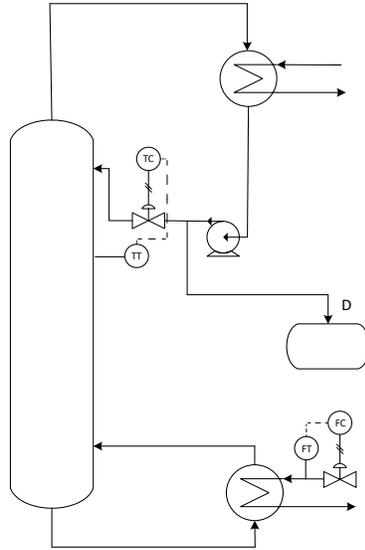
#### **4.4.7. Controladores de nivel.**

El nivel es usualmente controlado manipulando el flujo de las corrientes de producto, reflujo o la tasa de condensación. Los controles de nivel se deben sintonizar adecuadamente, de otra forma pueden generar perturbaciones con los lazos de control de composición o presión.

**Nivel en fondo:** para controlar el nivel de los fondos, frecuentemente se manipula el flujo de la corriente de fondo. En columnas que no cuentan con un baffle en la sección de fondos, la corriente de salida de fondo es la fuente del líquido para el rehervidor y el producto de fondo, en este caso el nivel debe ser controlado en un rango muy limitado, esto con el propósito de garantizar una cabeza constante de líquido al rehervidor. Cuando se cuenta con un baffle, no se requiere control en un rango de nivel tan estrecho[4].

#### **4.4.8. Sistema de control en destilación batch.**

Las modalidades de operación en Batch, reflujo constante y reflujo variable, involucran diferentes estrategias de control. Para la modalidad de reflujo constante, donde la composición del destilado cambia continuamente, la composición promedio del destilado solo se puede conocer al final de la operación. El control de la composición del destilado promedio es, por lo tanto de naturaleza de control de lazo abierto; sin embargo, el modo reflujo variable es inherentemente una estrategia feedback, debido a que la relación de reflujo se ajusta constantemente para mantener constante la composición del destilado [1]. El sistema de control debe tener consideraciones especiales, en última instancia similares al de su contraparte, operación en continuo, en la figura 4.7 se muestra un esquema de control propuesto para operación en batch [5].



**Figura 4.7.** Esquema de control para operación en batch.

Como se puede observar en la figura 4.7 la composición del producto se controla mediante el control de temperatura, cuya variable manipulada es el caudal de reflujo. El sistema de control propuesto, cuenta con un lazo de control adicional el cual controla el flujo de vapor suministrado al rehervidor.

#### 4.5. Controladores por retroalimentación (feedback).

Un controlador es el dispositivo encargado de ejecutar la decisión de control en un sistema. En la estrategia de control feedback, el controlador compara la señal del proceso de la variable controlada proveniente de un transmisor, con el punto de (set point), y envía la señal de salida a un elemento final de control (variable manipulada), para mantener la variable que se controla en el punto de ajuste deseado.

##### 4.5.1. Tipos de controladores por retroalimentación.

**Controlador proporcional (P).** Es el controlador más simple, su funcionamiento esta descrito por la ecuación 4.1.

$$u(t) = \bar{u}(t) + K_c * e(t) \text{ Ec. 4.1}$$

$$e(t) = y_s(t) - y(t) \text{ Ec. 4.2}$$

Donde:

$u(t)$ : Salida del controlador (variable manipulada).

$\bar{u}(t)$ : Salida del controlador en el estado estacionario, cuando el error es cero.

$K_c$ : Ganancia del controlador.

$y_s(t)$ : Set point de la variable controlada.

$y(t)$ : Variable controlada.

$e(t)$ : error.

La ecuación 4.1 muestra que la salida del controlador es proporcional al error, la proporcionalidad está dada por la ganancia del controlador  $K_c$ . La desventaja que presenta este tipo de controlador es que opera con una desviación entre el set point y la variable controlada, esta desviación del punto de ajuste se denomina como off-set.

**Controlador proporcional-integral (PI).** Cuando el proceso controlado no admite off set es necesario implementar un nuevo modo de control, este nuevo modo de control corresponde a la acción integral, en consecuencia, el controlador se transforma en un controlador proporcional-integral, a continuación, se muestra su respectiva ecuación.

$$u(t) = \bar{u}(t) + K_c \left[ e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt \right] \text{ Ec. 4.3}$$

Donde:

$T_i$ : tiempo integral.

**Controlador proporcional-integral-derivativo (PID).** Algunas veces se añade otro modo de control al controlador PI, este corresponde a la acción derivativa, la cual tiene como propósito anticipar hacia dónde va el proceso, mediante la observación de la rapidez para el cambio del error, su derivada. La ecuación 4.4 describe su funcionamiento.

$$u(t) = \bar{u}(t) + K_c \left[ e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \right] \text{ Ec. 4.4}$$

Donde:

$T_D$ : tiempo derivativo.

No se recomienda este tipo de controlador cuando el sistema presenta ruido, la aplicación de la acción derivativa da como resultado la amplificación de este inconveniente [6].

#### 4.6. Función de transferencia.

La función de transferencia es un modelo matemático usado para expresar la ecuación diferencial que relaciona la variable de salida con la variable de entrada, se define como el cociente entre la transformada de Laplace de la salida (función de respuesta) y la transformada de Laplace de la entrada (función de excitación), bajo la suposición de que todas las condiciones iniciales son cero (en variables de desviación).

A partir de la función de transferencia es posible representar la dinámica de un sistema en ecuaciones algebraicas en el dominio de la transformada de Laplace (S), cuya potencia más alta en el denominador (n) corresponde al orden n-ésimo del sistema [7].

La ecuación 4.1 representa una función de transferencia de proceso ( $G_p$ ) de primer orden con tiempo muerto, la cual está conformada por los siguientes términos:

$$G_p = \frac{K_p * e^{-t_D S}}{\tau S + 1} \text{ Ec. 4.5}$$

$K_p$ : ganancia del proceso, se define como la relación entre la magnitud del cambio de la variable de salida con respecto a la magnitud del cambio en la variable de entrada.

$t_D$ : tiempo muerto, es el intervalo de tiempo que tarda en producirse un cambio en la magnitud de la variable salida, una vez se efectúa un cambio en la variable de entrada.

$\tau$ : constante de tiempo, se define como el tiempo que tarda el sistema en alcanzar el 63,2% del total del cambio en la variable de salida.

Los parámetros de una función de transferencia de proceso de primer orden con tiempo muerto, se pueden encontrar haciendo pruebas dinámicas en lazo abierto tales como la curva de reacción, la cual consiste en realizar un escalón a una variable de entrada del proceso, cuando el sistema se encuentre en estado estacionario, y graficar la magnitud de la variable de salida en el tiempo hasta que el sistema alcance un nuevo estado estacionario.

#### **4.7. Sintonización de controladores por retroalimentación.**

La sintonización de un controlador debe tener en cuenta cuatro factores fundamentales.

- El algoritmo PID que tiene el controlador, puesto que en los distintos controladores comerciales no son exactamente iguales.
- El modelo dinámico del proceso puede variar de unas condiciones de operación a otras, debido a la no linealidad del proceso real.
- La variable manipulada no debe experimentar cambios excesivamente bruscos que afecten negativamente al equipo.
- La calidad de la respuesta deseada puede referirse a cambios en el punto de ajuste o a cambios en las perturbaciones.

##### **4.7.1. Criterios de calidad de respuesta.**

Los criterios de calidad de respuesta se dividen en:

- Criterios de estabilidad (margen de fase o ganancia)
- Criterios basados en la respuesta en estado estacionario (offset permitido).
- Criterios basados en la respuesta dinámica del sistema, denominados criterios de desempeño

### **Criterios de Desempeño.**

Estos criterios se basan en la integral del error, entre los más comunes se encuentran:

1. Integral del cuadrado del error (ISE).

$$ISE = \int e^2(t)dt \text{ Ec. 4.6}$$

2. Integral del valor absoluto del error (IAE).

$$IAE = \int |e(t)|dt \text{ Ec. 4.7}$$

3. Integral del valor absoluto del error por el tiempo (ITAE).

$$ITAE = \int t|e(t)|dt \text{ Ec. 4.8}$$

La sintonización óptima es la que minimiza el criterio seleccionado (ISE, IAE, ITAE).

#### **4.7.2. Métodos de sintonización de controladores PID.**

Existen métodos de sintonía que no requieren de un modelo del proceso, se pueden implementar de manera totalmente experimental, entre ellos destaca el modelo de Ziegler Nichols de lazo cerrado; también existen otros modelos que hacen uso de modelos aproximados del proceso a

sistemas de primer orden con tiempo muerto, entre ellos se encuentran los modelos propuestos por Cohen Coon, Ziegler Nichols de lazo abierto, Ciancone, entre otros.

**Método de Cohen Coon.** Basándose en diferentes criterios de optimización (1/4 de relación de decaimiento, mínimo offset, ISE) propuso las relaciones mostradas en la siguiente tabla.

**Tabla 4.1.** Método de sintonía de Cohen Coon.

Controlador	Parámetros.	Cohen-Coon
P	Kc	$\frac{1}{K_p} \frac{\tau}{t_D} \left(1 + \frac{t_D}{3\tau}\right)$
PI	Kc	$\frac{1}{K_p} \frac{\tau}{t_D} \left(0.9 + \frac{t_D}{12\tau}\right)$
	TI	$\frac{t_D \left[30 + 3 \left(\frac{t_D}{\tau}\right)\right]}{9 + 20 \left(\frac{t_D}{\tau}\right)}$
PID	Kc	$\frac{1}{K_p} \frac{\tau}{t_D} \left(\frac{16\tau + 30}{12\tau}\right)$
	TI	$\frac{t_D \left[32 + 6 \left(\frac{t_D}{\tau}\right)\right]}{13 + 8 \left(\frac{t_D}{\tau}\right)}$
	TD	$\frac{4t_D}{11 + 2 \left(\frac{t_D}{\tau}\right)}$

**Método de Ziegler-Nichols de lazo abierto.**

Basándose también en la relación de decaimiento de 1/4, Ziegler y Nichols propusieron las relaciones ilustradas en la tabla 4.2, este método se recomienda usar cuando la relación entre el tiempo muerto y la constante de tiempo se encuentre dentro del rango 0.1 a 1.

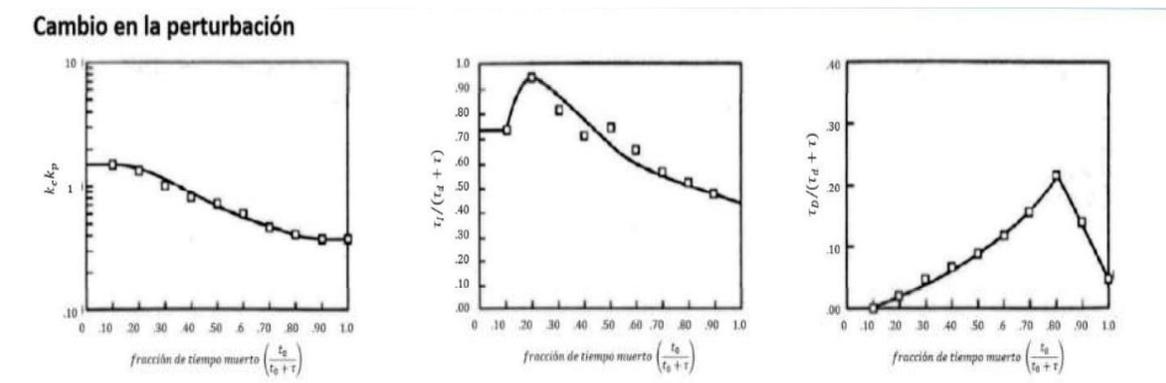
**Tabla 4.2.** Método de sintonía de Ziegler-Nichols lazo abierto.

Controlador	Parámetros.	Cohen-Coon
P	Kc	$\frac{1}{K_p} \frac{\tau}{t_D}$
PI	Kc	$\frac{0.9}{K_p} \frac{\tau}{t_D}$
PID	TI	$3.33t_D$
	Kc	$\frac{1.2}{K_p} \frac{\tau}{t_D}$
	TI	$2t_D$
	TD	$0.5t_D$

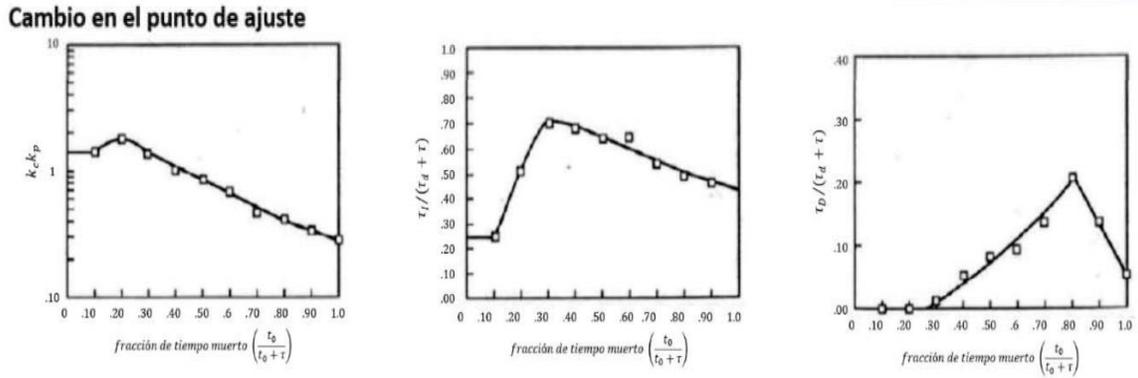
**Método de Ciancone.** Ciancone obtuvo correlaciones diferentes para control por cambios en el set point y cambios en la perturbación, basándose en los siguientes criterios:

- Errores de  $\pm 25\%$  en los parámetros del modelo.
- Modelo simple de primer orden con tiempo muerto.
- Minimización del IAE en la respuesta a un escalón.
- Restricciones en la variación de la variable manipulada.

Las correlaciones de Ciancone para un PID se muestran en las figuras 4.8 y 4.9.



**Figura 4.8.** Correlaciones de Ciancone para cambios en la perturbación [8].



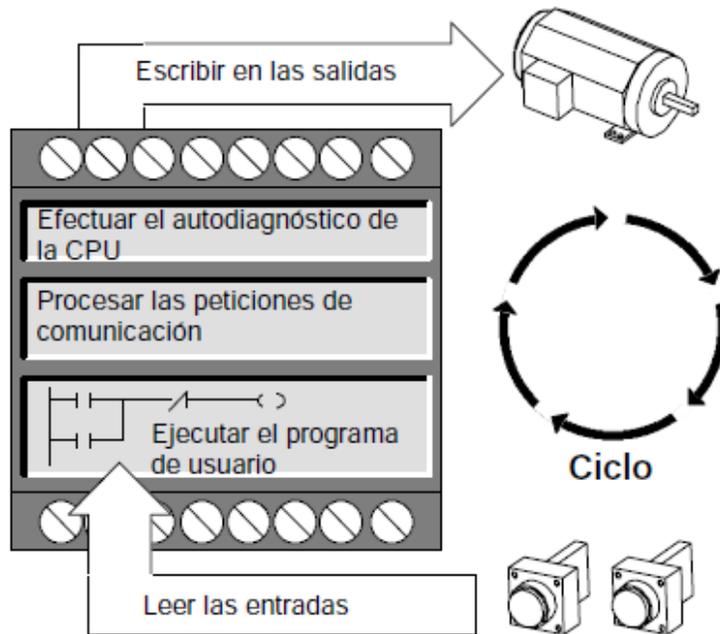
**Figura 4.9.** Correlaciones de Ciancone para cambios en el punto de ajuste [8].

#### 4.8. Controladores lógicos programables (PLC).

Un controlador lógico programable (PLC) es una forma especial de controlador basado en microprocesador que utiliza una memoria programable para almacenar instrucciones y para implementar funciones tales como lógica, secuenciación, temporización, conteo y aritmética para controlar máquinas y procesos. El término lógica se usa porque la programación se ocupa principalmente de implementar la lógica y las operaciones de conmutación [9].

Un PLC ejecuta 3 operaciones principales en secuencia cíclica: lectura, ejecución y escritura. El PLC lee el estado de las entradas, luego el programa almacenado en la CPU utiliza las entradas para evaluar la lógica, durante la ejecución del programa, el PLC actualiza los datos, finalmente escribe los datos en las salidas.

La figura 4.10 ilustra el ciclo de tareas ejecutadas por el PLC S7-200, el cual hace parte del equipo de interés del presente trabajo.



**Figura 4.10.** Ciclo del S7-200 [10].

EL S7-200 ejecuta la siguiente serie de tareas de forma repetitiva, esta ejecución se denomina ciclo [10].

- Leer las entradas: el S7-200 copia el estado de las entradas físicas en la imagen de proceso de las entradas.
- Ejecuta la lógica de control en el programa: ejecuta las operaciones del programa y guarda los valores en las distintas áreas de memoria.
- Procesar las repeticiones de comunicación: ejecuta las tareas necesarias para la comunicación.
- Efectuar el autodiagnóstico de la CPU: verifica si el firmware, la memoria del programa y los módulos de ampliación están trabajando correctamente.
- Escribir en las salidas: los valores almacenados en la imagen de proceso de las salidas se escriben en las salidas físicas.

### **Entradas y salidas digitales.**

Son señales discretas que solo pueden tomar los valores de cero o uno lógico. Los módulos de entradas digitales trabajan con señales de tensión, por ejemplo, cuando de un elemento llega una señal de 24 V se interpreta como un 1, y cuando llega cero voltios se interpreta como un 0.

### **Entradas y salidas análogas.**

Las entradas y salidas análogas son señales eléctricas cuyos valores de tensión o voltaje varían constantemente y pueden tomar cualquier valor dentro de un determinado rango. Los módulos de entradas del PLC, convierten la magnitud analógica en un número que se deposita en una variable de memoria interna del autómata, la señal se convierte de analógica a digital A/D, esta conversión se realiza con una precisión o resolución determinada (número de bits) y cada cierto intervalo de tiempo (periodo muestreo). Los módulos de salida convierten la señal digital a analógica D/A, también con una determinada resolución y periodo de muestreo.

### **Elementos básicos de un programa en PLC S7-200.**

Un bloque de programa se compone del código ejecutable y los comentarios. El código ejecutable comprende el programa principal, así como subrutinas y/o rutinas de interrupción (opcionales). El código se compila y se carga en el S7-200, a excepción de los comentarios del programa. Las unidades de organización (programa principal, subrutinas y rutinas de interrupción) sirven para estructurar el programa de control [10].

### **Programa principal (OB1).**

Esta parte del programa contiene las operaciones que controlan la aplicación. El S7-200 ejecuta estas operaciones en orden secuencial una vez por ciclo. El programa principal se denomina también OB1 [10].

### **Subrutinas (SBR).**

Estos elementos opcionales del programa se ejecutan sólo cuando se llaman desde el programa principal, desde una rutina de interrupción, o bien desde otra subrutina. Las subrutinas son elementos opcionales del programa, adecuándose para funciones que se deban ejecutar repetidamente. Así, en vez de tener que escribir la lógica en cada posición del programa principal donde se deba ejecutar una función, basta con escribirla sólo una vez en una subrutina y llamar a la subrutina desde el programa principal cada vez que sea necesario. Las subrutinas tienen varias ventajas [10]:

- La utilización de subrutinas permite reducir el tamaño total del programa.
- La utilización de subrutinas acorta el tiempo de ciclo, puesto que el código se ha extraído del programa principal. El S7-200 evalúa el código del programa principal en cada ciclo, sin importar si el código se ejecuta o no. Sin embargo, el S7-200 evalúa el código en la subrutina sólo si se llama a ésta. En cambio, no lo evalúa en los ciclos en los que no se llame a la subrutina.
- La utilización de subrutinas crea códigos portátiles. Es posible aislar el código de una función en una subrutina y copiar ésta a otros programas sin necesidad de efectuar cambios o con sólo pocas modificaciones.

### **Rutinas de interrupción (INT).**

Estos elementos opcionales del programa reaccionan a determinados eventos de interrupción. Las rutinas de interrupción se pueden programar para gestionar eventos de interrupción predefinidos. El S7-200 ejecuta una rutina de interrupción cuando ocurre el evento asociado. El programa principal no llama a las rutinas de interrupción. Una rutina de interrupción se asocia a un evento de interrupción y el S7-200 ejecuta las operaciones contenidas en esa rutina sólo cada vez que ocurra el evento en cuestión.

## **4.9. Sistema SCADA.**

Según Aquilo [11], un sistema SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition o Control con Supervisión y Adquisición de Datos), es “cualquier software que permita el acceso a datos remotos de un proceso y permita, utilizando las herramientas de comunicación necesarias en cada caso, el control del mismo. No se trata de un sistema de control, sino de una utilidad software de monitorización o supervisión, que realiza la tarea de interface entre los niveles de control (PLC) y los de gestión a un nivel superior”.

Los objetivos para que su instalación sea perfectamente aprovechada son los siguientes [11]:

- Funcionalidad completa de manejo y visualización en sistema operativo sobre cualquier PC estándar.
- Arquitectura abierta que permita combinaciones con aplicaciones estándar y de usuario, que permitan a los integradores crear soluciones de mando y supervisión
- Sencillez de instalación, sin exigencias de hardware elevadas, fáciles de utilizar, y con interfaces amigables con el usuario.
- Permitir la integración con las herramientas ofimáticas y de producción.
- Fácilmente configurable y escalable, debe ser capaz de crecer o adaptarse según las necesidades cambiantes de la empresa.
- Ser independiente del sector y la tecnología.
- Funciones de mando y supervisión integradas.
- Comunicaciones flexibles para poder comunicarse con total facilidad y de forma transparente al usuario con el equipo de planta y con el resto de la empresa (redes locales y de gestión).

#### **4.10. Interfaz Hombre-Máquina (HMI).**

De acuerdo a Aquilino [11], una interfaz hombre-máquina, comprende los sinópticos de control y los sistemas de presentación gráfica. La función de un Panel Sinóptico es la de representar, de forma simplificada, el sistema bajo control. En un principio los paneles sinópticos eran de tipo estático, colocados en grandes paneles plagados de indicadores y luces. Con el tiempo han ido

evolucionando, junto al software, en forma de representaciones gráficas en pantallas de visualización (PVD, Pantallas de Visualización de Datos).

## 5. Metodología.

En la fase inicial de este trabajo se llevó a cabo la realización del estado del arte, por medio de la búsqueda en literatura acerca de las estrategias de control más convenientes para operar una columna de destilación, diseño de sistemas de control, métodos de sintonización de los parámetros de un controlador PID, evaluación del desempeño para este tipo de equipo y finalmente algunos conceptos relacionados con el PLC, sistemas SCADA y HMI.

En la segunda fase se realizó la identificación del equipo, qué elementos y estructuras conforman todo el sistema, de esta forma se documentó toda la instrumentación con la que cuenta actualmente la torre de destilación. Todo esto se muestra en la siguiente sección.

## 6. Desarrollo.

### 6.1. Descripción del equipo

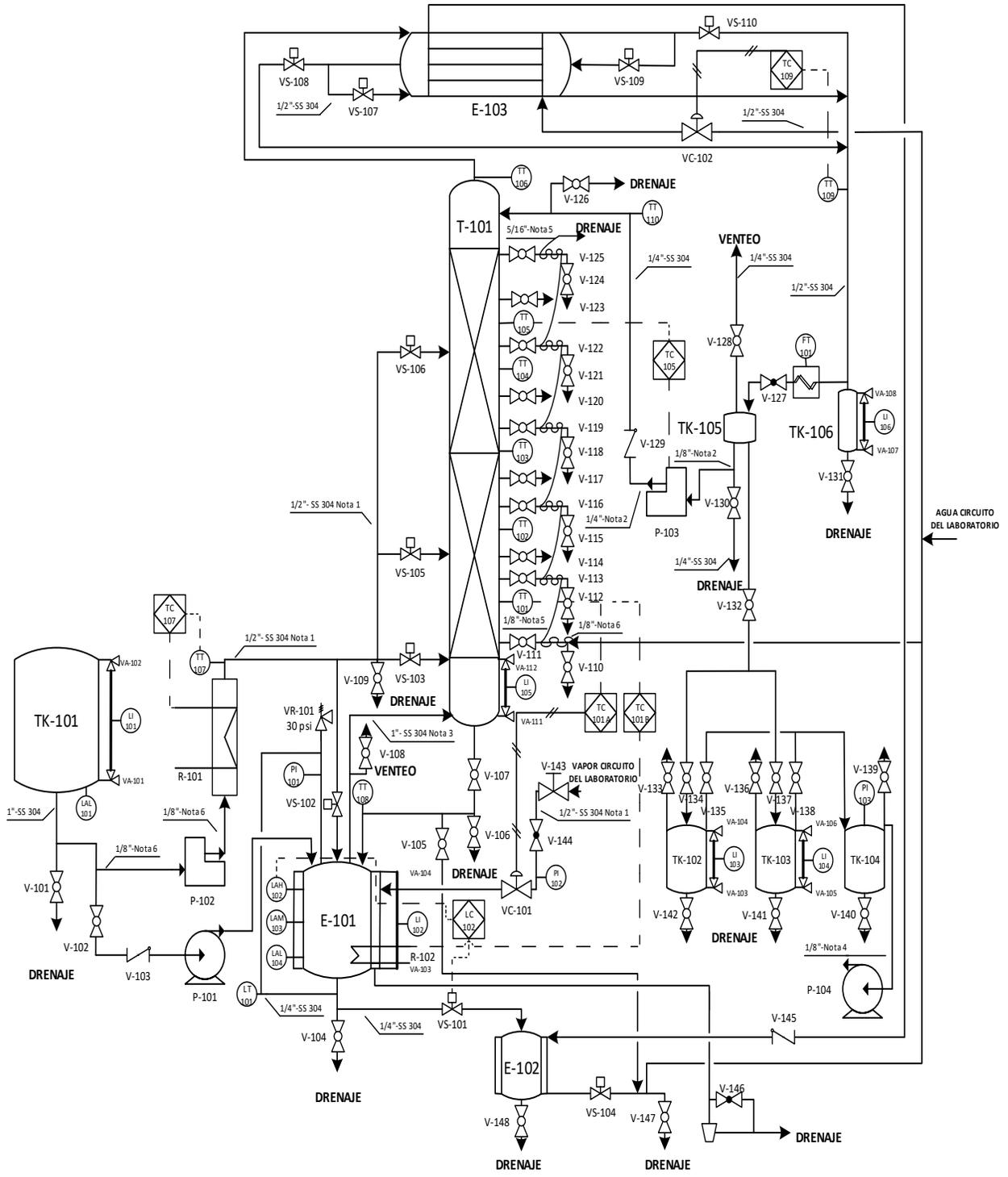
En la tabla 6.1 se muestra la descripción de la instrumentación disponible actualmente en la columna. En la figura 6.1 se observa el diagrama P&ID actualizado del proceso.

**Tabla 6.1.** Instrumentación instalada actualmente en la columna de destilación.

Elemento	Cantidad	Tipo de señal	Descripción
Sensor de temperatura PT-100	10	Entrada análoga	Termopar 2 hilos, 9 con rango de temperatura 0-100°C y 1 con rango de 0-110°C

Sensor de flujo másico Coriolis	1	Entrada análoga	Envía una señal de 4-20 mA por medio de un transmisor Modelo 1700. Rango de medición 0-50 L/h
Sensor diferencial de presión	1	Entrada análoga	El sensor diferencial de presión de Rosemount tiene acoplado el transmisor 1151 Smart Pressure Transmitters. Este sensor realiza la diferencia entre el punto de baja presión (L) y el de alta presión (H), arrojando como resultado la presión ejercida por la columna de líquido acumulado.
Válvula de control neumática	2	Salida análoga	Las válvulas son de acción neumática, manejando un rango de 3 -15 psi de presión directamente relacionado con la apertura de la válvula. El flujo de aire es regulado por medio de un convertidor I/P, el cual recibe una señal de control de 4-20 mA y la convierte en una salida de aire de 3-15 psi.
Válvula solenoide	10	Salida digital	Válvulas solenoides de acción directa (rango de presión 0-17 psig), y servoaccionadas-on off (rango de presión 0,3 – 30 bar.), de ½”, en ambos casos accionadas a 24 VDC-on-off.
Bomba dosificadora	2	Salida análoga	Regulan el flujo por medio de una señal de control de 4-20 mA; con rango de 0-45 L/h
Bomba centrífuga	1	Salida digital	SAER ELECTROPOMPE TIPO OMP, 115 V, 3450 RPM, 24-11 Hmt , 0.5 HP, 60 Hz, 0.37 KW

---



**Figura 6.1.** Diagrama P&ID actualizado de la Torre de destilación empacada.

A continuación, se da una breve descripción del sistema y cada uno de los elementos que lo conforman.

Sistema para la destilación y rectificación (a presión atmosférica o empleando vacío) de mezclas multicomponentes, construida en acero inoxidable SS-304 y empacada con Cascade Minirings. El rehervidor tiene una capacidad de 30 L y cuenta para el servicio de calefacción con resistencia eléctrica de 4000W o chaqueta para vapor saturado. Cuenta con un tanque de almacenamiento de carga de 40 L, sistema de precalentamiento del alimento conformado por una resistencia de 4000W, 3 puntos diferentes de alimentación en la columna (bajo, medio y alto), 10 sensores transmisores de temperatura distribuidos a lo largo del equipo, 10 puntos de muestra en la columna, 2 válvulas de control neumáticas, 1 medidor de flujo másico coriolis, 1 sensor diferencial de presión, 2 bombas de diafragma para reflujo y para la alimentación y una bomba centrífuga empleada para cargar el rehervidor. Las secciones de columna y el rehervidor cuentan con sistema de aislamiento térmico y camisa en acero inoxidable. El flujo de fondos se acondiciona por medio de un enfriador, y el destilado se enfría y colecta en tanques acumuladores. El sistema de condensación permite seleccionar el número de pasos por los tubos, 1, 2 o 3 pasos, lo que permite estudiar diferentes arreglos de transferencia de calor.

El sistema se controla automáticamente por medio de un PLC, además, cuenta con una interfaz máquina-hombre (HMI).

### **Estructura.**

La estructura del sistema de destilación consta de 5 módulos básicamente, sistema de alimentación y tablero de control, torre de destilación y rehervidor, condensador, tanques colectores y sistema de vacío y el sistema de reflujo, adicionalmente, el soporte de toda la estructura, la escalera y las barandas del segundo nivel de la estructura.

### **Alimentación.**

El sistema de carga cuenta un tanque de alimentación, una bomba de diafragma para regulación del flujo, una bomba centrífuga para carga del rehervidor, sensor PT-100 y una resistencia de precalentamiento. A continuación, se describen los componentes del sistema:

- Tanque de carga
  - Volumen 40 L
  - Material de construcción acero inoxidable
  - Tapa plana en acero inoxidable
  - Nivel tipo caldera de ½"
  - Conexión de 1" en la parte lateral del tanque
  - Alarma de nivel bajo (flotador).
- Precalentador
  - Resistencia de 4000 W.
- Bomba dosificadora
  - Conexión a proceso ½"
  - Bomba tipo diafragma.
  - Pantalla de visualización.
  - Señal de control de 4-20 mA.
  - Rango de flujo de 0-45 L/h.

**Rehervidor.**

Rehervidor en acero inoxidable SS-304 con capacidad de 30 L. Cuenta con chaqueta en acero inoxidable SS-304 para calentamiento con vapor, adicionalmente, cuenta con una resistencia eléctrica sumergible en acero inoxidable, válvula solenoide servoaccionada para descarga y válvula solenoide servoaccionada para carga, sensor PT-100, manómetro de 0-100 psi, en el interior cuenta con 3 alarmas de nivel (bajo, medio y alta).

- Tapa:
  - Flancheda con 8 perforaciones
  - Tornillería en acero inoxidable
  - 4 conexiones de ½"
  - 1 conexión de 1"
- Cuerpo
  - Flanche con 8 perforaciones
  - 3 uniones de ½" al cuerpo principal

- 2 uniones a la chaqueta
- 1 conexión de 1 ¼"
- Mensulas de soporte en acero inoxidable.

