

**Comparación del desempeño de un Predictor de Smith frente a un PID convencional  
en la planta de fabricación de kumis del PIAI**



Anexos de monografía presentados como requisito parcial para optar por el título de  
Ingeniera en Automática Industrial

**Lucy Elena Gómez Chicue**

Director:

Msc. Francisco Franco Obando Díaz

Asesor de la empresa:

Msc. Vladimir Trujillo Arias

Coordinador de laboratorios

Universidad del Cauca

**Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones**

**Ingeniería en Automática Industrial**

Popayán, 2022

**Comparación del desempeño de un Predictor de Smith frente a un PID convencional  
en la planta de fabricación de kumis del PIAI**

Monografía presentada como requisito parcial para optar por el título de  
Ingeniera en Automática Industrial

**Lucy Elena Gómez Chicue**

Universidad del Cauca

**Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones**

**Ingeniería en Automática Industrial**

Popayán, 2022

## Contenido

Anexo A.....	7
Encendido y puesta en marcha de la planta virtual de fabricación de kumis .....	7
Anexo B.....	21
B.1    Identificación del modelo del proceso para el intercambiador de aumento de temperatura .....	21
B.2    Identificación del modelo del proceso para el intercambiador de disminución de temperatura .....	25
B.3    Sintonización de PID convencional con diferentes métodos de sintonización para el intercambiador de aumento de temperatura .....	30
B.4    Sintonización de PID convencional con diferentes métodos de sintonización para el intercambiador de disminución de temperatura .....	32
Anexo C.....	34
Discretización de funciones de transferencia que representan el comportamiento dinámico de los intercambiadores de calor .....	34
C.1    Discretización del modelo del proceso para la etapa de aumento de temperatura.....	35
C.2    Discretización del modelo del proceso para la etapa de disminución de temperatura.....	42
Bibliografía.....	50

## Lista de tablas

Tabla 1 .....	9
Tabla 2 .....	21
Tabla 3 .....	22
Tabla 4.....	26
Tabla 5 .....	26
Tabla 6.....	30
Tabla 7 .....	31
Tabla 8.....	32
Tabla 9.....	33

## Lista de figuras


Figura 1 Ingreso a la máquina virtual Planta virtual Cadsim - Plus .....	7
Figura 2. Encendido del PLC ControlLogix 1756-L61 .....	8
Figura 3. Conexión del cable Ethernet entre el PLC y el computador #3. ....	8
Figura 4. Dirección IP asignada al Host real .....	9
Figura 5. Dirección IP asignada al Host virtual.....	10
Figura 6. Pasos para la creación del canal de comunicaciones entre el Host virtual y el PLC .....	11
Figura 7. Canal de comunicación creado.....	12
Figura 8. Prueba de envío de datos desde el Host virtual hacia el PLC .....	13
Figura 9. Prueba de envío de datos desde el Host real hacia el Host virtual .....	13
Figura 10. Selección del archivo ejecutable de la lógica de control.....	14
Figura 11. Pasos para descargar la lógica de control de la planta de fabricación de kumis al PLC.....	15
Figura 12. Abrir KepserverEx .....	15
Figura 13. Importación de las Tags creadas guardadas en RSlogix 5000. ....	16
Figura 14. Abrir la llave de seguridad para su activación .....	17
Figura 15. Activación de la llave de seguridad de Cadsim Plus.....	17
Figura 16. Archivo que contiene los intercambiadores de calor .....	18
Figura 17. Planta virtual de fabricación de kumis .....	18
Figura 18. Correr la planta de fabricación de kumis de Cadsim Plus .....	19
Figura 19. Cliente Factory Talk View .....	19
Figura 20. Ventana principal para la identificación del modelo de los intercambiadores de calor .....	19
Figura 21 Porcentaje de apertura de la válvula TCV 201_1 del intercambiador de calor 1.	22
Figura 22 Temperatura de salida del intercambiador de calor 1 obtenida en la prueba escalón .....	23
Figura 23. Diagrama de bloques de modelo FOPDT obtenido para el intercambiador de calor 1 .....	24

