

Sistemas SCADA en proceso de refinación de crudo

Eric Xavier Buitrago Forero
David Steven Galvis Arévalo
Johan Andrés Sebastián Gómez Espinosa

Dirigido a: OLGA LUCIA RAMOS SANDOVAL, Ph.D.

Universidad Militar Nueva Granada
Bogota D.C.
29 de mayo del 2018

RESUMEN

En este documento se presenta la realización de un sistema SCADA sobre un subprocesso para la refinación de crudo, donde el principal objetivo es controlar y supervisar remotamente cada etapa del proceso de inicio a fin y que a su vez este tenga alarmas programadas capaces de indicar al personal a cargo cuando ocurre un inconveniente. En la industria petrolera es de vital importancia estar al tanto de la refinación de petróleo ya que cualquier cambio en este procedimiento puede resultar con la obtención de un producto de mala calidad lo cual genera pérdida de tiempo y de dinero. Ya que cada uno de estos procesos tienen características y estándares definidos como lo son las temperaturas o el tiempo de reacción del líquido que deben ser establecidos para que no hayan cambios en el resultado final del producto. Esto es realizado gracias a dos controles implementados sobre el proceso de calentamiento y de reacción sobre los cuales se aplican un controlador PID y controlador por realimentación de estados respectivamente. Y sobre los cuales deben siempre estar visibles los valores de temperatura de cada uno de estos en las interfaces de usuario ya sea local o remota que permita al personal a cargo observar que ninguna de estas supere los límites o generen errores imprevistos a pesar de las alarmas instaladas en el sistema y que tanto el motor del reactor (variador) como la bomba (servomotor) se encuentren operando de la manera correcta.

INTRODUCCIÓN

La refinación del crudo involucra una serie de procesos tanto físicos como químicos a los cuales se somete el petróleo crudo, los productos que se obtienen de ellos tienen diferentes rendimientos ya que estos dependen del origen del crudo; para ajustar estos rendimientos al patrón de consumo algunas de las fracciones se someten a diversos procesos de conversión. Estos procesos de conversión se aplican con el objeto de obtener productos más ligeros, mediante transposiciones moleculares, cuyo valor comercial es mayor. Estos procesos pueden ser de tres tipos: procesos de destilación, procesos de desintegración y procesos de purificación. [1]

Para esta aplicación se realiza un sistema SCADA que controla y supervisa distintos procesos de refinado de petróleo, pero vale la pena definir cada uno de los puntos que participan en todo el proceso y su función:

Los sistemas SCADA proveen un software de supervisión y control a través de múltiples controladores lógicos programables. Estos sistemas son diseñados para usarse sobre largas distancias como agua o por extensas redes eléctricas. Debido a las largas distancias,

estos sistemas permiten visualizar un proceso y controlarlo en tiempo real mediante una estación de monitoreo.[2]

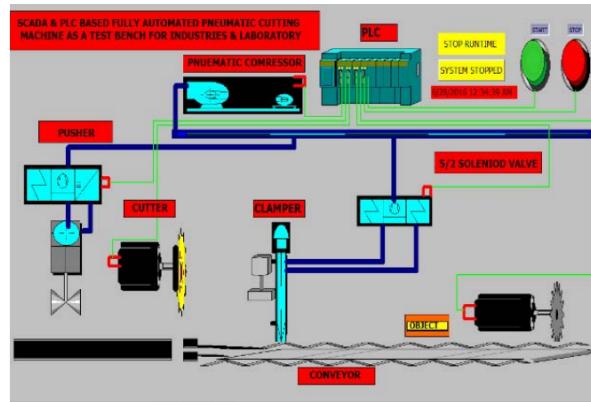


Figura 1: Ejemplo de sistema SCADA.[3]

El variador de frecuencia regula la velocidad de motores eléctricos para que la electricidad del motor se ajuste a la demanda real de la aplicación. Un variador es un regulador industrial que se encuentra entre la alimentación energética y el motor. La energía de la red pasa por el variador y regula la energía antes de que ésta llegue al motor para luego ajustar la frecuencia y la tensión en función de los requisitos del procedimiento.[4]



Figura 2: Variadores Micromaster SIEMENS[5]

Los servomotores con su correspondiente driver, son dispositivos de accionamiento para el control de precisión de velocidad, torque y posición. Estos reemplazan los accionamientos neumáticos e hidráulicos (salvo en aplicaciones de alto torque) y constituyen la alternativa de mejor desempeño frente a los accionamientos mediante convertidores de frecuencia, ya que estos no proporcionan un control de posición y son poco efectivos a bajas velocidades.[6]

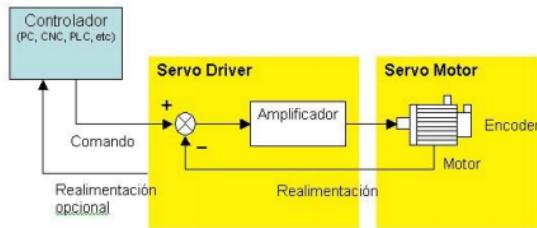


Figura 3: Servomotor con driver [6]

OBJETIVO

Diseñar e implementar un sistema SCADA que permita el control y supervisión de 3 estaciones de trabajo de manera local y remota simulando un subproceso de refinación de crudos con sistemas de precalentamiento y de reacción para esto utilizando controladores PID y realimentación de variables de estado.

MATERIALES

- *PLC S7-1500
- *Cables Ethernet
- *Micromaster 440 Siemens
- *Siemens Motor 1LA7 070 2YA60
- *TIA Portal V13
- *MATLAB R2017a
- *PT100 Siemens
- *Servomotor YASKAWA Sigma II
- *HMI KTP600 Basic Color PN
- *Relé
- *Componentes analógicos (Condensadores, resistencias, amplificadores operacionales)

PROCEDIMIENTO

Para la realización de esta aplicación, se debe tener claro el proceso a realizar, es por eso que se separa en todos los puntos claves, así como los componentes reales que se representan:

- Horno = Planta térmica.
- Mezclador = Motor trifásico utilizando el variador de velocidad.
- Reactor = Circuito realizado por computadores analógicos.
- Bomba centrífuga = Servomotor.

