



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO  
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN CONTROL Y  
AUTOMATISMO

TEMA:

**Evaluación de controladores PID y RST aplicado a sistemas  
de calefacción en plantas de destilación usando Simulink**

AUTOR:

**Yazbek Marich, Leszek Antonio**

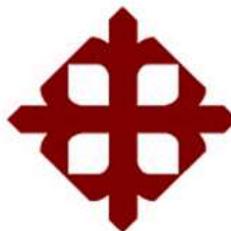
Componente práctico del examen complejo previo a la  
obtención del grado de **INGENIERO ELECTRÓNICO EN  
CONTROL Y AUTOMATISMO**

REVISOR:

M. Sc. Romero Paz, Manuel de Jesús

Guayaquil, Ecuador

10 de marzo del 2022



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO  
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN CONTROL Y  
AUTOMATISMO

**CERTIFICACIÓN**

Certificamos que el presente **componente práctico del examen complejo**, fue realizado en su totalidad por **Yazbek Marich, Leszek Antonio** como requerimiento para la obtención del título de **INGENIERO ELECTRÓNICO EN CONTROL Y AUTOMATISMO**.

REVISOR

M. Sc. Romero Paz, Manuel de Jesús

DIRECTOR DE CARRERA

M. Sc. Héras Sánchez, Miguel Armando

Guayaquil, a los 10 días del mes de marzo del año 2022



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO  
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN CONTROL Y  
AUTOMATISMO

**DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD**

Yo, **Yazbek Marich, Leszek Antonio**

**DECLARÓ QUE:**

El **componente práctico del examen complejo, Evaluación de controladores PID y RST aplicado a sistemas de calefacción en plantas de destilación usando Simulink**, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido.

Guayaquil, a los 10 días del mes de marzo del año 2022

EL AUTOR

---

YAZBEK MARICH, LESZEK ANTONIO



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO  
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN CONTROL Y  
AUTOMATISMO

**AUTORIZACIÓN**

**Yo, Yazbek Marich, Leszek Antonio**

Autorizó a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil a la **publicación** en la biblioteca de la institución del **componente práctico del examen complejo, Evaluación de controladores PID y RST aplicado a sistemas de calefacción en plantas de destilación usando Simulink** cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, a los 10 días del mes de marzo del año 2022

EL AUTOR

---

YAZBEK MARICH, LESZEK ANTONIO

## REPORTE DE URKUND

<b>Documento</b>	Yazbek_Antonio_EC.docx (D131874785)
<b>Presentado</b>	2022-03-28 22:41 (-05:00)
<b>Presentado por</b>	fernandopm23@hotmail.com
<b>Recibido</b>	edwin.palacios.ucsg@anaylsis.orkund.com
<b>Mensaje</b>	Revisión EC Yazbek Marich, Leszek <a href="#">Mostrar el mensaje completo</a> 0% de estas 15 páginas, se componen de texto presente en 0 fuentes.

Categoría	Enlace/nombre de archivo
Fuentes alternativas	
Fuentes no usadas	

Advertencias Reiniciar Competir

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL  
FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO  
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN CONTROL Y  
AUTOMATISMO

TEMA: Evaluación de controladores PID y RST aplicado a  
sistemas de calefacción en plantas de destilación usando  
Simulink

AUTOR: Yazbek Marich, Leszek Antonio

Componente práctico del examen complejo previo a la  
obtención del grado de INGENIERO ELECTRÓNICO EN  
CONTROL Y AUTOMATISMO

REVISOR: M. Sc. Romero Paz, Manuel de Jesús

Guayaquil, Ecuador

10 de marzo del 2022

REVISOR



M. Sc. Romero Paz, Manuel de Jesús

## DEDICATORIA

Esta componente practico está dedicada a:

A mis padres Viviana y Antonio quienes con su amor y esfuerzo me han permitido cumplir un sueño más.

Gracias por inculcar en mí el ejemplo de esfuerzo, de no temer a las adversidades.

También a mis hermanos Sadrac y Jelena por su cariño y apoyo incondicional.

A toda mi familia porque con sus oraciones, consejos y palabras de aliento hicieron de mí una mejor persona.

Finalmente quiero dedicar este componente practico a todos mis amigos, por apoyarme cuando más las necesito, por extender su mano en momentos difíciles.”

EL AUTOR

YAZBEK MARICH, LESZEK ANTONIO

## **AGRADECIMIENTO**

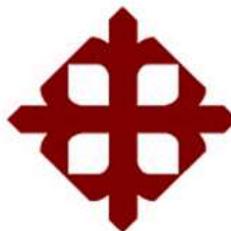
Mi profundo agradecimiento a todas las autoridades y personal que hacen la Universidad Católica Santiago de Guayaquil, por confiar en mí y permitirme realizar todo el proceso investigativo.

De igual manera, mis agradecimientos a toda la Facultad de Técnica para el Desarrollo, a mis profesores quienes con la enseñanza de sus valiosos conocimientos hicieron que pueda crecer día a día como profesional.

Gracias a cada uno de ustedes por su paciencia, dedicación, apoyo incondicional y amistad.

EL AUTOR

YAZBEK MARICH, LESZEK ANTONIO



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO  
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN CONTROL Y  
AUTOMATISMO

**TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN**

f.

**M. Sc. ROMERO PAZ, MANUEL DE JESUS**

DECANO

f.

**M. Sc. VALLEJO SAMANIEGO, LUIS VICENTE**

COORDINADOR DEL ÁREA

f.

**M. Sc. PALACIOS MELÉNDEZ, EDWIN FERNANDO**

OPONENTE

## Índice General

Índice de Figuras .....	xi
Índice de Tablas.....	xiii
Resumen .....	xiv
Capítulo 1: Descripción del componente práctico .....	2
1.1.  Introducción.....	2
1.2.  Definición del problema. ....	3
1.3.  Objetivo General. ....	3
1.4.  Objetivos Específicos. ....	3
Capítulo 2: Fundamentación teórica. ....	4
2.1.  Introducción de los sistemas de control PID.....	4
2.2.  Controladores PID.....	4
2.3.  Ventajas y desventajas de los controladores. ....	7
2.3.1.  Ventajas e inconvenientes de la acción proporcional. ....	7
2.3.2.  Ventajas e inconvenientes de la acción integral. ....	7
2.3.3.  Ventajas e inconvenientes de la acción derivativa.....	8
2.4.  Criterio de ajuste de Ziegler-Nichols: .....	8
2.5.  Criterios de estabilidad. ....	10
2.5.1.  Declaración del criterio de estabilidad de Routh.....	10
2.5.2.  Declaración del criterio de estabilidad de Jury. ....	11
2.6.  Procesos de destilación térmica (cambio de fase) .....	12
2.6.1.  Destilación instantánea multietapa (MSFD).....	12
2.6.2.  Destilación de efecto múltiple (MED).....	14
2.6.3.  Destilación por compresión de vapor (VCD).....	15
Capítulo 3: Diseño, Simulación y Resultados obtenidos.....	17
3.1.  Descripción general del sistema de calefacción usando evaporador de agua. ....	17

3.2. Modelado de la identificación del sistema de calefacción en planta de destilación. ....	18
3.3. Control del sistema digital. ....	19
3.4. Criterio de estabilidad de Jury para rendimiento del sistema. ....	20
3.5. Control del sistema mediante controlador RST. ....	24
3.6. Análisis comparativo de la simulación del controlador PID analógico, digital y RST. ....	26
Conclusiones .....	30
Recomendaciones. ....	31
Bibliografía. ....	32

## Índice de Figuras

### Capítulo 2:

Figura 2. 1: Diagrama de bloques del sistema de control PID. ....	5
Figura 2. 2: Principio del proceso de destilación instantánea multietapa (MSFD). ....	13
Figura 2. 3: Esquema de un proceso de destilación de efecto múltiple (MED). .....	14
Figura 2. 4: Esquema de un proceso típico de destilación por compresión de vapor. ....	16

### Capítulo 3:

Figura 3. 1: Esquema de automatización de un sistema de destilación. ....	17
Figura 3. 2: Respuesta al escalón del sistema de calefacción. ....	18
Figura 3. 3: Respuesta al impulso de la función de transferencia $Fp$ para $T_e=2.5$ s. ....	19
Figura 3. 4: Respuesta al impulso de la función de transferencia $Fp$ para $T_e=2$ s. ....	20
Figura 3. 5: Respuesta al impulso de la función de transferencia $Fp$ para $T_e=1$ s. ....	20
Figura 3. 6: Diagrama de Nyquist del sistema digital no corregido. ....	21
Figura 3. 7: Diagrama Black-Nichols del sistema digital no corregido. ....	22
Figura 3. 8: Diagrama de Nyquist del sistema digital corregido. ....	23
Figura 3. 9: Esquema funcional del controlador de corrección clásico. ....	24
Figura 3. 10: Diagrama de bloques por analogía para $R = T$ . ....	25
Figura 3. 11: Diagrama de bloques por analogía para $R \neq T$ . ....	25
Figura 3. 12: Diagrama de bloques del sistema RST. ....	25
Figura 3. 13: Diagrama de bloques para los controladores PID analógico y digital para el sistema de destilación. ....	27
Figura 3. 14: Gráfica comparativa entre los controladores PID analógico y digital del sistema de destilación. ....	27