## **Columna.**

Columna para destilación y rectificación (atmosférica y/o vacío) de mezclas multicomponentes, con sensores de temperatura a lo largo de la columna, puntos de alimentación para operación continua, puntos de muestreo con válvulas de bola en acero inoxidable de ¼". A continuación, se describen los componentes principales de la columna:

- 2 secciones empacadas
  - Primer tramo:
    - Altura 1,5 m.
    - Diámetro 10 cm
    - 5 puntos de muestreo
    - 1 visor a contraluz
    - 2 puntos de temperatura
    - 2 puntos de alimentación
    - Aislamiento térmico con recubrimiento en acero inoxidable
    - Rejilla de soporte de empaque
    - Ménsula de soporte
  - Segundo tramo
    - Altura 1,5 m.
    - Diámetro 10 cm
    - 5 puntos de muestreo
    - 3 punto de temperatura
    - 1 puntos de alimentación
    - Aislamiento térmico con recubrimiento en acero inoxidable

- Rejilla de soporte de empaque
  - Ménsula de soporte
- Fondo columna
  - Conexión de 1" para ingreso de vapor
  - Nivel tipo caldera
  - Conexión de ½" por el fondo para retorno a la torre
- Cabezal de reflujo
  - Conexión de ¼" para entrada de reflujo
  - Distribuidor tipo flauta
- Tipo de empaque:
  - Cascade® Mini-Rings (CMR®): Empaque de la tercera generación de empaque al azar. Estos anillos son similares a los anillos Pall®, pero la relación de aspecto (altura a diámetro) en los CMR® es de 1:3 mientras que en los anillos Pall® es de 1:1. La menor relación de aspecto orienta las partículas, lo cual reduce la fricción y ofrece mayor área de transferencia de masa.
- Bridas con tornillería en acero inoxidable
- 2 Distribuidores de flujo
- Empaque de asbesto teflonado resistente a altas temperaturas y solventes orgánicos
- 10 válvulas de bola en acero inoxidable de ¼"
- 3 válvulas solenoides de ½"
- 5 sensores PT-100

### **Condensador.**

El sistema de condensación mediante el cual los vapores generados en el rehervidor y rectificadores en las dos secciones de la columna son condensados. Este sistema cuenta con 1

válvula de control mediante la cual se regula el flujo de agua de refrigeración, 4 válvulas solenoides y 2 sensores PT-100. El condensador es del tipo tubos y coraza, con la opción de trabajar 1,2 o 3 pasos por los tubos y 1 por la camisa. A continuación, se describen los componentes del sistema:

- Condensador del tipo tubos y coraza, con la posibilidad de 1 paso por la coraza uno por los tubos (1-1), 1 paso por la coraza dos por los tubos (1-2) y un paso por la coraza tres por los tubos (1-3).
- 4 válvulas solenoides para seleccionar el arreglo del número de pasos por los tubos.
- 2 sensores PT 100.

### **Reflujo.**

Mediante el sistema de reflujo se realiza la medición del flujo de condensados y se retorna la cantidad de condensado necesaria para asegurar la relación de reflujo establecida por el usuario. A continuación, se describen los componentes del sistema de reflujo:

- Tanque en acero inoxidable SS-304 para recolectar condensado.
- Medidor de flujo
  - Medidor másico por el principio de Coriolis
  - Señal de control de 4-20 mA
  - Conexión a proceso de ½" bridada
- 1 Válvula de aguja.
- Mirilla de flujo en vidrio con flanches en acero inoxidable SS-304
- Bomba dosificadora
  - Conexión a proceso ½"
  - Tipo: diafragma
  - Pantalla de visualización
  - Señal de control de 4-20 mA
  - Rango de flujo de 0-45 L/h

### **Colectores y sistema de vacío.**

Tanques colectores en acero inoxidable SS-304, con fondo y tapa hemielipsoidales, para coleccionar cortes de condensados, con sistema de transmutación para operación de vacío; trampa de vacío en acero inoxidable SS-304 con bomba de vacío.

- Tanques colectores
  - 2 Tanque cilíndrico en acero inoxidable SS-304, con sistema de transmutación
  - 2 conexiones laterales de ½" en cada tanque
  - Tapa hemi-elipsoidal soldada, con tres conexiones de ½" FNPT
  - 6 Válvulas en acero inoxidable para realizar la transmutación y venteo de los tanques.
  - Fondo hemi-elipsoidal soldado con una conexión de ½" FNPT, con válvula de bola en acero inoxidable
  - 2 Medidor de nivel de ½", tipo caldera
  - Mensulas de soporte en acero inoxidable con terminación en media luna
  
- Sistema de vacío
  - Trampa de vacío en acero inoxidable
  - Tapa hemielipsoidal soldada con tres conexiones de ½" FNPT
  - 3 válvulas en acero inoxidable
  - Fondo hemi-elipsoidal soldado con una conexión de ½" FNPT
  - 1 bomba de vacío.
  - 1 vacuómetro 0-30 Hg in.
  - Mensulas de soporte en acero inoxidable con terminación en media luna

## **PLC.**

La torre de destilación cuenta con un PLC S7-200 y un panel de control TOUCHPANEL TP177A.

## 6.2.Programación PLC.

Para la programación del PLC inicialmente se determinaron los modos de operación a programar, entre los cuales se encuentran:

- Operación Manual.
- Operación en Continuo.
- Operación en Batch con reflujo.
- Operación en Batch sin reflujo.

En esta etapa también se definió el sistema de control para cada modo de operación. A continuación, se da una breve descripción del proceso que ejecuta cada uno de estos modos, y los lazos de control PID establecidos.

6.2.1. **Operación en manual:** este modo de operación no cuenta con ningún lazo de control, todos los elementos accionados como válvulas solenoides, válvulas de control, resistencias, bombas dosificadoras y centrífuga, se manipulan de forma manual, como medida de precaución y para evitar que se inunde la columna, la válvula solenoide de descarga del rehervidor se activa de manera automática cuando el nivel en el rehervidor activa la alarma de nivel alto.

6.2.2. **Operación en continuo:** este modo de operación cuenta con los siguientes lazos de control:

1. **Control de temperatura en tope de la columna:** la variable controlada es la temperatura sensada por la PT-100 ubicada en la parte más alta de la sección empacada de la columna (TT105), la variable manipulada es el flujo de la bomba dosificadora encargada de retornar el reflujo a la torre (P103), este lazo tiene como finalidad controlar la composición en el producto de tope mediante la temperatura.

2. **Control de temperatura en fondo de la columna:** la variable controlada es la temperatura sensada por la PT-100 ubicada en la parte más baja de la sección empacada de la columna (TT101), la variable manipulada es la apertura de la válvula de control del

flujo de vapor suministrado al rehervidor (VC101) o la potencia de la resistencia del rehervidor (R102), esto dependiendo del modo de calentamiento establecido para la operación ( Vapor o resistencia), este lazo tiene como objetivo controlar la composición en el producto de fondo mediante la temperatura.

3. **Control de temperatura de condensado:** este lazo controla la temperatura de la corriente a la salida del condensador (TT109), manipulando la apertura de la válvula de control del suministro de agua al condensador (VC102). Este lazo se estableció debido a que el equipo no cuenta con un sensor de presión en cuyo caso se podría establecer un lazo para controlar la presión en la columna, manipulando la apertura la válvula de control del suministro de agua al condensador, como se recomienda en literatura.
4. **Control de temperatura de alimentación:** la variable controlada corresponde a la temperatura del alimento suministrado a la columna (TT107), manipulando la potencia de la resistencia del alimento (R101).
5. **Control de nivel rehervidor:** debido a que no se cuenta con alarmas o un sensor de nivel dentro de la columna, se optó por establecer un control de nivel para el líquido acumulado en el rehervidor, el cual dispone de dicha instrumentación, sin embargo, la corriente de producto de fondos no cuenta con una válvula actuada proporcional que permita regular el flujo, por lo cual el nivel se controla con la apertura y cierre de la válvula solenoide ubicada en la corriente de descarga del rehervidor, activándose de manera automática cuando se enciende la alarma de nivel alto y cerrándose cuando esta se desactiva.

El modo de operación en continuo ejecuta de manera secuencial las siguientes tareas.

1. Cargar de rehervidor. El sistema activa la bomba centrífuga y bomba dosificadora de alimentación hasta que el nivel en el rehervidor alcanza la alarma de nivel alto.

2. Encendido de resistencia del rehervidor o apertura de válvula de control del flujo de vapor suministrado al rehervidor: una vez cargado el rehervidor se activan todos los lazos de control de la temperatura exceptuando el del control de temperatura en el tope de la columna, se activa la resistencia o se abre la válvula de suministro de vapor al rehervidor, según el modo de calentamiento seleccionado, esto con el objetivo de alcanzar el set point establecido para cada lazo de control.
3. Operación a reflujo total: La torre de destilación opera a reflujo total, hasta alcanzar una condición de estado estacionario, en el cual la temperatura en el fondo de la columna (TT101) alcanza y permanece en un rango determinado por el set point fijado, durante un intervalo de tiempo establecido por el usuario desde las configuraciones del sistema.
4. Activación de lazo de control de temperatura en tope de la columna y nivel en el rehervidor: después de alcanzar la condición de estado estacionario, el sistema activa los lazos de control de temperatura en el tope de la columna y nivel de líquido en el rehervidor, cabe resaltar que el lazo de control de temperatura en tope puede ser desactivado para habilitar la opción de operar con una relación de reflujo establecida por el usuario. En esta tarea también se activa la alimentación a la torre.

6.2.3. **Operación batch con reflujo:** este modo de operación dispone de los siguientes lazos de control:

1. **Control de temperatura en tope de la columna:** la variable controlada es la temperatura sensada por la PT-100 ubicada en la parte más alta (TT105) de la sección empacada de la columna, la variable manipulada es el flujo de la bomba dosificadora encargada de retornar el reflujo a la torre (P103), este lazo tiene como finalidad controlar la composición en el producto de tope mediante la temperatura.

- 2. Control de temperatura de condensado:** este lazo de controla la temperatura de la corriente a la salida del condensador (TT109), manipulando la apertura de la válvula de control del suministro de agua al condensador (VC102). Este lazo se estableció debido a que el equipo no cuenta con un sensor de presión en cuyo caso se podría establecer un lazo para controlar la presión en la columna, manipulando la apertura la válvula de control del suministro de agua al condensador, como se recomienda en literatura.

El modo de operación batch con reflujo ejecuta de manera secuencial las siguientes tareas.

1. Cargar de rehervidor. El sistema activa la bomba centrífuga y bomba dosificadora de alimentación hasta que el nivel en el rehervidor alcanza la alarma de nivel alto.
2. Encendido de resistencia del rehervidor o apertura de válvula de control del flujo de vapor suministrado al rehervidor: una vez cargado el rehervidor se activa la resistencia o se abre la válvula de suministro de vapor a los valores fijados por el usuario. También se activan todos los lazos de control de la temperatura.

6.2.4. **Operación batch sin reflujo:** este modo de operación dispone de los siguientes lazos de control:

- 1. Control de temperatura en fondo de la columna:** la variable controlada es la temperatura sensada por la PT-100 ubicada en la parte más baja (TT101) de la sección empacada de la columna, la variable manipulada es la apertura de la válvula de control del flujo de vapor suministrado al rehervidor (VC101) o la potencia de la resistencia del rehervidor (R102), esto dependiendo del modo de calentamiento establecido para la operación (Vapor o resistencia).

- 2. Control de temperatura de condensado:** este lazo de controla la temperatura de la corriente a la salida del condensador (TT109), manipulando la apertura de la válvula de control del suministro de agua al condensador (VC102). Este lazo se estableció debido a que el equipo no cuenta con un sensor de presión en cuyo caso se podría establecer un lazo para controlar la presión en la columna, manipulando la apertura la válvula de control del suministro de agua al condensador, como se recomienda en literatura.

El modo de operación batch sin reflujo ejecuta de manera secuencial las siguientes tareas.

1. Cargar de rehervidor. El sistema activa la bomba centrífuga y bomba dosificadora de alimentación hasta que el nivel en el rehervidor alcanza la alarma de nivel alto.
2. Encendido de resistencia del rehervidor o apertura de válvula de control del flujo de vapor suministrado al rehervidor: una vez cargado el rehervidor se activan todos los lazos de control de la, se activa la resistencia o se abre la válvula de suministro de vapor al rehervidor, según el modo de calentamiento seleccionado, esto con el objetivo de alcanzar el set point establecido para cada lazo de control.

Cada modo de operación se puede finalizar en cualquier momento mediante la orden de finalizar que puede ser ejecutada por el usuario.

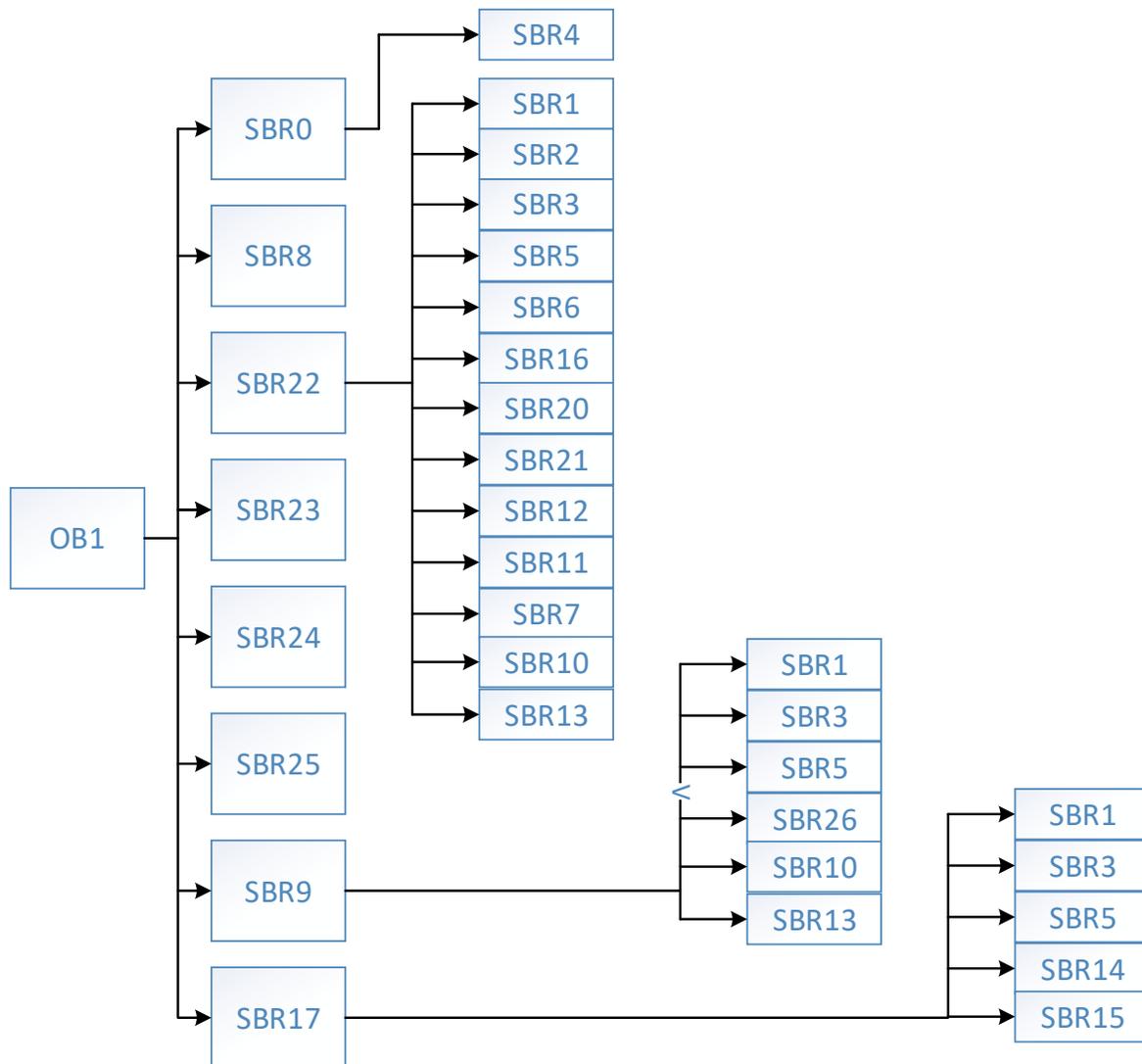
El sistema ejecuta de manera automática las siguientes tareas establecidas para garantizar seguridad y protección de los equipos:

1. Apagado de resistencia y flujo de vapor en rehervidor: cuando el nivel de líquido en el rehervidor activa la alarma de nivel bajo el sistema procede a cerrar por completo la válvula de vapor y/o apaga la resistencia. Esta acción también se ejecuta cuando la temperatura del rehervidor es mayor o igual a 100 °C

2. Apagado de bomba dosificadora de alimentación y bomba centrífuga: las bombas, dosificadora del alimento y centrífuga se desactivan cuando la alarma de nivel bajo en el tanque de almacenamiento se activa. La bomba dosificadora de alimentación tampoco se activa cuando ninguna de las válvulas solenoides del rehervidor y alimentación en punto bajo, medio y alto de la columna están abiertas.
3. Apagado de resistencia de alimento: la resistencia del alimento se apaga por completo cuando el flujo de la bomba dosificadora del alimento es igual a cero.

### **6.3.Estructura programa PLC.**

La figura 6.2 muestra la estructura del programa del PLC.



**Figura 6.2.** Diagrama programa PLC.

A continuación, se da una breve descripción de cada elemento que conforma el programa mostrado en la figura 6.2.

OB1: programa principal, en el bloque principal se encuentra conformado por diversas subrutinas las cuales contienen los modos de operación: Manual (SBR24), Continuo (SBR22), Batch con reflujo (SBR9) y Batch sin reflujo (SBR17).

SBR0: subrutina que tiene como función realizar la escalización de todas las señales de entrada análogas a las respectivas unidades de ingeniería de cada variable.

SBR1: subrutina que tiene como función realizar la carga de la mezcla a separar desde el tanque de almacenamiento al rehervidor.

SBR2: subrutina que tiene como función realizar la configuración de apertura y cierre de las válvulas solenoides para establecer el punto de alimentación (bajo, medio y alto).

SBR3: subrutina que tiene como función realizar la configuración de apertura y cierre de las válvulas solenoides para establecer el número de pasos por tubos en el condensador (uno, dos y tres).

SBR4: subrutina creada para realizar todas las operaciones matemáticas para la escalización de todas las señales de entrada análogas realizadas en SBR0.

SBR5: subrutina que contienen la operación del algoritmo (PID) para controlar la temperatura del condensado, manipulando la válvula de control del suministro de agua refrigerante en el condensador.

SBR6: subrutina que contienen la operación del algoritmo (PID) para controlar la temperatura ubicada en la parte baja de la sección empacada de la columna, manipulando la apertura de la válvula de control del flujo de vapor suministrado al rehervidor para la operación en continuo.

SBR7: subrutina que contienen la operación del algoritmo (PID) para controlar la temperatura del alimento suministrada, manipulando la potencia de la resistencia del alimento.

SBR8: subrutina que tiene como función asignar los parámetros a cada bloque de operación PID dependiendo del modo de operación y modo de calentamiento para el rehervidor que se defina.

SBR9: subrutina que lleva a cabo la operación en batch con reflujo.

SBR10: subrutina que contienen la operación del algoritmo (PID) para controlar la temperatura ubicada en la parte alta de la sección empacada de la columna, manipulando el flujo de la bomba dosificadora encargada de retornar el reflujo a la torre en la operación en continuo.

SBR11: subrutina que tiene como función realizar la alimentación de la mezcla a separar desde el tanque de almacenamiento a la columna de destilación.

SBR12: subrutina que tiene como función realizar la operación de reflujo total.

SBR13: subrutina que tiene como función realizar la operación de reflujo definido por el usuario.

SBR14: subrutina que contienen la operación del algoritmo (PID) para controlar la temperatura ubicada en la parte baja de la sección empacada de la columna, manipulando la apertura de la válvula de control del flujo de vapor suministrado al rehervidor para la operación en batch sin reflujo.

SBR15: subrutina que contienen la operación del algoritmo (PID) para controlar la temperatura ubicada en la parte baja de la sección empacada de la columna, manipulando la potencia de la resistencia del rehervidor para la operación en batch sin reflujo.

SBR16: subrutina que contienen la operación del algoritmo (PID) para controlar la temperatura ubicada en la parte baja de la sección empacada de la columna, manipulando la potencia de la resistencia del rehervidor para la operación en continuo.

SBR17: subrutina que lleva a cabo la operación en batch sin reflujo.

SBR19: subrutina que contienen la operación del algoritmo (PID) para controlar la temperatura ubicada en la parte alta de la sección empacada de la columna, manipulando el flujo de la bomba dosificadora encargada de retornar el reflujo a la torre, en la operación en batch con reflujo.

SBR20: subrutina que contienen la operación del algoritmo (PID) para controlar el flujo condensado, manipulando la apertura de la válvula de control del flujo de vapor suministrado al rehervidor para la operación en continuo. Este lazo de control no fue objeto de estudio en el presente trabajo.

SBR21: subrutina que contienen la operación del algoritmo (PID) para controlar el flujo condensado, manipulando la potencia de la resistencia del rehervidor para la operación en continuo. Este lazo de control no fue objeto de estudio en el presente trabajo.

SBR22: subrutina que lleva a cabo la operación en continuo.

SBR23: subrutina que lleva a cabo la finalización de cualquier modo operación que se esté ejecutando, apaga todas las resistencias, bomba centrífuga, manda flujo cero para las dos bombas dosificadoras, cierra por completo las dos válvulas proporcionales de control y desactiva todas las válvulas solenoides.

SBR24: subrutina que lleva a cabo la operación en manual.

SBR25: subrutina que lleva a cabo la normalización de todas las variables de entrada para cada operación del algoritmo PID.

En esta etapa también se diseñó la interfaz gráfica del sistema SCADA, en conjunto la actualización del programa HMI para el panel de control.

Una vez realizada la interfaz gráfica del sistema SCADA se procedió a verificar que todos los elementos e instrumentación de la columna funcionen correctamente, para ello inicialmente se preparó la mezcla de sustancias a separar que corresponde a una solución de agua-etanol con 30% v/v de etanol. Luego se operó la torre en modo manual, primero con medio de calentamiento de vapor y luego con resistencia. A partir de estas pruebas también se logró identificar algunas condiciones de operación que sirvieron de base para la etapa de sintonización de los controladores.

#### **6.4.Sintonización de Controladores.**

La sintonización de los controladores PID establecidos en el sistema de control para cada modo de operación, se realizó siguiendo varias etapas. Inicialmente se operó la torre de destilación en el modo manual, con la finalidad de realizar curvas de reacción que permitieron determinar los parámetros de las funciones de transferencia de cada proceso. A continuación, se describe cada experimento realizado para estimar dichos parámetros.

La mezcla de sustancias con la que se realizó la experimentación corresponde a una mezcla agua-etanol, la cual se preparó para que contenga un 30% V/V de etanol.

##### **6.4.1. Sintonización de lazos de control para operación en continuo con vapor.**

Para la realización de las curvas de reacción se mantuvieron constantes las condiciones de operación de las variables que no hacen parte de está, a continuación, se muestran las condiciones de operación iniciales.

- Alimentación a la columna en punto medio.
- 3 pasos por los tubos en el condensador.
- Resistencia de precalentamiento del alimento 100% de total de potencia (4000W).
- Flujo de alimentación 10 L/h.
- Flujo de reflujo 10L/h.
- % de apertura de válvula de suministro de vapor al rehervidor de 50%.
- % de apertura de válvula de suministro de agua refrigerante al condensador de 40%.

- Resistencia del rehervidor 0% de total de potencia (0W).
- Nivel inicial de carga al rehervidor hasta alarma de nivel medio.

Luego se procedió a realizar los escalones uno a la vez de cada variable de entrada para los lazos de control correspondientes a este modo de operación, con la precaución de retornar a las condiciones iniciales y esperar el tiempo necesario hasta que el sistema alcance el estado estacionario, para posteriormente estimar de la curva de reacción los parámetros de la función de transferencia del proceso de primer orden con tiempo muerto, esto mediante el proceso previamente mostrado en el marco teórico.

Con los parámetros de las funciones del proceso se determinó los valores de un controlador PI haciendo uso de los métodos de Ziegler-Nichols lazo abierto, Ciancone y Cohen Coon.

Finalmente se procedió a evaluar los parámetros de los controladores estimados por cada método, operando la torre en modo continuo con las siguientes condiciones de operación.

- Alimentación a la columna en punto medio.
- 3 pasos por los tubos en el condensador.
- Flujo de alimentación 10 L/h.
- Set point temperatura de tope de la sección empacada 75 °C
- Set point temperatura de fondo de la sección empacada 90 °C
- Set point temperatura de condensado de la sección empacada 35 °C
- Set point temperatura de alimentación 90 °C

Como perturbación al sistema se empleó el cambio del flujo de alimentación de 10-15 L/h. Para evaluar el desempeño de cada lazo de control con los parámetros de sintonía encontrados, se empleó el criterio basado en el índice IAE.

Para sintonizar los controladores de los otros modos de operación se siguió la misma metodología mostrada para la operación en continuo con vapor, variando las condicione

iniciales de operación en el modo manual empleado para realizar las curvas de reacción, además de las condiciones con que se evaluó cada conjunto de parámetros.

#### **6.4.2. Sintonización de lazos de control para operación en continuo con resistencia.**

Condiciones de operación del modo manual para la realización de las curvas de reacción:

- Alimentación a la columna en punto medio.
- 1 paso por los tubos en el condensador.
- Resistencia de precalentamiento del alimento 100% de total de potencia (4000W).
- Flujo de alimentación 10 L/h.
- Flujo de reflujo 5L/h.
- % de apertura de válvula de suministro de vapor al rehervidor de 0%.
- % de apertura de válvula de suministro de agua refrigerante al condensador de 40%.
- Resistencia del rehervidor 100% de total de potencia (4000W).
- Nivel inicial de carga al rehervidor hasta alarma de nivel medio.

Condiciones de operación para evaluar desempeño de cada lazo de control PI:

- Alimentación a la columna en punto medio.
- 1 paso por los tubos en el condensador.
- Flujo de alimentación 10 L/h.
- Set point temperatura de tope de la sección empacada 75 °C
- Set point temperatura de fondo de la sección empacada 90 °C
- Set point temperatura de condensado de la sección empacada 35 °C
- Set point temperatura de alimentación 90 °C.

#### **6.4.3. Sintonización de lazos de control para operación en Batch con reflujo con resistencia.**

Condiciones de operación del modo manual para la realización de las curvas de reacción:

- 1 paso por los tubos en el condensador.
- Resistencia de precalentamiento del alimento 0% de total de potencia (0W).
- Flujo de alimentación 0 L/h.
- Flujo de reflujo 5L/h.
- % de apertura de válvula de suministro de vapor al rehervidor de 0%.
- % de apertura de válvula de suministro de agua refrigerante al condensador de 40%.
- Resistencia del rehervidor 100% de total de potencia (4000W).
- Nivel de carga al rehervidor de líquido hasta alarma de nivel alto.

Condiciones de operación para evaluar desempeño de cada lazo de control PI:

- 1 paso por los tubos en el condensador.
- Flujo de alimentación 0 L/h.
- Set point temperatura de tope de la sección empacada 75 °C
- Resistencia del rehervidor 100% de total de potencia (4000W).
- Set point temperatura de condensado de la sección empacada 40 °C

#### **6.4.4. Sintonización de lazos de control para operación en Batch con reflujo con vapor.**

Condiciones de operación del modo manual para la realización de las curvas de reacción:

- 3 paso por los tubos en el condensador.
- Resistencia de precalentamiento del alimento 0% de total de potencia (0W).
- Flujo de alimentación 0 L/h.
- Flujo de reflujo 15L/h.
- % de apertura de válvula de suministro de vapor al rehervidor de 50%.
- % de apertura de válvula de suministro de agua refrigerante al condensador de 40%.
- Resistencia del rehervidor 0% de total de potencia (0W).
- Nivel de carga al rehervidor de líquido hasta alarma de nivel alto.

Condiciones de operación para evaluar desempeño de cada lazo de control PI:

- 3 paso por los tubos en el condensador.
- Flujo de alimentación 0 L/h.
- Set point temperatura de tope de la sección empacada 76 °C
- % de apertura de válvula de suministro de vapor al rehervidor de 50%.
- Set point temperatura de condensado de la sección empacada 33 °C

### **6.5. Interfaz Hombre-Máquina de sistema SCADA.**

A continuación, se muestra la interfaz gráfica del sistema SCADA la cual permite controlar y supervisar el sistema desde un PC.

La interfaz gráfica permite acceder a las secciones de control, proceso, registro, alarmas, configuraciones e información, mediante los botones ubicados en la parte inferior de la figura 6.3. La primera imagen (figura 6.3) que se muestra al iniciar el sistema corresponde a la sección de control, la cual permite seleccionar el modo de operación (Continuo, batch con reflujo, batch sin reflujo y manual)



**Figura 6.3.** Interfaz hombre maquina SCADA (Control).

Al seleccionar el modo continuo pulsado sobre el botón continuo se muestra la siguiente imagen (figura 6.4).



**Figura 6.4.** Interfaz hombre maquina SCADA (Control-continuo).

Se debe configurar todos los parámetros mostrados en esta sección, los cuales corresponden al set point para los lazos de control establecidos para este modo de operación, punto de alimentación (bajo, medio y alto), numero de pasos por los tubos en el condensador (1,2,3), flujo de alimentación. El parámetro set point en punto de zona empacada tope, puede ser remplazado por el parámetro relación de reflujo, cuando se deshabilita este lazo de control desde la sección de configuración como se verá más adelante. Para iniciar la operación se pulsa sobre el botón INICIO ubicado en la parte inferior izquierda, la operación puede finalizarse en cualquier momento pulsado el botón FINALIZAR

En las figuras 6.5 y 6.6 se muestra las imágenes correspondientes a los modos de operación de batch con reflujo y sin reflujo respectivamente.

OPERACIÓN BATCH CON REFLUJO

CONTINUO
**BATCH CON REFLUJO**
BATCH SIN REFLUJO
MANUAL



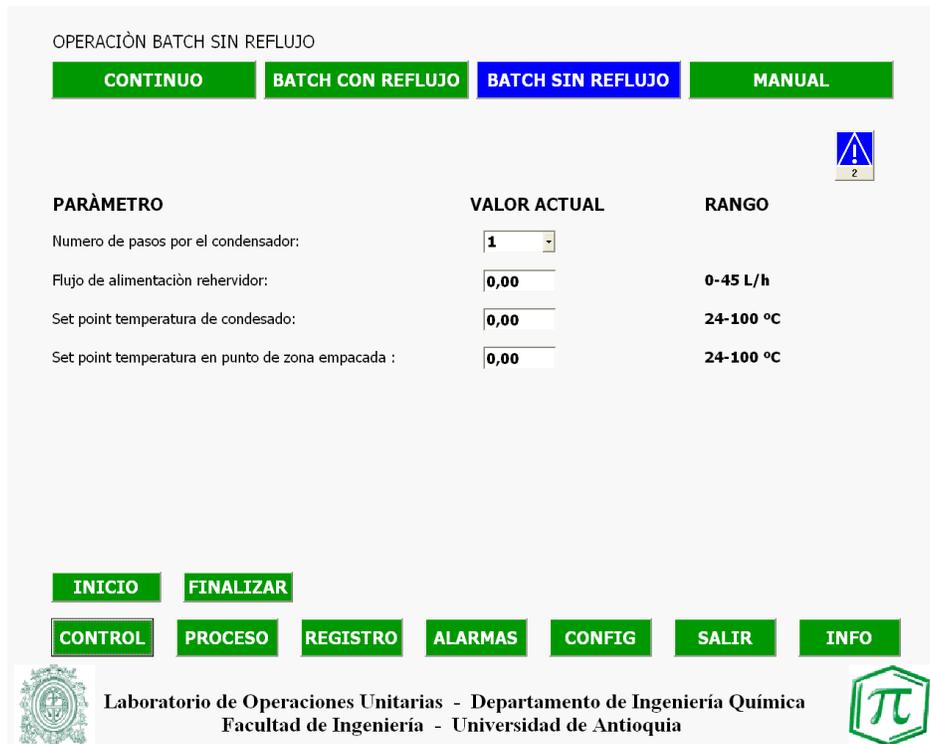
PARÀMETRO	VALOR ACTUAL	RANGO
Numero de pasos por el condensador:	<input type="text" value="1"/>	
Flujo de alimentación rehedidor:	<input type="text" value="0,00"/>	0-45 L/h
Set point temperatura en punto de zona empacada tope:	<input type="text" value="0,00"/>	24-100 °C
Set point temperatura de condensado:	<input type="text" value="0,00"/>	24-100 °C
% Potencia de resistencia de rehedidor:	<input type="text" value="0,00"/>	0-100 %

INICIO
FINALIZAR

CONTROL
PROCESO
REGISTRO
ALARMAS
CONFIG
SALIR
INFO


 Laboratorio de Operaciones Unitarias - Departamento de Ingeniería Química  
 Facultad de Ingeniería - Universidad de Antioquia
 

**Figura 6.5.** Interfaz hombre maquina SCADA (Control-batch con reflujo).



**Figura 6.6.** Interfaz hombre maquina SCADA (Control-batch sin reflujo).

El parámetro “% potencia de resistencia de rehervidor” de la figura 6.5 se muestra en pantalla cuando desde la sección de configuraciones se selecciona el modo de calentamiento resistencia, en el caso de seleccionar vapor el parámetro que aparece en pantalla es: % válvula de apertura vapor.

En la figura 6.7 se muestra la imagen correspondiente al modo de operación manual.