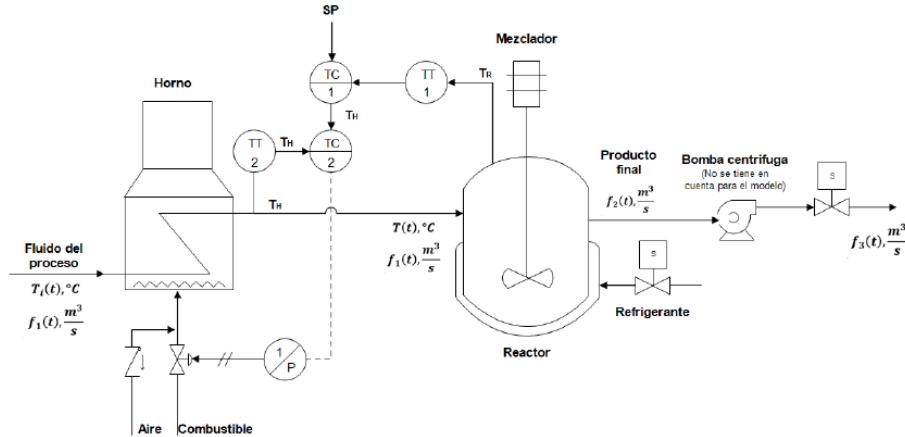
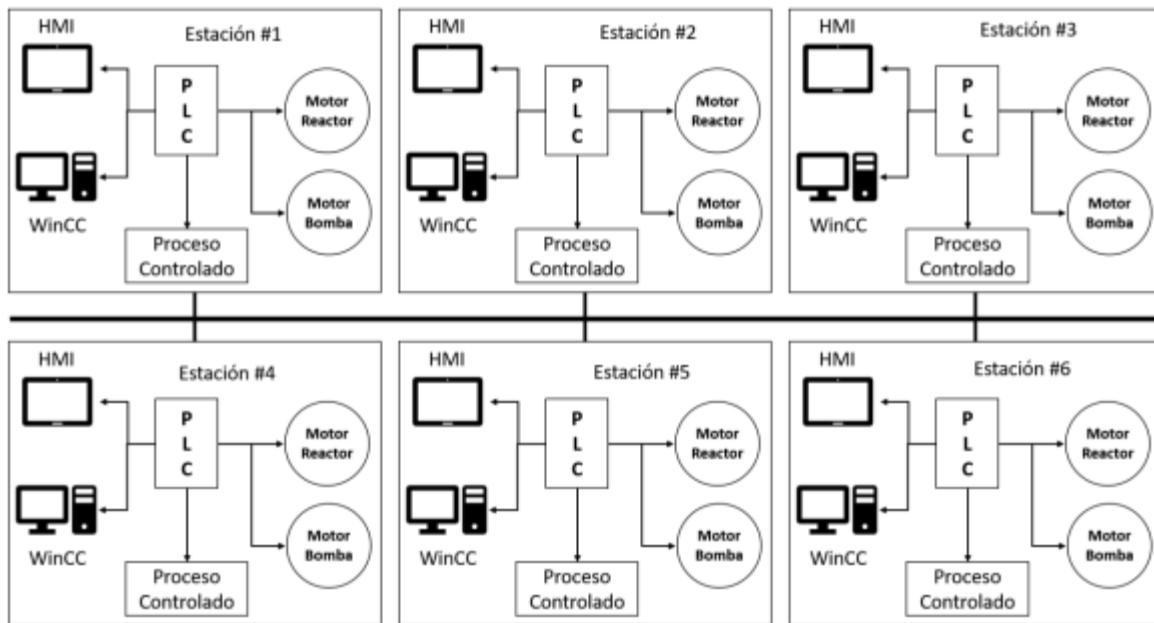


Figura 4: Esquema de subproceso de refinado de petróleo

El objetivo principal de este laboratorio es controlar y supervisar 6 procesos diferentes mediante sistemas SCADA utilizando comunicación PROFIBUS donde cada estación puede controlar a otra y supervisar ya sea de manera local (HMI) o remota (WinCC)



- Supervisión local

Se realiza la supervisión remota utilizando las HMI KTP600 Basic Color disponibles en el laboratorio de automatización. La imagen principal con la que se encuentra el usuario, desde la cual podrá seleccionar la estación de trabajo a controlar y supervisar.

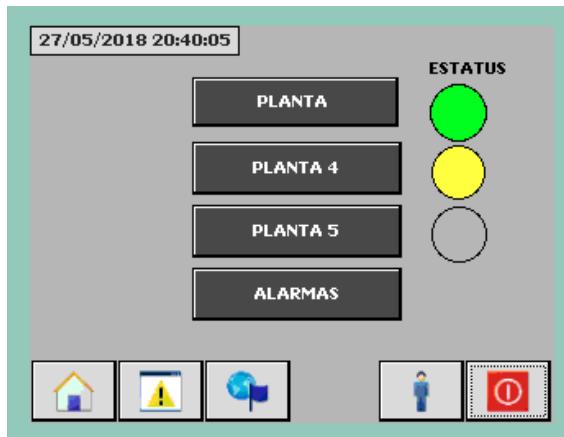


Figura 5: Imagen principal HMI

Esta es la imagen principal donde se encuentran las plantas que se pueden tener conexión y además se tiene las alarmas de todo el sistema.

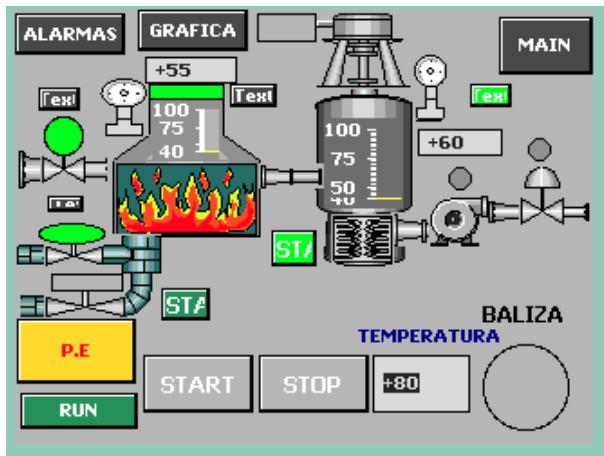


Figura 6 : Imagen diagnóstico del proceso HMI Fase 1

Descripción de la planta pantalla HMI

En cada planta encontramos cada sensor de planta donde encontramos el de la válvula de aire para combustión, el fluido que se va a refinar, la presión del horno del reactor los sensores de temperatura de horno y del reactor la bomba de agitacion valvula de salida del sistema y la bomba de salida del sistema el sistema puede arrancar si todo está listo para que el fluido entre a proceso.