Figura 3. 15: Diagrama de bloques para los controladores PID analógico y RST del sistema de destilación.....	27
Figura 3. 16: Gráfica comparativa entre los controladores PID analógico y RST del sistema de destilación.....	28
Figura 3. 17: Diagrama de bloques para los controladores PID digital y RST del sistema de destilación.....	28
Figura 3. 18: Gráfica comparativa entre los controladores PID digital y RST del sistema de destilación.....	28

## Índice de Tablas

### Capítulo 2:

Tabla 2. 1: Método "clásico" Ziegler-Nichols.....	9
Tabla 2. 2: Segundo método Ziegler-Nichols.....	9
Tabla 2. 3: Método de ajuste Ziegler-Nichols.....	10
Tabla 2. 4: Criterio de estabilidad de Routh.....	10

## Resumen

Durante los últimos años, el requerimiento de modelar sistemas de orden superior, así como la complejidad de estos sistemas, han llevado a los investigadores a la reducción del orden de estos, tanto para facilitar su estudio y análisis, sino también a la búsqueda de aproximaciones adecuadas a los sistemas de alto orden adecuado que mantenga las mismas características. Por lo tanto, el presente documento se desarrolla el componente práctico del examen complejo denominado “Evaluación de controladores PID y RST aplicado a sistemas de calefacción en plantas de destilación usando Simulink”. Para controlar el proceso de destilación se adopta un controlador PID utilizando el segundo método de Ziegler y Nichols, y se compara por un regulador RST, que se caracteriza por dos grados de libertad de control (uno para la entrada y otro para la entrada y el otro para la salida), por lo que es robusto frente a las perturbaciones.

**Palabras claves:** CONTROLADOR, PID, RST, PROCESOS, DESTILACIÓN, SIMULACIÓN

## Capítulo 1: Descripción del componente práctico

### 1.1. Introducción.

Las industrias que se dedican a los procesos son de naturaleza dinámica. Las plantas industriales no suelen funcionar en estado estable. Las perturbaciones de la línea de suministro y del entorno, las vibraciones de los equipos, los cambios en las condiciones ambientales, el desgaste de los intercambiadores de calor y la degradación del rendimiento de los equipos afectan al buen funcionamiento del proceso. (Ramli, 2018)

Las columnas de destilación son una de las partes más importantes del proceso de separación en las industrias químicas y petroquímicas. En un proceso típico, un sistema de columna de destilación se utiliza para la separación y la purificación de mezclas que contienen dos o más componentes. El control del proceso de la columna de destilación presenta algunas dificultades debido a sus características altamente no lineales, a su estructura de múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO) y a la presencia de perturbaciones durante su funcionamiento. (Haji H. & Monje, 2019)

Un controlador proporcional-integral-derivativo (PID) es un mecanismo de retroalimentación del bucle de control general (controlador) muy utilizado en la industria encargada de procesos de destilación. Un controlador PID intenta corregir el error entre un punto de consigna deseado y una variable de proceso de medición y luego una acción correctiva que puede ajustar el proceso en consecuencia para mantener el error mínimo. (Jones & Hengue, 2009)

MatLab/Simulink es un potente programa de simulación que proporciona un entorno para la exploración del comportamiento del modelo dinámico de sistemas eléctricos, mecánico, termodinámico, entre otros. Este software permite la determinación y el ajuste adecuado de los parámetros de interacción y las propiedades físicas, así como diseños alternativos para los sistemas de destilación.

## **1.2. Definición del problema.**

Evaluación de controladores PID y RST aplicado a sistemas de calefacción en plantas de destilación usando Simulink

## **1.3. Objetivo General.**

Realizar la evaluación de los controladores PID y RST aplicado a sistemas de calefacción en plantas de destilación usando Simulink.

## **1.4. Objetivos Específicos.**

- a. Describir los fundamentos teóricos de los sistemas controladores y procesos de destilación industrial.
- b. Diseñar el modelo de identificación de un sistema de calefacción de una planta de destilación.
- c. Evaluar los resultados obtenidos del sistema de calefacción mediante los controladores PID y RST.

## Capítulo 2: Fundamentación teórica.

### 2.1. Introducción de los sistemas de control PID.

El control PID se inventó en 1910, y durante las últimas diez décadas se han propuesto numerosos métodos de diseño de controladores PID. Los métodos de Ziegler Nichols y Cohen-Coon son dos métodos básicos que se basan en la experiencia de la sintonización manual. Estos dos métodos se emplean principalmente para los procesos que tienen grandes retardos de tiempo, por ejemplo, los procesos químicos. Además, estos dos métodos proporcionan una relación de amortiguación insatisfactoria y los criterios de estabilidad no están claramente descritos.

El controlador PID es inevitable en la mayoría de las aplicaciones de control debido a su universalidad y simplicidad. En el diseño del controlador PID se utilizan las reglas de sintonización. El método de sintonía Ziegler-Nichols (Z-N) es bien conocido y ampliamente utilizado en la formación de ingenieros en sistemas de control. Su perfeccionamiento se realizó para suprimir el exceso de sobreimpulso en la respuesta del punto de consigna o referencia.

Posteriormente, la modificación del método Z-N que aporta un rendimiento más robusto. El método de sintonización Z-N es adaptado por Cohen y Coon (C-C) para optimizar el lazo de control PID con respecto al rechazo de perturbaciones resultando con una tasa de decaimiento de un cuarto. La tasa de decaimiento de un cuarto se considera como la regla general que proviene del método de sintonización Z-N. Las cantidades clave en el diseño del controlador son la ganancia y frecuencia final. (Fišer & Zítek, 2019)

### 2.2. Controladores PID.

El controlador PID en la actualidad es, sin duda, el control más utilizado. El sistema de control PID se muestra en la figura 2.1 donde  $r(s)$ ,  $y(s)$  y  $d(s)$  son la entrada de referencia, la salida y la perturbación respectivamente,  $G_p(s)$  denota la planta. Se divide en tres términos, proporcional (P), integral (I) y

derivativo (D), que se basan en el error presente, pasado y futuro respectivamente. El término proporcional es proporcional al valor actual del error y proporciona una acción de control general. Sin embargo, el uso del término proporcional por sí solo conducirá a un error de estado estacionario entre la señal de salida y el punto de consigna. Para eliminar el error de estado estacionario, se emplea el término integral.

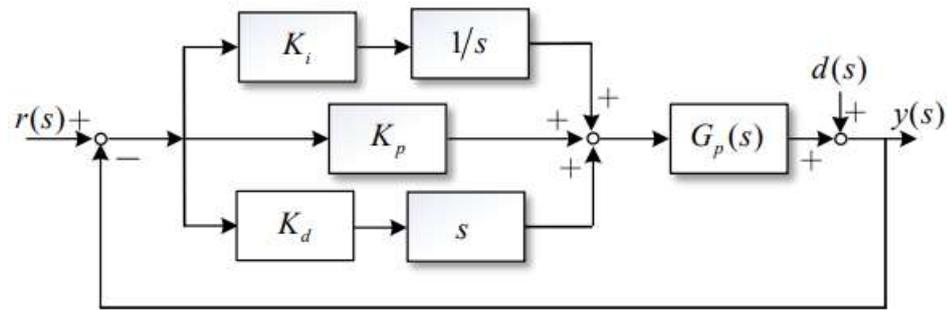


Figura 2. 1: Diagrama de bloques del sistema de control PID.  
Fuente: (Ellis, 2012)

El término integral integra los valores pasados del error en el tiempo para producir la señal de control. Si el error existe, el término integral seguirá funcionando debido al valor histórico acumulado del error. El término integral dejará de crecer si se elimina el error. De modo que el término integral asegura el seguimiento del error en estado estacionario cero o la eliminación de la señal de DC. El término integral aporta un gran retardo al sistema debido a las integraciones. Para compensar el retardo se emplea el término derivativo debido al adelanto de fase de  $90^\circ$ .

Además, el término derivativo estima la tendencia futura del error calculando la tasa de cambio del error. Es lo que se denomina "control anticipado". El término de la derivada reducirá el efecto de control si el error cambia suavemente. El efecto de control será mayor si el error cambia rápidamente.

Aparte de los métodos Z-N y C-C, se han propuesto algunos métodos de diseño de PID basados en modelos. Tales como el método de colocación de polos, el método de colocación de polos dominantes, el método de Haalman, los métodos de diseño basados en la ganancia y el margen de fase.

El método de colocación de polos permite a los diseñadores colocar los polos del sistema de bucle cerrado en las ubicaciones deseadas mediante la adición de un controlador, de modo que la dinámica del sistema sea la deseada. Sin embargo, la colocación arbitraria de los polos es difícil de lograr si la planta es de alto orden y el controlador es de bajo orden. Para superar este problema, se propone la colocación de polos dominantes.

La idea detrás del método de colocación de polos dominantes es poner dos polos de lazo cerrado en la región dominante, y los otros polos están fuera de la región. En este sentido, es necesario proponer un método convencional de colocación de polos dominantes. Se basa en el modelo simplificado de las plantas. Sin embargo, no se puede garantizar la dominancia de los polos elegidos. Además, este método conducirá a inestabilidad del sistema de lazo cerrado si no se maneja bien. Por todo ello, el método de colocación de polos es complicado o incluso no está disponible para el sistema de alto orden.