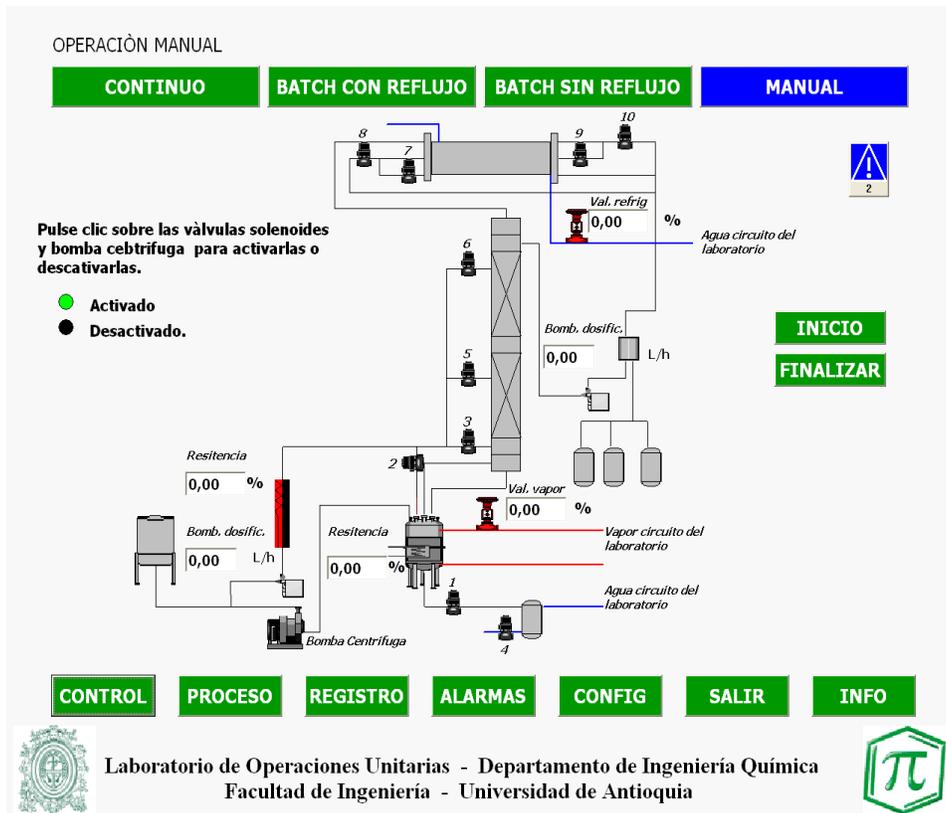
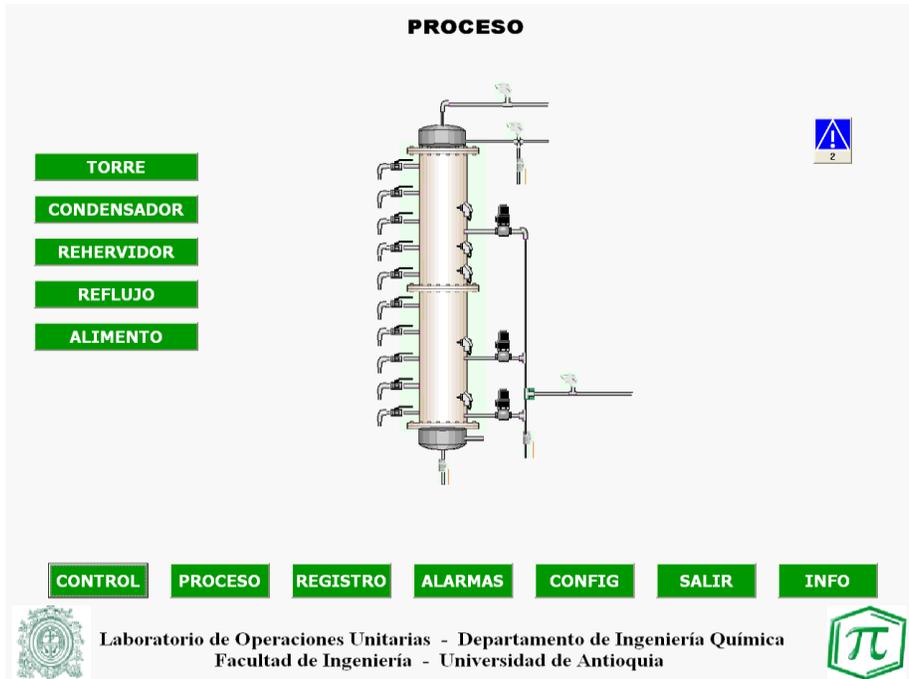
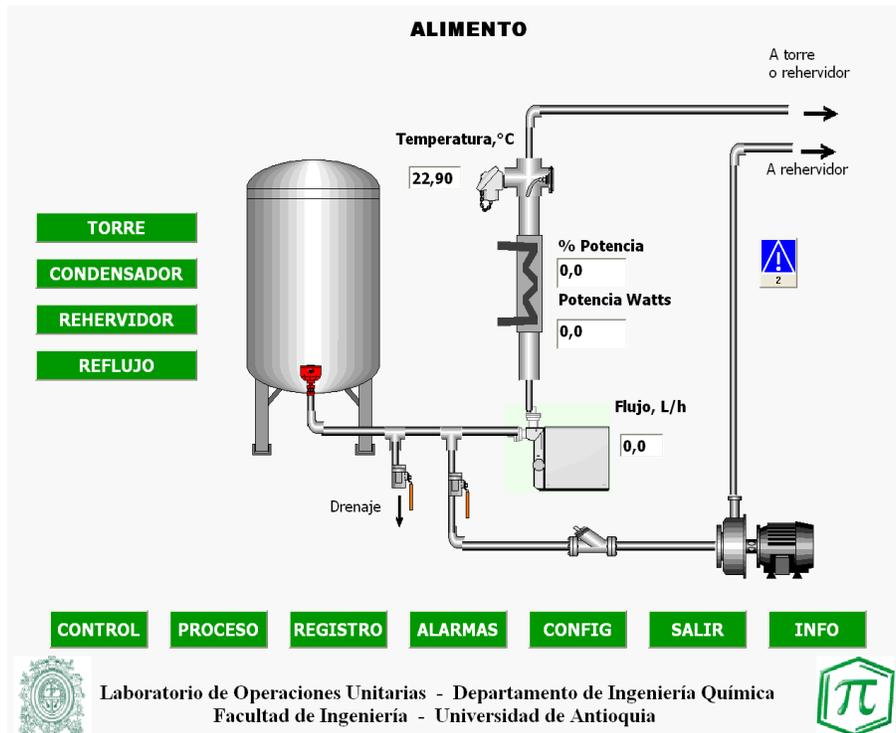


Figura 6.7. Interfaz hombre maquina SCADA (Control-manual).

En la sección de proceso (figura 6.8) se muestra una lista de botones para acceder a la visualización de las diferentes variables (temperatura, flujos, % de apertura de válvulas, potencia de resistencias) presentes en los elementos que conforman todo el sistema de destilación (alimento, rehervidor, torre, reflujo, condensador), ilustrados en las figuras 6.9-6.13. Algunos elementos como válvulas solenoides o resistencias cuentan con animación (cambio de color) para indicar que están activados o desactivados.



**Figura 6.8.** Interfaz hombre maquina SCADA (Proceso).



**Figura 6.9.** Interfaz hombre maquina SCADA (Proceso-alimento).

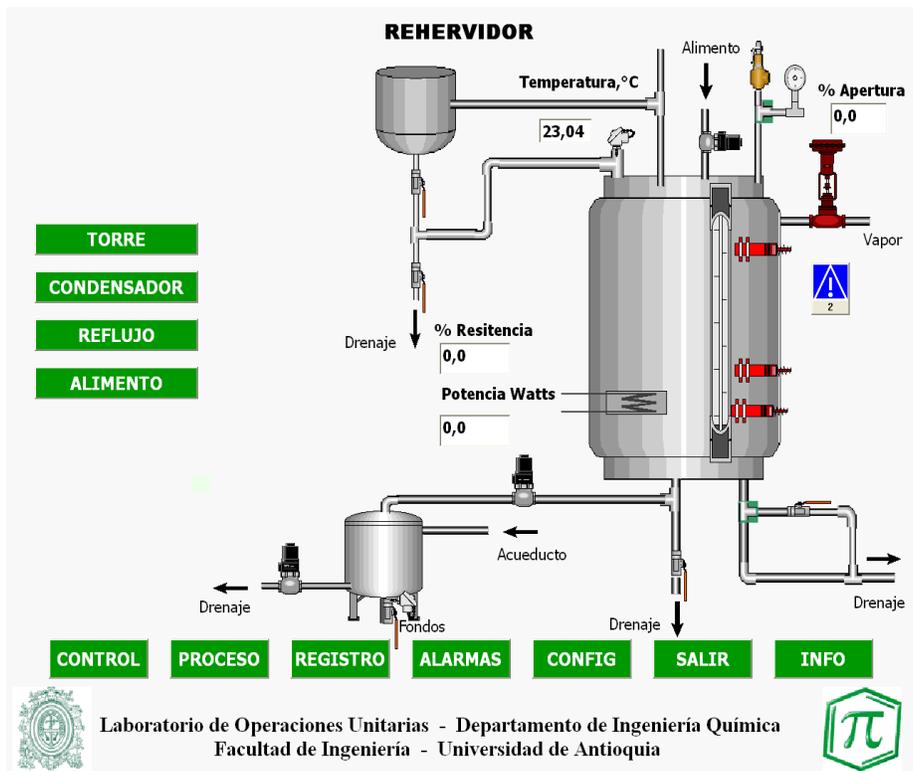
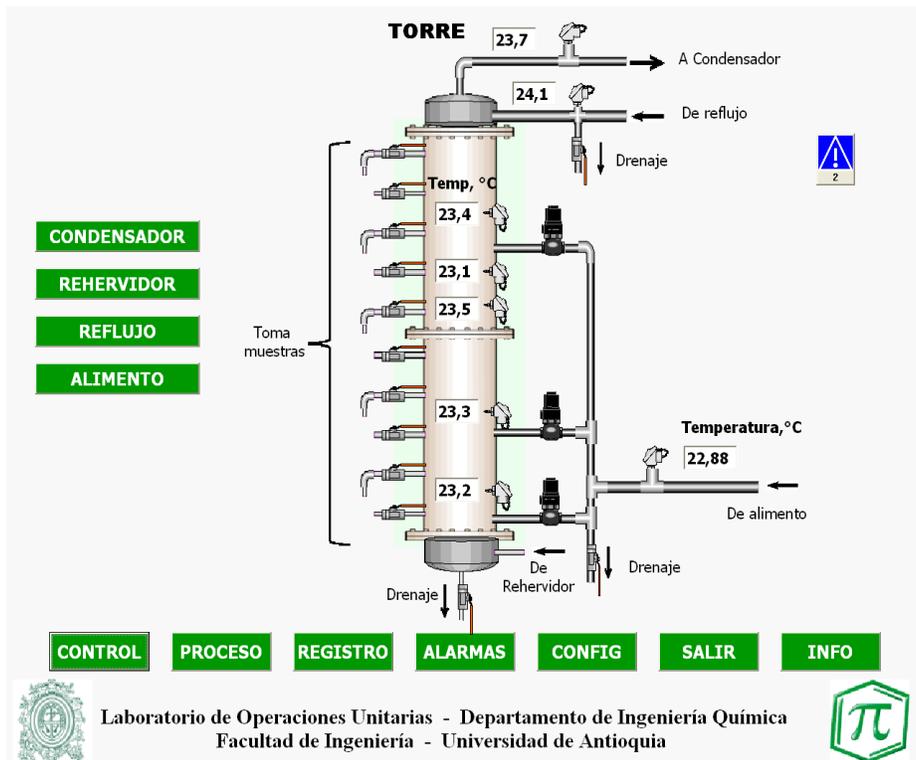
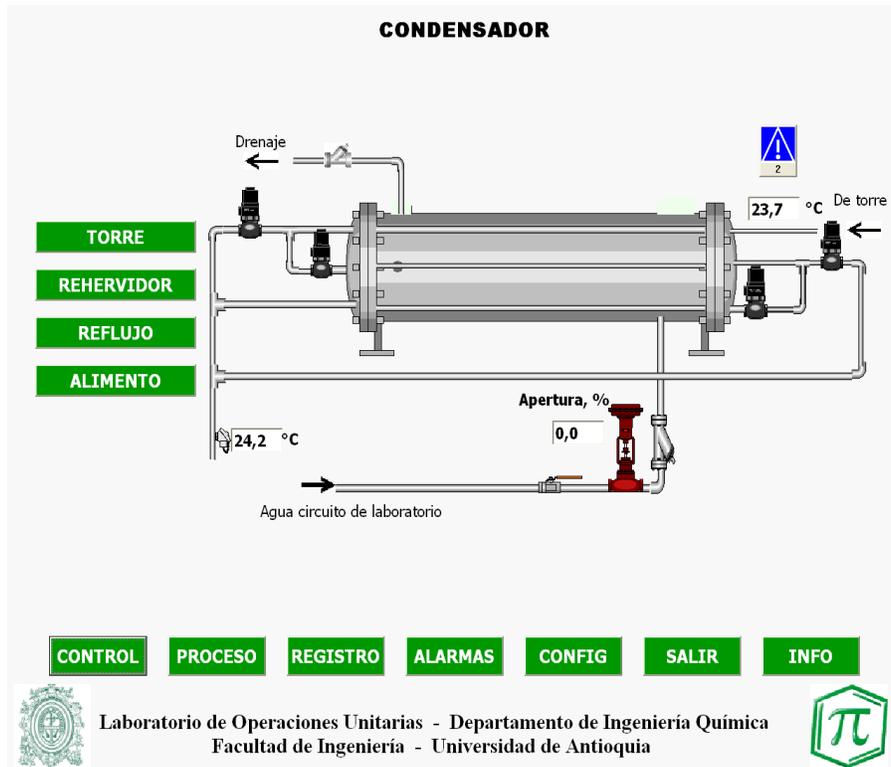


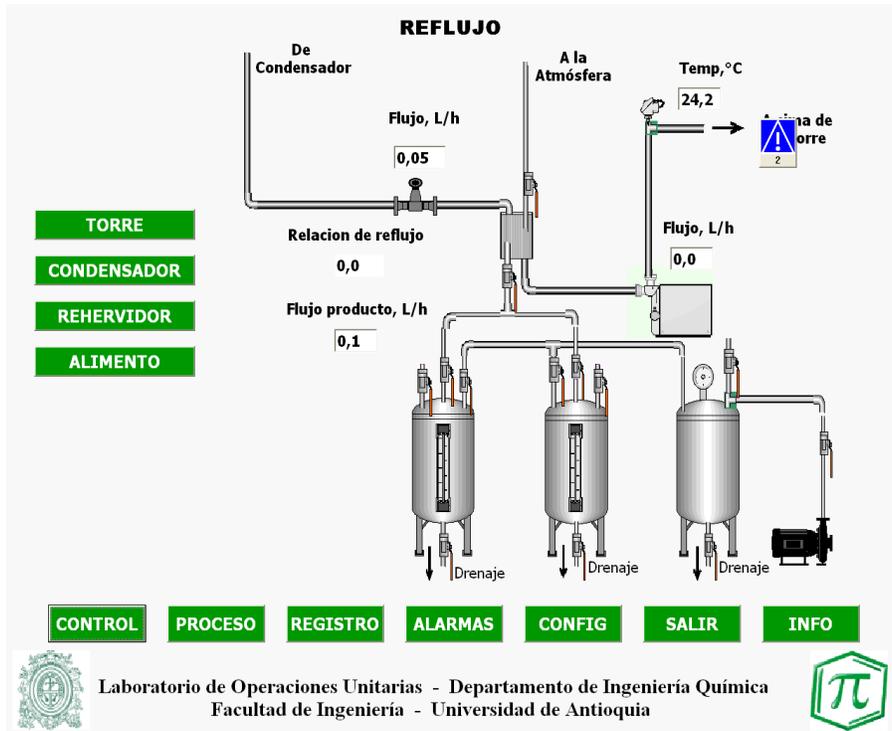
Figura 6.10. Interfaz hombre maquina SCADA (Proceso-rehervidor).



**Figura 6.11.** Interfaz hombre maquina SCADA (Proceso-torre).

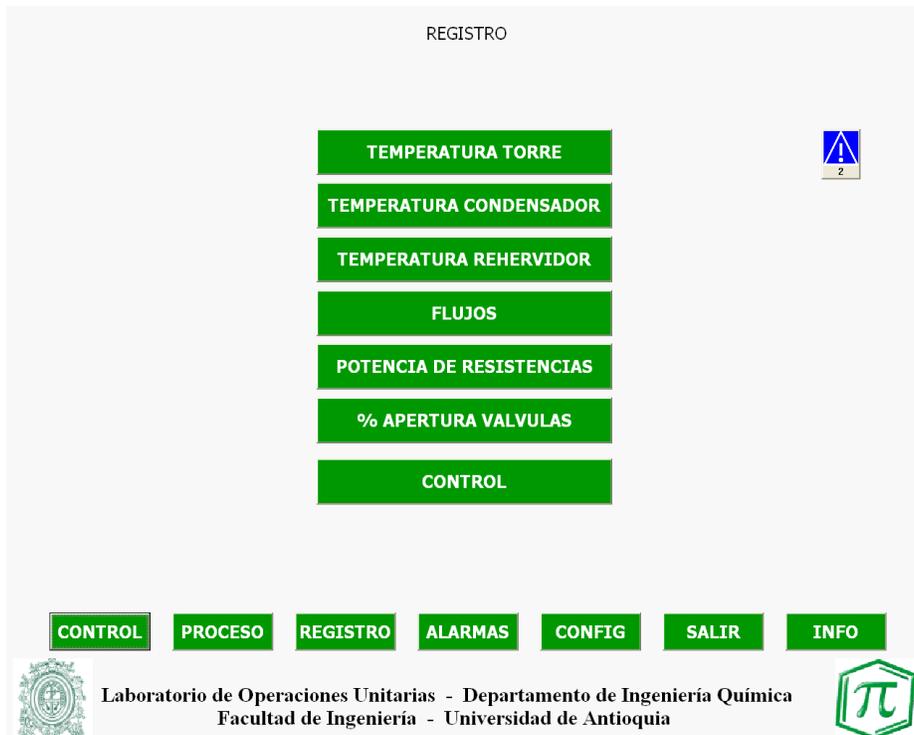


**Figura 6.12.** Interfaz hombre maquina SCADA (Proceso-condensador).

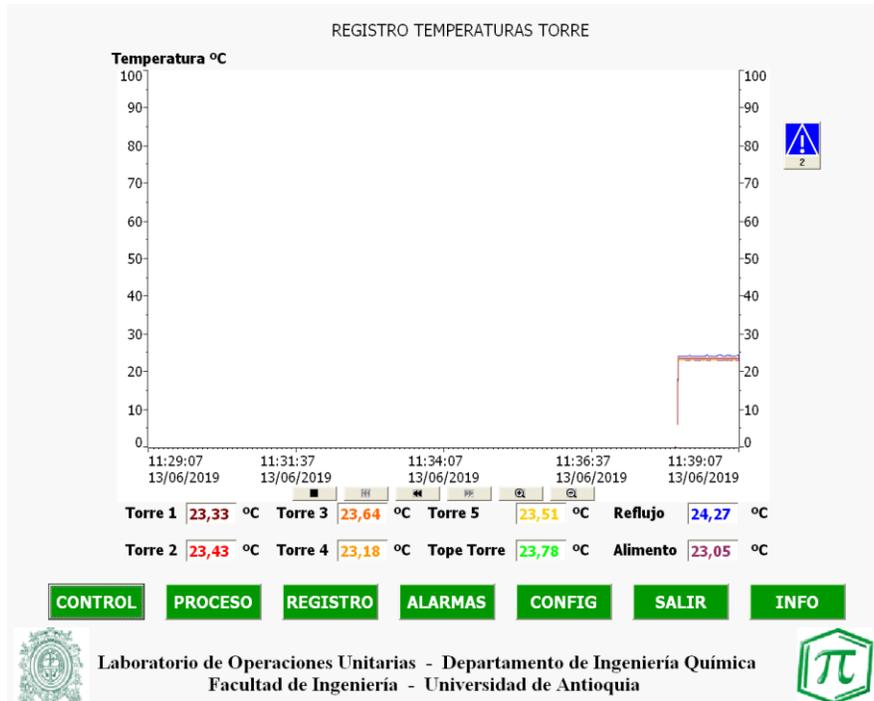


**Figura 6.13.** Interfaz hombre maquina SCADA (Proceso-reflujo).

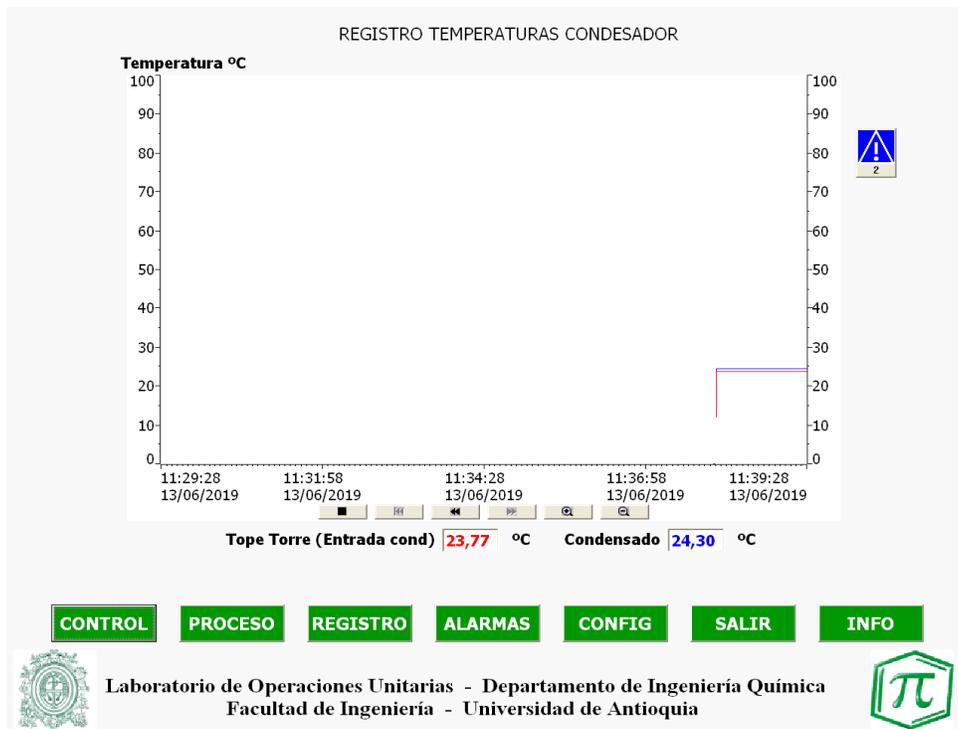
La sección de registro (figura 6.14) permite acceder la visualización de todas las variables del proceso con respecto al tiempo (figuras 6.15-6.21).



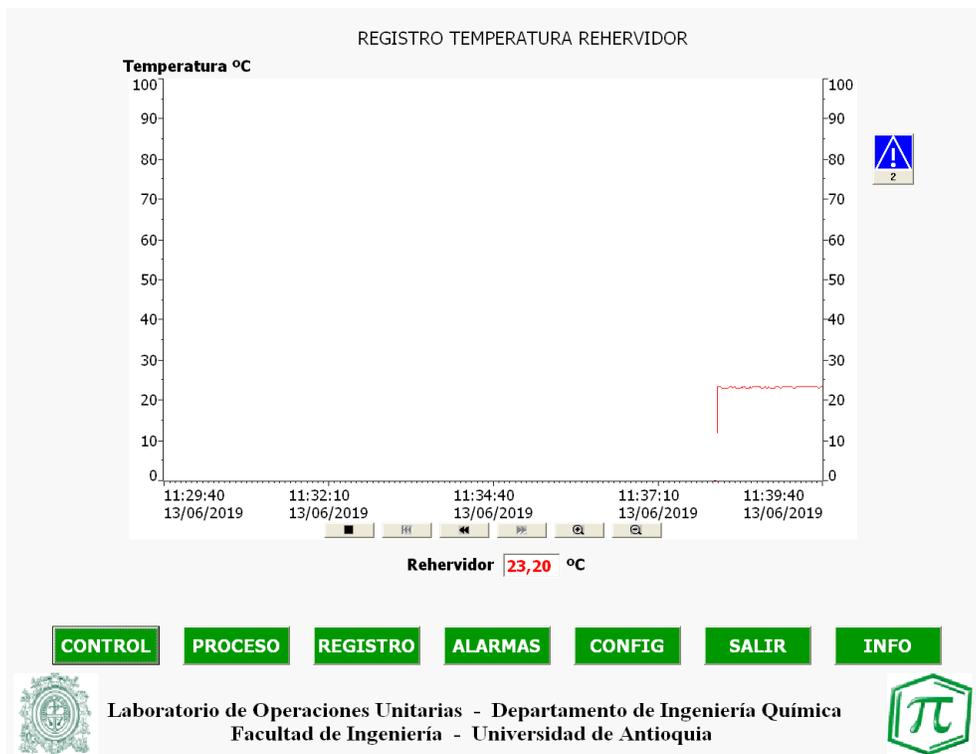
**Figura 6.14.** Interfaz hombre maquina SCADA (Registro).



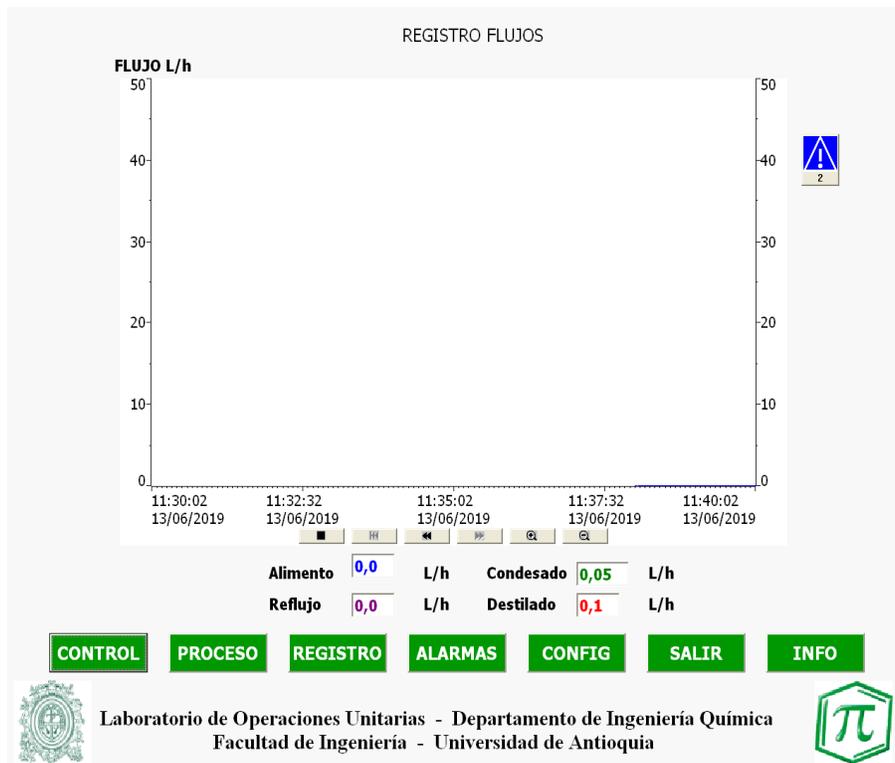
**Figura 6.15.** Interfaz hombre maquina SCADA (Registro-temperaturas torre).



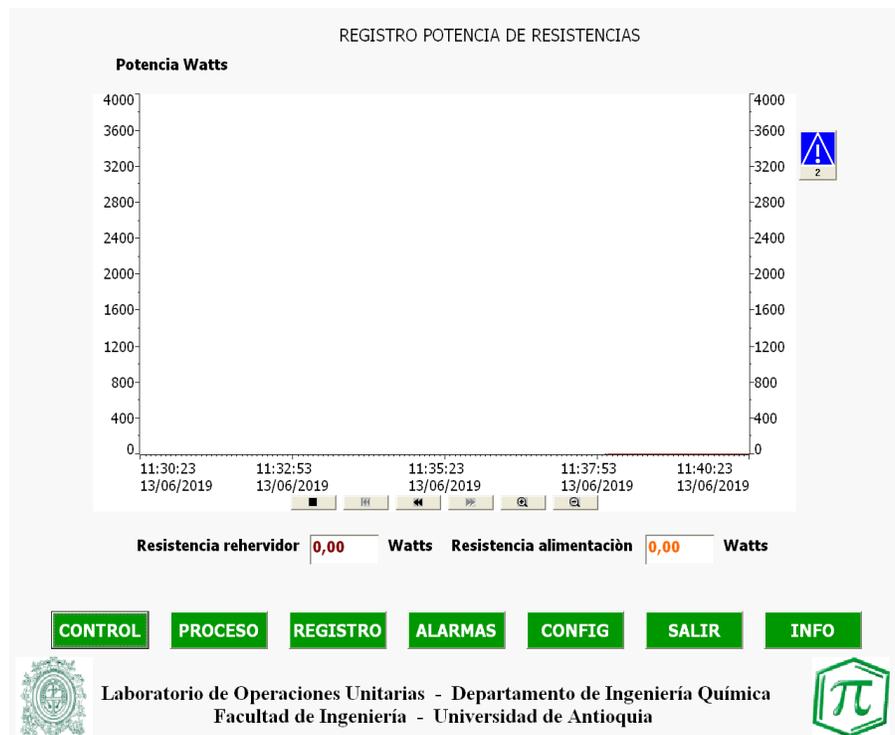
**Figura 6.16.** Interfaz hombre maquina SCADA (Registro-temperaturas condensador).



**Figura 6.17.** Interfaz hombre maquina SCADA (Registro-temperatura rehervidor).



**Figura 6.18.** Interfaz hombre maquina SCADA (Registro-flujos).



**Figura 6.19.** Interfaz hombre maquina SCADA (Registro-potencia de resistencias).

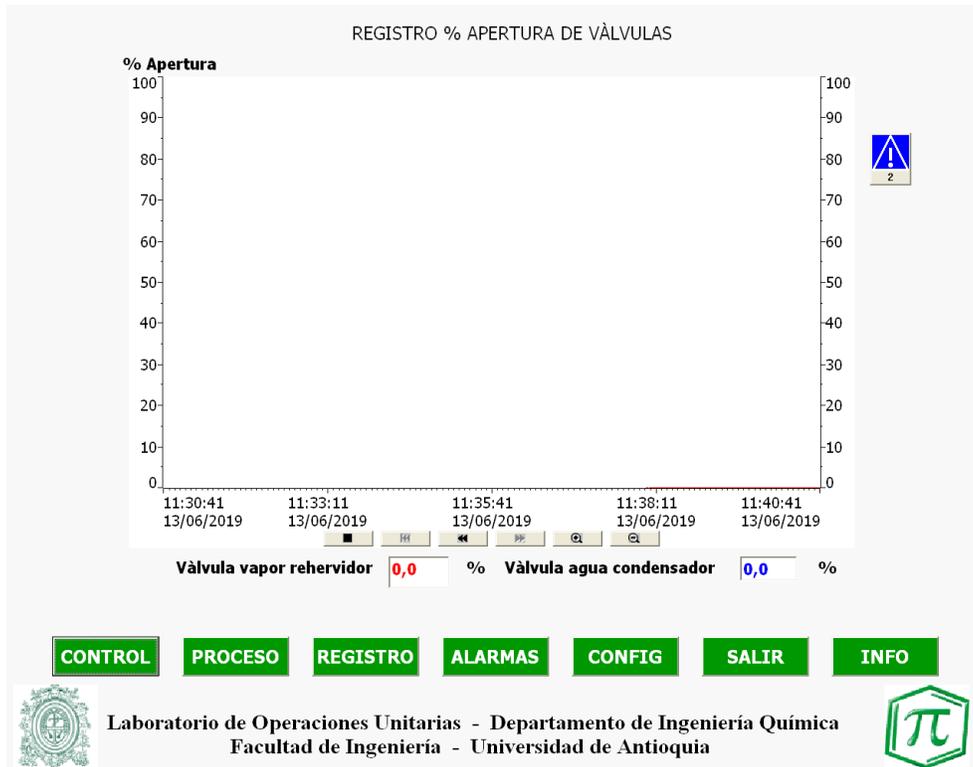


Figura 6.20. Interfaz hombre maquina SCADA (Registro-% Apertura de válvulas).



Figura 5.21. Interfaz hombre maquina SCADA (Registro-control).

En registro-control (figura 6.21) se puede visualizar las variables de los lazos de control del sistema.

La figura 6.22 muestra la sección de alarmas, el icono de advertencia (figura 6.23) solo aparecerá en pantalla cuando exista una condición de alarma, indicando también el número de alarmas presentes.

ALARMAS

Nº	Hora	Fecha	Estado	Texto	GR
2	11:38:03	13/06/2019	E	Nivel de rehervidor bajo, el sistema procede a apagar la resistencia y cerrar la válvula de vapor.	0
1	11:38:03	13/06/2019	E	Tanque de almacenamiento vacío, cargue el tanque.	0



**CONTROL**   **PROCESO**   **REGISTRO**   **ALARMAS**   **CONFIG**   **SALIR**   **INFO**

 Laboratorio de Operaciones Unitarias - Departamento de Ingeniería Química  
Facultad de Ingeniería - Universidad de Antioquia 

**Figura 6.22.** Interfaz hombre maquina SCADA (Alarmas).



**Figura 6.23.** Interfaz hombre maquina SCADA (Icono de alarma).

Finalmente, la figura 6.24 muestra el menú de configuraciones, el cual se permite el acceso a las configuraciones del sistema de control (figura 6.25), solo se puede acceder por medio de una contraseña y usuario, y modo de calentamiento (figura 6.26) de acceso libre.