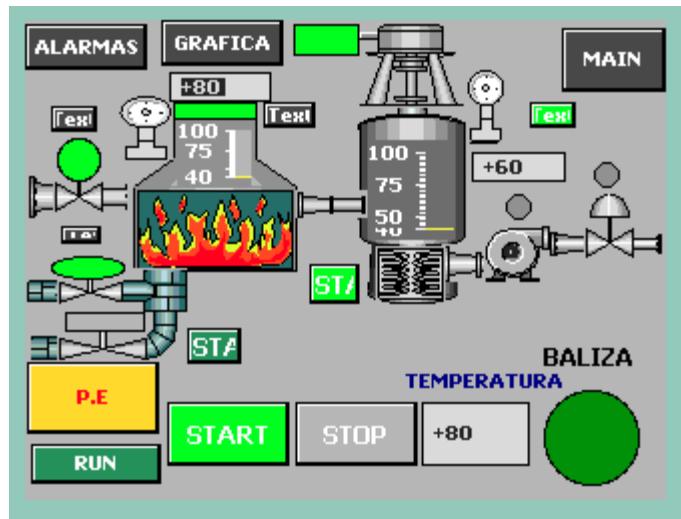


Figura 7: Imagen diagnóstico del proceso HMI Fase 2

Cuando llega la temperatura del horno con respecto a la deseada para su proceso de refinación se prende la bomba de agitación hasta que el reactor llegue a su temperatura deseada.

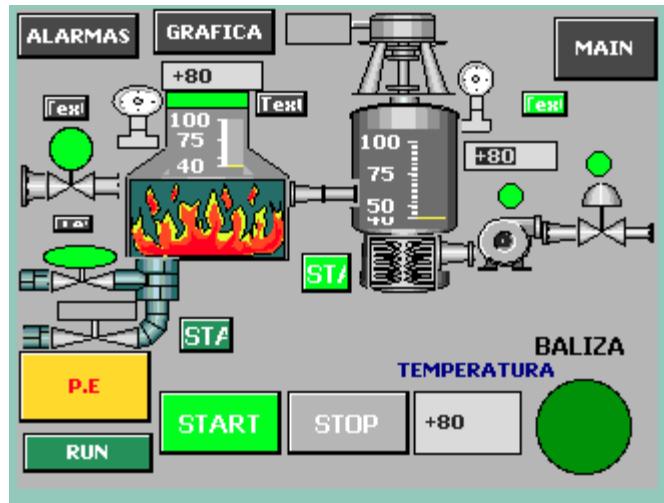


Figura 8: Imagen diagnóstico del proceso HMI Fase 3

Cuando llegamos a la temperatura deseada en el reactor podemos saber que el fluido está listo para la salida del sistema por lo cual apagamos la bomba de agitación y prendemos la bomba de salida del sistema con su válvula para terminar la salida del fluido.

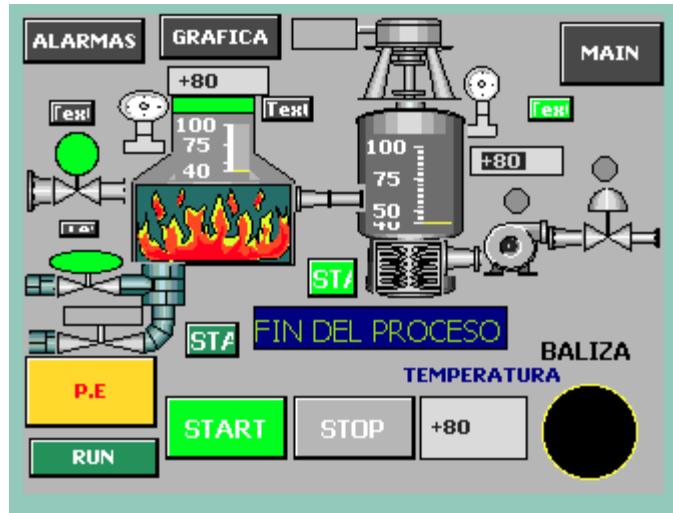


Figura 9: Imagen diagnóstico del proceso HMI Fase 4

Tenemos una señal de final de proceso para que el operario sepa que ya terminó y que está listo para cambiar la temperatura si lo desea para el siguiente proceso.

ALARMAS

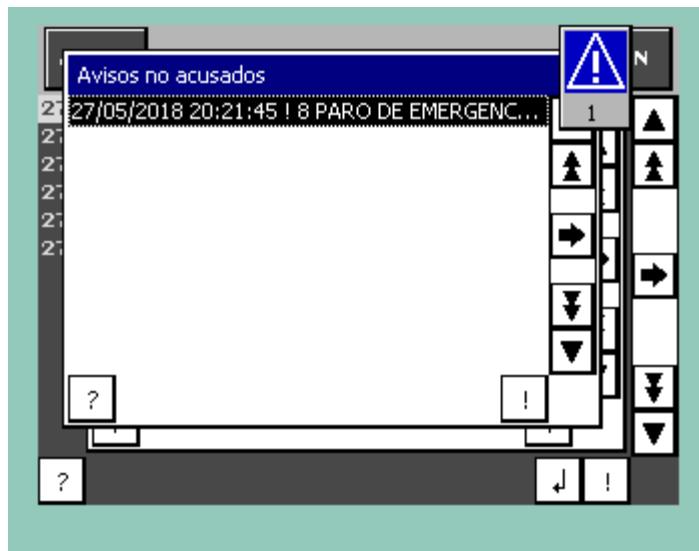


Figura 10: Imagen de aviso de STOP de Emergencia HMI

Se tiene una alarma de error que nos dice que está el paro de emergencia activado lo cual no importa en la pantalla que estemos podemos verla de inmediato.