El método de Haalman puede considerarse como un método de cancelación de polos y ceros. Proporciona un controlador que es capaz de cancelar los polos y ceros del proceso para lograr el rendimiento y la dinámica deseados. El inconveniente del método de Haalman es que todos los polos y ceros del proceso se cancelan, lo que puede causar la pérdida de controlabilidad del controlador, lo que significa que el controlador no será capaz de reducir el error. Se sabe del control clásico que el margen de fase está relacionado con el amortiguamiento del sistema, el margen de ganancia y el margen de fase pueden considerarse como una medida de rendimiento.

El método basado en el margen de ganancia y de fase proporciona un controlador para satisfacer los criterios de margen de ganancia y margen de fase de un sistema de bucle cerrado de un sistema de lazo cerrado. Sin embargo, es complicado expresar los márgenes de ganancia y de fase del sistema. A la luz de lo anterior, el criterio de estabilidad y el método de ajuste del controlador PID convencional están asociados a tres ganancias de control, que son complicadas y difíciles de obtener.

### **2.3. Ventajas y desventajas de los controladores.**

#### **2.3.1. Ventajas e inconvenientes de la acción proporcional.**

Se observa que el controlador P proporciona una transmisión instantánea de la señal de error; en este sentido, su acción es relativamente dinámica: su control no depende del pasado, ni de una tendencia, sino simplemente de lo que está ocurriendo en el momento presente.

Una limitación del controlador P es su incapacidad para cancelar el error estático (con respecto a una consigna constante o a una perturbación constante). En efecto, si la señal de control  $u(t)$  que se aplica al sistema debe ser distinta de cero para que éste recupere o mantenga su estado de equilibrio, es necesario al mismo tiempo que el error sea distinto de cero ya que:

$$\begin{aligned}u(t) &\neq 0 \\K_p \varepsilon(t) &\neq 0 \\ \varepsilon(t) &\neq 0\end{aligned}$$

Sin embargo, la acción proporcional suele ser suficiente para controlar varios sistemas en la industria. Es sencillo de aplicar (amplificador simple), de ahí su gran ventaja. La acción integral se utiliza normalmente la industria siempre que sea necesario, por razones tecnológicas, para tener una precisión perfecta, por ejemplo, para el control de la presión o la temperatura en un reactor nuclear. Además, hay que tener en cuenta que la acción integral es un filtro, por lo que es interesante utilizarla para la regulación de parámetros muy dinámicos como la presión.

#### **2.3.2. Ventajas e inconvenientes de la acción integral.**

El controlador de acción integral complementa la del controlador de acción proporcional. Este tipo de acción integral permite eliminar el error residual en estado estacionario. Para que el sistema sea más dinámico (reducir el tiempo de respuesta), se reduce la acción integral. Sin embargo, lamentablemente se introduce un desplazamiento de fase de  $-90^\circ$  y corre el riesgo de que el sistema sea inestable (reducción del margen de fase).

El coeficiente  $1/T_i$  actúa como una ganancia y su valor afecta al comportamiento del lazo de control. En la industria, la acción I se utiliza cuando se requiere una precisión perfecta por razones tecnológicas. Por ejemplo, la regulación de la presión o la temperatura en un reactor nuclear.

### **2.3.3. Ventajas e inconvenientes de la acción derivativa.**

Al compensar la inercia debida al tiempo muerto, la acción derivativa acelera la respuesta del sistema y mejora la estabilidad del bucle. En la práctica, la acción derivativa se aplica sólo a las variaciones de la variable a controlar y no a la desviación de la consigna para evitar tirones por una variación brusca de la consigna.

En la industria, la acción D nunca se utiliza sola, sino siempre asociada a otras acciones. Se recomienda su uso para el ajuste de parámetros lentos como la temperatura. Por otro lado, en presencia de parámetros ruidosos, la acción derivativa no es recomendable. En efecto, una señal ruidosa asimilada a una función sinusoidal que tenga, por ejemplo, la frecuencia de la red (50 Hz) se amplificará al derivarla.

### **2.4. Criterio de ajuste de Ziegler-Nichols:**

Es un criterio de ajuste muy fácil de aplicar y que da buenos resultados. Sólo se puede utilizar para ajustar un controlador PI, PD o PID. Este método se utiliza para el control de sistemas de primer orden con retardo. Este criterio se basa en el conocimiento de la ganancia, el tiempo y el retardo del proceso a controlar. Se considera un sistema de primer orden con función de transferencia:

$$F(p) = \frac{K}{1 + \tau p} e^{-\theta p}$$

Donde,

$K$ , es la ganancia del sistema

$t$ , es la constante de tiempo del sistema

$\theta$ , es el retardo del sistema

Método Ziegler-Nichols "clásico", este método puede resumirse en la tabla 2.1.

Tabla 2. 1: Método "clásico" Ziegler-Nichols.

	$K_p$	$T_i$	$T_d$
Controlador P	$\frac{\tau}{\theta K}$	0	0
Controlador PI	$\frac{0.6\tau}{\theta K}$	$3\theta$	0
Controlador PID	$\frac{0.8\tau}{\theta K}$	$2\theta$	$0.4\theta$

Fuente: (Ellis, 2012)

En la tabla 2.2 se muestra el resumen de los valores para el segundo método de Ziegler-Nichols

Tabla 2. 2: Segundo método Ziegler-Nichols.

	$K_p$	$T_i$	$T_d$
Controlador P	$\frac{\tau}{\theta K}$	0	0
Controlador PI	$\frac{0.6\tau}{\theta K}$	$1.5\tau$	0
Controlador PID	$\frac{0.8\tau}{\theta K}$	$\tau$	$0.4\theta$

Fuente: (Ellis, 2012)

Ahora, se describe el método basado en el conocimiento de la ganancia y el periodo crítico. Este método consiste en regular el sistema con un controlador proporcional y variar su ganancia hasta que aparezcan las oscilaciones. Este valor de ganancia es el más bajo que provoca la inestabilidad del sistema, que se denomina ganancia crítica  $K_c$ . El periodo de oscilaciones correspondiente a este valor de ganancia se denomina periodo crítico y se denota  $T_c$ . Este método puede resumirse en la tabla 2.3.

Tabla 2. 3: Método de ajuste Ziegler-Nichols.

	$K_p$	$T_i$	$T_d$
Controlador P	$\frac{K_c}{2}$	0	0
Controlador PI	$\frac{K_c}{2.2}$	$0.8T_c$	0
Controlador PID	$\frac{K_c}{1.6}$	$0.5T_c$	$0.1T_c$

Fuente: (Ellis, 2012; Tseng et al., 2021)

## 2.5. Criterios de estabilidad.

### 2.5.1. Declaración del criterio de estabilidad de Routh.

El sistema es estable si se cumplen las dos condiciones siguientes.

- Condición 1: "Todos los coeficientes  $a_i$  de la ecuación característica debe ser positivo". Si se cumple esta condición necesaria, se construye la tabla de Routh (véase la tabla 2.4).

Tabla 2. 4: Criterio de estabilidad de Routh.

	Columna 1	Columna 2	Columna 3
Crear	$a_n$	$a_{n-2}$	$a_{n-4}$
	$a_{n-1}$	$a_{n-3}$	$a_{n-5}$
Determinar	$A_1$	$A_2$	$A_3$
	$B_1$	$B_2$	$B_3$
	$C_1$	$C_2$	$C_3$

Fuente: (Ellis, 2012; Tseng et al., 2021)

Cuyos valores de las constantes A, B y C:

$$A_1 = \frac{a_{n-1}a_{n-2} - a_n a_{n-3}}{a_{n-1}}; \quad A_2 = \frac{a_{n-1}a_{n-4} - a_n a_{n-5}}{a_{n-1}}$$

$$B_1 = \frac{A_1 a_{n-3} - A_2 a_{n-1}}{A_1}; \quad B_2 = \frac{A_1 a_{n-5} - A_3 a_{n-1}}{A_2}$$

$$C_1 = \frac{B_1 A_2 - A_1 B_2}{B_1}; \quad C_2 = \frac{B_1 A_3 - A_1 B_3}{B_2}$$

- b. Condición 2: es necesario y suficiente que todos los coeficientes de la primera columna sean positivos.

### 2.5.2. Declaración del criterio de estabilidad de Jury.

Esta condición se denomina la declaración del criterio de Jury. Es decir, que es un criterio algebraico. Sea la función de transferencia del sistema:

$$FTBA(z) = H(z) = \frac{Num(z)}{Den(z)} = \frac{N(z)}{D(z)}$$

Esto da la ecuación característica:  $1 + FTBA(z) = 0$

$$1 + FTBA(z) = 1 + \frac{N(z)}{D(z)}$$

Con  $N(z)$  y  $D(z)$  son polinomios, tal que,

$$D(z) + N(z) = 0$$

$$a_0 + a_1z + a_2z^2 + \dots + a_nz^n = 0$$

Para el sistema físico, cualesquiera que sean los coeficientes  $a_0 + a_1 + a_2 + \dots + a_n$  son reales con  $a_n > 0$

Un sistema de lazo cerrado es estable si se cumplen las siguientes  $n+1$  condiciones sobre los coeficientes de su ecuación característica:

- Condición 1:

$$\sum_{i=0}^n a_i > 0$$

- Condición 2:

$$(-1)^n \sum_{i=0}^n (-1)^i a_i > 0$$

- Condición 3:

$$|a_0| < a_n$$

- Condición 4:

$$|a_0^i| - |a_{n-1}^i| > 0$$

## **2.6. Procesos de destilación térmica (cambio de fase)**

El agua tiene la capacidad de ser separada de otras moléculas indeseables utilizando energía térmica debido a que tiene una temperatura de evaporación o saturación relativamente baja. Una vez evaporada de la solución, el vapor de agua puede ser condensado y recapturado para su posterior procesamiento. Existen tres tecnologías principales en la categoría de destilación térmica que se utilizan actualmente: la destilación instantánea multietapa (MSFD), la destilación de efecto múltiple (MED) y la compresión de vapor (VC). Como es un proceso que requiere mucha energía, las destilaciones térmicas se incorporan más a menudo en lugares donde la energía es abundante y barata.