**Figura 6.24.** Interfaz hombre maquina SCADA (Configuraciones).

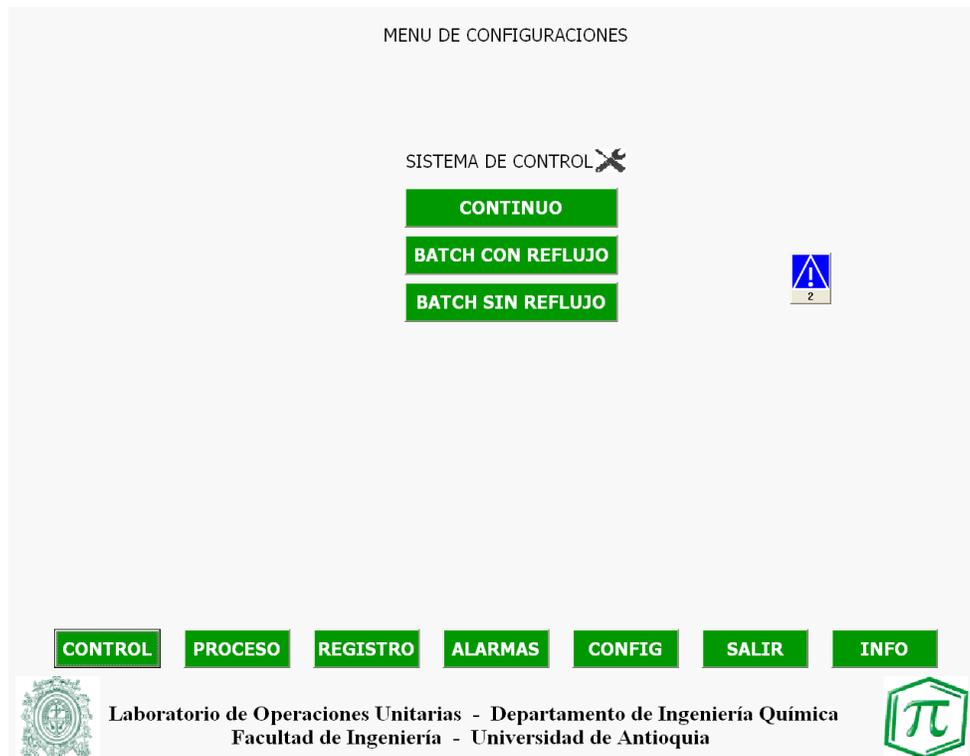


Figura 6.25. Interfaz hombre maquina SCADA (Configuraciones-sistema de control).

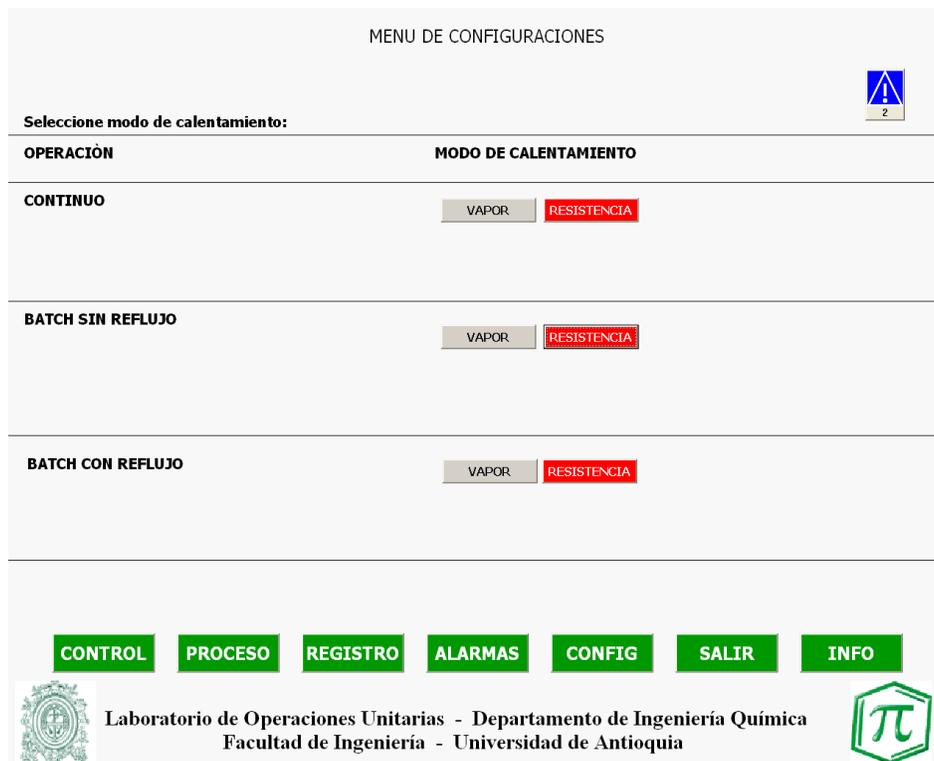
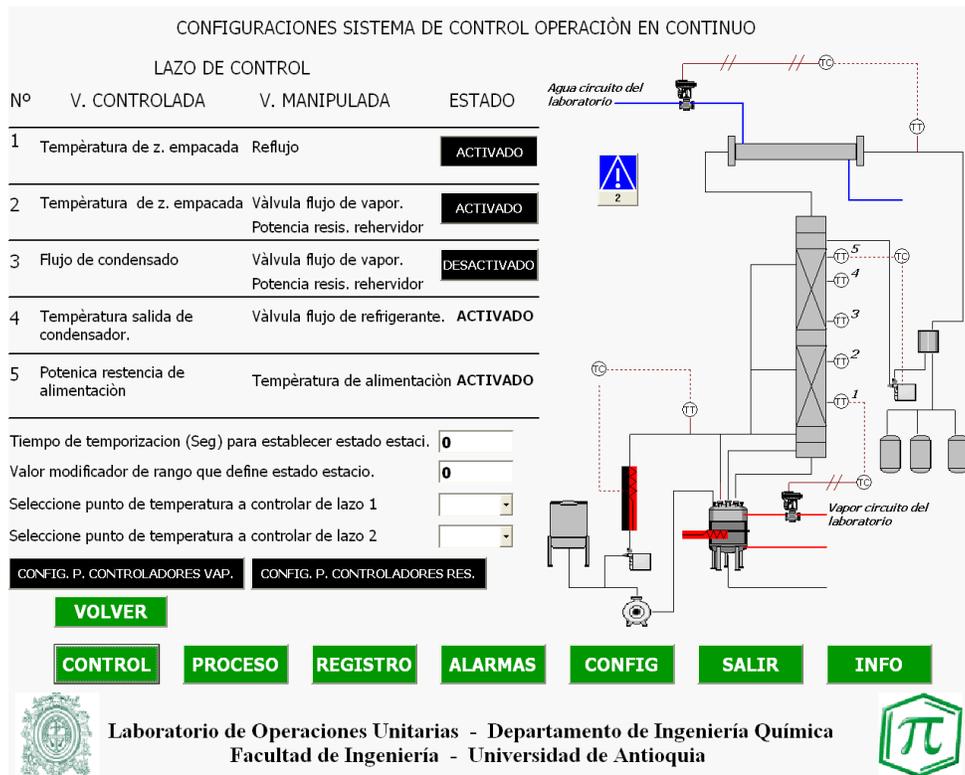


Figura 6.26. Interfaz hombre maquina (Configuraciones-modo de calentamiento).

En el menú de configuraciones del modo de calentamiento (figura 6.26), se puede seleccionar si el calor en el rehervidor es provisto por la resistencia o vapor, los parámetros de los controladores PID dependen de esta elección.

Como se puede ver en la figura 6.25 cada modo de operación tiene sus respectivas configuraciones, estas se muestran en las figuras 6.27-6.29.



**Figura 6.27.** Interfaz hombre maquina (Configuraciones-sistema de control-continuo).

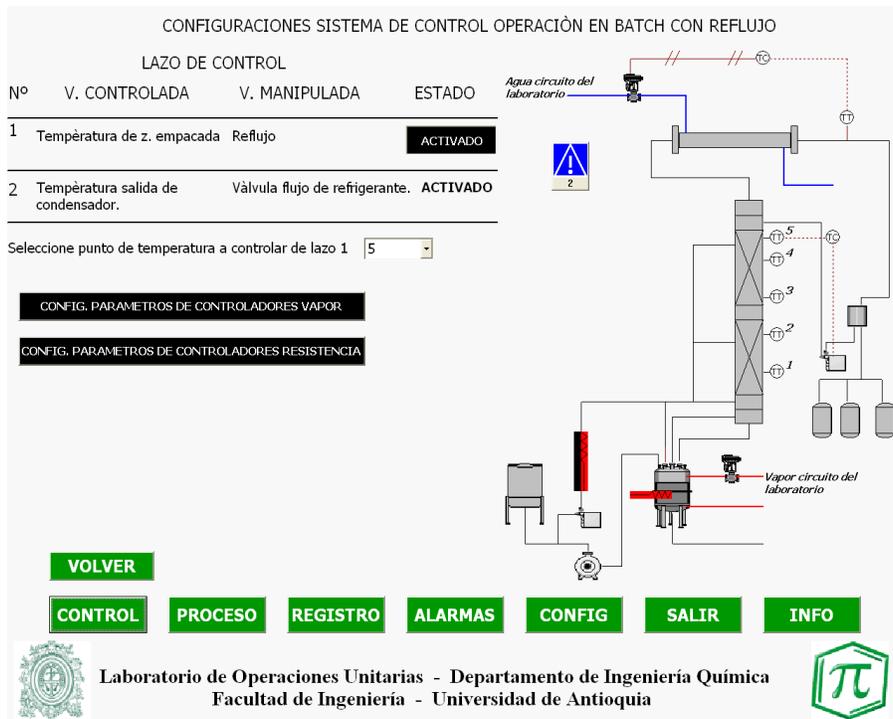


Figura 6.28. Interfaz hombre maquina (Configuraciones-sistema de control-batch con reflujo).

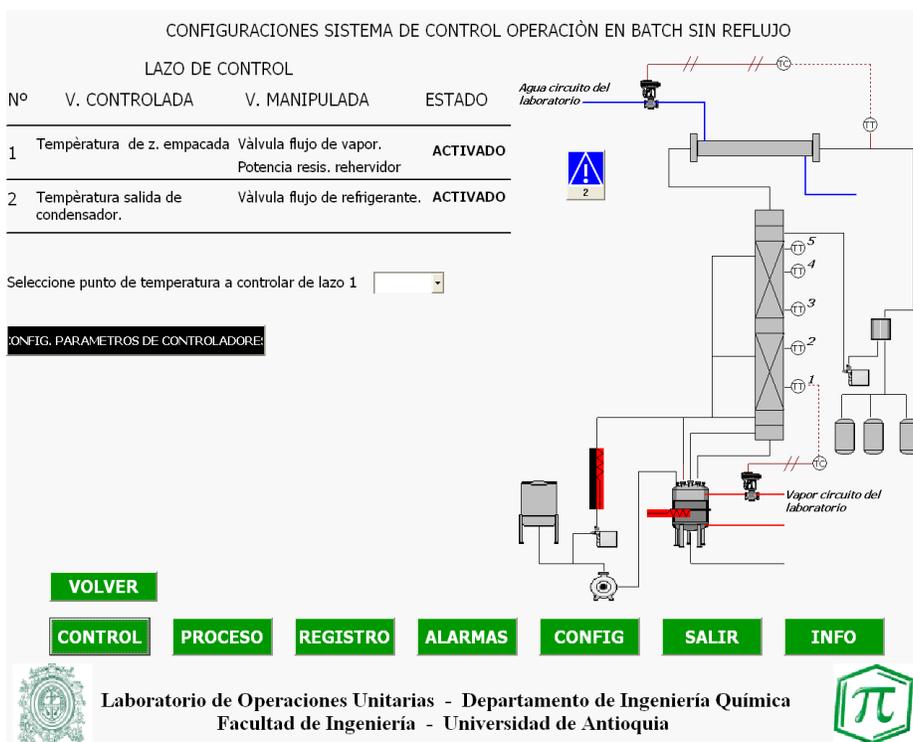


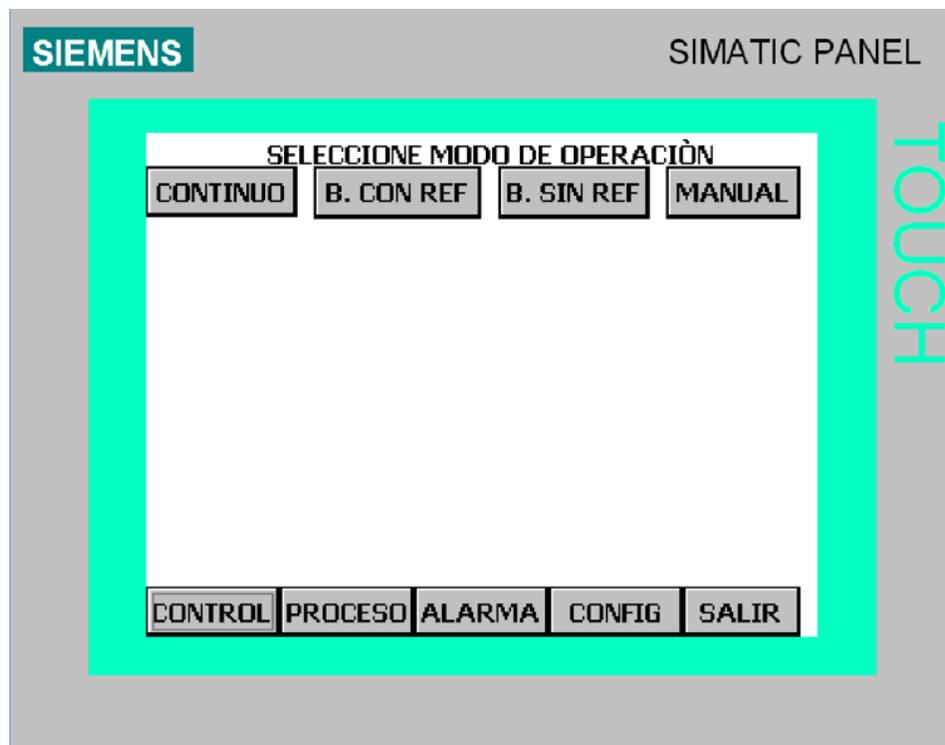
Figura 6.29. Interfaz hombre maquina (Configuraciones-sistema de control-batch con reflujo).

El programa de a interfaz gráfica del sistema SCADA permite almacenar todas las variables del proceso en documentos de Excel, los valores de las variables se guardan cada segundo, estos se almacenan dentro de la carpeta ubicada en el escritorio de la PC llamada “Datos torre”.

## 6.6. Interfaz Hombre-Máquina de panel de control.

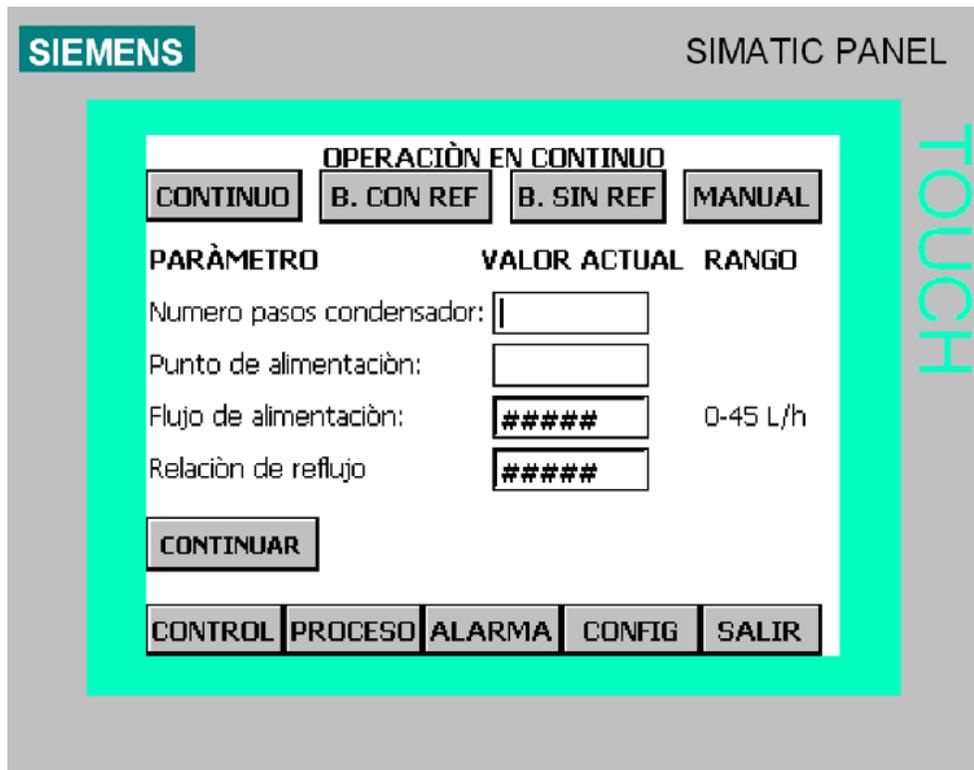
A continuación, se muestra la interfaz gráfica del panel de control. Los campos de entrada de cada parámetro no muestran valores debido a que las capturas de imagen se tomaron desde el PC.

La interfaz gráfica permite acceder a las secciones de control, proceso, alarmas, configuraciones, mediante los botones ubicados en la parte inferior de la figura 6.30. La primera imagen (figura 6.30) que se muestra al iniciar el sistema corresponde a la sección de control, la cual permite seleccionar el modo de operación (Continuo, batch con reflujo, batch sin reflujo y manual)



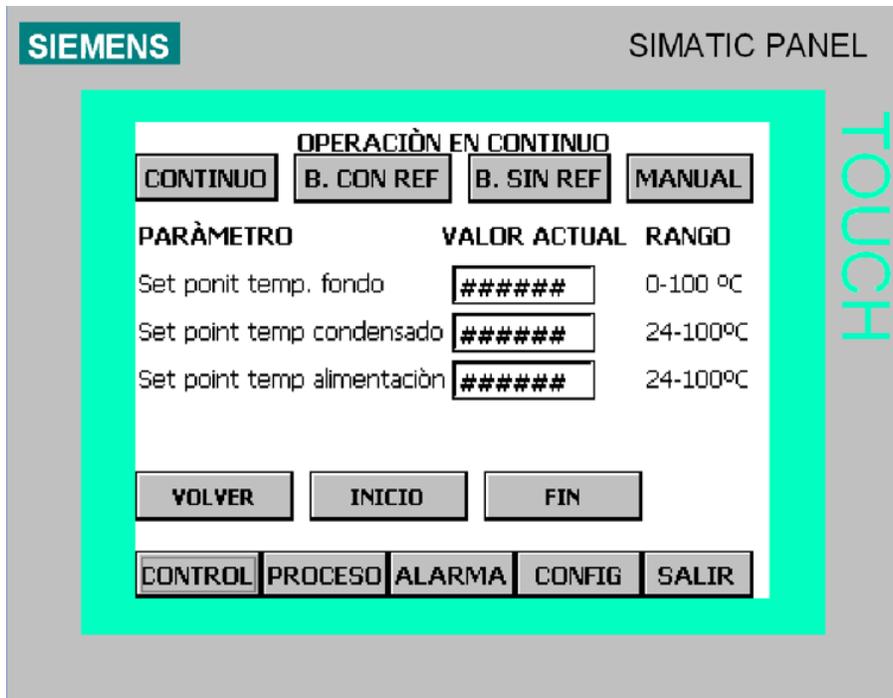
**Figura 6.30.** Interfaz hombre maquina panel de control (Control).

Al seleccionar el modo continuo pulsado sobre el botón continuo se muestra la siguiente imagen (figura 6.31).



**Figura 6.31.** Interfaz hombre maquina panel de control (Control-continuo).

Se debe configurar todos los parámetros mostrados en esta sección, los cuales corresponden al set point para los lazos de control establecidos para este modo de operación, punto de alimentación (bajo, medio y alto), numero de pasos por los tubos en el condensador (1,2,3), flujo de alimentación, relación de reflujo o set point en punto de zona empacada tope (depende de la configuración del sistema, al pulsar continuar se muestra en pantalla los parámetros faltantes por configurar en este modo de operación (figura 6.32). Para iniciar la operación se pulsa sobre el botón INICIO ubicado en la parte inferior izquierda, la operación puede finalizarse en cualquier momento pulsado el botón FINALIZAR

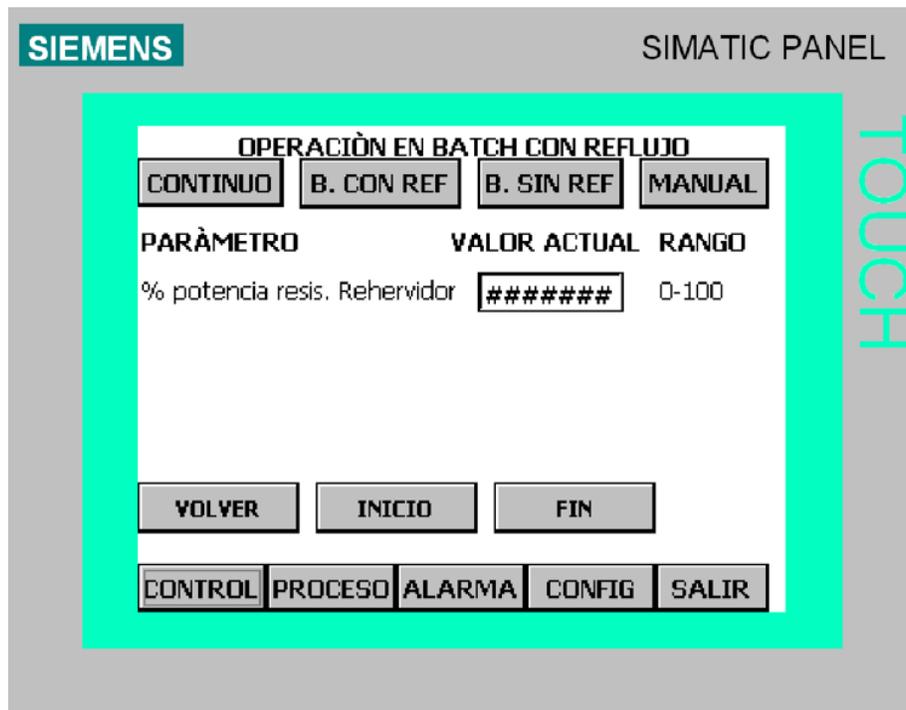


**Figura 6.32.** Interfaz hombre maquina panel de control (Control-continuo).

En las figuras 6.33, 6.34 y 6.35 se muestra las imágenes correspondientes a los modos de operación de batch con reflujo y sin reflujo respectivamente.



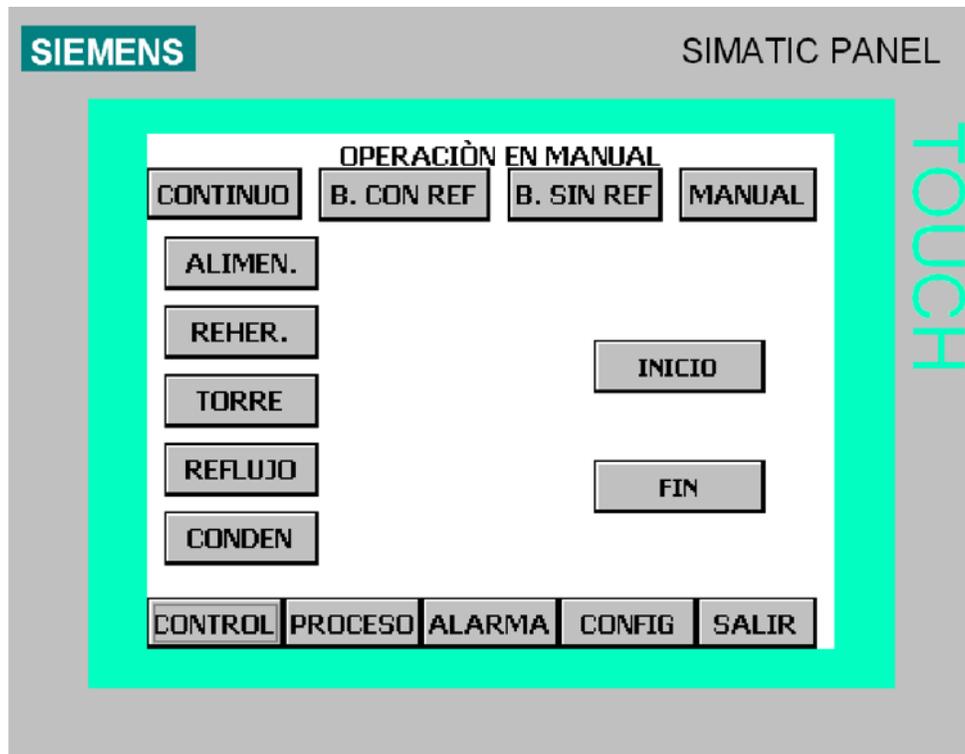
Figura 6.33. Interfaz hombre maquina panel de control (Control-batch con reflujo).



**Figura 6.34.** Interfaz hombre maquina panel de control (Control-batch sin reflujo).

El parámetro “% potencia de resistencia de rehervidor” de la figura 6.34 se muestra en pantalla cuando desde la sección de configuraciones se selecciona el modo de calentamiento resistencia para este modo de operación, en el caso de seleccionar vapor el parámetro que aparece en pantalla es: % válvula de apertura vapor.

En la figura 6.35 se muestra la imagen correspondiente al modo de operación manual.



**Figura 6.35.** Interfaz hombre maquina panel de control (Control-manual).

Para configurar los parámetros en el modo manual de cada uno de los elementos del sistema es necesario pulsar sobre los botones: ALIMEN, REHER, TORRE, REFLUJO, COND, los cuales permite el acceso a las imágenes mostrados en las figuras 6.36-6.40.

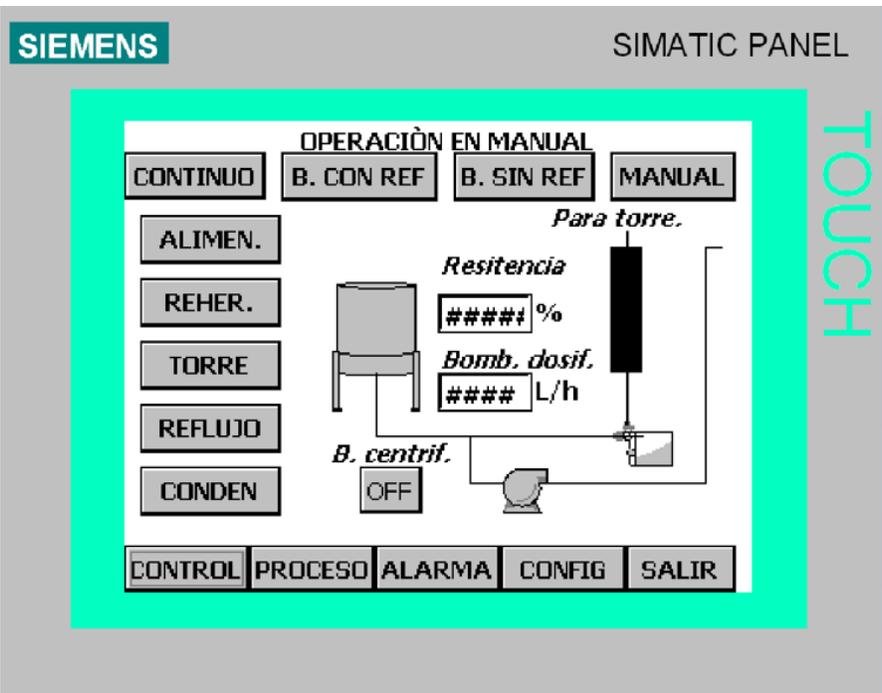


Figura 6.36. Interfaz hombre maquina panel de control (Control-manual-alimento).

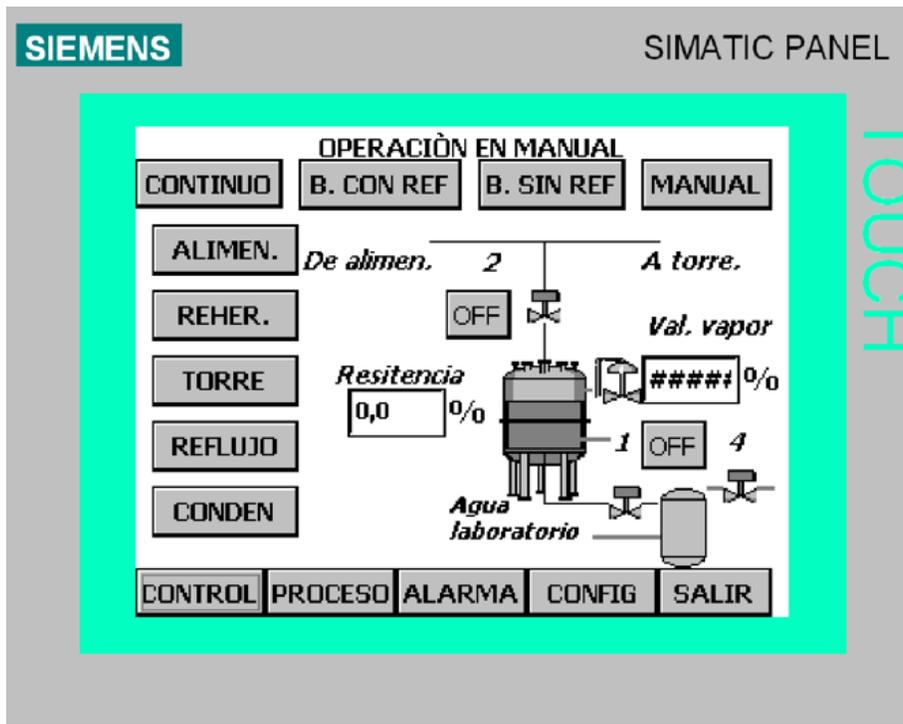


Figura 6.37. Interfaz hombre maquina panel de control (Control-manual-rehervidor).

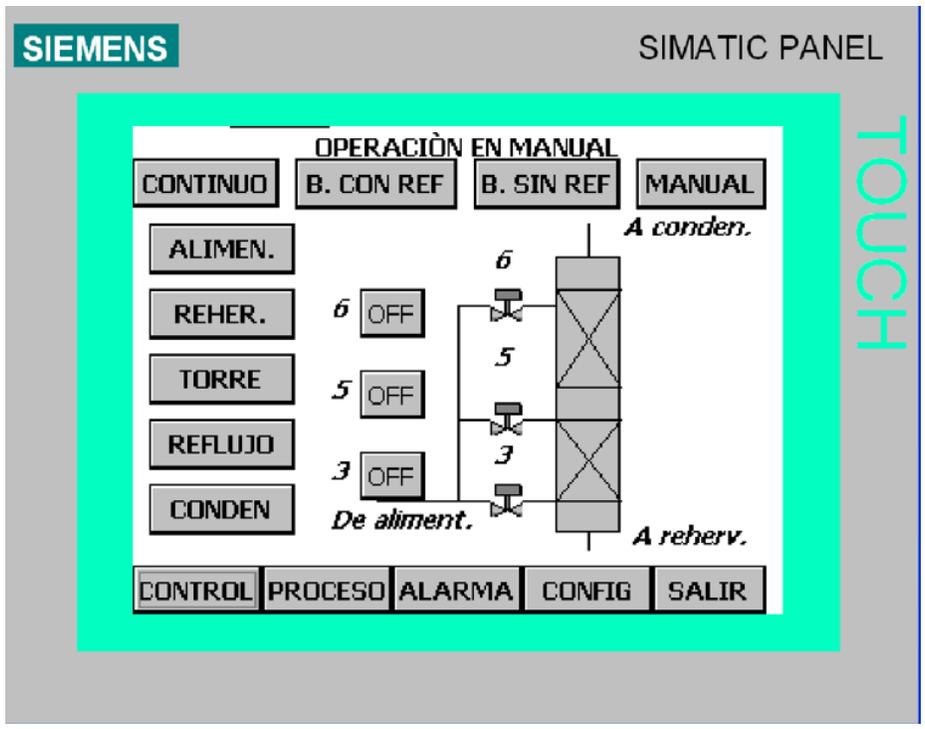


Figura 6.38. Interfaz hombre maquina panel de control (Control-manual-torre).