Figura 24. Validación del modelo FOPDT obtenido para el intercambiador de calor 1 .....	25
Figura 25 Porcentaje de apertura de la válvula TCV 202 – 1.....	27
Figura 26 Temperatura de salida del intercambiador 2 obtenida con la prueba escalón .....	27
Figura 27. Diagrama de bloques de modelo FOPDT para el intercambiador 2 .....	29
Figura 28. Validación del modelo FOPDT obtenido para el intercambiador de calor 2 .....	29
Figura 29. Diagrama de bloques de lazo cerrado para pruebas de sintonización del PID convencional.....	30
Figura 30 Respuesta de la temperatura mediante el método sintonización de CHR .....	31
Figura 31 Respuesta de la temperatura mediante el método de López et Al.....	31
Figura 32 Respuesta de la temperatura mediante el método de Lambda .....	32
Figura 33 Respuesta mediante el método sintonización de CHR.....	33
Figura 34 Respuesta mediante el método de López Et Al.....	33
Figura 35 Respuesta mediante el método de Lambda .....	33
Figura 36 Implementación discreta del predictor de Smith.....	34
Figura 37 Discretización de la función de transferencia en Matlab/Simulink .....	37
Figura 38 Función de transferencia en tiempo discreto obtenida para la etapa de aumento de temperatura .....	37
Figura 39 Predictor de Smith discreto de la etapa de aumento de temperatura.....	38
Figura 40 Discretización de la función de transferencia de disminución de temperatura en Matlab/Simulink .....	43
Figura 41 Función de transferencia en tiempo discreto obtenida para la etapa de disminución de temperatura.....	44
Figura 42 Predictor de Smith discreto de la etapa de disminución de temperatura.....	45

## Anexo A

### Encendido y puesta en marcha de la planta virtual de fabricación de kumis

En [1] se presentan los pasos para poner en funcionamiento la planta virtual de fabricación de kumis, estos pasos se describen a continuación.

1. Primero, encender el computador N°3 del laboratorio de control de procesos, en este reposa la máquina virtual.
2. Abrir la máquina virtual desde el software VMWare Work Station Pro  ubicado en el escritorio del computador N°3 y seleccionar Máquina Planta virtual – CadSim Plus, dar clic en la opción “RUN”, y de este modo se enciende la máquina virtual. Posteriormente digitar la contraseña “YOGURT” en el usuario YOGURES DE COLOMBIA y finalmente dar clic en la opción continuar, ver figura 1.