### **2.6.1. Destilación instantánea multietapa (MSFD).**

La MSFD utiliza la energía térmica para evaporar el agua que luego puede condensarse y capturarse mediante una alimentación de agua (normalmente agua de mar) como refrigerante. Se incorporan múltiples etapas que pueden utilizar el agua de alimentación "precalentada" de la etapa anterior como entrada, reduciendo así la energía necesaria para llevar el agua por encima de la temperatura de saturación en cada etapa sucesiva.

Debido a la simplicidad del proceso, la MFSD es la tecnología de destilación más utilizada en términos de capacidad. Sin embargo, debido a la pérdida de energía durante el proceso de condensación, la MFSD es el proceso de desalinización a gran escala menos eficiente que se utiliza actualmente, tal como se muestra en la figura 2.2. El proceso térmico consiste en la separación de la sal y el agua dulce mediante la evaporación del agua de la solución y la recogida del destilado utilizando energía térmica.

El principal proceso térmico utilizado en las plantas de desalinización a gran escala es MSFD. Este proceso implica el calentamiento del agua de mar en un contenedor conocido como calentador de salmuera (véase figura 2.2). El agua calentada pasa a otro recipiente conocido como "etapa", donde la presión circundante es inferior a la del calentador de salmuera.

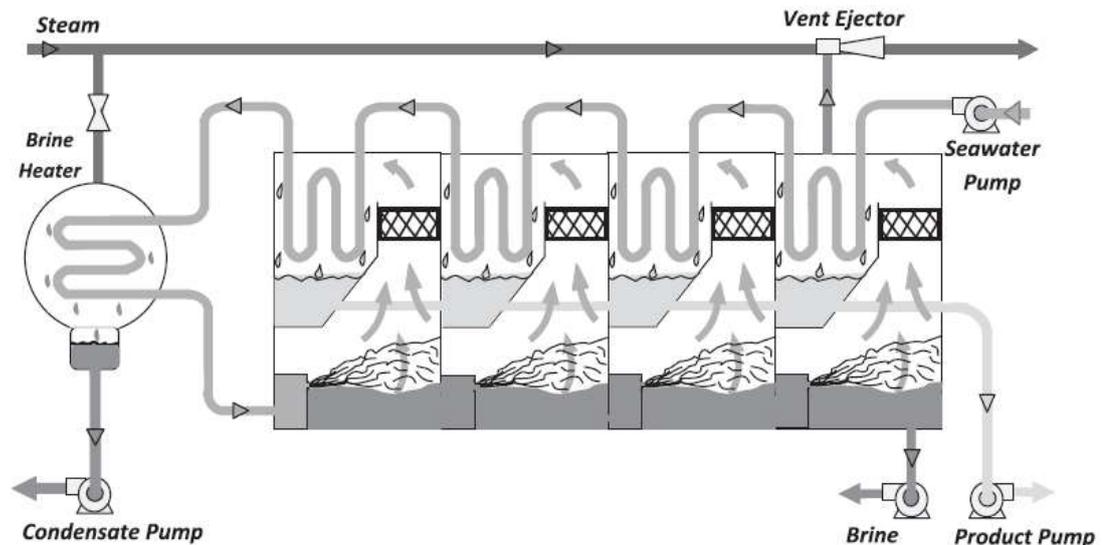


Figura 2. 2: Principio del proceso de destilación instantánea multietapa (MSFD).  
Fuente: (Hamdan et al., 2008)

La introducción repentina del agua calentada en una "etapa" de menor presión hace que hierva tan rápidamente que se convierta en vapor. Sólo un pequeño porcentaje de esta agua se convierte en vapor. En consecuencia, el agua restante se enviará a través de una serie de etapas adicionales, cada una de las cuales posee una presión ambiental más baja que la "etapa" anterior. A medida que se genera vapor, éste se condensa en los tubos de los intercambiadores de calor que recorren cada etapa y que llevan el agua de mar al calentador de salmuera.

Las principales ventajas de MSFD son las siguientes:

1. Fácil de manejar;
2. Genera agua de alta calidad;
3. Los costes marginales descienden significativamente a mayores capacidades;
4. Puede ser semi-operativa durante los periodos de limpieza o sustitución de periodos de limpieza o sustitución del equipo, limitando así el tiempo de inactividad;
5. Pocos requisitos de pretratamiento;
6. No genera residuos por el retrolavado de los filtros de pretratamiento.

Las principales desventajas de la MSFD son las siguientes:

1. Alto consumo de energía en comparación con la ósmosis inversa;
2. Genera una gran cantidad de contaminación atmosférica (principalmente por el alto consumo de energía);
3. Respuesta lenta a las fluctuaciones de la demanda de agua;
4. Alta tasa de incrustación en los tubos.

### 2.6.2. Destilación de efecto múltiple (MED).

Al igual que en el proceso MSFD, en el proceso MED se utiliza energía térmica para evaporar el agua de la solución de alimentación. Sin embargo, en lugar de introducir grandes cantidades de energía térmica en la solución, ésta se lleva a una temperatura inferior a la de saturación y la presión ambiental de la cámara de destilación se reduce por debajo de la presión de saturación para esa temperatura. Esta combinación de energía térmica y reducción de la presión es capaz de evaporar la solución de alimentación con un poco menos de energía total requerida en comparación con la MSFD. De nuevo se incorporan múltiples etapas para "reciclar" las soluciones ya calentadas, tal como se muestra en la figura 2.3.

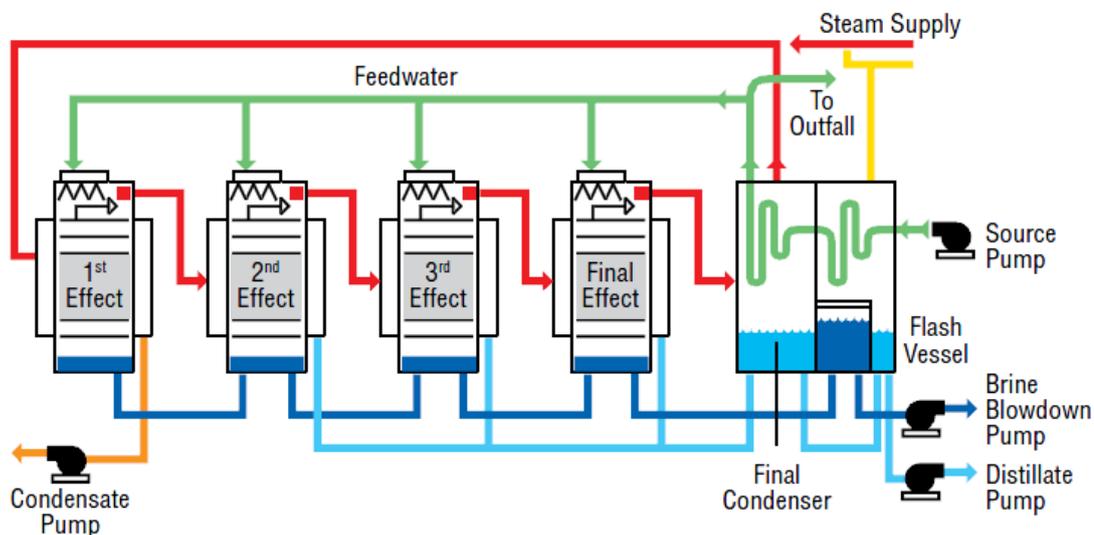


Figura 2. 3: Esquema de un proceso de destilación de efecto múltiple (MED).

Fuente: (Ullah et al., 2013)

La destilación de efecto múltiple (MED), como se muestra en la figura 2.3, es el proceso térmico de baja temperatura para obtener agua dulce mediante la recuperación del vapor de agua de mar hirviendo en una

secuencia de recipientes, (llamados efectos) cada uno mantenido a una temperatura más baja que el anterior.

Las principales ventajas de MED son las siguientes

1. Amplia selección de agua de alimentación;
2. Alta calidad del agua de producto con gran fiabilidad;
3. Menor consumo de energía que el MSF;
4. Requiere un funcionamiento a menor temperatura (reduce las incrustaciones y los costes de energía).

Las principales desventajas de MED son las siguientes

1. Mayores requisitos energéticos que la OI;
2. Respuesta lenta a las fluctuaciones de la demanda de agua;
3. Capacidad inferior a la de las MSF.