Figura 11: Imagen aviso de alarmas HMI

Tenemos unas alertas emergentes con respecto a la sensorica del sistema y funcionamiento de la refinadora; contamos también con la alerta de fin de ciclo que podemos ver desde cualquier lugar de las plantas desde cualquier HMI o Scada.

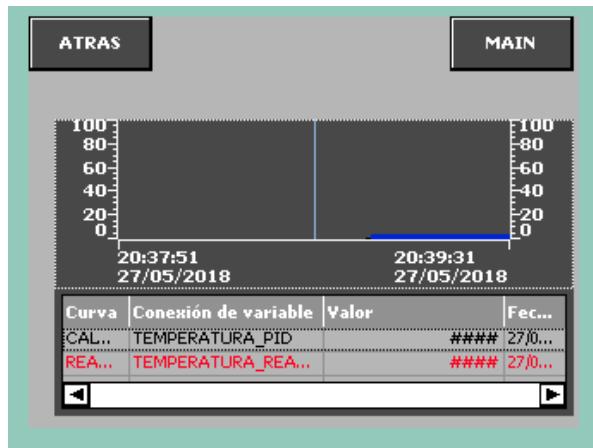


Figura 12: Gráfico de temperaturas HMI

Contamos con un histórico en tiempo real de las dos temperaturas de cada planta lo que implica control en las operaciones de cada ciclo y los gastos de combustible en cada planta para la refinación del fluido deseado.

- Supervisión remota

La estación PC se encarga de supervisar y controlar el proceso a través del ordenador, este se enlaza con un PLC a través de una subred, que deben ser iguales a la configurada en el módulo de comunicación del PLC, con el fin de que se pueda controlar el proceso desde un sitio remoto mediante el programa WinCC.

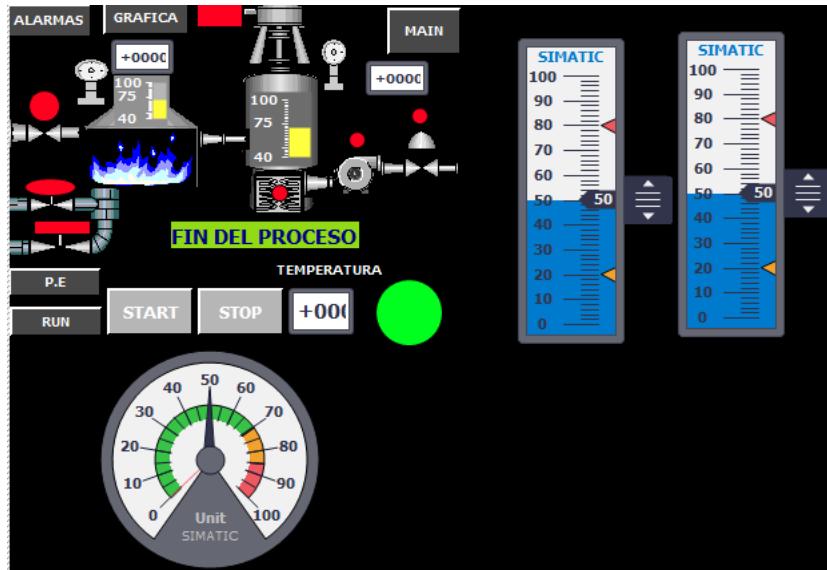


Figura 13: Pantalla del proceso, estación PC en WinCC

En el WinCC podemos tener más espacio para el proceso podemos tener los medidores más claros de las temperaturas del horno y del reactor con un medidor en la parte inferior de la temperatura a la cual necesitamos que esté la planta.

- Entradas analógicas

Para esta aplicación se configuran 2 entradas analógicas que serán el voltaje del divisor de tensión que permite la medición de la PT100 y la salida del circuito del reactor.

- Salidas analógicas

Se configuran dos salidas analógicas para esta aplicación que serán: 1) La salida señal de control del servosistema que entra al circuito del reactor y 2) El voltaje de referencia que es la señal que activa el servomotor cuando este se requiera.

- Reactor

En el modelado del reactor entran distintos factores físicos y característicos en este, en el caso consultado se trata de un reactor industrial, sin embargo al ser esta una aplicación de

menor escala se deben ajustar factores como lo son el tamaño del reactor y la temperatura a la cual este trabajará. Estas constantes se presentan en la tabla X :

Variable	Valor	Descripción	Unidades
F	0.2	Flujo volumétrico	m^3/s
r	0.8	Radio del reactor	m
h	1.5	Altura del reactor	m
Cp	2.2	Coeficiente de presión	KJ/Kg
p	800	Densidad del crudo	Kg/m^3
K	2.2	Constante cinética	-
Cin	5	Conc de alimentación	$Kmol/m^3$
TH	275	Temp inicial reactante	K
Tc	300	Temp del refrigerante	K

Tabla 1: Constantes del reactor.

Luego de tener estas constantes, se definen 3 variables: 1) $A = \pi * r^2$ la cual será el área del reactor, 2) $V = A * h$ que será el volumen del reactor, y por último 3) $k1 = A * 0.05$ que es un 5% del área del reactor que no se utiliza. Y reemplazando estas variables y constantes en las matrices de la figura X se resolvería el modelo por variables de estado. [7]

$$A = \begin{bmatrix} -\left(\frac{F}{V}\right) - K & -K \\ \frac{K}{p * Cp} & -\left(\frac{F}{V}\right) - k1 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{F}{V} \end{bmatrix}$$

$$C = [0 \quad 1]$$

$$D = 0$$

Figura 14: Matrices que forman el modelo espacio de estados del reactor.

Luego utilizando la función ss2tf de Matlab que permite convertir un modelo de espacio de estado a función de transferencia quedará entonces de la siguiente manera.

$$\frac{0.2709}{s^2 + 2.255 s + 0.2734}$$

Para que se pueda simular la función de transferencia del reactor sobre computadores analógicos, fue necesario buscar un circuito que cumpliera con una respuesta similar de segundo orden y para ello se encontró la implementación de un filtro pasa-banda de

segundo orden basados [8], que para llegar a la función de transferencia se varían los valores de resistencias y condensadores acorde al ajuste de la ganancia proporcional del sistema y de sus tiempos característicos de establecimiento en lazo abierto.