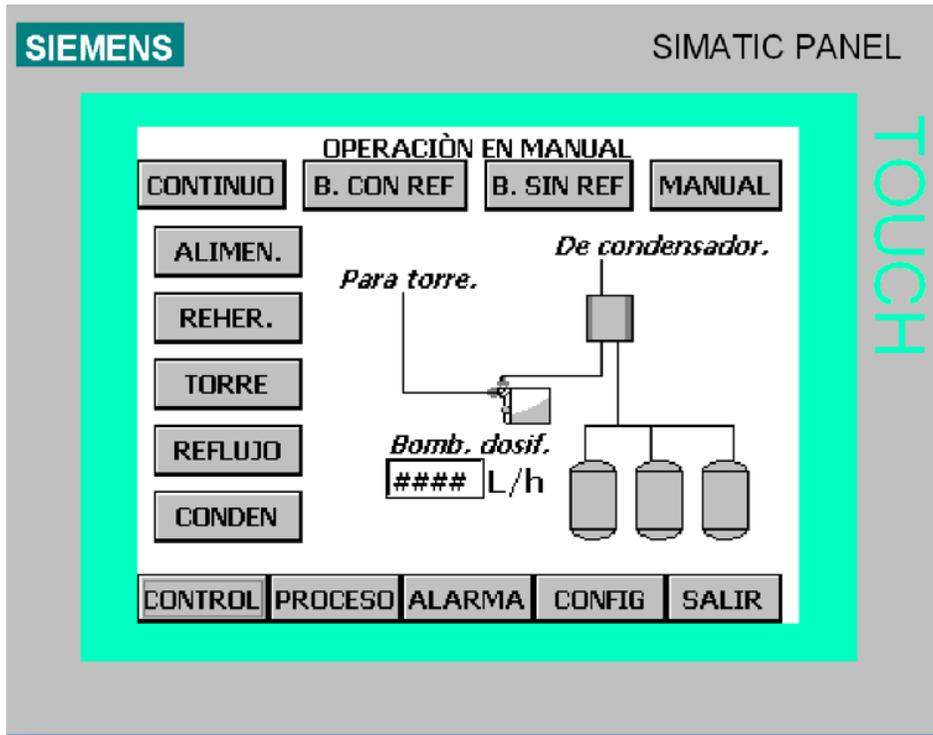
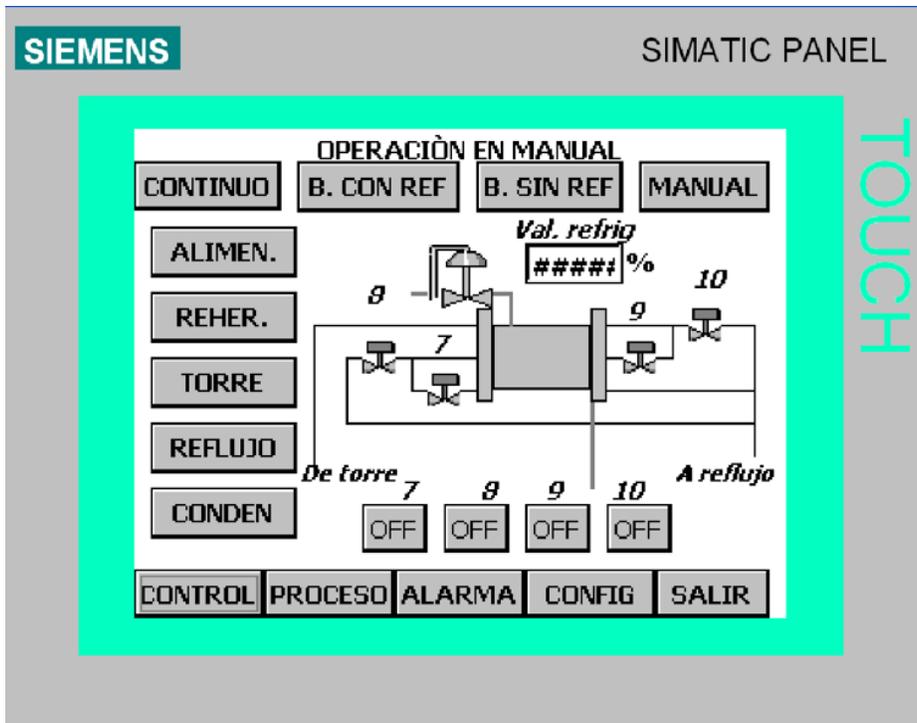


Figura 6.39. Interfaz hombre maquina panel de control (Control-manual-reflujo).



**Figura 6.40.** Interfaz hombre maquina panel de control (Control-manual-condensador).

En la sección de proceso (figura 6.41) se muestra una lista de botones para acceder a la visualización de las diferentes variables (temperatura, flujos, % de apertura de válvulas, potencia de resistenticas) presentes en los elementos que conforman todo el sistema de destilación (alimento, rehervidor, torre, reflujo, condensador), ilustrados en las figuras 6.42-6.46.

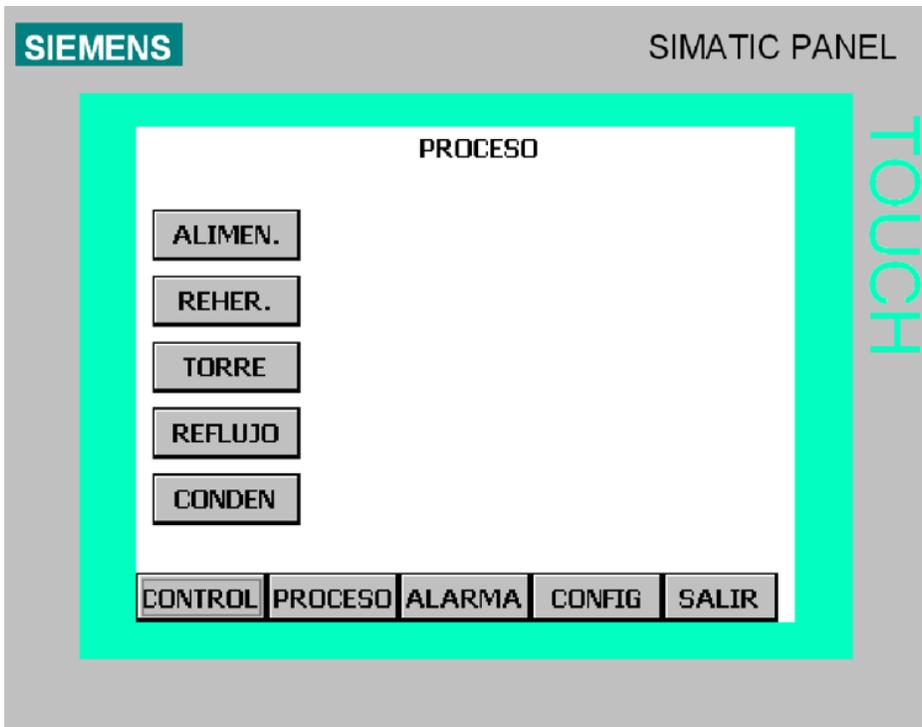


Figura 6.41. Interfaz hombre maquina panel de control (Proceso).

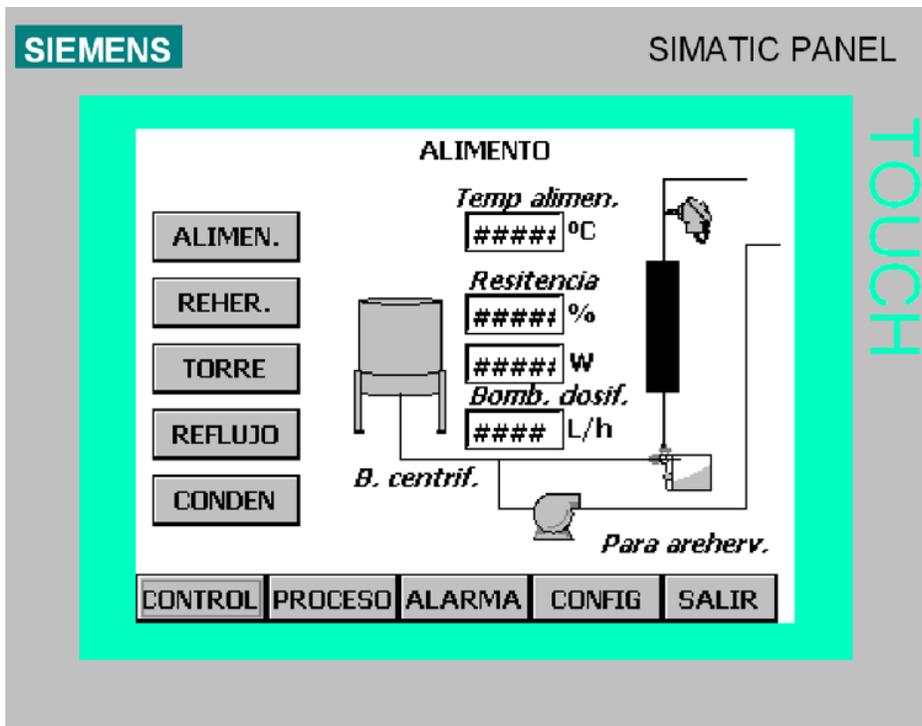


Figura 6.42. Interfaz hombre maquina panel de control (Proceso-alimento).

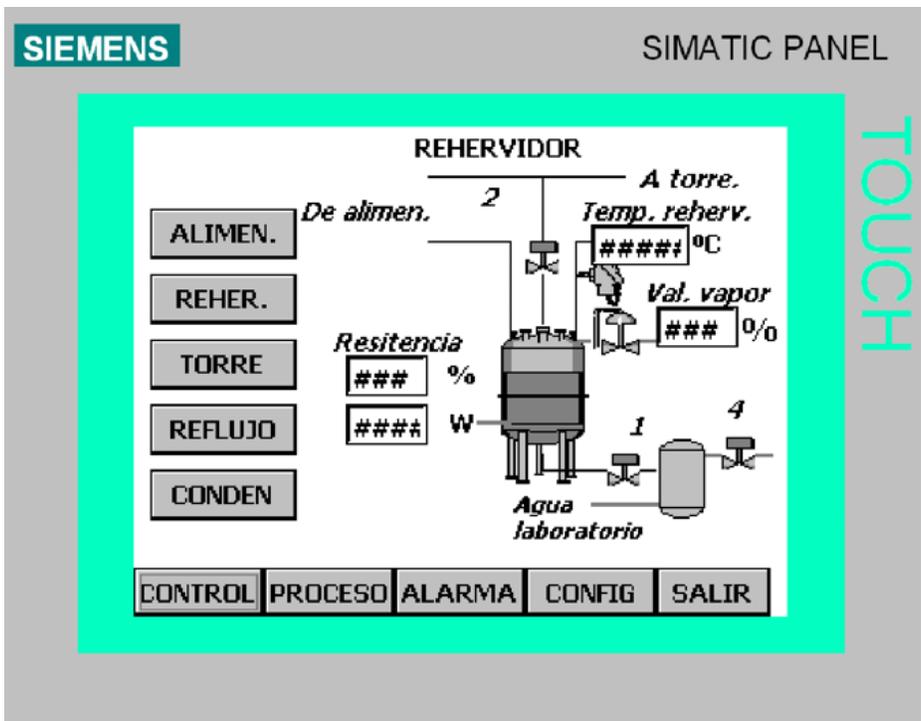


Figura 6.43. Interfaz hombre maquina panel de control (Proceso-rehervidor).

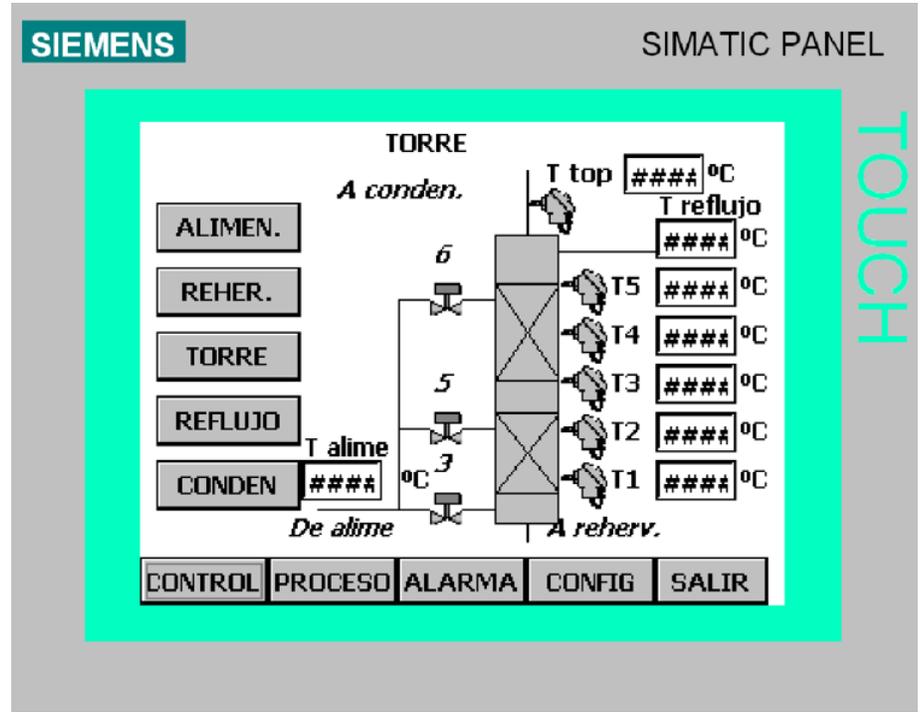


Figura 6.44. Interfaz hombre maquina panel de control (Proceso-torre).

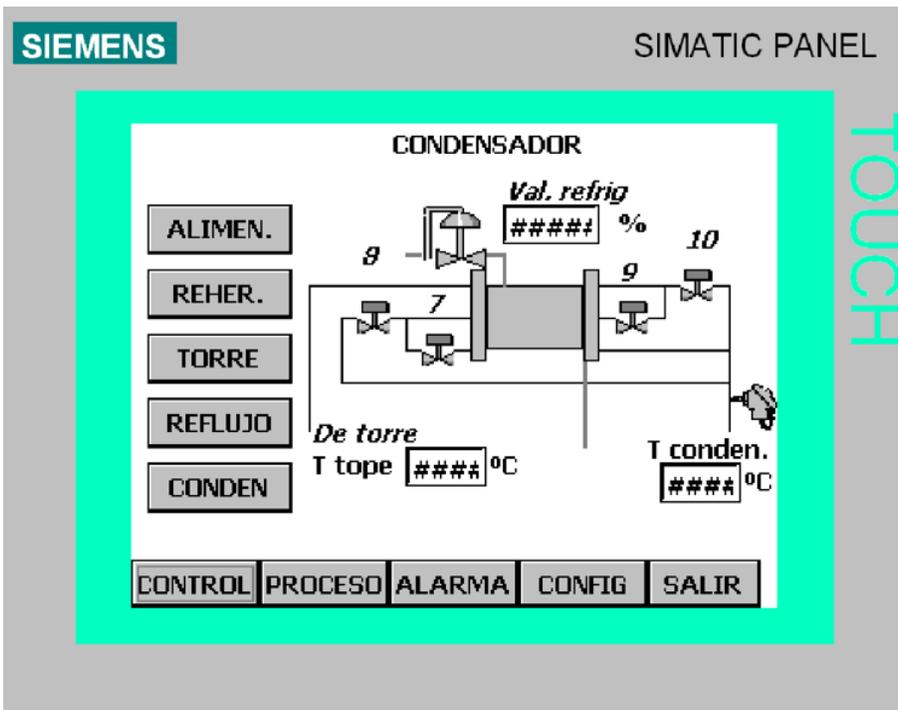


Figura 6.45. Interfaz hombre maquina panel de control (Proceso-condensador).

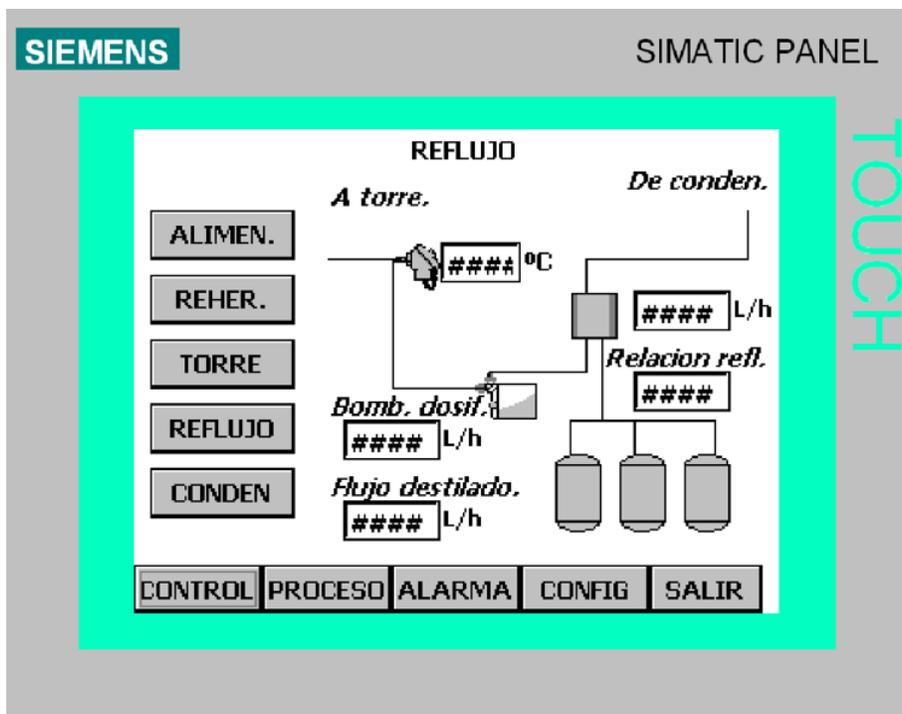
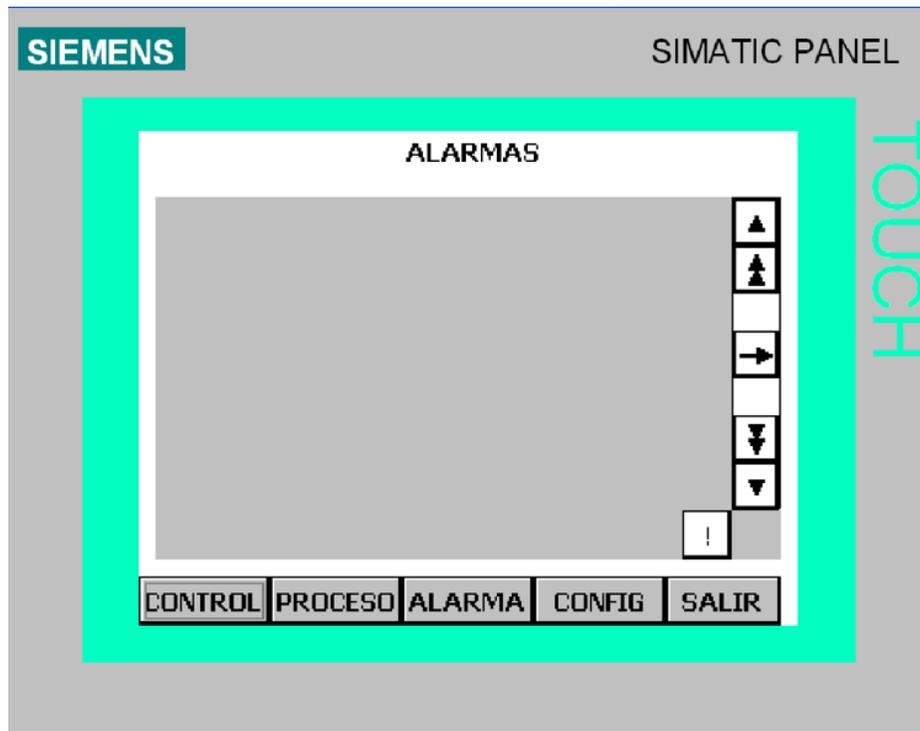


Figura 6.46. Interfaz hombre maquina panel de control (Proceso-reflujo).

La figura 6.47 muestra la sección de alarmas, el icono de advertencia (figura 6.48) solo aparecerá en pantalla cuando exista una condición de alarma, indicando también el nmero de alarmas presentes.

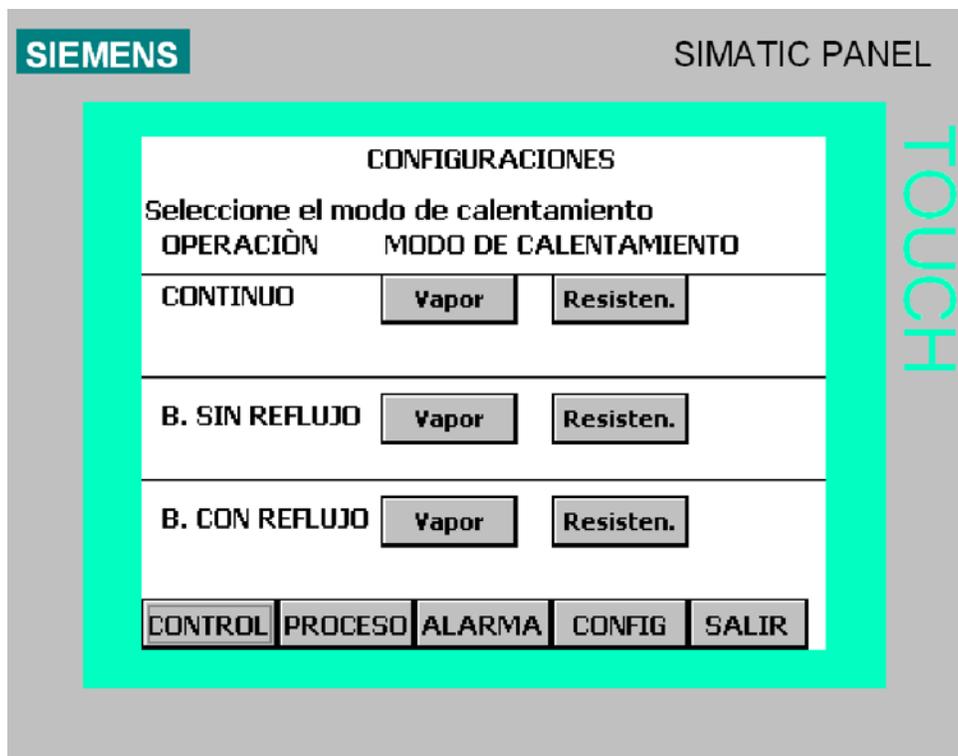


**Figura 6.47.** Interfaz hombre maquina panel de control (Alarmas).



**Figura 6.48.** Interfaz hombre maquina panel de control (Icono de alarma).

Finalmente, la figura 6.49 muestra el menú de configuraciones, el cual se permite el acceso a configurar el modo de calentamiento de cada modo de operación.



**Figura 6.49.** Interfaz hombre maquina panel de control (Configuraciones -modo de calentamiento).

En el menú de configuraciones del modo de calentamiento (figura 6.48), se puede seleccionar si el calor en el rehervidor es provisto por la resistencia o vapor, los parámetros de los controladores PID dependen de esta elección.

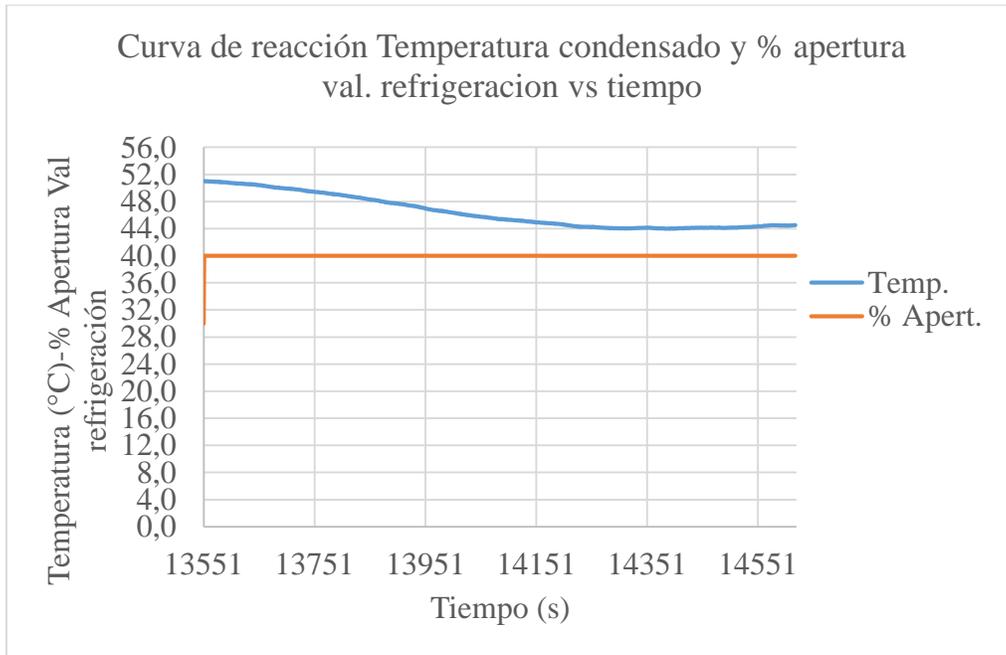
## 7. Resultados y Análisis

### 7.1. Curvas de reacción.

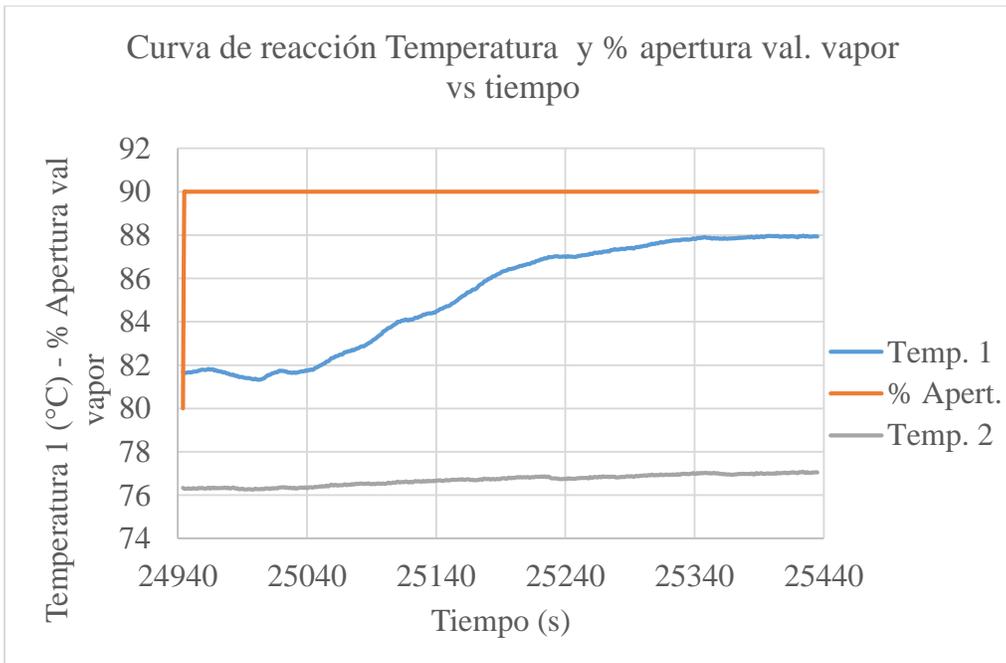
A continuación, se presentan las curvas de reacción realizadas en cada modo de operación de la columna.

#### 7.1.1. Curvas de reacción operación en continuo con vapor.

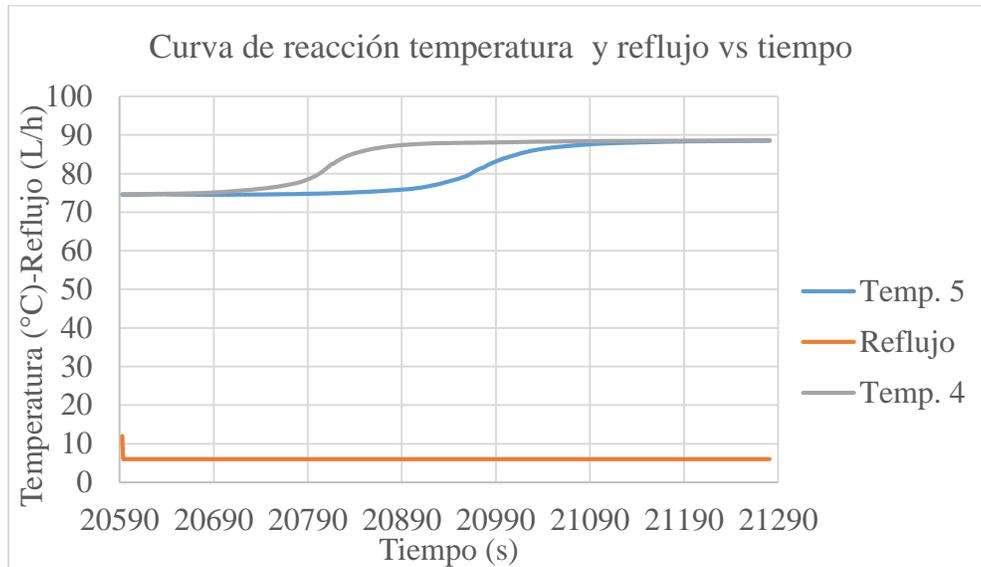
Las figuras 7.1-7.4 muestran las curvas de reacción obtenidas para la operación en continuo con vapor.



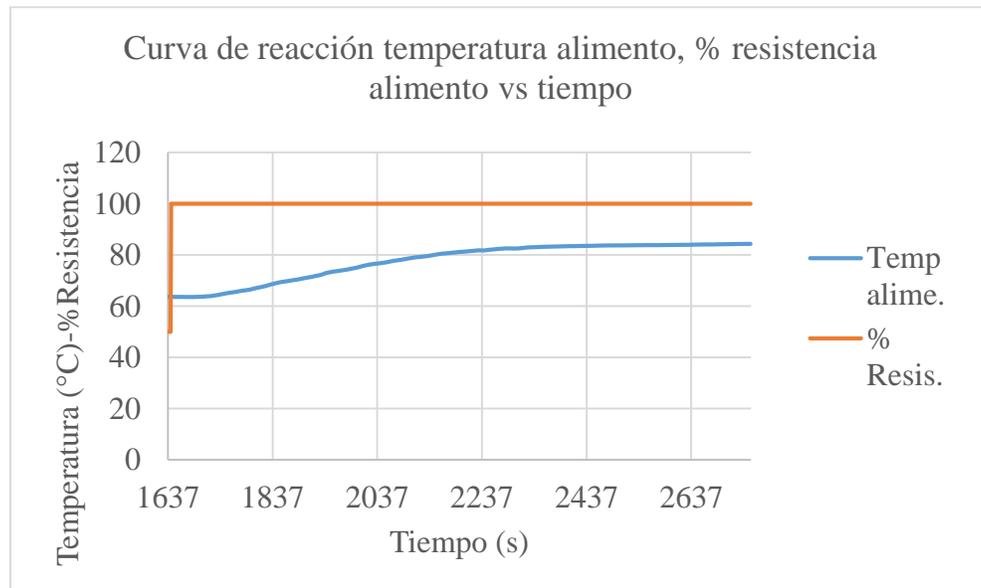
**Figura 7.1.** Curva de reacción temperatura condensado y % de apertura válvula de refrigeración vs tiempo (operación en continuo con vapor).



**Figura 7.2.** Curva de reacción temperatura y % de apertura válvula de vapor vs tiempo (operación en continuo con vapor).



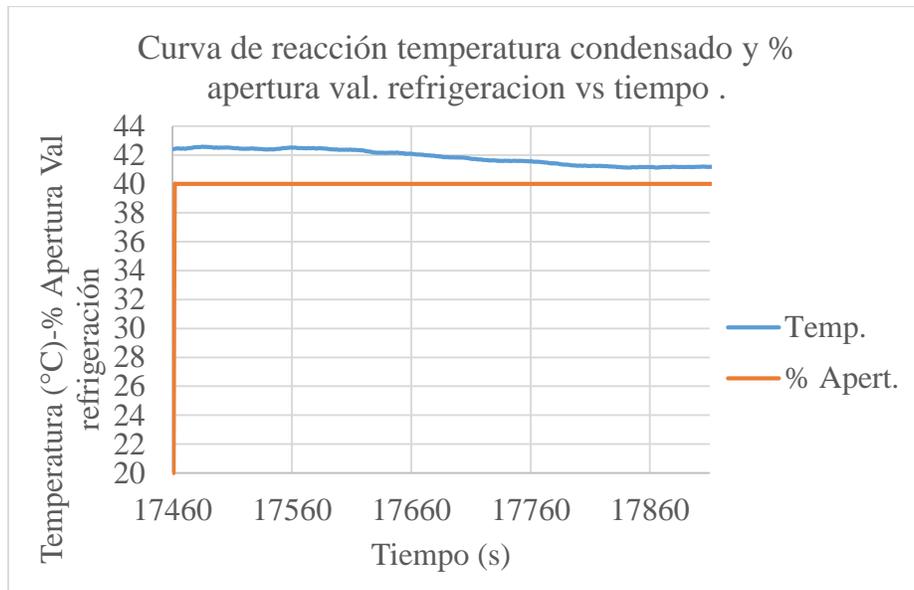
**Figura 7.3.** Curva de reacción temperatura y reflujo vs tiempo (operación en continuo con vapor).



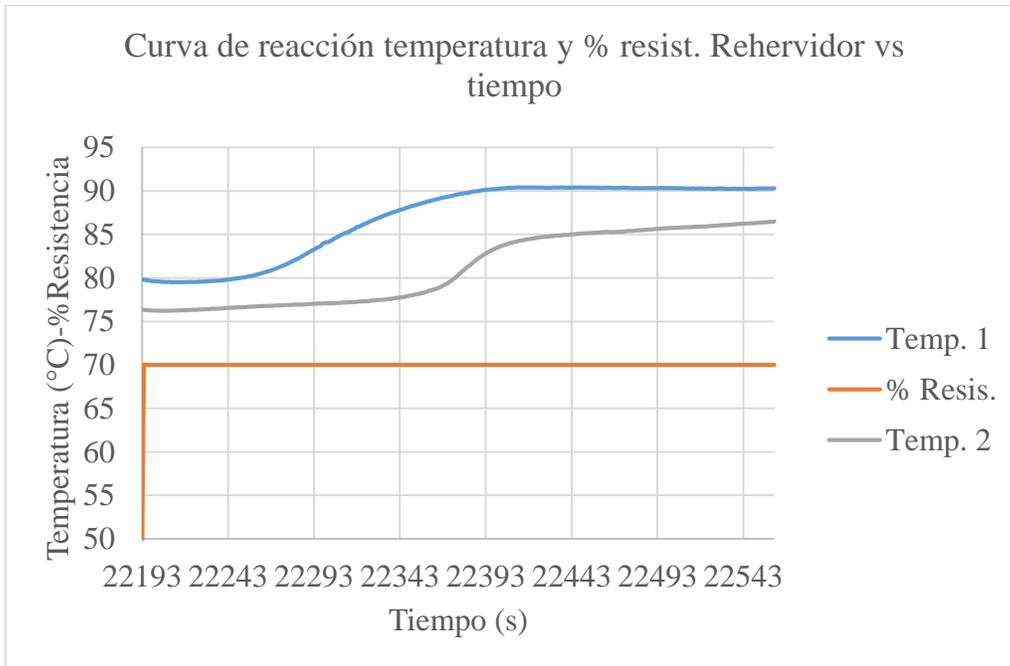
**Figura 7.4.** Curva de reacción temperatura y % de resistencia de alimento vs tiempo (operación en continuo con vapor).