### **2.6.3. Destilación por compresión de vapor (VCD)**

En la destilación por compresión de vapor, la fuente de calor se utiliza para generar el vapor a partir del agua de mar y, a continuación, el vapor se comprime mediante un compresor. La temperatura y la presión del vapor aumentan como resultado de la compresión. El trabajo realizado en el compresor se transforma en calor. El agua de mar entrante se utiliza para enfriar el vapor comprimido, que luego se condensa en agua dulce destilada y, al mismo tiempo, el agua de mar se calienta aún más produciendo más vapor.

La VCD también puede utilizarse en combinación con MED o por sí sola. Las unidades de compresión de vapor se construyen en diferentes configuraciones. Como resultado, el compresor mecánico se utiliza para producir calor para la evaporación. Los compresores de vapor suelen ser de pequeña capacidad y se utilizan principalmente en hoteles, centros turísticos y en aplicaciones industriales. La figura 2.4 muestra la desalinización por compresión en fase de vapor. En la VCD, el calor latente rechazado durante el proceso de condensación es capturado y reintroducido en la solución de alimentación entrante para maximizar la eficiencia de los sistemas. Se utiliza



## Capítulo 3: Diseño, Simulación y Resultados obtenidos.

### 3.1. Descripción general del sistema de calefacción usando evaporador de agua.

En el estudio anterior se ha visto que la destilación por vapor es más rentable si se puede controlar la temperatura del vapor. Por ello, interesa diseñar un sistema de calefacción con control de temperatura que conste de un evaporador de agua. La figura 3.1 muestra el esquema de un sistema de automatización de destilación.

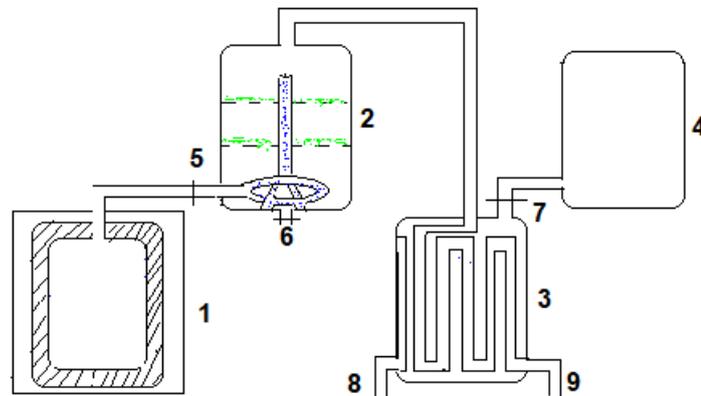


Figura 3. 1: Esquema de automatización de un sistema de destilación.  
Elaborado por: Autor.

A continuación, se describen cada uno de los procesos del sistema de destilación:

1: sistema de calefacción: todo el proceso de destilación al vapor se controla en este nivel

2: destilación al vapor: es la instalación de destilación al vapor

3: refrigerador natural: consiste en un serpentín por cuyo interior circulan los productos volátiles a licuar

4: depósito de agua fría

5: suministro de vapor a la temperatura establecida

6: drenaje: la válvula se abre cuando hay un exceso de residuos en la destilación

7: válvula de salida de agua fría

8: salida de agua

9: salida de combustible

### 3.2. Modelado de la identificación del sistema de calefacción en planta de destilación.

Para identificar el proceso de calentamiento, se ha procedido a trabajar en un sistema de control de bucle abierto. La forma ideal de controlar el calentamiento en las plantas de destilación por fases es fijar el caudal de vapor o fijar la caída de presión. Lamentablemente, este tipo de control no puede aplicarse a nuestro sistema, ya que no se dispone de un caudalímetro de vapor ni de un sensor de presión diferencial.

En este caso hay que elegir entre la presión y la temperatura del vapor como valor a controlar. Para el estudio se ha elegido el control de la temperatura del vapor. Tomando como punto de partida el resultado relativo a la respuesta escalonada de un sistema de calefacción BO representado en la figura 3.2.

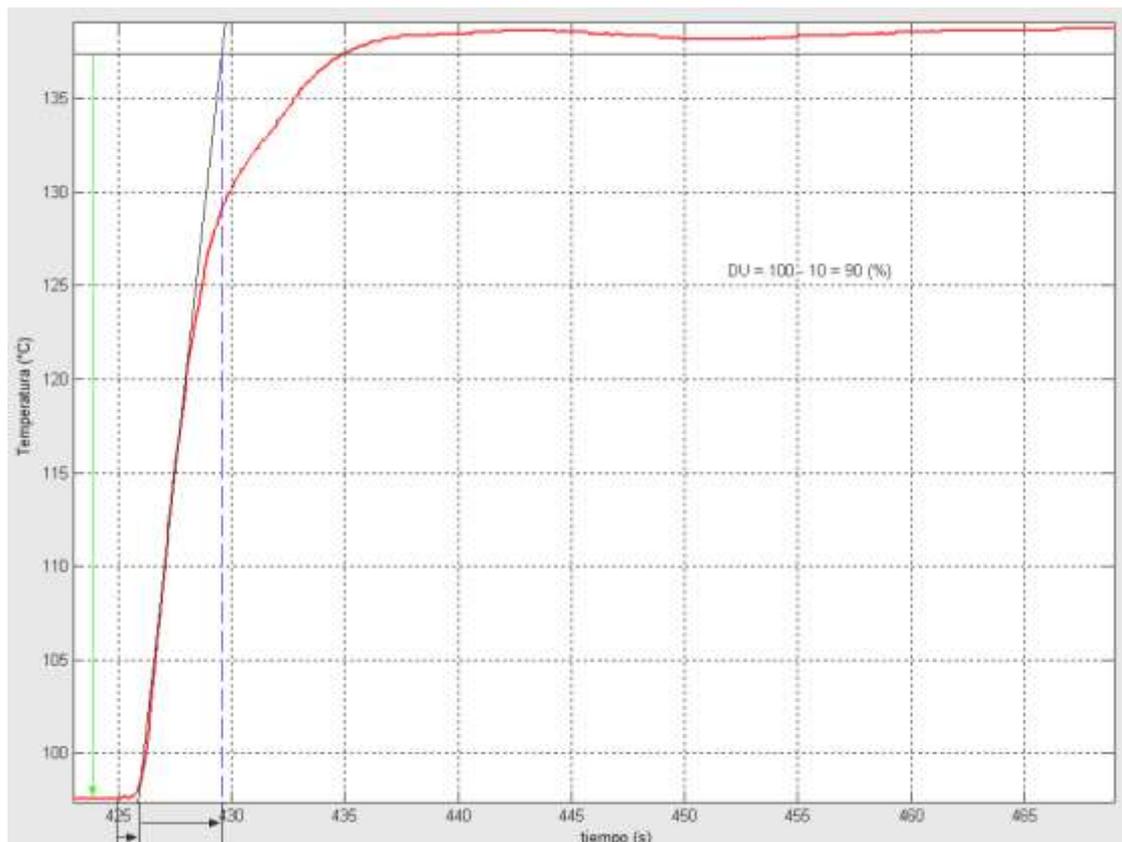


Figura 3. 2: Respuesta al escalón del sistema de calefacción.  
Elaborado por: Autor.

Donde el valor de la presión máxima del vapor es de 3 bar que es el valor límite de la compresibilidad de la cota, se observa que se tiene un sistema que

se estabiliza a un valor de unos 139 °C y que el tiempo de respuesta es de unos 10 s. Utilizando el modelo de función de transferencia para la figura 3.2, se encuentra que,

$$\frac{T_g}{T_u} = \frac{4}{1} = 4$$

Según el criterio de adaptabilidad, un controlador PI será más que suficiente.

$$K = \frac{\Delta y}{\Delta u} = \frac{40}{14.4} = 2.75$$

Por lo tanto, la función de transferencia del sistema de calefacción es:

$$F(p) = \frac{K}{(1+p)^3}$$

### 3.3. Control del sistema digital.

En esta sección se procede a obtener las respuestas al impulso para el período de muestreo. Según el método de los polos dominantes, el estudio del presente sistema tiene como función de transferencia a:  $F(p) = \frac{K}{(1+p)^3}$  que es equivalente al estudio de un sistema de control de primer orden. Aplicando el teorema de Shannon, para un sistema de primer orden, se debe cumplir que:  $\frac{\tau}{4} < T_e < \tau$

Por lo tanto,  $0.75 < T_e < 3$ , donde  $T_e$  es el período de muestreo. En las figuras 3.3, 3.4 y 3.5 se muestran las respuestas al impulso para la función de transferencia del sistema de control identificado de la figura 3.2.

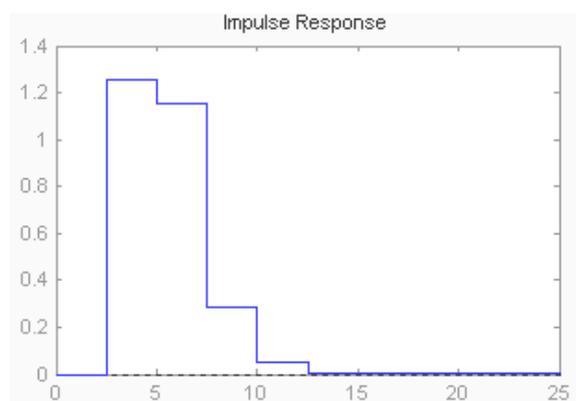


Figura 3. 3: Respuesta al impulso de la función de transferencia  $F(p)$  para  $T_e=2.5$  s. Elaborado por: Autor.