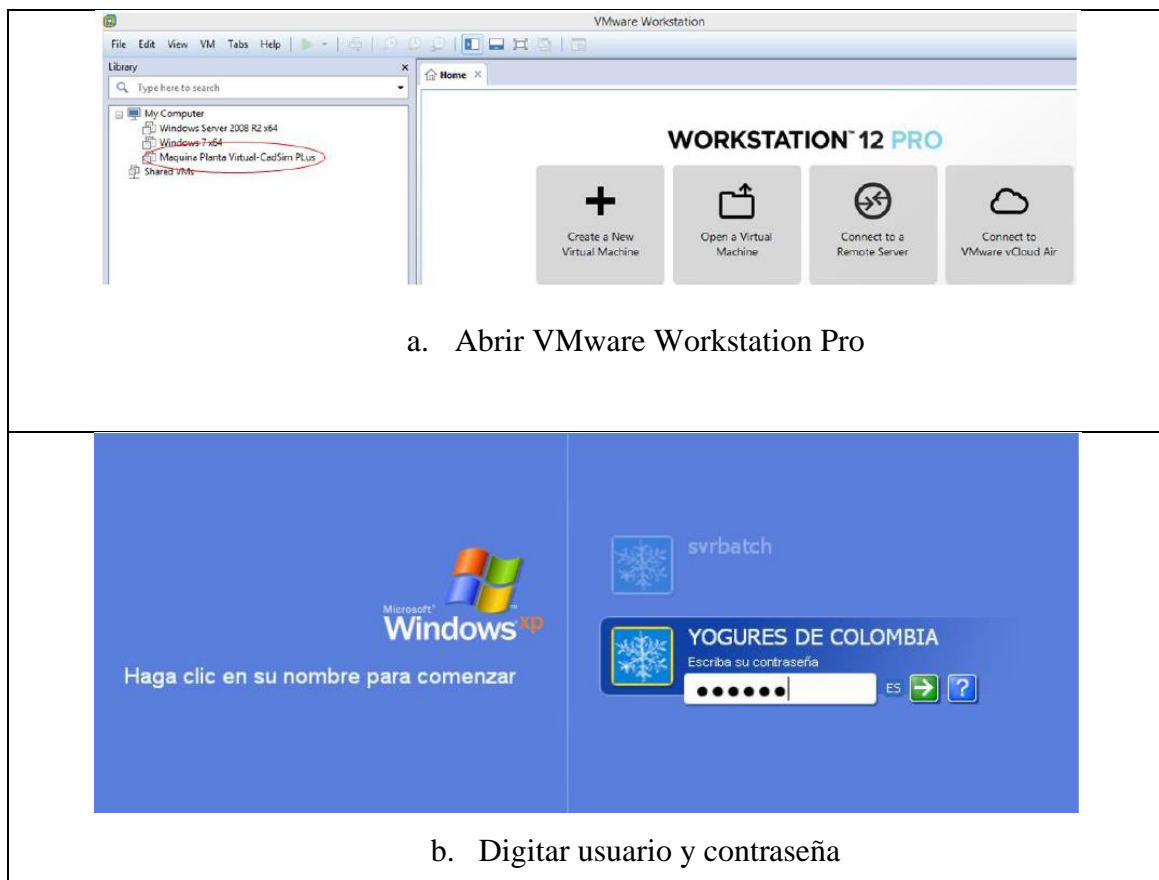


Figura 1 Ingreso a la máquina virtual Planta virtual Cadsim - Plus

3. Encender el PLC ControlLogix 1756-L61 de Allen Bradley, para esto se conecta a la alimentación a través de la toma de corriente, cerrar el breaker, la fuente de alimentación debe estar activada y el PLC debe encontrarse en modo “Remote”. Una vez encendido se debe encender también el bombillo piloto N°1 en el panel de control, el procesador, la fuente de alimentación y el módulo Ethernet/IP 1756/ENBT, como se muestra en la figura 2.