### 7.1.2. Curvas de reacción operación en continuo con resistencia.

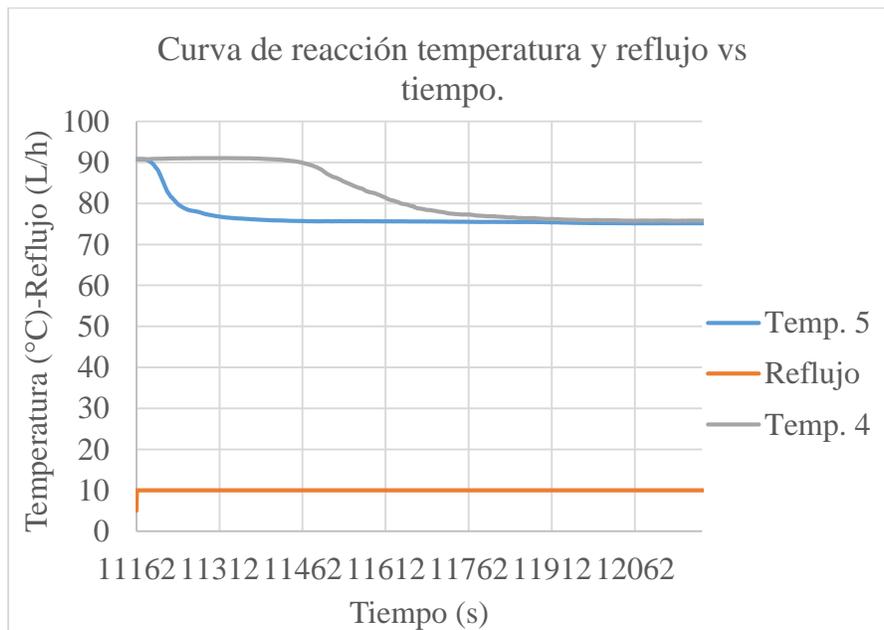
Las figuras 7.5-7.7 muestran las curvas de reacción obtenidas para la operación en continuo con resistencia.



**Figura 7.5.** Curva de reacción temperatura condensado y % de apertura válvula de refrigeración vs tiempo (operación en continuo con resistencia).



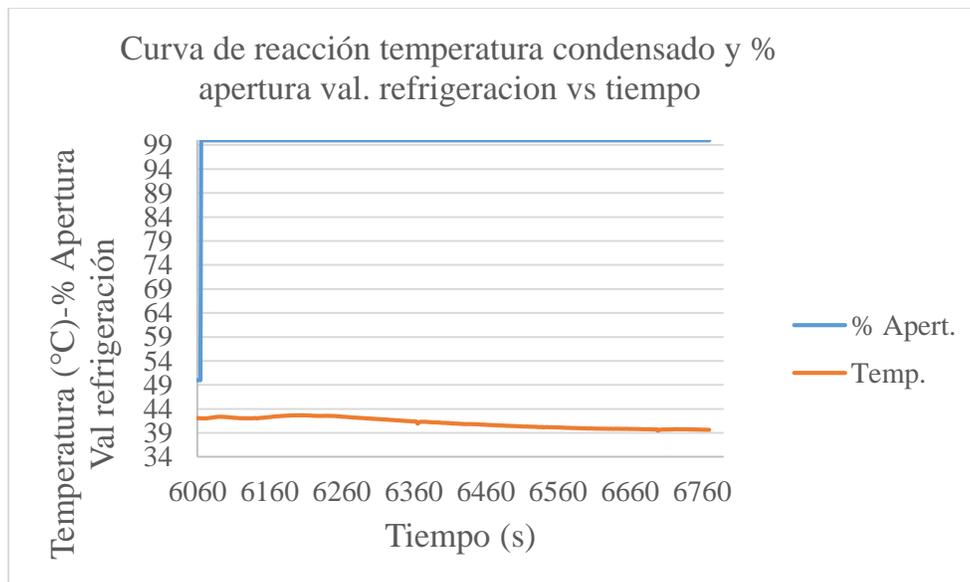
**Figura 7.6.** Curva de reacción temperatura y % de resistencia de rehervidor vs tiempo (operación en continuo con resistencia).



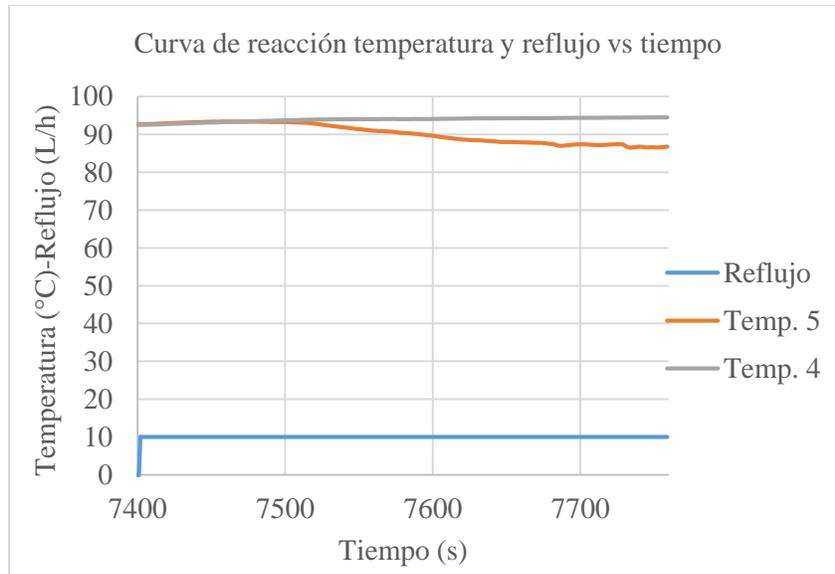
**Figura 7.7.** Curva de reacción temperatura y reflujo vs tiempo (operación en continuo con resistencia).

### 7.1.3. Curvas de reacción operación en batch con resistencia.

Las figuras 7.8 y 7.9 muestran las curvas de reacción obtenidas para la operación en batch con resistencia.



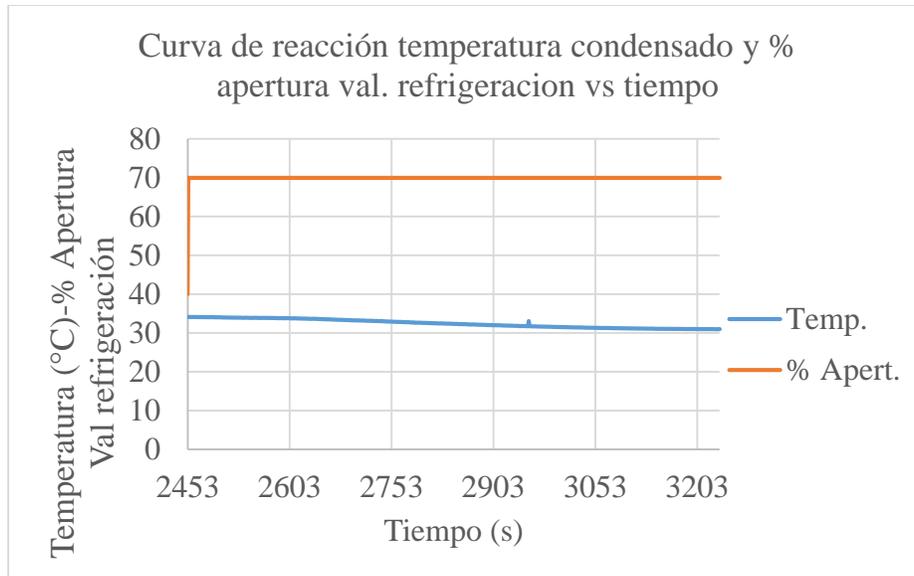
**Figura 7.8.** Curva de reacción temperatura condensado y % de apertura válvula de refrigeración vs tiempo (operación en batch con resistencia).



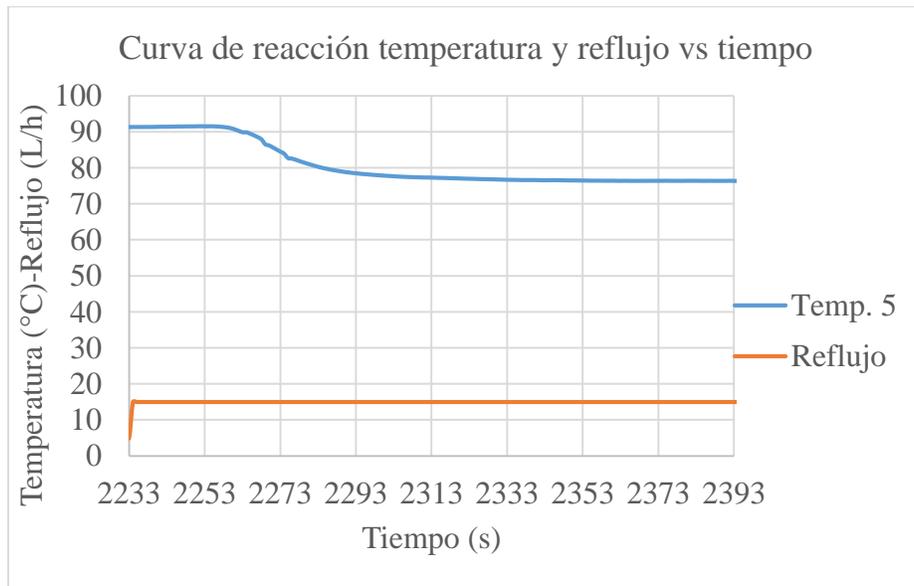
**Figura 7.9.** Curva de reacción temperatura y reflujo vs tiempo (operación en batch con resistencia).

#### 7.1.4. Curvas de reacción operación en batch con vapor.

Las figuras 7.10 y 7.11 muestran las curvas de reacción obtenidas para la operación en batch con vapor.



**Figura 7.10.** Curva de reacción temperatura condensado y % de apertura válvula de refrigeración vs tiempo (operación en batch con vapor).



**Figura 7.11.** Curva de reacción temperatura y reflujo vs tiempo (operación en batch con vapor).

Como se puede apreciar en las figuras 7.1, 7.5, 7.8, 7.10, el cambio en la temperatura de la corriente de proceso a la salida del condensador es muy pequeño, aproximadamente 5°C, esto a pesar de que la magnitud del escalón en la mayoría de los casos supera el 20 % de apertura de la

válvula de control del suministro de agua, de esta forma se puede inferir que la ganancia de este proceso resulta ser pequeña; también es evidente que la dinámica de este sistema es lenta, superando los 8 minutos para alcanzar la temperatura final en el nuevo estado estacionario. Cabe mencionar que para los modos de operación con resistencia se utilizó una configuración de 1 paso por los tubos y 1 paso por la camisa del condensador, y en los modos de operación con vapor se utilizó una configuración de 3 pasos por los tubos y 1 por la camisa del condensador, sin embargo, las curvas de reacción presentan similitudes en cuanto a su forma.

Las figuras 7.2 y 7.6 muestran las curvas de reacción realizadas para la temperatura de la parte inferior de la zona empacada, la cual cuenta con 2 sensores transmisores de temperatura, TT-101 y TT-102, en las gráficas representados por Temp 1 y Temp 2 respectivamente. Como se puede apreciar la magnitud del cambio en la temperatura 1 ante el escalón de la apertura de la válvula de control del suministro de vapor y % de potencia de la resistencia del rehervidor, es mucho mayor en comparación al cambio experimentado por la temperatura 2, de lo cual se puede inferir que la temperatura en TT-101 resulta ser más sensible ante un cambio en el calor suministrado al rehervidor, por cualquiera de las dos fuentes (vapor o resistencia). Teniendo en cuenta el criterio de la sensibilidad para la determinación del punto de medición para realizar el control de temperatura en la torre, se puede afirmar que el punto sensado por TT-101 resulta ser el más indicado para ser controlado en lazo cerrado.

En la figura 7.3 se muestra la curva de reacción obtenida para la temperatura sensada por TT-104 y TT-105, Temp 4 y Temp 5 respectivamente, los cuales están ubicados en la parte superior de la zona empacada de la columna, como se puede apreciar, se realizó un escalón negativo en el reflujo, por tanto, la temperatura del tope de la zona empacada se incrementa, en este caso no existe diferencia en cuanto a la sensibilidad debido a que la magnitud del cambio total ante un escalón en el reflujo, resulta ser igual para las dos temperaturas; sin embargo, la temperatura sensada por TT-104 tiene una respuesta dinámica más rápida, puesto que al estar ubicada en un punto más bajo que TT-105, experimenta un incremento de temperatura más rápido provocado por el vapor proveniente del rehervidor. En el caso en que se realiza un escalón positivo en el reflujo, como el ilustrado en las figuras 7.7 y 7.9, la respuesta dinámica es mucho más rápida en la TT-105 en comparación a la de TT-104, ya que en este caso el líquido retornado a la columna

desciende desde el tope, afectado en primera instancia a los puntos ubicados en la parte superior. La constante de tiempo cuando se realiza un escalón positivo resulta ser menor como se ve en la siguiente sección, es por ello que se optó por controlar la temperatura de TT-105.

Para la temperatura de la alimentación se realizó una sola curva de reacción, debido a que en este proceso no se ve afectado por otras variables del sistema, analizadas en las curvas de reacción ya mencionadas, es decir su dinámica no se ve afectada si la columna opera en continuo con medio de calentamiento vapor o resistencia, sin embargo, cabe resaltar que el flujo de la alimentación si afecta en gran medida esta variable. La curva de reacción mostrada en la figura 7.4 se obtuvo con un flujo de alimentación de 10 L/h con la cual se alcanzó una temperatura máxima de 84 °C operando con 100% de la potencia que genera la resistencia del alimento, al incrementar el flujo a 20 L/h, la temperatura máxima que alcanza la alimentación, empleando la misma potencia, ronda los 65°C, por tanto, se tiene una curva de reacción completamente diferente.

## 7.2.Sintonía de Controladores y evaluación del desempeño

En la tabla 7.1 se muestran los parámetros de cada función de transferencia del proceso, obtenidos a partir de las curvas de reacción mostradas en la sección anterior.

**Tabla 7.1.** Parámetros de funciones de proceso.

Modo de operación	Variable de salida	Variable de entrada	Ganancia del proceso $K_p$	Constante de tiempo $\tau$ (s)	Tiempo muerto $t_D$ (s)	$t_D/\tau$
Continuo (vapor)	Temp. Condensado Temperatura 1 (TT-105)	% apertura VC (VC-102)	-0,65	233	28	0,12
		% apertura VC (VC-101)	0,63	170	57	0,34
	Temperatura 5 (TT-105)	Reflujo	-2,33	245	147	0,60
		% Potencia resistencia (R101)	0,34	317	74	0,23
Continuo (Resistencia)	Temp. Condensado Temperatura 1 (TT-105)	% apertura VC (VC-102)	-0,06	219	50	0,23
		% Potencia resistencia (R102)	0,53	95	37	0,39
	Temperatura 5 (TT-105)	Reflujo	-3,23	48	23	0,48
		% Potencia resistencia	0,34	317	74	0,23

		(R101)				
Batch (vapor)	Temp. Condensado Temperatura 5 (TT-105)	% apertura VC (VC-102)	-0,10	365	52	0,14
		Reflujo	-1,48	24	22	0,92
Batch (Resistencia)	Temp. Condensado Temperatura 5 (TT-105)	% apertura VC (VC-102)	-0,06	274	50	0,18
		Reflujo	-0,50	130	102	0,78

Como se visualiza en la tabla 7.1 en todos los procesos el tiempo muerto es menor a la constante de tiempo, y su relación se encuentra entre 0.1-1, es por ello que se opta por implementar controladores PI, puesto que, como regla empírica se recomienda usar controladores PID cuando dicha relación es mayor que 1. Así mismo esto posibilita hacer uso de los métodos de sintonía propuestos por Ziegler-Nichols y Cohen-Conn. En la tabla 7.2 se muestran los parámetros de los controladores PI estimados mediante los datos suministrados en la tabla 7.1.

**Tabla 7.2.** Parámetros de controladores PI

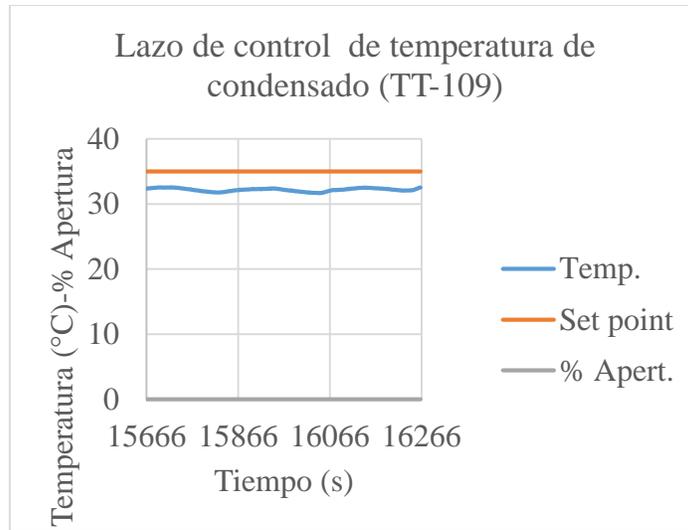
Modo de operación	Variable controlada	Variable manipulada	Ziegler-Nichols		Cohen -Coon		Ciancone (Regulación)	
			Ganancia K <sub>C</sub>	Tiempo integral TI (min)	Ganancia K <sub>C</sub>	Tiempo integral TI (min)	Ganancia K <sub>C</sub>	Tiempo integral TI (min)
Continuo (vapor)	Temp. Condensado	% apertura VC (VC-102)	-11,52	1,54	-11,65	1,24	-3,08	1,09
	Temperatura 1 (TT-105)	% apertura VC (VC-101)	4,26	3,14	4,39	1,88	3,97	2,38
	Temperatura 5 (TT-105)	Reflujo	-0,64	8,09	-0,68	3,71	-0,51	4,57
	Temperatura alimentación	% Potencia resistencia (R101)	11,19	4,07	11,43	2,77	7,26	2,61
Continuo (Resistencia)	Temp. Condensado	% apertura VC (VC-102)	-63,58	2,75	-64,92	1,88	-41,94	2,20
	Temperatura 1 (TT-105)	% Potencia resistencia (R102)	4,40	2,04	4,56	1,14	4,00	1,52
	Temperatura 5 (TT-105)	Reflujo	-0,58	1,27	-0,61	0,65	-0,56	0,83

	Temperatura alimentación	% Potencia resistencia (R101)	11,19	4,07	11,43	2,77	7,26	2,61
Batch con reflujo (vapor)	Temp. Condensado Temperatura 5 (TT-105)	% apertura VC (VC-102) Reflujo	-62,14	2,86	-62,96	2,23	-20,66	1,81
			-0,66	1,21	-0,72	0,44	-0,54	0,51
Batch con reflujo (Resistencia)	Temp. Condensado Temperatura 5 (TT-105)	% apertura VC (VC-102) Reflujo	-81,12	2,75	-82,49	2,01	-41,12	2,16
			-2,30	5,61	-2,47	2,23	-1,80	2,51
Batch sin reflujo (vapor)	Temp. Condensado	% apertura VC (VC-102)	-62,14	2,86	-62,96	2,23	-20,66	1,81
	Temperatura 1 (TT-101)	% apertura VC (VC-101)	4,26	3,14	4,39	1,88	3,97	2,38
Batch sin reflujo (Resistencia)	Temp. Condensado	% apertura VC (VC-102)	-81,12	2,75	-82,49	2,01	-41,12	2,16
	Temperatura 1 (TT-101)	% Potencia resistencia (R102)	4,40	2,04	4,56	1,14	4,00	1,52

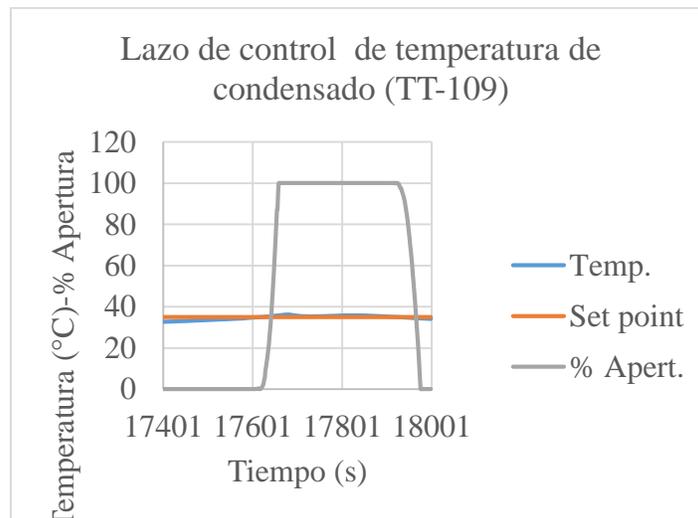
Finalmente se evaluó el desempeño de cada lazo de control para cada conjunto de parámetros en cada modo de operación, esto mediante el índice de desempeño IAE. En las siguientes figuras se muestra el comportamiento dinámico de lazo cerrado para cada lazo de control establecido en los diferentes modos de operación.

### 7.2.1. Operación en continuo con vapor.

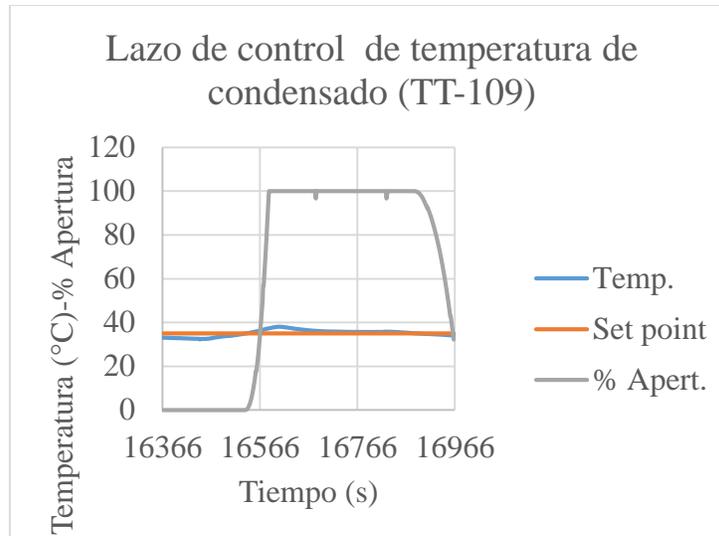
En las figuras 7.12-7.14 se muestra el comportamiento dinámico del lazo de control de la temperatura de la corriente de proceso a la salida del condensador.



**Figura 7.12.** Lazo de control de temperatura de condensado (TT-109) (Ziegler-Nichols).



**Figura 7.13.** Lazo de control de temperatura de condensado (TT-109) (Cohen-Coon).

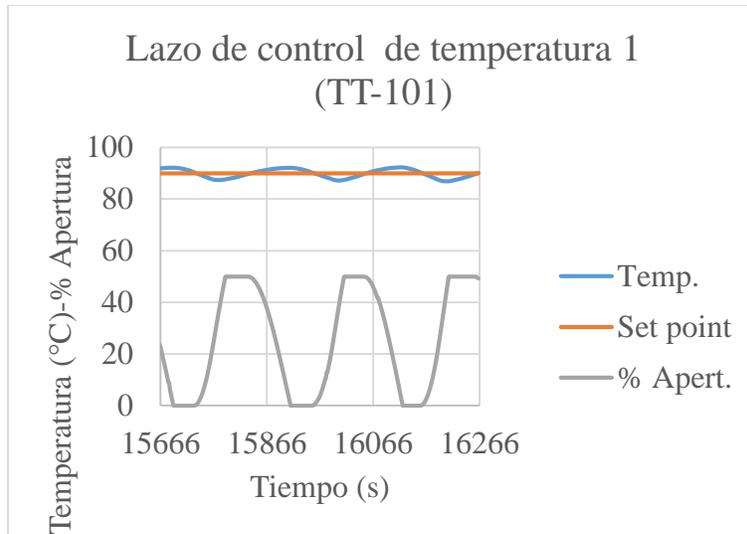


**Figura 7.14.** Lazo de control de temperatura de condensado (TT-109) (Ciancone).

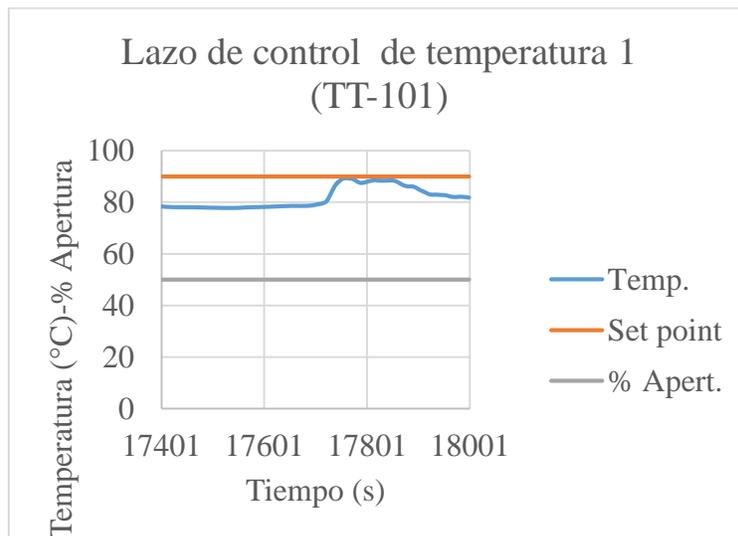
Se apreció que la temperatura ambiente afecta de manera considerable la capacidad de regulación de la temperatura que tiene el condensador; en días en que la temperatura ambiente está por debajo del su promedio normal ( $24^{\circ}\text{C}$ ), se requiere una menor apertura de la válvula de control para alcanzar un determinado set point en comparación a los días en que la temperatura del ambiente se encuentra en su valor habitual.

La válvula de control del suministro de agua al condensador permanece totalmente cerrada cuando el valor de la temperatura controlada está por debajo del set point, y pasa a estar totalmente abierta en cuanto la temperatura supera el set point, tal como se observa en las figuras 7.13 y 7.14, esta rápida respuesta de la variable manipulada se debe al alto valor de la ganancia que tiene el controlador (-11 y -3).

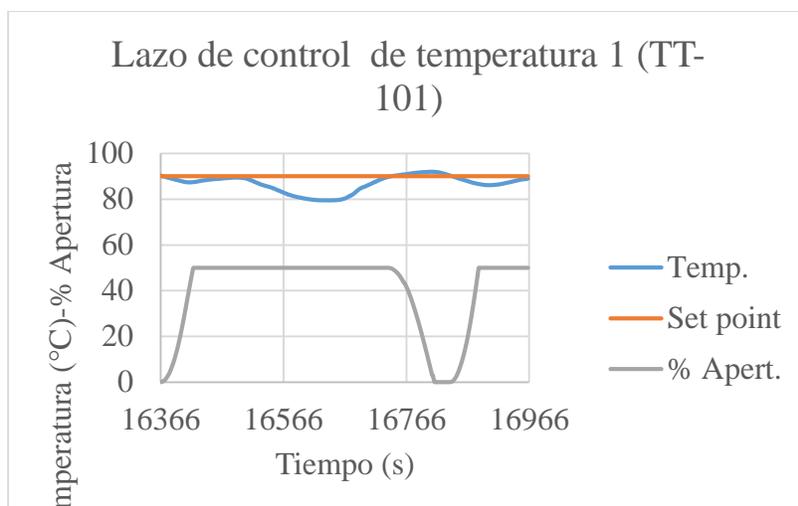
En las figuras 7.15-7.17 se muestra el comportamiento dinámico del lazo de control de la temperatura 1 de la zona empacada (TT-101).



**Figura 7.15.** Lazo de control de temperatura 1 (TT-101) (Ziegler-Nichols).



**Figura 7.16.** Lazo de control de temperatura 1 (TT-101) (Cohen-Coon).



**Figura 7.17.** Lazo de control de temperatura 1 (TT-101) (Ciancone).

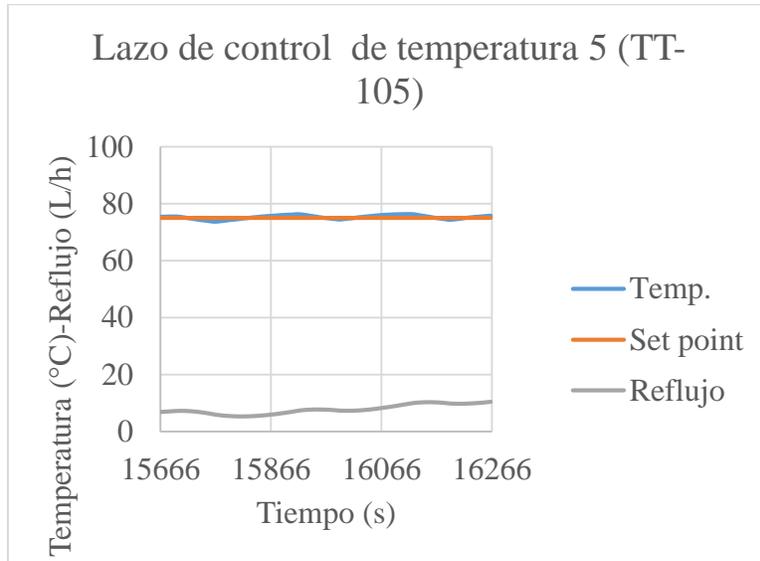
En todas las figuras 7.15-7.17 se visualiza que la apertura máxima de la válvula de control del suministro del vapor al rehervidor es de 50%, este límite se estableció debido a que cuando la apertura de dicha válvula se encuentra al 100 % abierta, se produce un flujo alto de vapor desde el rehervidor, el cual eleva la temperatura en todos los puntos de la zona empacada a un valor por encima de 85°C, causando que el controlador de temperatura del punto más alto de la zona empacada, el cual manipula el flujo de reflujo, establezca el máximo flujo posible de la bomba dosificadora, en el cual se opera a reflujo total. Aun con el máximo flujo de líquido retornado a la torre no se puede controlar la temperatura a un valor por debajo de 85°C. Es por este motivo que se optó por fijar 50% como límite de apertura de la válvula de control, en el cual se obtuvo buenos resultados en cuanto a las temperaturas deseadas en la zona empacada.

En la figura 7.15 se visualiza que con los parámetros estimados por Ziegler-Nichols, el sistema se comporta oscilante, sin embargo, el sobrepaso de la variable controlada es relativamente pequeño 3-2 °C de del set point fijado (90°C). El comportamiento del sistema con los parámetros de Ciancone (figura 7.17) es similar a los de Ziegler-Nichols, con la diferencia de que el periodo de oscilación es mayor.

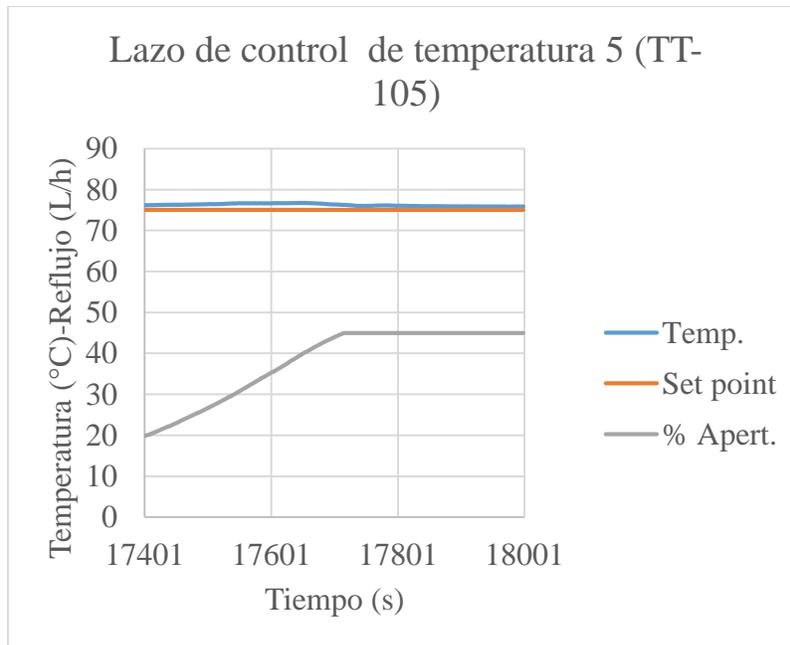
También es evidente que este lazo de control resulta ser susceptible a la perturbación causada por el flujo de vapor proveniente desde la caldera. En la figura 7.16 se observa que durante todo el intervalo de tiempo la válvula de control del vapor se mantuvo abierta al 50%, aun así, no se logró alcanzar el set point establecido de 90°C, puesto que en dicho momento el flujo de vapor

suministrado al rehervidor era menor comparado con el flujo en los intervalos de tiempo que se evaluó los parámetros estimados por Ziegler-Nichos y Ciancone.