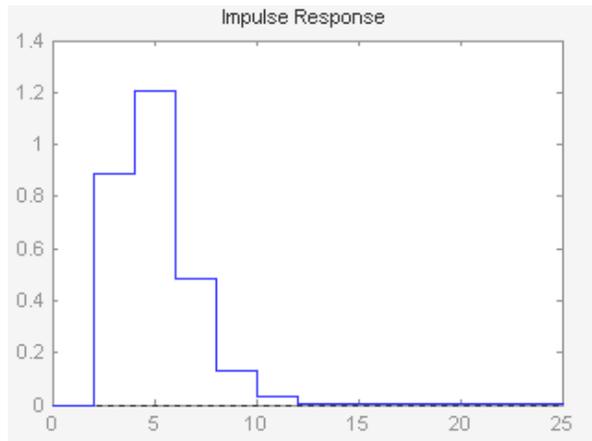


Figura 3. 4: Respuesta al impulso de la función de transferencia  $F(p)$  para  $T_e=2$  s.  
Elaborado por: Autor.

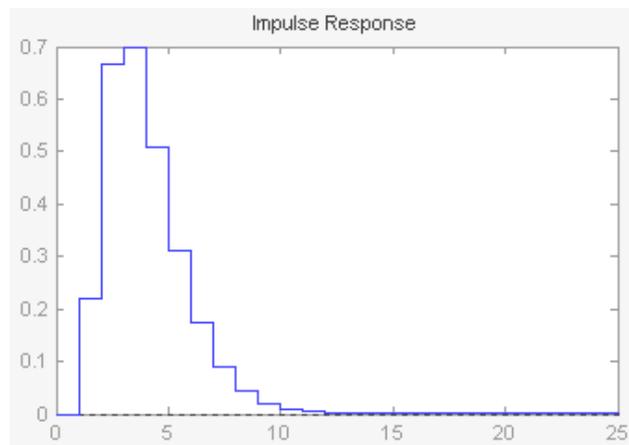


Figura 3. 5: Respuesta al impulso de la función de transferencia  $F(p)$  para  $T_e=1$  s.  
Elaborado por: Autor.

Esto significa que para  $T_e = 1$  s puede tomarse como el periodo más pequeño que tiene un decaimiento rápido para obtener los mejores datos. De ahí la función de transferencia  $z$  no corregida es:

$$F(z) = \frac{0.22z^2 + 0.42z + 0.049}{z^3 - 1.1z^2 + 0.4z - 0.049}$$

### 3.4. Criterio de estabilidad de Jury para rendimiento del sistema.

El objetivo del sistema de control es garantizar el seguimiento de una variable de salida con una señal de entrada que sirve de referencia para el sistema. El 90% de los lazos de control utilizan la estructura clásica de un controlador PID. Aunque es relativamente fácil de configurar, el controlador PID no siempre proporciona un buen rendimiento en el caso de los procesos:

- con gran retardo puro,

- cuyas características dinámicas varían durante el funcionamiento
- de orden superior a 2
- donde no se debe sobrepasar la consigna

Para ello, se introduce una nueva estructura de corrección, el corrector RST, que es más interesante, más eficiente y robusto que la clásica corrección en serie. Por lo tanto, aplicando el criterio de estabilidad de Jury a la función de transferencia  $F(z)$  se obtiene la ecuación característica:

$$1 + FTBA(z) = Num[F(z)] + Den[F(z)]$$

$$1 + FTBA(z) = 0.22z^2 + 0.42z + 0.049 + z^3 - 1.1z^2 + 0.4z - 0.049$$

$$1 + FTBA(z) = z^3 - 0.88z^2 + 0.82z$$

Cuyas condiciones de estabilidad del sistema son:

a. Condición 1:

$$a_0 + a_1 + a_2 + a_3 = 1 - 0.88 + 0.82 > 0$$

b. Condición 2:

$$a_0 - a_1 + a_2 - a_3 = 1 + 0.88 + 0.82 > 0$$

La figura 3.6 muestra el diagrama de Nyquist del sistema digital no corregido. El gráfico se sitúa a la derecha del eje de las  $x$  ( $x=-1$ ). En consecuencia, se considera que el sistema es casi estable.

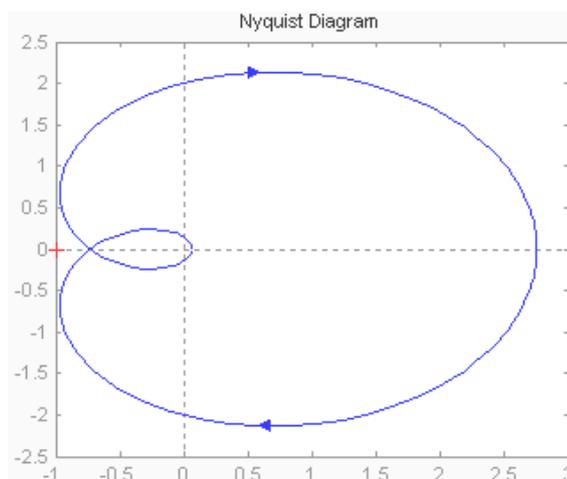


Figura 3. 6: Diagrama de Nyquist del sistema digital no corregido.  
Elaborado por: Autor.

La figura 3.7 muestra el diagrama de Black-Nichols del sistema digital no corregido. En este caso se puede afirmar que el sistema es estable porque el punto crítico (0 dB, -180°) está a la derecha del sistema. Después, se obtiene la precisión del sistema sólo se calcula la desviación posicional ya que el sistema está orientado en la clase 0 ya que no hay integrador:

$$\varepsilon_p = \frac{1}{1 + \frac{Num(1)}{Den(1)}}$$

$$\varepsilon_p = \frac{1}{1 + \frac{0.689}{0.251}} = 0.267$$

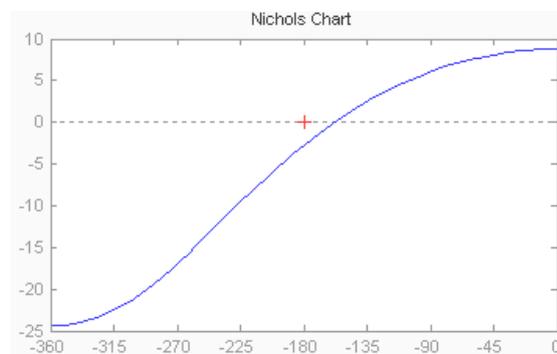


Figura 3. 7: Diagrama Black-Nichols del sistema digital no corregido.  
Elaborado por: Autor.

Por lo tanto, el error de posición es igual al 26%. En conclusión, después de estudiar la estabilidad y la precisión del sistema, hay que corregir los errores para que el proceso funcione correctamente. A continuación, se analiza la corrección del sistema mediante controlador PID digital.

Se sabe que el sistema no alcanza la consigna que se debería tener, por lo que interesa es corregir el sistema. Según el criterio de los reguladores, un sistema controlador PI será más que suficiente porque  $T_g/T_u = 4$ . Por lo tanto,

$$C_{pi} = k_p \left[ \frac{\left(1 + \frac{1}{T_i}\right)z - 1}{z - 1} \right]$$

Suponiendo que  $T_i = 3.3 \text{ s}$  el sistema de control PI queda definido como,

$$C_{pi} = k_p \left[ \frac{\left(1 + \frac{1}{3.3}\right)z - 1}{z - 1} \right]$$

$$C_{pi} = k_p \left( \frac{1.303z - 1}{z - 1} \right)$$

En consecuencia, se obtiene la función de transferencia de bucle abierto (FTBA),

$$FTBA = F(z) * C(z)$$

$$FTBA = \left( \frac{0.22z^2 + 0.42z + 0.049}{z^3 - 1.1z^2 + 0.4z - 0.049} \right) * \left( k_p \left[ \frac{1.303z - 1}{z - 1} \right] \right)$$

$$FTBA = k_p \left( \frac{0.286z^3 + 0.326z^2 - 0.356z - 0.049}{z^4 - 2.1z^3 + 1.5z^2 - 0.449z - 0.049} \right)$$

La ecuación característica evaluando  $k_p$  mediante el criterio de estabilidad de Jury queda definida como,

$$0.04(k_p - 1) - (0.35k_p + 0.44)z + (0.32k_p + 1.5)z^2 + (0.28k_p - 2.1)z^3 + z^4 = 0$$

las condiciones de estabilidad de Jury se definen como,

- a. Condición 1:  $k_p > 0.09$
- b. Condición 2:  $k_p < 26$

A continuación, en la figura 3.8 se visualiza el diagrama de Nyquist con  $k_p = 0.75$ .

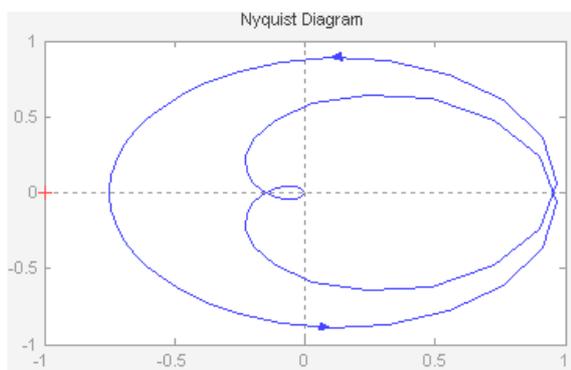


Figura 3. 8: Diagrama de Nyquist del sistema digital corregido.  
Elaborado por: Autor.