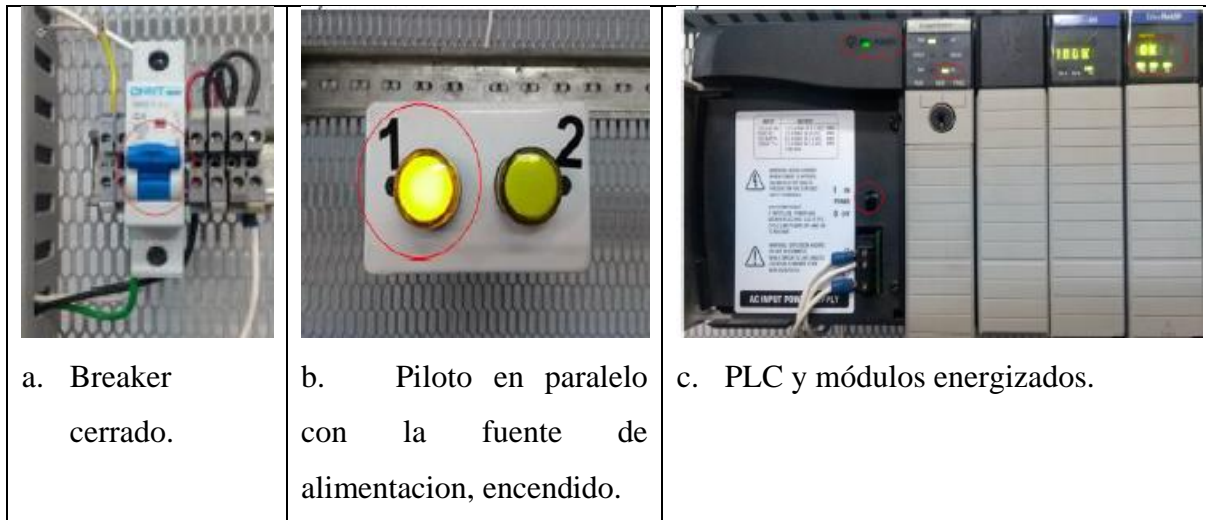


Figura 2. Encendido del PLC ControlLogix 1756-L61

4. Conectar el cable Ethernet entre el computador N°3 y el PLC ControlLogix 1756-L61, ver figura 3.

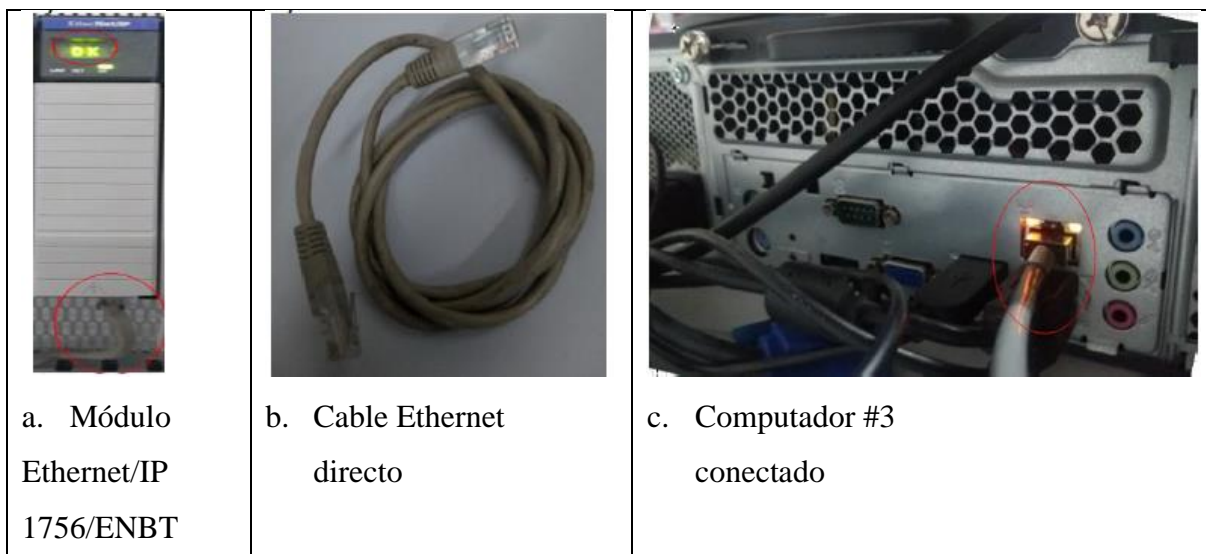


Figura 3. Conexión del cable Ethernet entre el PLC y el computador #3.



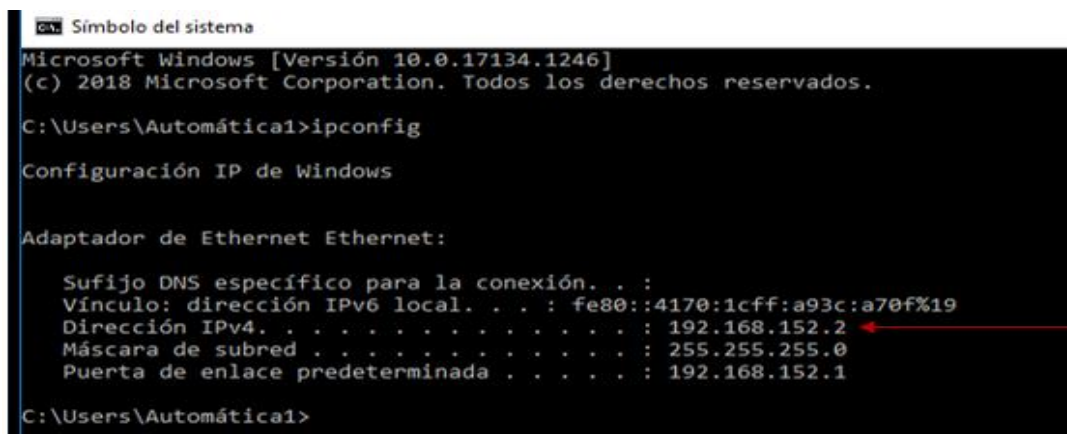
5. Verificar que las direcciones IP del Host real, Host virtual y del módulo Ethernet/IP 1756/ENBT coincidan con la tabla 1.