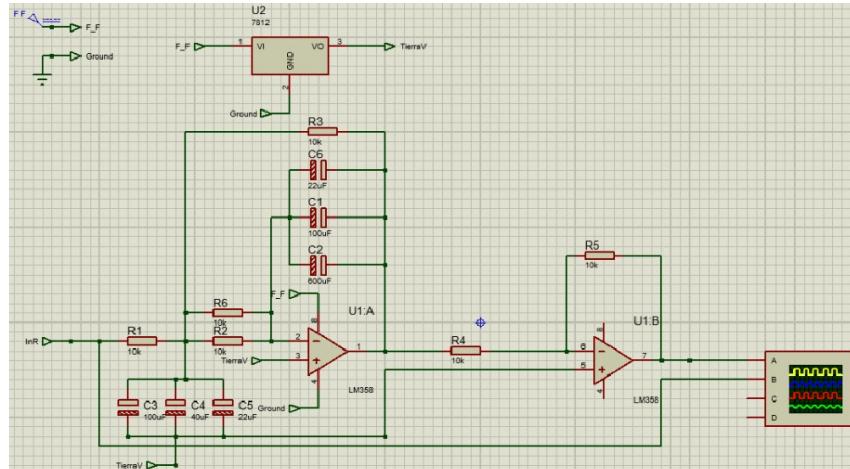


Figura 15: Circuito analógico que simula el reactor.

- Control realimentación por variables de estado

Teniendo la función de transferencia en continuo se debe discretizar para que se pueda realizar un control digital, se obtienen las matrices G y H para realizar el servosistema con observador.

$$G = \begin{bmatrix} -0.0178 & -0.0378 \\ 0.1384 & 0.2942 \end{bmatrix} \quad H = \begin{bmatrix} -0.1779 \\ 1.3837 \end{bmatrix}$$

Para hallar el polinomio deseado, se define un coeficiente de amortiguamiento “zita” de 1 y un tiempo de establecimiento de 300 segundos.

$$\begin{aligned} z_{d1} = \\ z^3 - 1.687*z^2 + 0.7522*z - 0.03352 \end{aligned}$$

Posterior a esto se obtienen las constantes de control de realimentación, constante integral, y las constantes de observador.

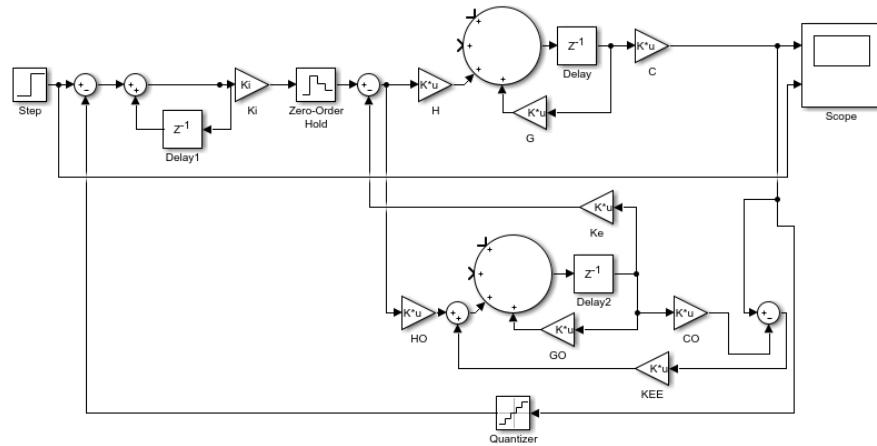


Figura 16: Servosistema con observador en discreto

Y la respuesta del sistema con el controlador implementado se observa en la figura x, donde el sistema se estabiliza en aproximadamente 300 segundos y con una respuesta de tipo sobre-amortiguada.

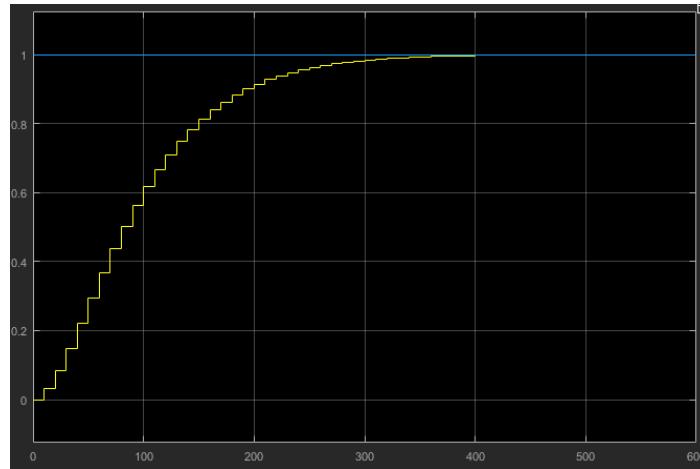


Figura 17: Respuesta del reactor con controlador implementado.

- Comunicación

Para la comunicación entre las estaciones de trabajo se utiliza comunicación Ethernet, la comunicación entre el controlador lógico programable y el variador se utiliza el estándar PROFIBUS que está cableado ya internamente en los dispositivos que se disponen en el laboratorio, y la comunicación con las pantallas HMI se utiliza el estándar PROFINET, donde se configuran en el programa del TIA Portal las distintas direcciones IP para las 3 estaciones de trabajo y también para la estación PC.

- Modelado térmico

Para la realización de la planta térmica, se realiza un prototipo de horno o mufla utilizando madera MDF por fuera y por dentro como aislante térmico se utiliza aluminio y poliestireno expandido (Icopor). En esta se debe implementar un elemento capaz de elevar la temperatura interna de la planta y que se pueda controlar la intensidad de calor que produce, entonces para este elemento se decide optar por una lámpara incandescente capaz de calentar el aluminio y la temperatura dentro de la mufla. Dentro del horno también se encuentra el sensor de temperatura de Siemens PT100 que será la que mida la temperatura dentro. Para medir la temperatura es necesario hacer un divisor de tensión que permite leer el cambio de voltaje sobre la variación de la RTD, en vista de que este es un resistor que cambia su resistencia acorde a la temperatura a la que se encuentra. Se debe realizar la conexión de la siguiente manera.