Entonces la función de transferencia del regulador pasa a ser,

$$C_{pi} = 0.75 \left( \frac{1.303z - 1}{z - 1} \right)$$

De ahí la función de transferencia de bucle abierto (FTBA) corregida queda definida como,

$$G_z(c) = \frac{0.21z^3 + 0.24z^2 - 0.26z - 0.036}{z^4 - 2.1z^3 + 1.5z^2 - 0.44z + 0.049}$$

Y la función de transferencia de lazo cerrado sería,

$$F(z) = \frac{0.21z^3 + 0.24z^2 - 0.26z - 0.036}{z^4 - 1.88z^3 + 1.74z^2 - 0.71z + 0.01}$$

### 3.5. Control del sistema mediante controlador RST.

El propósito de esta sección es corregir el sistema mediante el controlador de seguimiento de referencia (RST). En este caso, la regulación del sistema también se hace de forma digital. Lo que queda por hacer es corregir el sistema mediante el controlador RST. Entonces, se procede a evaluar los polinomios  $R(z)$ ,  $S(z)$  y  $T(z)$ . El objetivo de esta corrección es buscar un controlador de mejor rendimiento que el controlador clásico.

Si  $R = T$ , el controlador RST es equivalente a un controlador PID. Esta condición se utiliza como punto de partida. En la figura 3.9 se muestra el diagrama de bloques del controlador clásico.

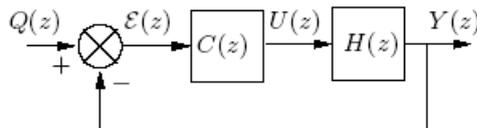


Figura 3. 9: Esquema funcional del controlador de corrección clásico.  
Elaborado por: Autor.

De la figura 3.9 se obtiene por analogía,

$$C(z) = \frac{S(z)}{R(z)}$$

$$H(z) = \frac{B(z)}{A(z)}$$

La figura 3.10 muestra el diagrama de bloques convertido a partir de la figura 3.9.

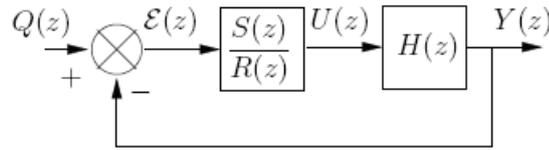


Figura 3. 10: Diagrama de bloques por analogía para  $R = T$ .  
Elaborado por: Autor.

Si  $R \neq T$ , se obtiene el diagrama de bloques mostrado por la figura 3.11.

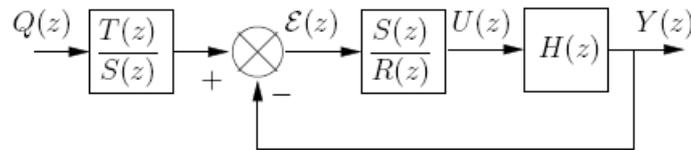


Figura 3. 11: Diagrama de bloques por analogía para  $R \neq T$ .  
Elaborado por: Autor.

Se sabe que,

$$C(z) = 0.75 \left( \frac{1.303z - 1}{z - 1} \right)$$

De donde,

$$S(z) = 0.75(1.303z - 1) = 0.977z - 0.75$$

$$R(z) = z - 1$$

La síntesis del regulador RST consiste en calcular la relación,

$$\frac{T(z)}{S(z)}$$

Por lo tanto,  $T(z) = az + b$ , es decir, que se debe buscar los coeficientes  $a$  y  $b$ . Utilizando el álgebra de los diagramas funcionales, se obtiene el diagrama de bloques mostrado por la figura 3.12.

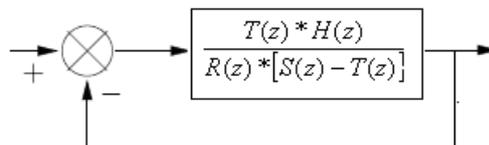


Figura 3. 12: Diagrama de bloques del sistema RST.  
Elaborado por: Autor.

A continuación, se procede a calcular los coeficientes a y b,

$$T(z) * H(z) + R(z)[S(z) - T(z)] = \underbrace{T(z)[H(z) - R(z)]}_{X(z)} + \underbrace{R(z) * S(z)}_{Y(z)} = 0$$

$$X(z) = (az + b)[0.22z^2 + 0.44z + 0.049 - (z - 1)(z^3 - 1.1z^2 + 0.4z - 0.049)]$$

$$Y(z) = 0.75(1.303z - 1)(z - 1)(z^3 - 1.1z^2 + 0.4z - 0.049)$$

$$(0.97 - a)z^5 + (2.1a - b - 2.79)z^4 - (1.28a - 2.1b - 3.03)z^3 + (0.89a - 1.28b - 1.56)z^2 + (0.49b + 0.39)z - 0.36 = 0$$

a. Condición 1:

$$0.71a + 0.31b - 1.25 > 0$$

b. Condición 2:

$$-5.27a + 4.87b + 9.04 > 0$$

Estas dos condiciones son suficientes para evaluar a y b. Por lo tanto, una vez que se ha resuelto:

$$a < 0.88$$

$$b < 0.032$$

El polinomio es entonces,

$$T(z) = 0.216z + 0.0032$$

$$\frac{T(z)}{S(z)} = \frac{0.216z + 0.0032}{0.97z - 0.75}$$

$$\frac{T(z)}{S(z)} = \frac{0.97z - 0.75}{z - 1}$$

### 3.6. Análisis comparativo de la simulación del controlador PID analógico, digital y RST.

La temperatura es específica para cada producto a destilar. Por lo tanto, se simula la respuesta al impulso a través de 3 escenarios.

Escenario 1: comparativa entre PID analógico y digital. La figura 3.13 muestra el diagrama de bloque del diseño del controlador PID analógico  $G(p)$ ,

y del controlador PID digital  $G(z)$ . La figura 3.14 muestra la gráfica comparativa entre el controlador PID analógico y digital para el sistema de destilación.

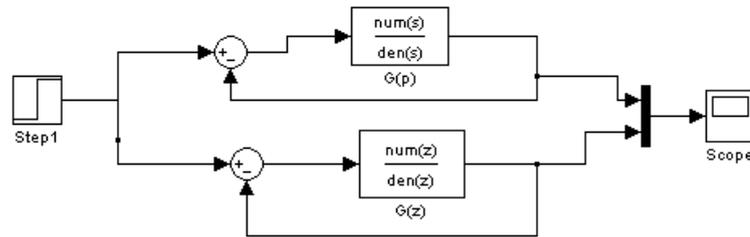


Figura 3. 13: Diagrama de bloques para los controladores PID analógico y digital para el sistema de destilación.  
Elaborado por: Autor.

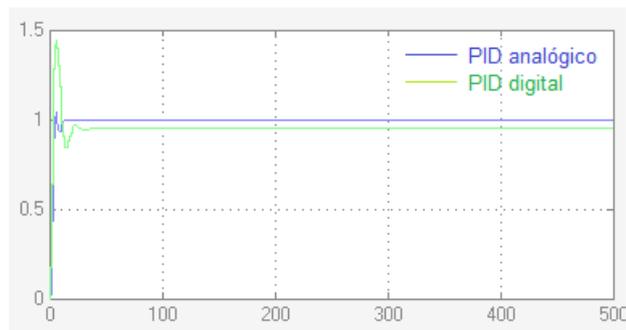


Figura 3. 14: Gráfica comparativa entre los controladores PID analógico y digital del sistema de destilación.  
Elaborado por: Autor.

Escenario 2: comparativa entre PID analógico y control RST. En la figura 3.15 se muestra el diagrama de bloques del sistema de control analógico y RST. La figura 3.16 muestra la gráfica comparativa entre el controlador PID analógico y RST para el sistema de destilación.

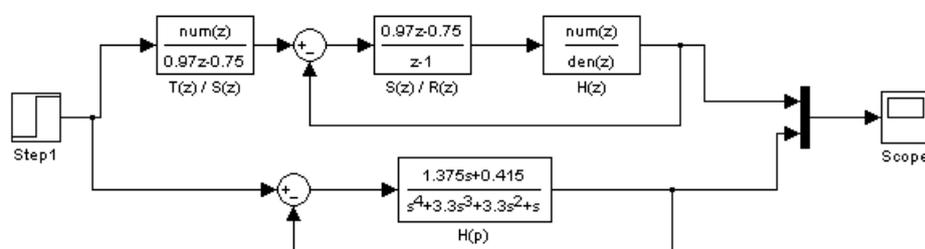


Figura 3. 15: Diagrama de bloques para los controladores PID analógico y RST del sistema de destilación.  
Elaborado por: Autor.

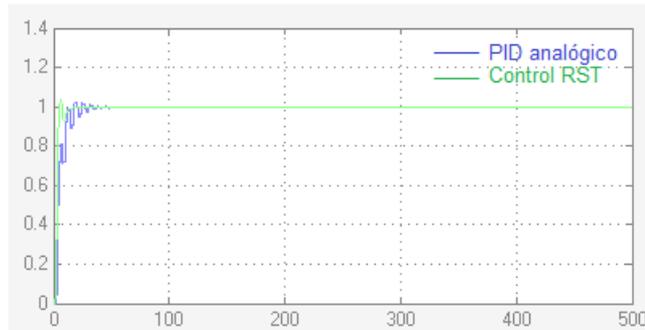


Figura 3. 16: Gráfica comparativa entre los controladores PID analógico y RST del sistema de destilación.