**Tabla 1**

*Direcciones IP del Host real, Host virtual y el módulo Ethernet/IP 1756/ENBT*

Equipo	IP	MASK	GATEWAY
Host real	192.168.152.2	255.255.255.0	192.168.152.1
Host virtual	192.168.152.3	255.255.255.0	192.168.152.1
Módulo Ethernet/IP 1756/ENBT	192.168.152.4	255.255.255.0	192.168.152.1

Para verificar la IP del Host real se va a la pestaña de inicio del computador N°3 y se digita el comando .cmd o símbolo del sistema, dentro de esta ventana se digita el comando ipconfig y en la información sobre el adaptador Ethernet se observa la IP asignada y la puerta de enlace, como se muestra en la figura 4.



```

C:\Users\Automática1>ipconfig

Configuración IP de Windows

Adaptador de Ethernet Ethernet:

    Sufijo DNS específico para la conexión. . . :
    Vínculo: dirección IPv6 local. . . . . : fe80::4170:1cff:a93c:a70f%19
    Dirección IPv4. . . . . : 192.168.152.2
    Máscara de subred . . . . . : 255.255.255.0
    Puerta de enlace predeterminada . . . . . : 192.168.152.1

C:\Users\Automática1>
  
```

Figura 4. Dirección IP asignada al Host real

De igual manera se realiza este procedimiento en la máquina virtual VMware para comprobar que la IP del Host virtual coincida con la tabla 1.

```

C:\Documents and Settings\YOGURES DE COLOMBIA>ipconfig

Configuración IP de Windows

Adaptador Ethernet Conexión de área local :
    Sufijo de conexión específica DNS :
    Dirección IP. . . . . : 192.168.152.3
    Máscara de subred : : : : : 255.255.255.0
    Puerta de enlace predeterminada : 192.168.152.1


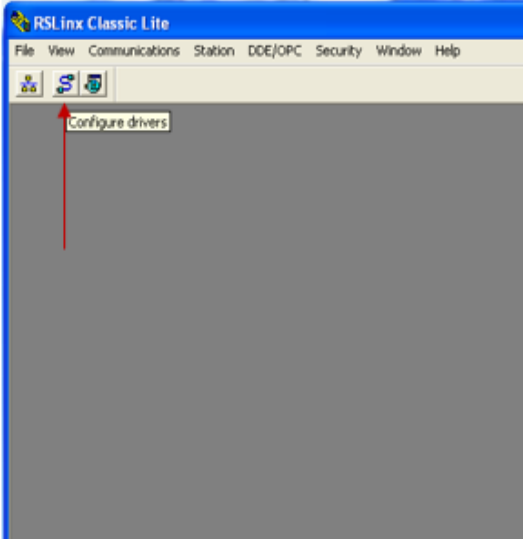
C:\Documents and Settings\YOGURES DE COLOMBIA>_

```

Figura 5. Dirección IP asignada al Host virtual

Finalmente se verifica en el módulo Ethernet/IP 1756/ENBT que la IP asignada a este coincida con la tabla 1.

6. Crear el canal de comunicación entre el PLC y el Host virtual, de la siguiente manera:  
Se abre RSLinx Classic para configurar una red Ethernet/IP Driver con el nombre Ethernet\_1 y adaptador Ethernet PCI AMD PCET 192.168.152.3.