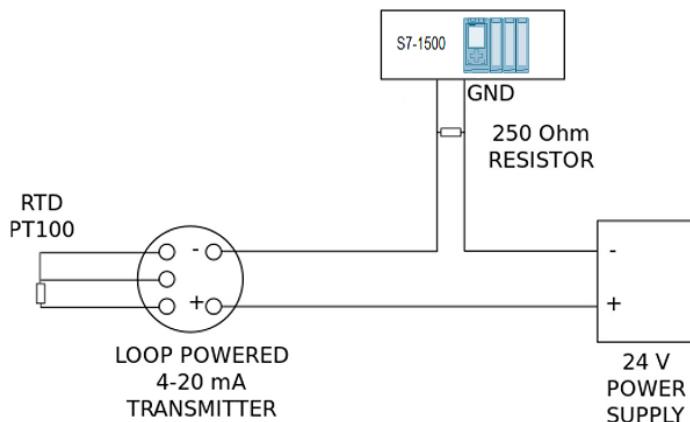


Figura 18: Conexión divisor de tensión para lectura de voltaje PT100. [9]

La medición de voltaje se realiza con una entrada analógica del PLC, configurada a un rango de voltaje que el usuario desee, ya sea de un rango entre 0 a 10V como desde 1 a 5V.



Figura 19: Planta térmica implementada

Para obtener el modelo de la planta térmica, se alimenta el bombillo para poder calentar el interior de la mufla donde a su vez se está midiendo la temperatura utilizando una termocupla con un multímetro Fluke y midiendo el voltaje en el divisor de tensión como salida y el voltaje de sobre el bombillo como la entrada para el sistema.

Posterior, utilizando el complemento `<ident>` de Matlab, se introducen los datos de entrada y de salida del sistema, donde se selecciona el tipo de función de transferencia que se quiere obtener, que para este caso será una función de segundo orden.

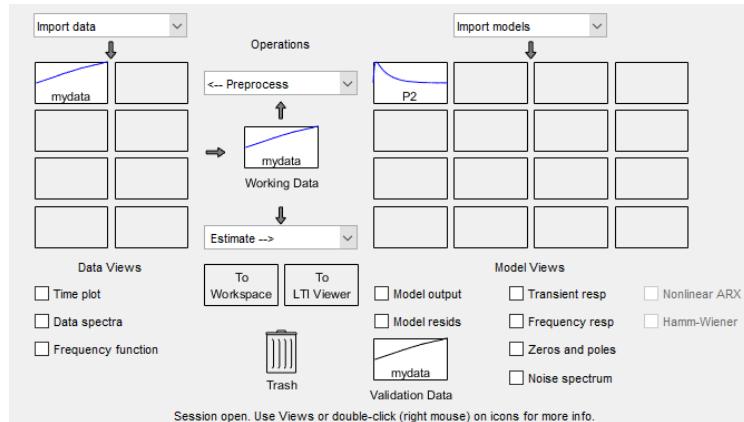


Figura 20: Interfaz del complemento `ident` de Matlab

Este complemento arroja como resultado la constante proporcional del sistema y además los 2 tiempos característicos de la respuesta en lazo abierto.

```

Process model with transfer function:
  Kp
G(s) = -----
  (1+Tp1*s) (1+Tp2*s)

  Kp = 0.14217
  Tp1 = 56.549
  Tp2 = 4.8693

```

Al realizar la caracterización, se obtiene un porcentaje de similitud entre la respuesta real y la respuesta con la función de transferencia obtenida utilizando ident.

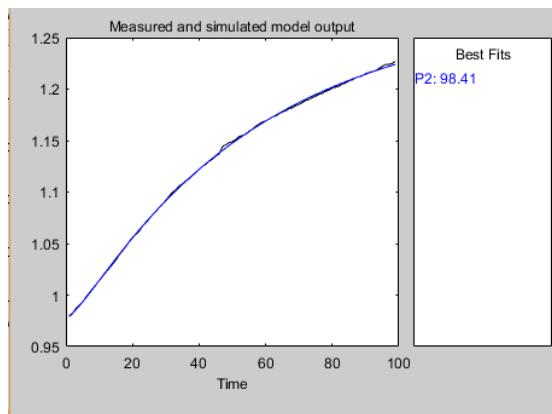


Figura 21: Porcentaje de similitud de función de transferencia real y caracterizada.

Y finalmente, la función de transferencia se muestra a continuación:

$$\frac{0.0005162}{s^2 + 0.223 s + 0.003631}$$

- Control PID

Para la implementación del controlador PID se inserta el bloque PID_Compact el cual permite caracterizar y controlar la planta que se conecte a la entrada analógica que se defina en el TIA Portal y el PLC. [10]



Figura 22: Bloque PID Compact

Al caracterizar el sistema, se define primero el punto mínimo y máximo de la señal de salida de la planta en grados centígrados, y a su vez se toma el valor del voltaje en bits al momento de la lectura a través de la entrada del PLC.

En la figura 23 se muestra la gráfica del sistema de puesta en servicio, donde se observa la referencia o setpoint (color cian, en grados, el punto a donde se quiere llegar), la señal de entrada escalada (color verde, el punto normalizado al cual se quiere llegar), y por último la salida en rojo, que es la señal PWM que controla el relé que enciende el bombillo para subir la temperatura del horno. Donde la referencia son 50°C como punto intermedio de la caracterización.