Elaborado por: Autor.

Escenario 3: comparativa entre PID digital y control RST. En la figura 3.17 se muestra el diagrama de bloques del sistema de control digital y control RST. La figura 3.18 muestra la gráfica comparativa entre el controlador PID digital y RST para el sistema de destilación.

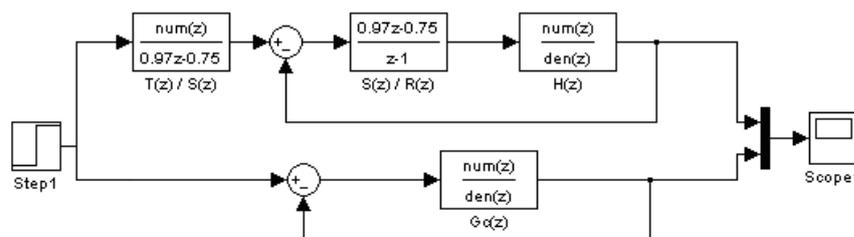


Figura 3. 17: Diagrama de bloques para los controladores PID digital y RST del sistema de destilación.

Elaborado por: Autor.

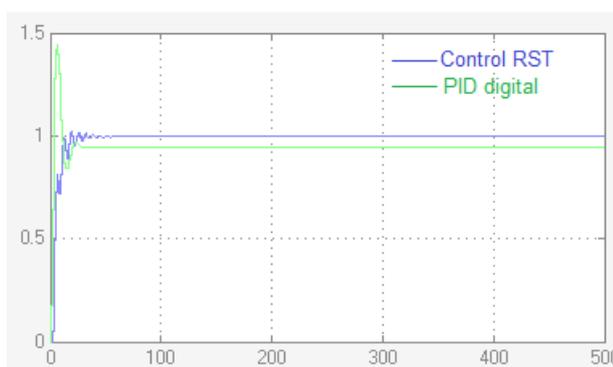


Figura 3. 18: Gráfica comparativa entre los controladores PID digital y RST del sistema de destilación.

El corrector implementado por el control RST nos muestra una respuesta débilmente oscilante, con una precisión, estabilidad y tiempo de respuesta satisfactorios en comparación con el controlador PID digital. Con el

controlador PID analógico se obtiene el mismo resultado que con el controlador RST digital, pero este último es ventajoso en caso de cambio de las especificaciones, ya que basta con cambiar el punto de consigna o referencia. En cambio, con el controlador PID analógico, se debe cambiar el circuito por completo.

## Conclusiones

- En el ámbito del control, se puede distinguir entre dos métodos de control: el control analógico y el control digital. Si las especificaciones no cambian, es mejor utilizar el control analógico, de lo contrario el control digital es más ventajoso.
- El sistema de calentamiento para la destilación de aceites esenciales es de orden 3, por lo que tiene un modo vibratorio, por lo que el uso de un corrector digital del tipo RST es muy interesante. Esto se debe a que puede garantizar y mantener un rendimiento de control óptimo, especialmente el control de la temperatura. Con este trabajo, se espera dar indicaciones útiles para quienes deban desarrollar la planta de destilación que tiene varios parámetros que regular. Son posibles varias ampliaciones, como la evaluación del coste de implantación del sistema.

## **Recomendaciones.**

- Análisis y simulación numérica de un controlador PID basado en el método de Ziegler-Nichols y auto-regulación.
- Análisis comparativo de los controladores PID y de red neuronal para mejorar el par inicial del motor eléctrico de inducción de rotor bobinado

## Bibliografía

- Ellis, G. (2012). Four Types of Controllers. En *Control System Design Guide* (pp. 97–119). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385920-4.00006-0>
- Fišer, J., & Zítek, P. (2019). PID Controller Tuning via Dominant Pole Placement in Comparison with Ziegler-Nichols Tuning. *IFAC-PapersOnLine*, 52(18), 43–48. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.12.204>
- Haji H., V., & Monje, C. A. (2019). Fractional-order PID control of a MIMO distillation column process using improved bat algorithm. *Soft Computing*, 23(18), 8887–8906. <https://doi.org/10.1007/s00500-018-3488-z>
- Hamdan, L. K., Zarei, M., Chianelli, R. R., & Gardner, E. (2008). Sustainable water and energy in Gaza Strip. *Renewable Energy*, 33(6), 1137–1146. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2007.10.002>
- Jones, K. O., & Hengue, W. (2009). Limitations of multivariable controller tuning using genetic algorithms. *Proceedings of the International Conference on Computer Systems and Technologies and Workshop for PhD Students in Computing - CompSysTech '09*, 1. <https://doi.org/10.1145/1731740.1731790>
- Khan, Q., Maraqa, M. A., & Mohamed, A.-M. O. (2021). Inland desalination. En *Pollution Assessment for Sustainable Practices in Applied Sciences and Engineering* (pp. 871–918). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809582-9.00017-7>
- Ramli, N. M. (2018). Distillation Column. En M. Shamsuzzoha (Ed.), *PID Control for Industrial Processes*. InTech. <https://doi.org/10.5772/intechopen.74656>
- Tseng, K.-H., Chung, M.-Y., Chang, C.-Y., Hsieh, C.-L., & Tseng, Y.-K. (2021). Parameter optimization of nanosilver colloid prepared by electrical spark discharge method using Ziegler-Nichols method. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 148, 109650. <https://doi.org/10.1016/j.jpics.2020.109650>

Ullah, I., Rasul, M., & Khan, M. M. (2013). *An overview of solar thermal desalination technologies.*



## DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **Yazbek Marich, Leszek Antonio** con C.C: # 070430295-9 autor del **Componente práctico del examen complejo,:** **Evaluación de controladores PID y RST aplicado a sistemas de calefacción en plantas de destilación usando Simulink** previo a la obtención del título de **INGENIERO ELECTRÓNICO EN CONTROL Y AUTOMATISMO** en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

1.- Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las instituciones de educación superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de titulación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.

2.- Autorizo a la SENESCYT a tener una copia del referido trabajo de titulación, con el propósito de generar un repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Guayaquil, 10 de marzo del 2022

f. 

Nombre: Yazbek Marich, Leszek Antonio

C.C: 070430295-9

<b>REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA</b>			
<b>FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN</b>			
<b>TÍTULO Y SUBTÍTULO:</b>	Evaluación de controladores PID y RST aplicado a sistemas de calefacción en plantas de destilación usando Simulink		
<b>AUTOR(ES)</b>	Yazbek Marich, Leszek Antonio		
<b>REVISOR(ES)/TUTOR(ES)</b>	M. Sc. Romero Paz, Manuel de Jesús		
<b>INSTITUCIÓN:</b>	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
<b>FACULTAD:</b>	Facultad de Educación Técnica para el Desarrollo		
<b>CARRERA:</b>	Ingeniería Electrónica en Control y Automatismo		
<b>TÍTULO OBTENIDO:</b>	Ingeniero Electrónico en Control y Automatismo		
<b>FECHA DE PUBLICACIÓN:</b>	10 de marzo del 2022	<b>No. DE PÁGINAS:</b>	32
<b>ÁREAS TEMÁTICAS:</b>	Sistemas de Control, Teoría de Control		
<b>PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:</b>	Controlador, PID, RST, Procesos, Destilación, Simulación		
<b>RESUMEN/ABSTRACT (150-250 palabras):</b>			
<p>Durante los últimos años, el requerimiento de modelar sistemas de orden superior, así como la complejidad de estos sistemas, han llevado a los investigadores a la reducción del orden de estos, tanto para facilitar su estudio y análisis, sino también a la búsqueda de aproximaciones adecuadas a los sistemas de alto orden adecuado que mantenga las mismas características. Por lo tanto, el presente documento se desarrolla el componente práctico del examen complejo denominado "Evaluación de controladores PID y RST aplicado a sistemas de calefacción en plantas de destilación usando Simulink". Para controlar el proceso de destilación se adopta un controlador PID utilizando el segundo método de Ziegler y Nichols, y se compara por un regulador RST, que se caracteriza por dos grados de libertad de control (uno para la entrada y otro para la entrada y el otro para la salida), por lo que es robusto frente a las perturbaciones.</p>			
<b>ADJUNTO PDF:</b>	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO	
<b>CONTACTO CON AUTOR/ES:</b>	<b>Teléfono:</b> +593 98 474 9493	<b>E-mail:</b> <a href="mailto:leszek.yazbek@cu.ucsg.edu.ec">leszek.yazbek@cu.ucsg.edu.ec</a>	
<b>CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN: COORDINADOR DEL PROCESO DE UTE</b>	<b>Nombre:</b> Palacios Meléndez Edwin Fernando		
	<b>Teléfono:</b> +593-9-67608298		
	<b>E-mail:</b> <a href="mailto:edwin.palacios@cu.ucsg.edu.ec">edwin.palacios@cu.ucsg.edu.ec</a>		
<b>SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA</b>			
<b>Nº. DE REGISTRO (en base a datos):</b>			
<b>Nº. DE CLASIFICACIÓN:</b>			
<b>DIRECCIÓN URL (tesis en la web):</b>			