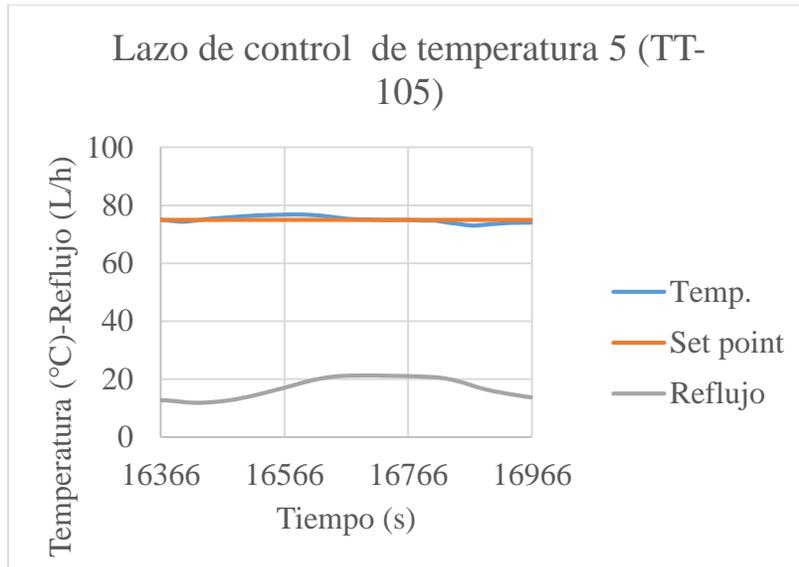
En las figuras 7.18-7.20 se muestra el comportamiento dinámico del lazo de control de la temperatura 5 de la zona empacada (TT-105).



**Figura 7.18.** Lazo de control de temperatura 5 (TT-105) (Ziegler-Nichols).



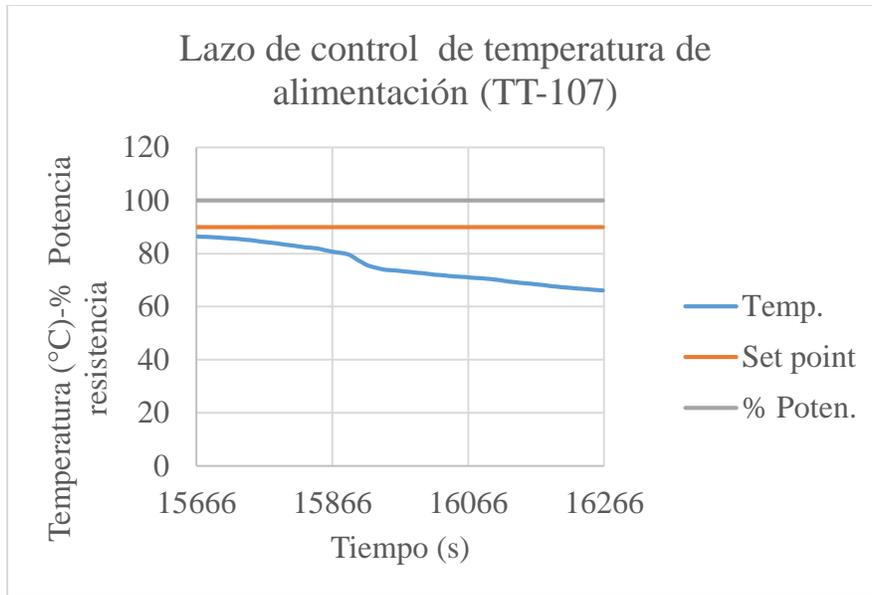
**Figura 7.19.** Lazo de control de temperatura 5 (TT-105) (Cohen-Coon).



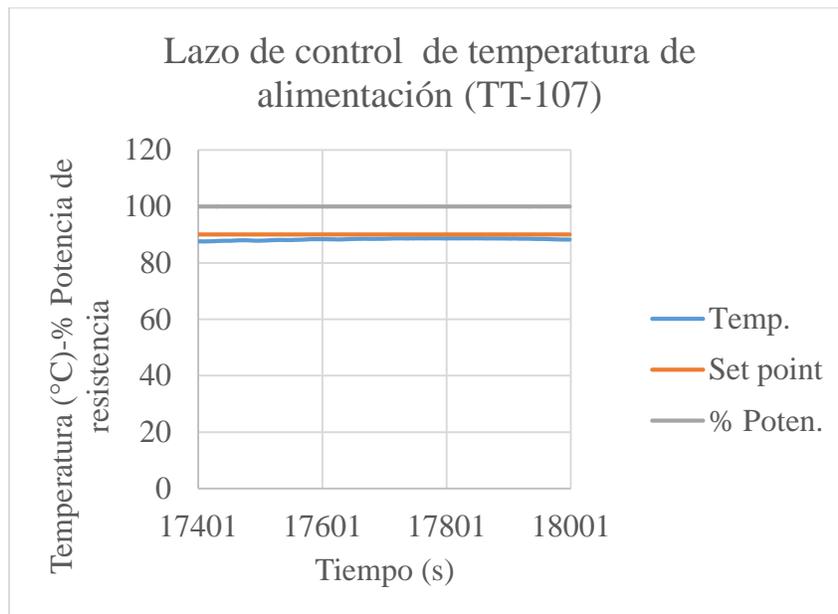
**Figura 7.20.** Lazo de control de temperatura 5 (TT-105) (Ciancone).

La figura 7.18 y 7.20 muestran un comportamiento oscilatorio similar al mostrado en lazo de control de la temperatura 1 (figuras 7.15 y 7.17) cuya diferencia también radica en el periodo de oscilación, siendo en este caso mayor el mostrado en la figura 7.20, sin embargo, la variable manipulada (reflujo) se mantiene oscilando entre valores más pequeños (5-10 L/h) en comparación a los de la figura 7.20 (11-21L/h), esto favorece a la obtención de una mayor cantidad de producto de tope, puesto que para controlar la temperatura se está retornando una menor cantidad de reflujo.

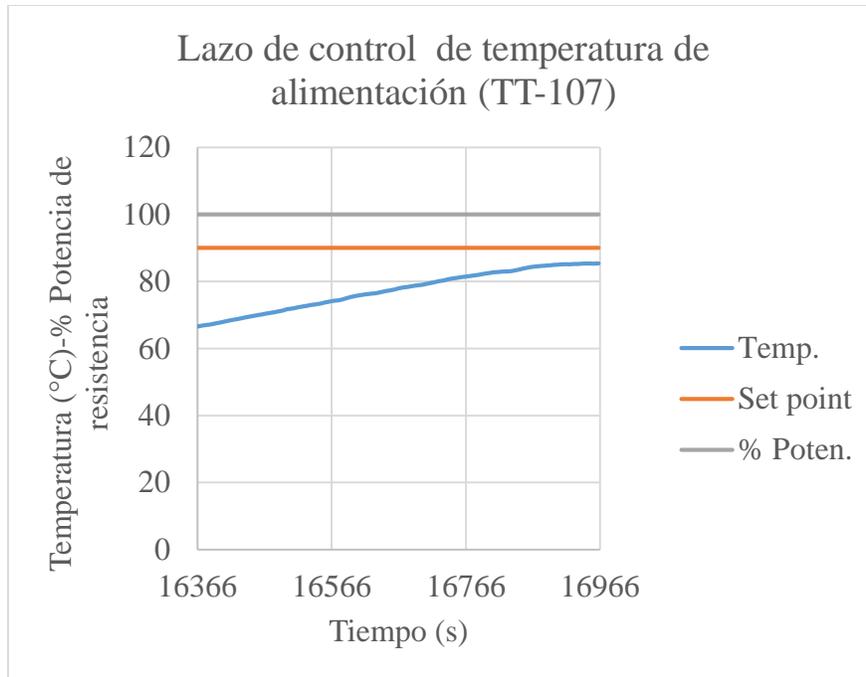
En las figuras 7.21-7.23 se muestra el comportamiento dinámico del lazo de control de la temperatura del alimento (TT-107).



**Figura 7.21.** Lazo de control de temperatura de alimentación (TT-107) (Ziegler-Nichols).



**Figura 7.22.** Lazo de control de temperatura de alimentación (TT-107) (Cohen-Coon).

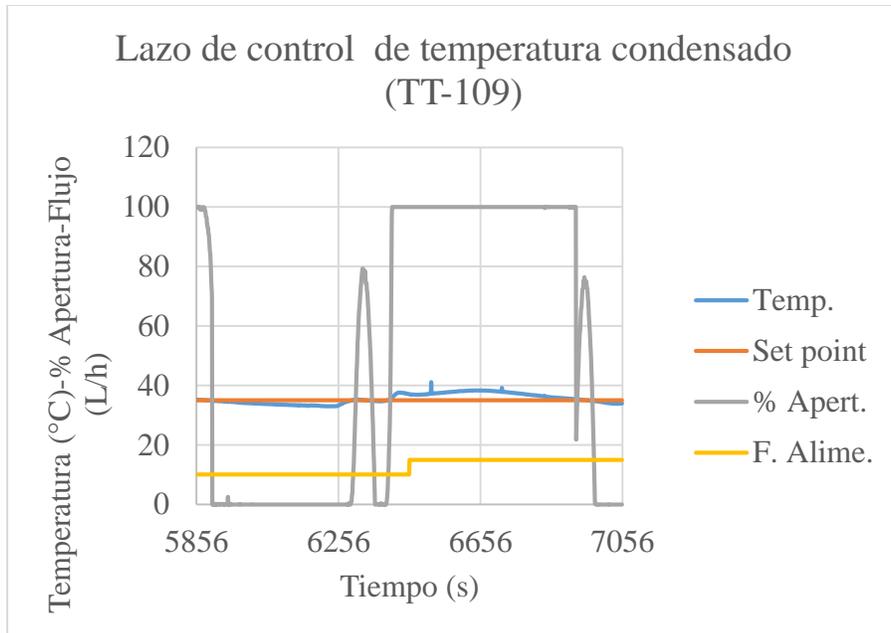


**Figura 7.23.** Lazo de control de temperatura de alimentación (TT-107) (Ciancone).

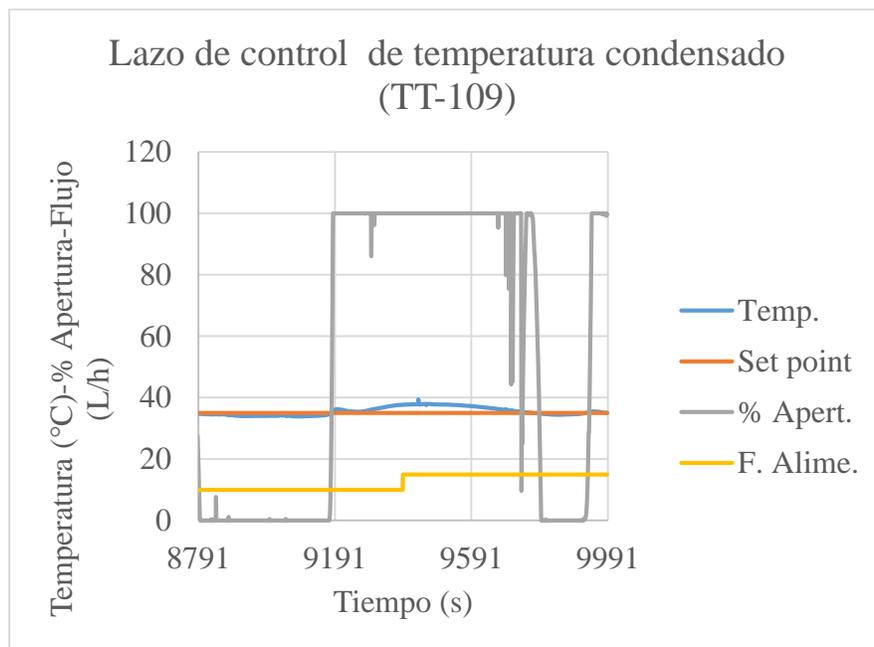
Se observa en las figuras 7.21-2.23 el set point establecido para la alimentación es de 90°C, temperatura que no se puede alcanzar cuando el flujo de la alimentación es de 10L/h, aun cuando la resistencia de precalentamiento trabaja a su máxima potencia. La temperatura máxima alcanzada fue de 88 °C como se muestra en la figura 7.22.

### 7.2.2. Operación en continuo con resistencia.

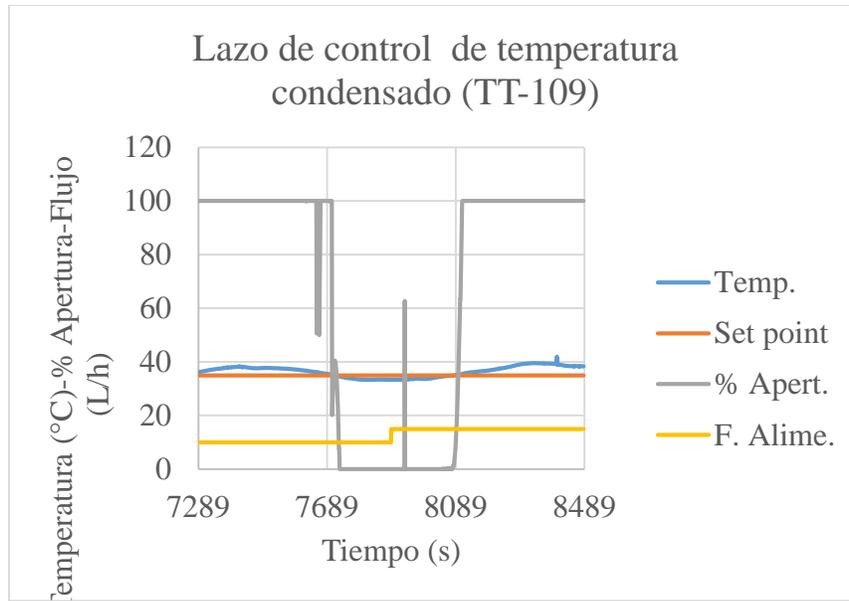
En este modo de operación se realizó una perturbación al sistema, la cual consiste en incrementar el flujo de alimentación de 10 a 15 L/h, este escalón se realizó a los 10 minutos de iniciar cada prueba, el tiempo total de cada prueba fue de 20 minutos. En las figuras 7.24-7.26 se muestra el comportamiento dinámico del lazo de control de la temperatura de la corriente de proceso a la salida del condensador.



**Figura 7.24.** Lazo de control de temperatura de condensado (TT-109) (Ziegler-Nichols).



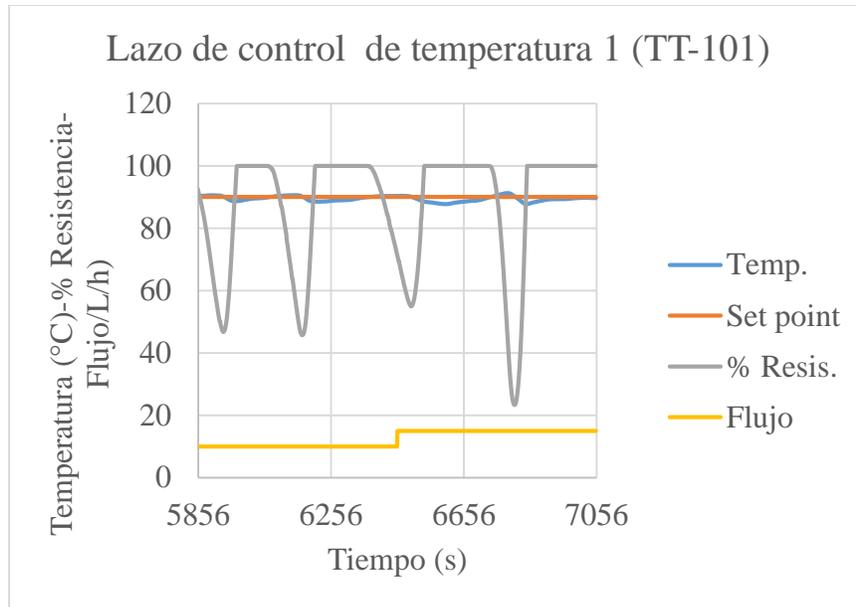
**Figura 7.25.** Lazo de control de temperatura de condensado (TT-109) (Cohen-Coon).



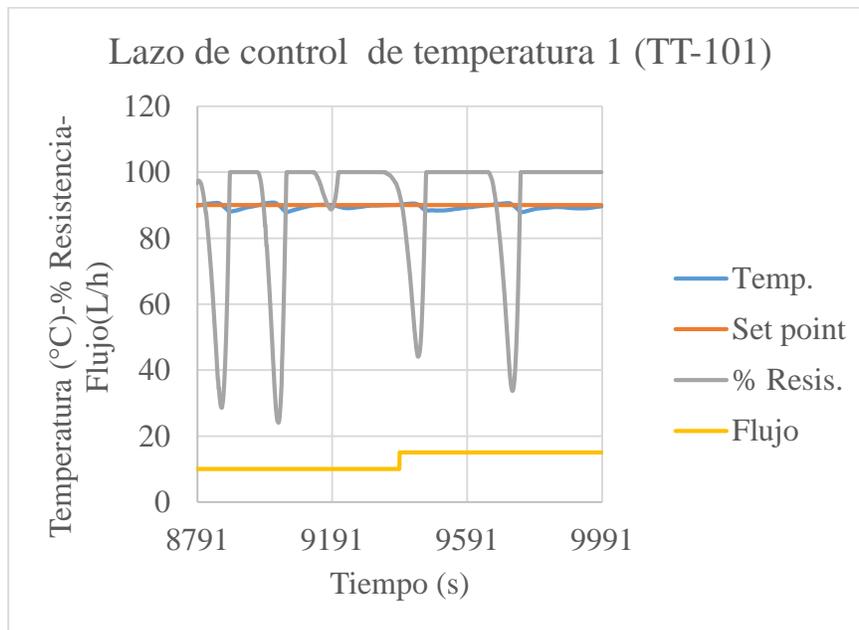
**Figura 7.26.** Lazo de control de temperatura de condensado (TT-109) (Ciancone).

Como se aprecia en las figuras 7.24-7.26 el comportamiento de lazo cerrado del control de temperatura del condensado, resulta ser oscilatorio; el incremento del flujo de alimentación no parece generar un cambio en la dinámica del sistema, también es evidente que el comportamiento de la variable manipulada (apertura de válvula de control) no es adecuado en cuanto a la protección del elemento final de control, puesto que realiza cambios bruscos, pasado de estar casi totalmente cerrada a estar totalmente abierta en un instante corto de tiempo.

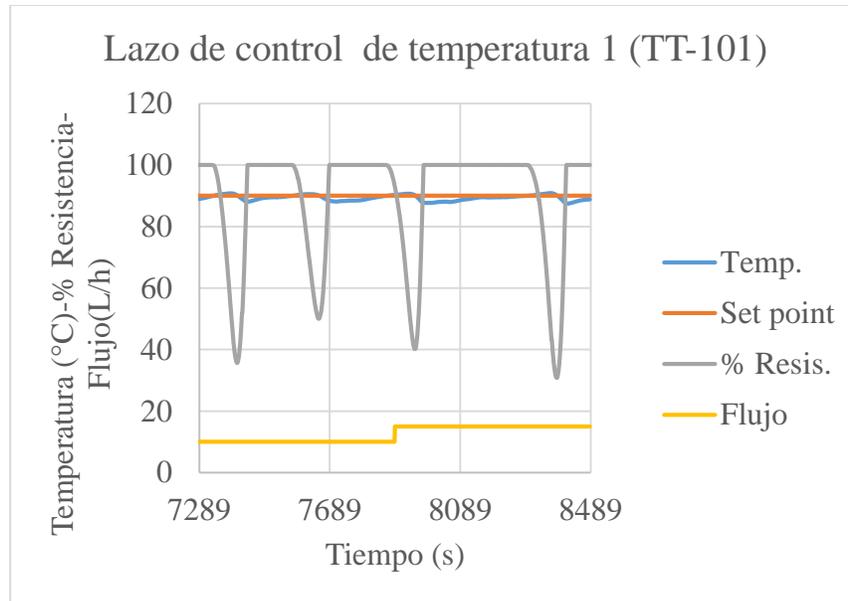
En las figuras 7.27-7.29 se muestra el comportamiento dinámico del lazo de control de la temperatura 1 de la zona empacada (TT-101).



**Figura 7.27.** Lazo de control de temperatura 1 (TT-101) (Ziegler-Nichols).



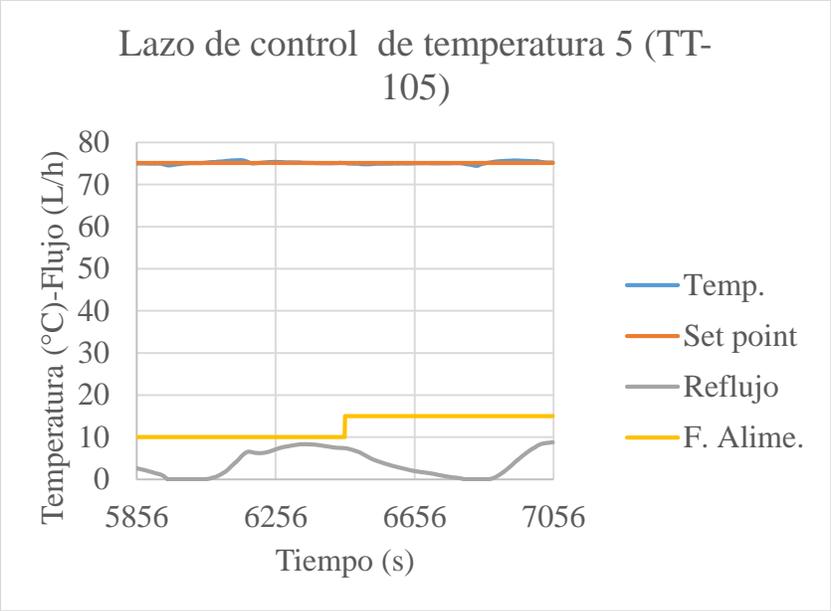
**Figura 7.28.** Lazo de control de temperatura 1 (TT-101) (Cohen-Coon).



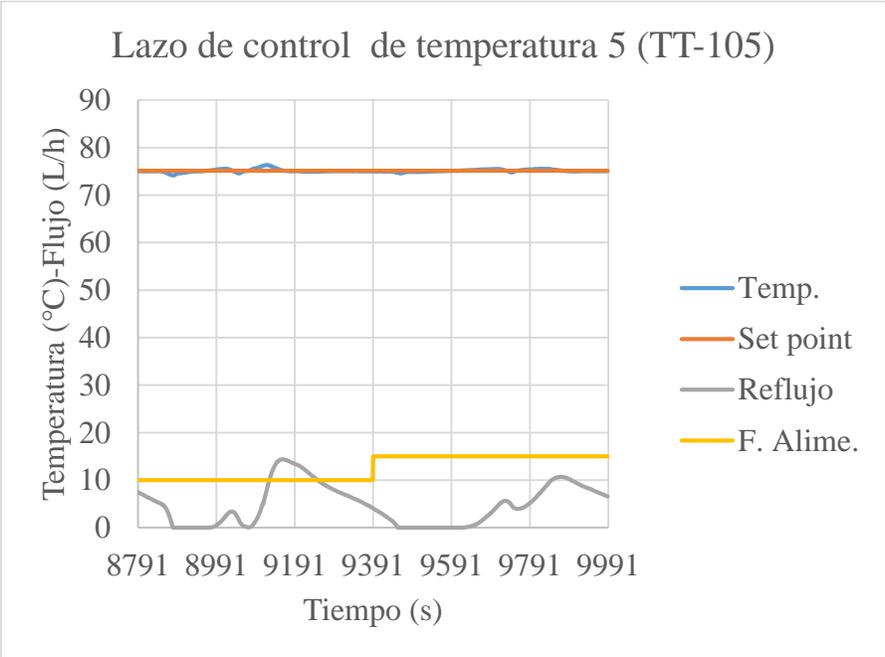
**Figura 7.29.** Lazo de control de temperatura 1 (TT-101) (Ciancone).

Con respecto al lazo de control de la temperatura 1, se visualiza que todos los conjuntos de parámetros estimados por los 3 métodos, generaron un comportamiento muy similar. En el caso de Ziegler-Nichos (figura 7.27) se tiene una mayor frecuencia de oscilación a comparación de Cohen-Coon (figura 7.28) y Ciancone (figura 7.29), en todos los casos se tiene un sobrepaso muy pequeño (1-2 °C). El incremento del flujo de alimentación, genera que el tiempo de elevación para alcanzar el set point en la oscilación posterior al escalón, se incremente levemente.

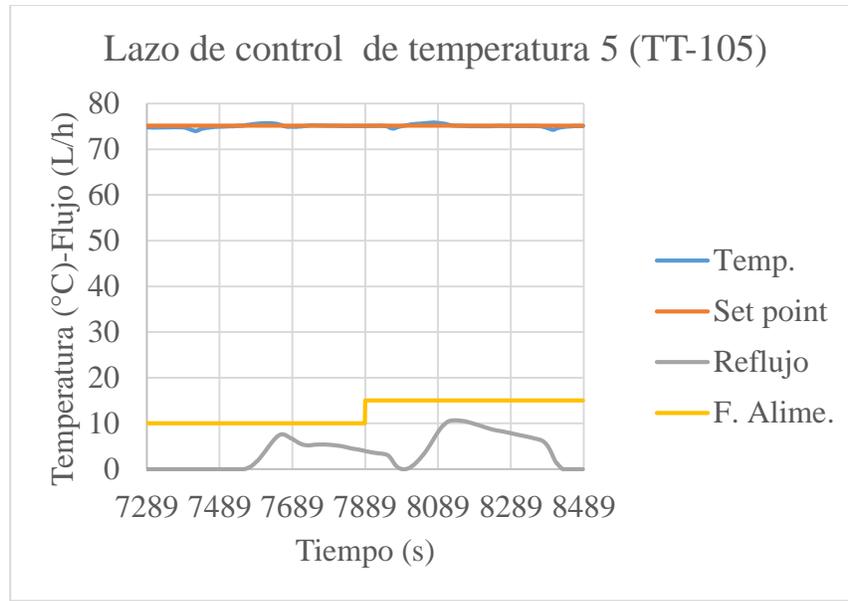
En las figuras 7.30-7.32 se muestra el comportamiento dinámico del lazo de control de la temperatura 5 de la zona empacada (TT-105).



**Figura 7.30.** Lazo de control de temperatura 5 (TT-105) (Ziegler-Nichols).



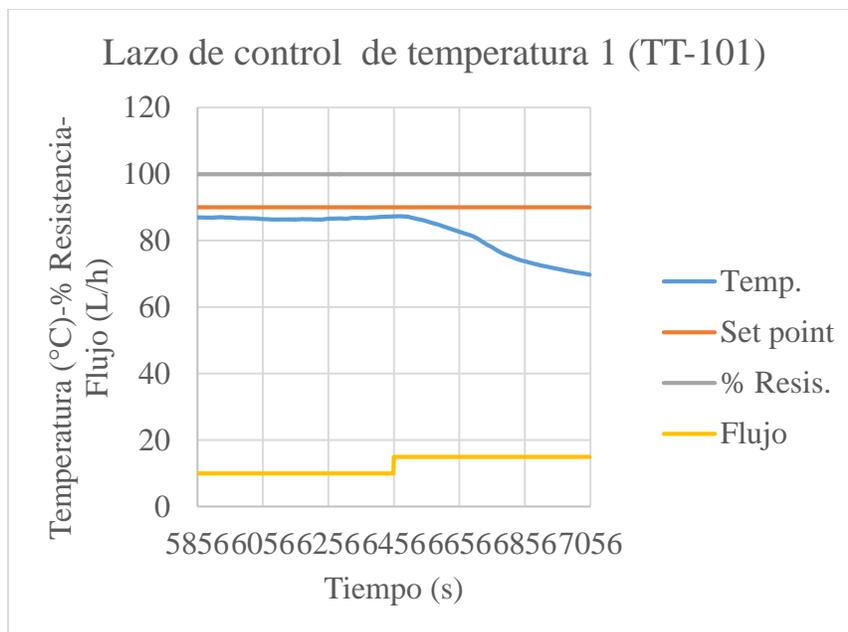
**Figura 7.31.** Lazo de control de temperatura 5 (TT-105) (Cohen-Coon).



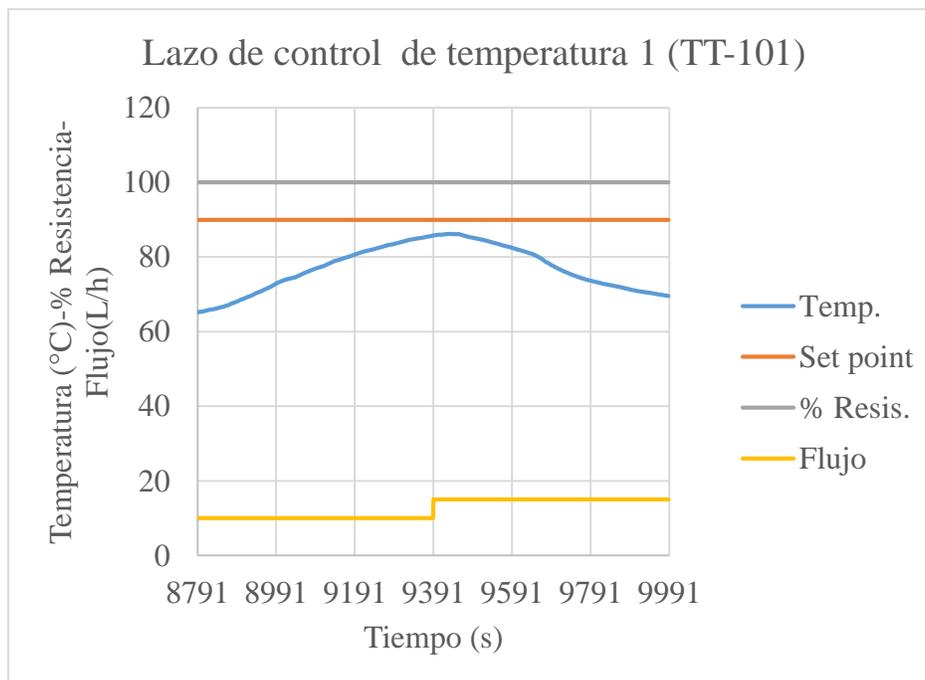
**Figura 7.32.** Lazo de control de temperatura 5 (TT-105) (Ciancone).

Tal como se aprecia en las figuras 7.30-7.32, la temperatura controlada se mantiene la mayor parte del intervalo de tiempo en el valor deseado, con algunos instantes donde ocurre un sobrepaso de máximo ( $3^{\circ}\text{C}$ ) para el caso de Ciancone (figura 7.32). Todos los parámetros generaron un comportamiento semejante, cuya diferencia más notable resulta ser la dinámica de la variable manipulada, en el caso de Ziegler-Nichols (figura 7.30) el reflujo no sobrepasa los 10 L/h, a diferencia de Cohen-Coon /figura 7.31) que en un instante supero los 15 L/h.

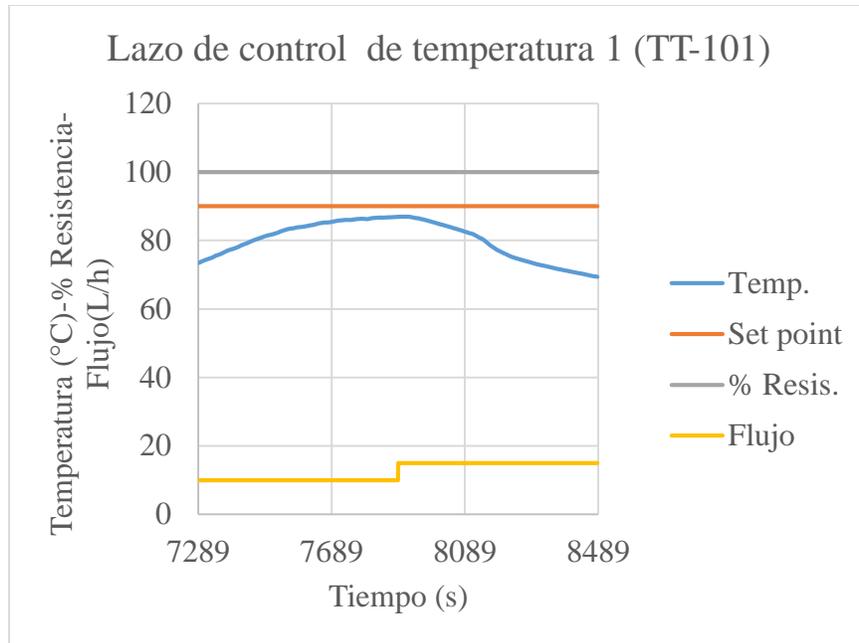
En las figuras 7.33-7.35 se muestra el comportamiento dinámico del lazo de control de la temperatura del alimento (TT-107).