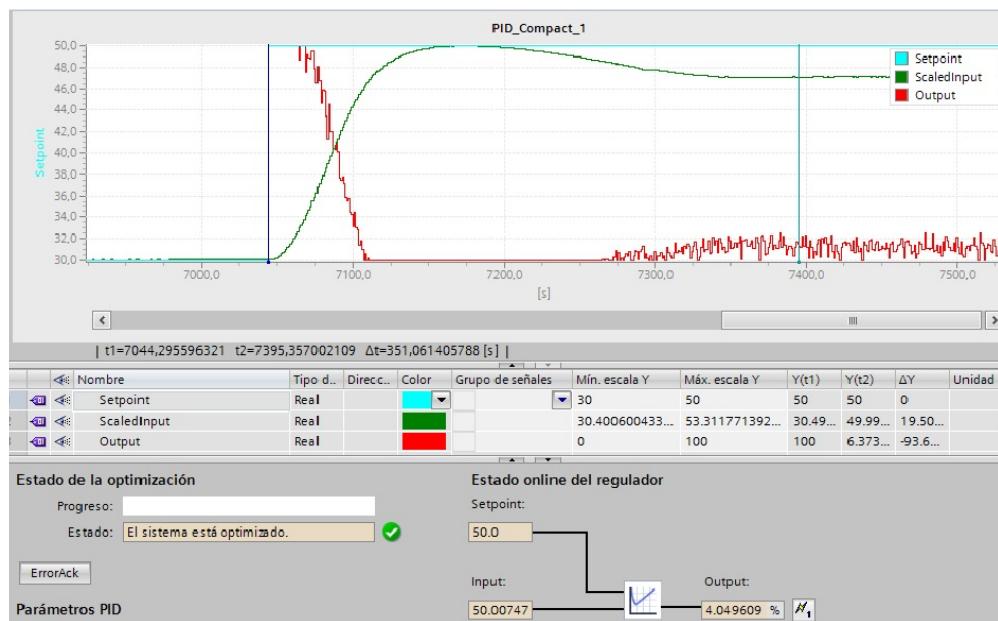


Figura 23 : Optimización para un valor intermedio del setpoint



Figura 24: Optimización para el valor máximo del setpoint

- Variador de velocidad

El variador de frecuencia como se menciona anteriormente, controla el porcentaje de la fase proveniente de la red eléctrica que ingresa al motor, de esta manera se vuelve un controlador para el motor, éste se comunica mediante PROFIBUS al PLC y de esta manera poder controlar el motor trifásico.



Figura 25: Variador Micromaster 440 SIEMENS

A este se ingresan todos los parámetros que son características del motor, de comunicación y eléctricas, estos parámetros y su respectiva función se encuentran en la tabla 1:

Parámetro	Valor	Descripción
P10	30	Ajuste de fábrica
P970	1	Reiniciar valores
P3	3	Usuario experto
P4	0	Todos los parámetros
P918	# = 55	Dirección de la tarjeta
P10	1	Puesta en marcha
P100	1	Sistema americano 60Hz
P304	220	Tensión del motor [V]
P305	1.9	Corriente del motor [A]
P307	0.5	Potencia del motor [HP]
P310	60	Frecuencia del motor [Hz]
P311	1590	Velocidad nominal [RPM]
P700	6	Conexión PROFIBUS
P1000	6	Conexión PROFIBUS
P1080	0	Frecuencia mínima [Hz]
P1082	60	Frecuencia máxima [Hz]
P1120	5	Tiempo a Vel máx [seg]
P1121	2	Tiempo desaceleración[seg]
P2040	#	Tiempo de vigilancia
P3900	x	Cargar la configuración

Tabla 2: Parámetros variador Micromaster 440

Desde el TIA Portal se envían parámetros al variador (palabras) para que cambie el porcentaje de la frecuencia de fase que llega al motor, que es directamente proporcional a la velocidad ejercida por este.

- Servomotor

Para el servomotor, se realiza un control de velocidad al momento en el que la bomba centrífuga se activa, para esto se envía un voltaje analógico al servomotor por la entrada V-REF del driver, el voltaje se envía a través del PLC con el fin de hacer girar el servomotor

a cierta velocidad, ya que en el parámetro Pn300 del servomotor puede configurarse la velocidad mediante el voltaje configurado en este parámetro. Este parámetro se configura desde 0 a 1200 lo cual indica que el motor girará a su velocidad máxima (3000 rpm) a 12V en sentido horario y a -12V en sentido antihorario a su velocidad máxima. Para esta práctica se decide configurar en 1000 ya que el voltaje de salida en este punto del proceso serán 5V y la velocidad a la que gire el eje serán 1500rpm.



Figura 26 : Servomotor YASKAWA Sigma II

**Al final de este documento se encuentra un anexo con el GRAFCET.
ANÁLISIS DE RESULTADOS**

Al realizar la optimización fina a la planta, el software calcula y muestra los valores resultantes del control, como lo son los valores de las ganancias proporcional, integral y derivativa que son características necesarias para realizar un controlador PID.

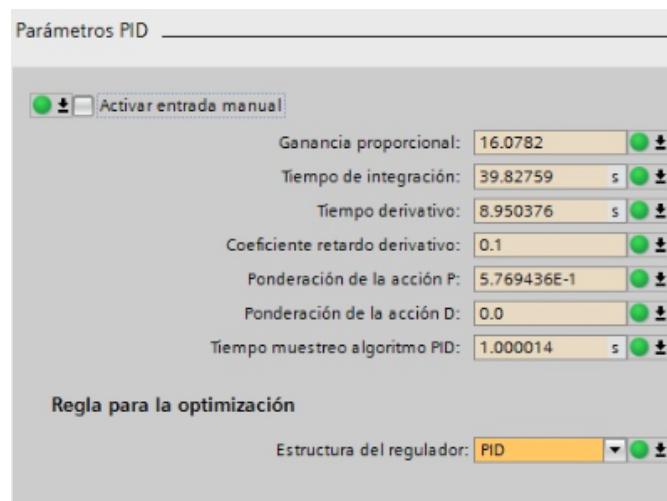


Figura 27: Parámetros del controlador PID para la mufla.

Se obtiene de manera exitosa controlar la planta térmica gracias al bloque PID_Compact incorporado en el PLC.

CONCLUSIONES

En los procesos de refinación es de suma importancia el control de las variables en tiempo real, para eso se debe desarrollar un sistema óptimo de supervisión precisa, para este caso el software WinCC es capaz de comunicar la información requerida de manera deseada. En el control de la planta de petróleo e inclusive simulando este sistema se requiere de un modelo de control preferiblemente sin error en el offset y que sea capaz de tener un tiempo de respuesta rápido.

REFERENCIAS

- [1]J. Mondragón, “Refinación del petróleo”, Universidad Nacional Autónoma de México UNAM, Cuautitlán, 1994.
- [2]G. Falco, C. Caldera, H. Shroobe, “ IIoT Cybersecurity Risk Modelling of SCADA Systems”, IEEE Internet of Things Journal, 2018.
- [3]F. Durrani, M. Riaz, M. Hamza, S. Durrani, H. Ali, “SCADA & PLC based fully automated pneumatic cutting machine: A test bench for industry and laboratory”, IEEE International Conference on Engineering and Emerging technologies, 2018.
- [4]¿Qué es un variador de frecuencia? ABB
<http://new.abb.com/drives/es/que-es-un-variador>
- [5]Manual técnico: Micromaster 440 Instrucciones de uso.
- [6]Asociación de industria eléctrica AIE de Chile, ABC de la automatización, Servomotores.

<http://www.aie.cl/files/file/comites/ca/abc/Servomotores.pdf>

[7]Continuously Stirred Tank Reactor, Nonlinear Models, Mathworks.

<http://apmonitor.com/wiki/index.php/Apps/StirredReactor>

[8]F. Franco, “ Filtros analógicos”, Electrónica analógica, Universidad Complutense de Madrid UCM
https://cv3.sim.ucm.es/access/content/group/portal-uatducma-43/webs/material_original/apuntes/PDF/09_filtros_analogicos.pdf

[9]Measurement of a RTD PT100 to an analog input.

<http://www.absolutelyautomation.com/articles/2016/02/09/temperature-measurement-rtd-pt100-4-20ma-transmitter-and-arduino>

[10] Siemens Manual User for PID on PLC S7-1500. (Available on)

https://cache.industry.siemens.com/dl/files/036/108210036/att_896030/v1/s71500_pid_control_function_manual_enUS_en-US.pdf

[11] Siemens Manual User for Micromaster 440. (Available on)

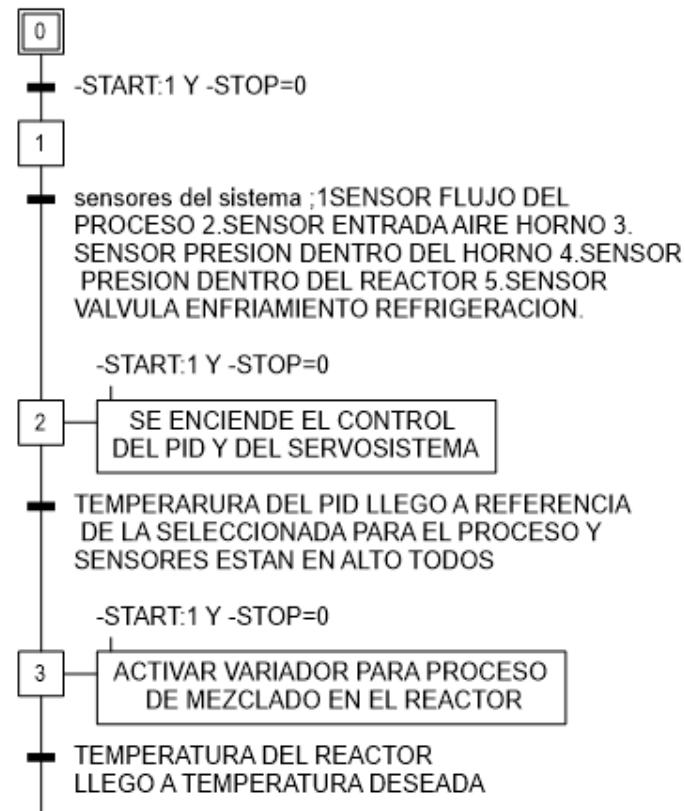
https://cache.industry.siemens.com/dl/files/204/23708204/att_60463/v1/440_PLI_23708204_en_0106.pdf

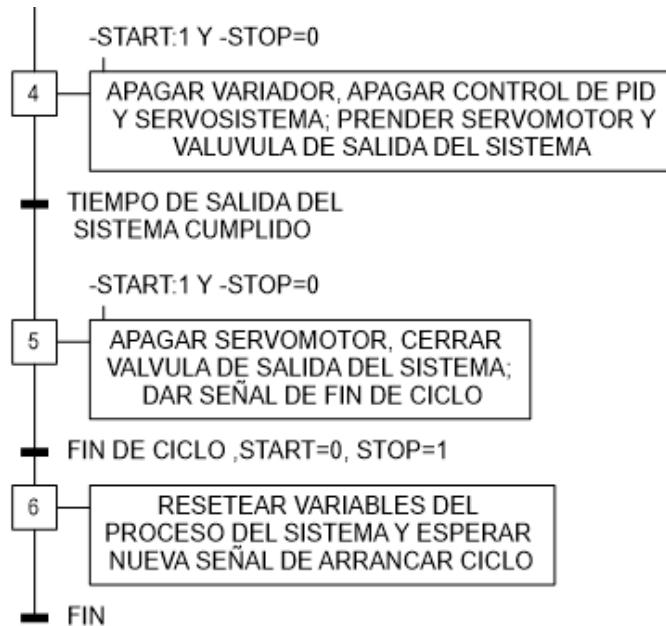
[12] Siemens Manual User for Temperature Sensor PT100. (Available on)

<https://sid.siemens.com/v/u/20052>

ANEXO

- GRAFCET NIVEL 1





NIVEL 2

I_D	
I0.0	PARADA DE EMERGENCIA
I0.1	START
I0.2	STOP
I0.3	SENSOR FLUJO DEL PROCESO
I0.4	SENSOR ENTRADA AIRE HORNO
I0.5	SENSOR NIVEL DENTRO DEL HORNO
I0.6	SENSOR NIVEL DENTRO DEL REACTOR
I0.7	SENSOR VALVULA ENFRIAMIENTO REFR

Q_D	
Q0.0	SEÑAL DE CONTROL TEMPERATURA VALVULA DE COMBUSTIBLE (T_C_HORNO)
Q0.1	VALVULA BOMBA SALIDA SISTEMA
Q0.2	SEÑAL DE ACTIVACION DE VARIADOR
Q0.3	VALVULA REFRIGERANTE
Q0.4	VALVULA BOMBA CENTRIFUGA
Q0.5	VALIZA VERDE
Q0.6	VALIZA AMARILLA
Q0.7	VALIZA ROJA

I_A		
IA0	IW2	TH(PT100)
IA1	IW4	TR(SALIDA INTEGRADO)
IA2	IW6	
IA3	IW8	

Q_A		
QA0	QW2	SEÑAL DE CONTROL REACTOR
QA1	QW4	BOMBA CENTRIFUGA (SERVOMOTOR)