**Figura 7.33.** Lazo de control de temperatura de alimentación (TT-107) (Ziegler-Nichols).



**Figura 7.34.** Lazo de control de temperatura de alimentación (TT-107) (Cohen-Coon).



**Figura 7.35.** Lazo de control de temperatura de alimentación (TT-107) (Ciancone).

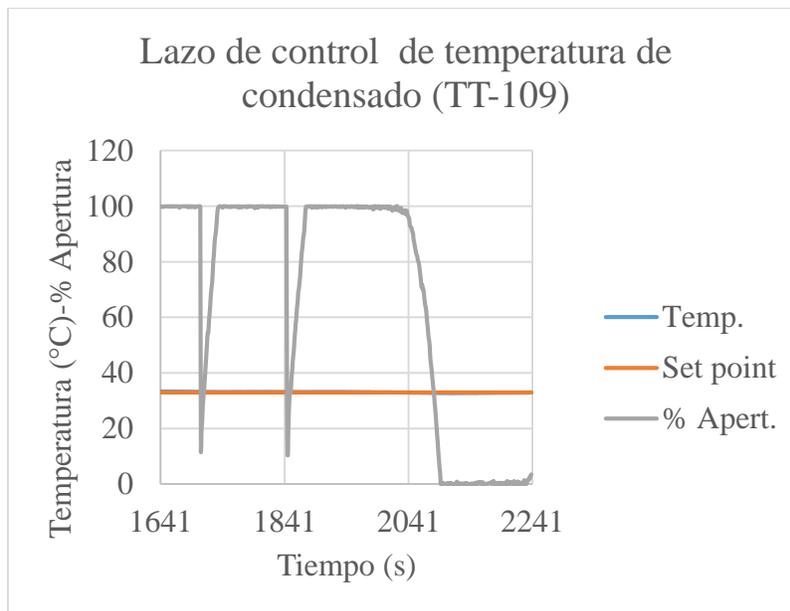
Al igual que en el modo de operación en continuo con vapor, el set point establecido para la alimentación fue de 90°C, como se visualiza en las figuras 7.33-7.35, la temperatura desciende de manera casi inmediata cuando el flujo de alimentación se incrementa de 10 a 15 L/h.

Como se aprecia en todos los lazos de control de la operación en continuo los sistemas tienen un comportamiento oscilatorio pero estable. La implementación de 2 lazos de control de temperatura en la zona empacada causa que estos interactúen entre sí, haciendo que la variable manipulada de uno de los lazos del control de temperatura, genera una perturbación para en la variable controlada del otro lazo. Por ejemplo, cuando la temperatura controlada en la sección baja de la columna se encuentra por debajo del set point, el controlador PI incrementa la apertura de la válvula de control del suministro de vapor o la potencia de la resistencia, según el modo de calentamiento con el que se opere, esto permite que se alcance nuevamente el set point establecido al generar un mayor flujo de vapor de la mezcla en el rehervidor, sin embargo este incremento de temperatura se propaga en toda la sección empacada, por lo cual en algún instante la temperatura en la sección alta controlada por el otro lazo, supera el set point establecido, de esta forma el control PI de este lazo incrementa el reflujo, una mayor cantidad de líquido retornando a la torre reduce nuevamente la temperatura en toda la sección empacada, afectando

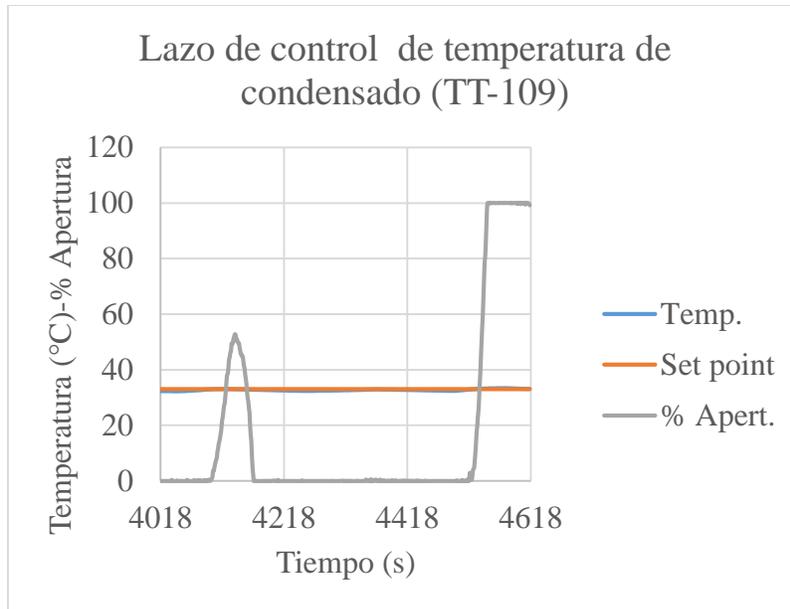
nuevamente la temperatura controlada en la sección baja, dando como resultado la generación de un efecto rebote entre dichas variables.

### 7.2.3. Operación en batch con reflujo con vapor.

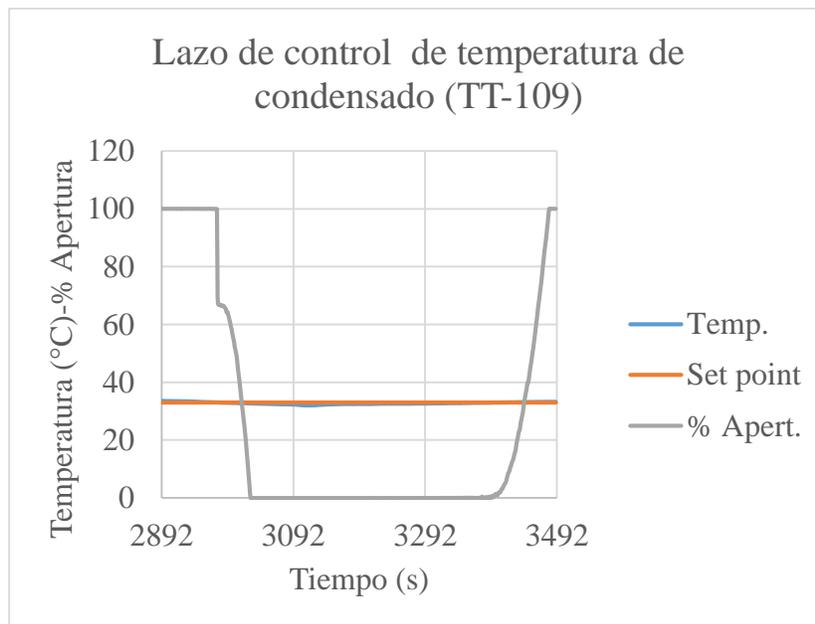
En las figuras 7.36-7.38 se muestra el comportamiento dinámico del lazo de control de la temperatura de la corriente de proceso a la salida del condensador (TT-109).



**Figura 7.36.** Lazo de control de temperatura de condensado (TT-109) (Ziegler-Nichols).



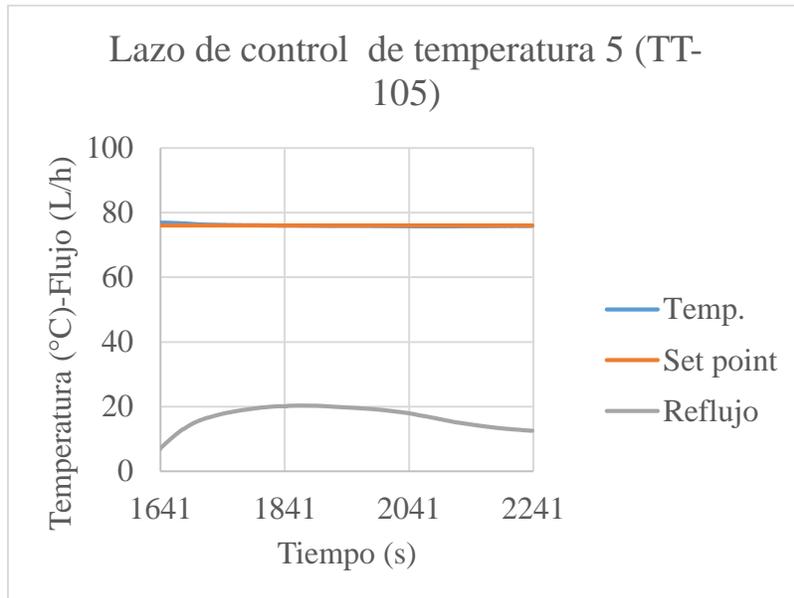
**Figura 7.37.** Lazo de control de temperatura de condensado (TT-109) (Cohen-Coon).



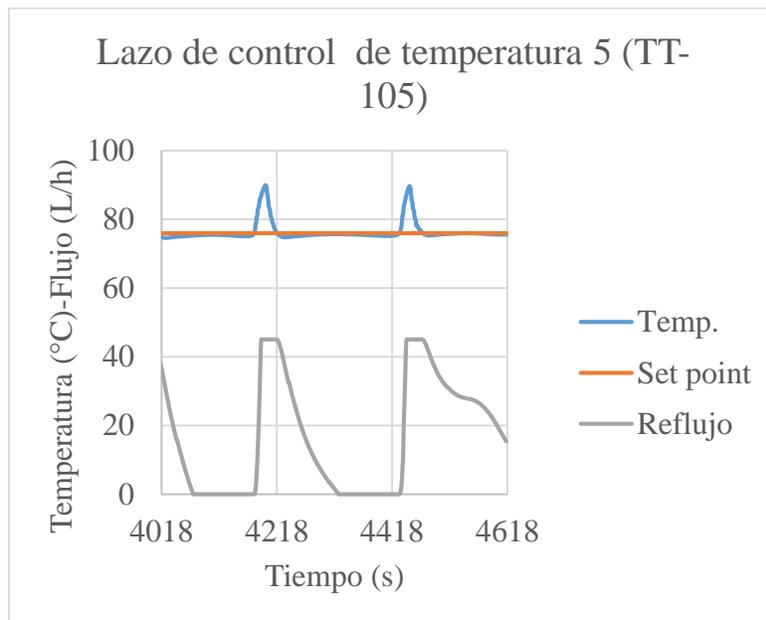
**Figura 7.38.** Lazo de control de temperatura de condensado (TT-109) (Ciancone).

Las figuras 7.36-7.38 muestran que el comportamiento del sistema es oscilatorio, en todos los casos el sobrepaso es de menos de (3°C). los parámetros estimados por Ziegler-Nichols (figura 7.36) dan como resultado un periodo de oscilación en la variable manipulada menor a comparación de Cohen-Coon y Ciancone.

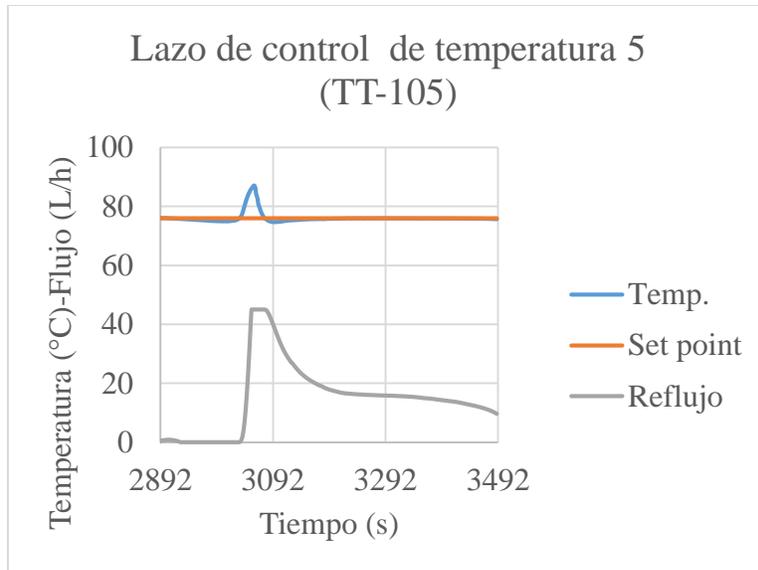
En las figuras 7.39-7.41 se muestra el comportamiento dinámico del lazo de control de la temperatura 5 de la zona empacada (TT-105).



**Figura 7.39.** Lazo de control de temperatura 5 (TT-105) (Ziegler-Nichols).



**Figura 7.40.** Lazo de control de temperatura 5 (TT-105) (Cohen-Coon).

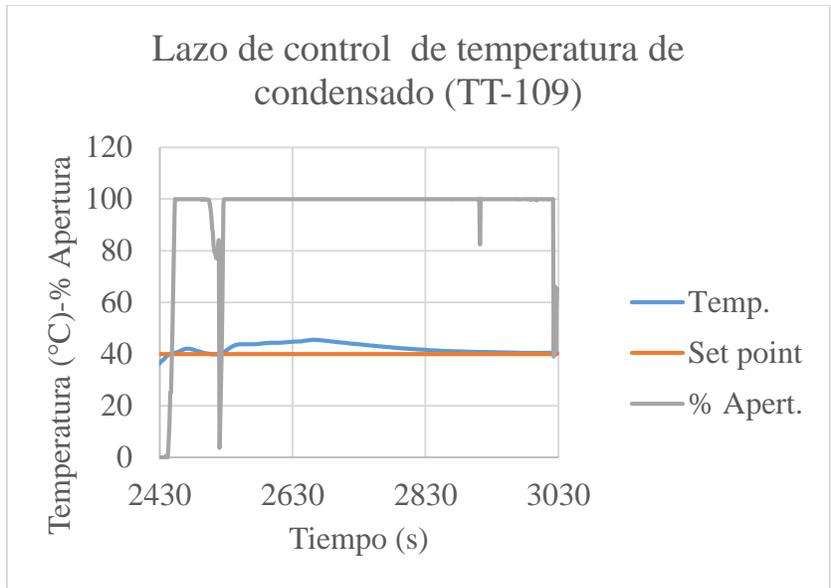


**Figura 7.41.** Lazo de control de temperatura 5 (TT-105) (Ciancone).

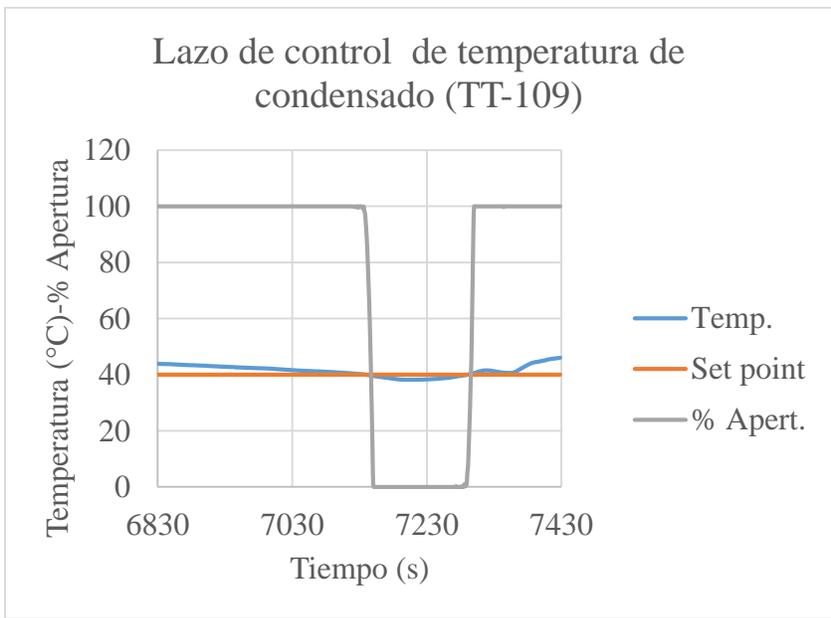
En la figura 7.40 se aprecia que durante los 10 minutos no ocurrió un alto sobrepaso de la variable controlada, comparado con el que se observa en las figuras 7.40 y 7.41, en los cuales la temperatura alcanzo 89°C y 86 °C respectivamente, cabe resaltar que los parámetros de Ziegler-Nichols se evaluaron al inicio del experimento y como se sabe el modo de operación batch es un proceso de tipo no estacionario, por lo cual la cantidad de etanol presente en el vapor que se genera en el rehervidor, disminuye gradualmente a medida que transcurre el tiempo, de tal forma que el vapor se vuelve más rico en el componente más pesado, en este caso el agua, esto da como resultado un incremento en el perfil de temperatura que se desarrolla en la columna, haciendo que su control en el tope requiera de una mayor cantidad de reflujo, como se observa en los parámetros de Ciancone y Cohen -Coon, los cuales se evaluaron después de Ziegler-Nichols.

#### **7.2.4. Operación en batch con reflujo con resistencia.**

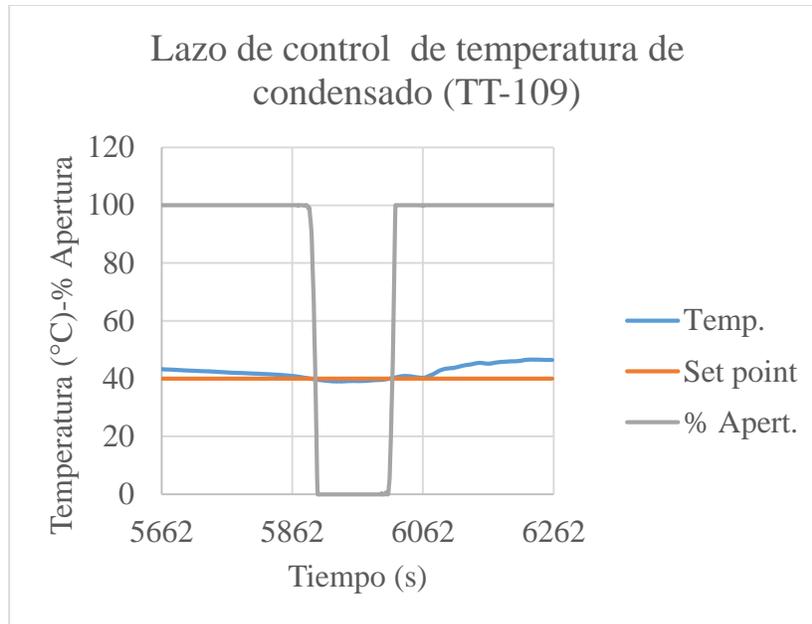
En las figuras 7.42-7.44 se muestra el comportamiento dinámico del lazo de control de la temperatura de la corriente de proceso a la salida del condensador (TT-109).



**Figura 7.42.** Lazo de control de temperatura de condensado (TT-109) (Ziegler-Nichols).



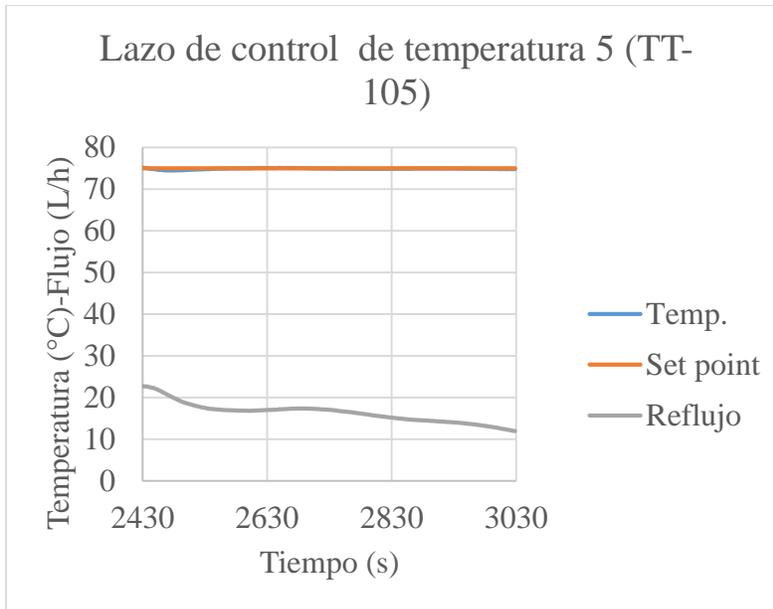
**Figura 7.43.** Lazo de control de temperatura de condensado (TT-109) (Cohen-Coon).



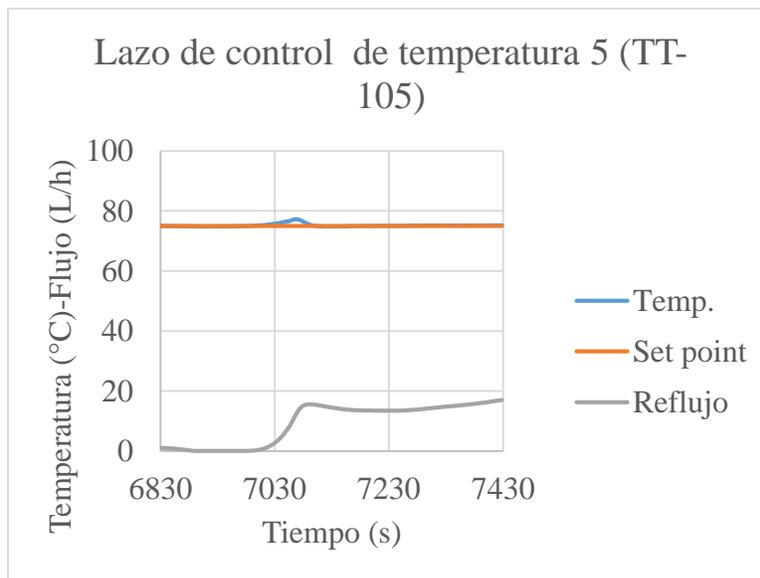
**Figura 7.44.** Lazo de control de temperatura de condensado (TT-109) (Ciancone).

Se observa en las figuras 7.42-7.44 que existe un mayor sobrepaso ( $3^{\circ}\text{C}$ - $6^{\circ}\text{C}$ ) de la variable controlada comparado con el visto en las figuras 7.36-7.38 que corresponden al control de la temperatura del condensado del modo de operación batch con reflujo empleando vapor, sin embargo, esta notable diferencia se debe a que para los modos de operación con resistencia se empleó un arreglo en el condensador de 1 paso por los tubos y 1 paso por la camisa, y para los modos de operación con vapor de 3 pasos por los tubos, lo cual mejora notablemente el control de la temperatura.

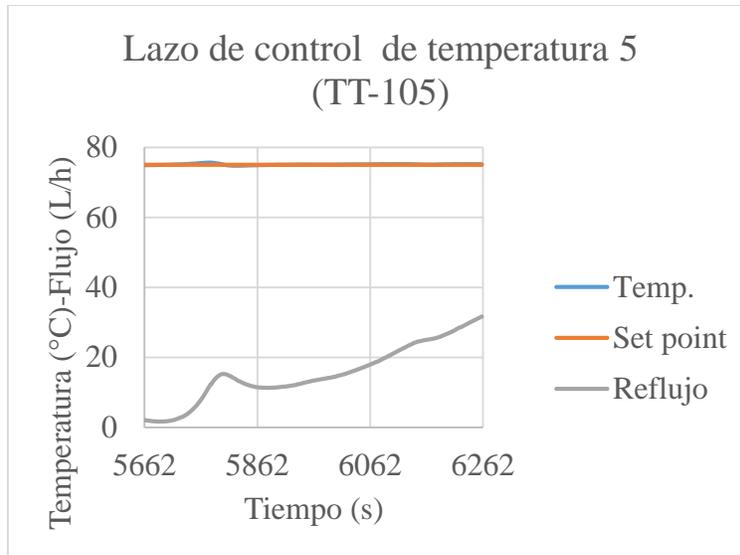
En las figuras 7.45-7.47 se muestra el comportamiento dinámico del lazo de control de la temperatura 5 de la zona empacada (TT-105).



**Figura 7.45.** Lazo de control de temperatura 5 (TT-105) (Ziegler-Nichols).



**Figura 7.46.** Lazo de control de temperatura 5 (TT-105) (Cohen-Coon).



**Figura 7.47.** Lazo de control de temperatura 5 (TT-105) (Ciancone).

Se visualiza en las figuras 7.45-7.47 que al igual que en modo de operación batch con vapor el reflujo, existe un sobrepaso mayor en los parámetros de Ciancone y Cohen-Coon los cuales se evaluaron después de haber transcurrido un tiempo de iniciar la operación, también es evidente que el reflujo tiende a aumentar para poder controlar la temperatura en el set point establecido de 75 °C, al final de la operación la torre empezará a operar a reflujo total, momento en el cual el etanol de la mezcla inicial se ha separado en su gran mayoría por el producto de tope.

Para el modo de operación batch sin reflujo con vapor y resistencia no se evaluó el desempeño, puesto que en dicho modo de operación se observó que al no tener liquido de reflujo retornado a la torre, la temperatura en toda la sección empacada alcanza los 90 °C, temperatura a la cual se evapora todos los componentes de la mezcla (etanol y agua), por lo cual en términos de separación este modo resulta ser completamente ineficiente.

En la tabla 7.2 se muestra el índice de desempeño (IAE) calculado para modo de operación y lazo de control.

Modo de operación	Variable	Variable	IAE
-------------------	----------	----------	-----

	controlada	manipulada	Periodo de evaluación (min)	Ziegler-Nichols	Cohen - Coon	Ciancone (Regulación)
Continuo (vapor)	Temp. Condensado	% apertura VC (VC-102)	10,00	1690,98	491,77	745,50
	Temperatura 1 (TT-105)	% apertura VC (VC-101)	10,00	919,94	4987,35	2139,63
	Temperatura 5 (TT-105)	Reflujo	10,00	371,92	858,13	529,14
	Temperatura alimentación	% Potencia resistencia (R101)	10,00	8577,88	979,38	7615,59
Continuo (Resistencia)	Temp. Condensado	% apertura VC (VC-102)	20,00	1730,90	1424,39	2557,70
	Temperatura 1 (TT-105)	% Potencia resistencia (R102)	20,00	962,79	824,43	1065,95
	Temperatura 5 (TT-105)	Reflujo	20,00	263,01	288,69	304,83
	Temperatura alimentación	% Potencia resistencia (R101)	20,00	8888,78	15405,59	11634,20
Batch con reflujo (vapor)	Temp. Condensado	% apertura VC (VC-102)	10,00	87,56	324,76	220,35
	Temperatura 5 (TT-105)	Reflujo	10,00	109,12	841,96	408,61
Batch con reflujo (Resistencia)	Temp. Condensado	% apertura VC (VC-102)	10,00	1411,79522	1211,67988	1527,10563
	Temperatura 5 (TT-105)	Reflujo	10,00	80,51	162,92	96,28

De manera general en casi todos los modos de operación a excepción del modo de operación continuo con resistencia, se tiene un mejor desempeño en los lazos de control de temperatura de la zona empacada tanto en temperatura 1 como 5 al emplear los parámetros de Ziegler-Nichols, también se observa que el desempeño en lazo de control de la temperatura del condensado es mucho mejor en los modos de operación con vapor en los cuales como ya se explicó se usó un arreglo en el condensador de 3 pasos por los tubos. Finalmente, el lazo de control de temperatura del alimento resulta tener el desempeño más bajo, puesto que el IAE resultante se mucho mayor a comparación de los valores presentados en los otros lazos de control.

Para medir la concentración aproximada de los productos de tope y fondo se empleó un hidrómetro-densímetro para medición de alcohol, la concentración resultante en el producto de tope para los modos de operación continuo fue de (92%-95% V/V de etanol), la cual se midió cada 10 minutos durante la prueba, para el producto de fondo la concentración obtenida fue de (1%-4% V/V). En los modos de operación batch con reflujo con vapor la concentración promedio al finalizar la prueba fue de 94 % V/V de etanol, para el producto descargado del rehervidor se

tuvo una concentración de 2% V/V de etanol. En los modos de operación batch con reflujo con resistencia la concentración promedio al finalizar la prueba fue de 93 % V/V de etanol, para el producto descargado del rehervidor se tuvo una concentración de 4% V/V de etanol. Las concentraciones obtenidas en el producto de destilado se encuentran casi en la máxima concentración determinada por el azeótropo de la mezcla, el cual a la presión de Medellín es de aproximadamente 95,2% V/V de etanol. Es importante resaltar que dicha concentración se logra alcanzar cuando la temperatura en el tope de la zona empacada se controla a 75°C, debido a que el flujo de vapor que sale del tope de la columna sufre una leve caída de temperatura en la tubería que conecta el tope de la columna con el condensador, perdiendo de 1°C a 2°C, como resultado el vapor que llega al condensador se encuentra a 73°C aproximadamente, temperatura a la cual se alcanza la concentración de azeótropo a la presión de Medellín.

Tenido en cuenta que la prioridad en una torre de destilación esta en garantizar la concentración deseada de los productos de tope y fondo se optó por elegir los parámetros estimados mediante el método de Ziegler-Nichols, puesto que se obtuvo un mejor desempeño en el control de temperatura de la zona empacada, lo cual deriva en un buen control de la concentración de los productos.

## **8. Conclusiones.**

El sistema SCADA implementado permitió llevar acabo la adquisición de datos requeridos para el desarrollo de este trabajo, además de garantizar una correcta supervisión y control de todo el sistema durante toda la fase de experimentación, así mismo la visualización de las diferentes variables en el tiempo facilita comprender como es su interacción y el efecto que tienen en la operación de destilación.

Los parámetros de los controladores que presentaron un mejor desempeño en la mayoría de los modos de operación y lazos de control, fueron los estimados por el método de Ziegler-Nichols, presentando los valores de IAE más pequeños.

Con el desarrollo de este trabajo se logró mejorar el funcionamiento de la columna de destilación en cuanto a su eficiencia en la separación de la mezcla agua-etanol, obteniendo en el producto de tope concentraciones en cada modo de operación, muy cercanas al azeótropo de esta mezcla (95,2 % V/V a la presión de Medellín) y en el fondo, un producto que casi en su totalidad contiene agua, esto gracias a los lazos de control de temperatura implementados y que sustituyen el esquema de control que tenía anteriormente el equipo, cuya prioridad de control era el flujo de destilado.

## **9. Anexos y recomendaciones.**

En esta sección se presentan algunas recomendaciones que surgen a partir de la experiencia adquirida de toda la ejecución de este trabajo.

Uno de los inconvenientes que presenta el sistema es la medición del flujo de destilado, el cual es sensado por un medidor de flujo coriolis y cuya medida en algunas ocasiones presenta una oscilación permanente en un rango de (0-50L/h), este hecho dificulta su lectura y puede ser un inconveniente en la adquisición de este dato. Durante la ejecución de este trabajo se instaló una válvula inmediatamente después del sensor que permite regular el flujo del destilado, con la intención de que, al obstruir el paso del fluido, se acumule una carga de líquido en toda la sección de tubería en la cual está instalado el sensor, y de esta forma siempre se tenga fluido pasando a través del sensor, sin embargo, esta medida no resultó efectiva, puesto que se siguió visualizando la presencia de dichas oscilaciones. Posteriormente se percató de que este inconveniente es generado en parte por la bomba dosificadora de diafragma del reflujo, ya que se observó que cuando esta emite un flujo de 10L/h, provoca la generación excesivamente oscilante de esta medida. Esto se puede deber a que este elemento puede estar generando una señal de ruido eléctrico en el sensor coriolis, otra posible causa es que las pulsaciones que la bomba genera, causen una succión del líquido que sale de la tubería en la cual se encuentra el sensor de flujo. Como recomendación para mejorar la medición del flujo de destilado se puede incrementar la longitud de la tubería que se encuentra entre el sensor de flujo y la mirilla de condensado, esto puede contribuir a que la succión que pueda estar causando la bomba, no afecte al líquido que

sale inmediatamente después del sensor, también se puede incrementar el tamaño del ducto de venteo, con el propósito de que la mayor cantidad de fluido succionado provenga de este ducto.

En el presente trabajo se estableció un control de nivel de líquido en el rehervidor para el modo de operación en continuo, sin embargo, este control se realiza con la apertura y cierre de la válvula solenoide ubicada en la tubería de descarga del producto de fondo, abriéndose cuando el líquido acumulado en el rehervidor activa la alarma de nivel alto, y cerrándose inmediatamente se desactiva esta alarma. Debido a que el rehervidor cuenta con un sensor de nivel por presión diferencial, se podría establecer un lazo de control de nivel con dicho sensor, pero en el cual se debería instalar una válvula proporcional actuada que sirva como elemento final de control, esto permitiría que se tenga un flujo de producto de fondo continuo.

El desempeño de los controladores se puede mejorar implementando otros métodos de sintonía, en los cuales los parámetros estimados en el presente trabajo pueden servir como como valores de partida.

## **10. Referencias bibliográficas.**

- [1] K. Kim, "Batch Distillation," pp. 107–150, 2005.
- [2] L. Wkren, M. C. Smith, and P. Harriott, *Wkren L, McCabe -Julian C. Smith - Peter Harriott. .*
- [3] W. L. Luyben and J. P. Shunta, *Desing of distillation column control systems. .*
- [4] H. Z. Kister, "Distillation operation." .
- [5] F. G. Shinskey, *Pocess control systems.* 1979.
- [6] C. A. Smith, *Control automático de procesos teoría y práctica.* 1991.
- [7] K. Ogata, *Ingeniería de control moderna.* 1982.
- [8] T. E. Marlin, *Process Control - Marlin - 2nd Edition.* 1995.
- [9] W. Bolton, *Programmable Logic Controllers.* 2006.
- [10] SIEMENS, "Manual del sistema de automatización S7-200." 2008.
- [11] Rodriguez.Aquilino, *Sistemas SCADA.* 2003.