 <p>a) Abrir RSLinx Classical</p>	 <p>b. Ir a la opción configure Drivers.</p>
---	---

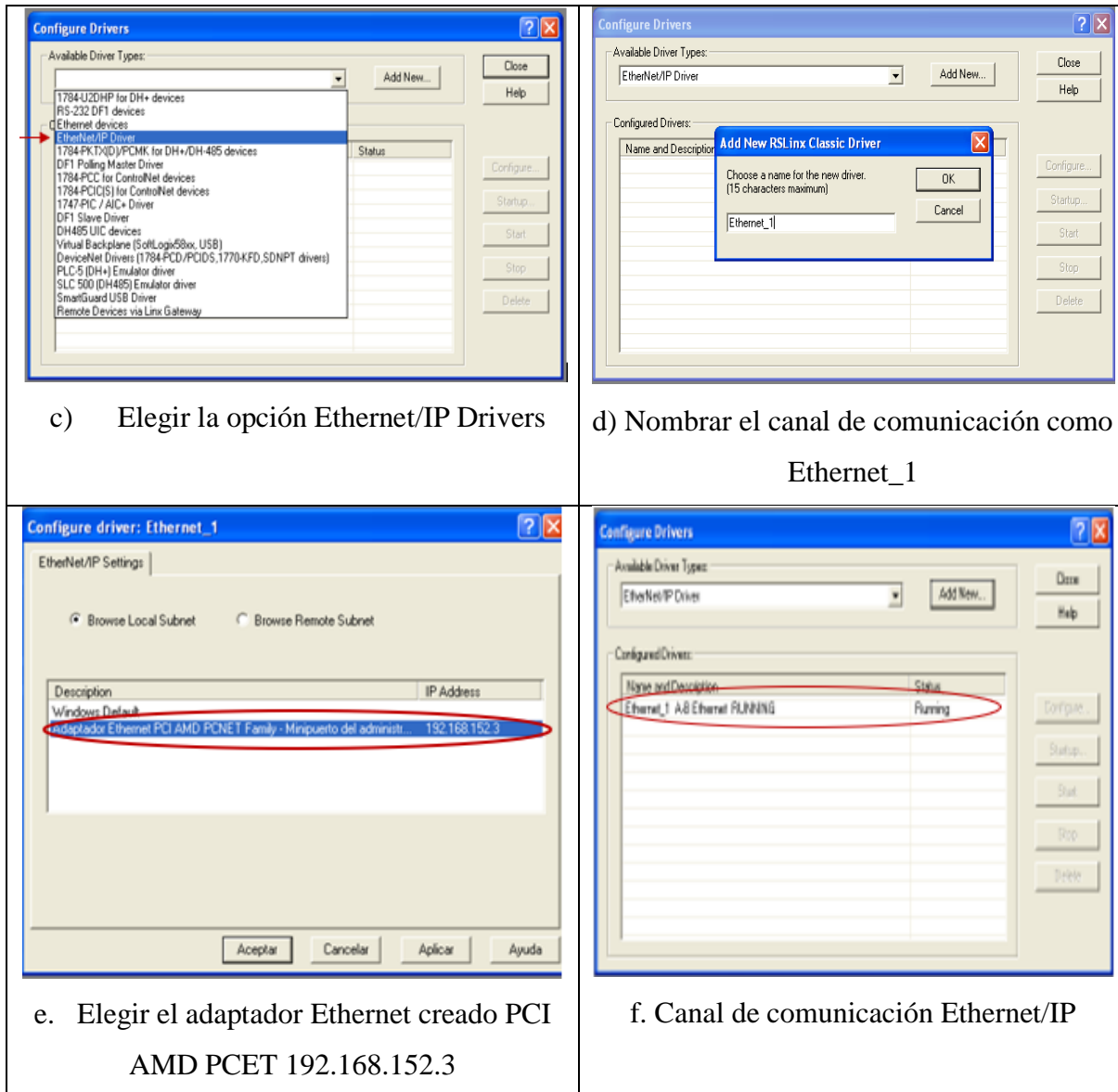


Figura 6. Pasos para la creación del canal de comunicaciones entre el Host virtual y el PLC

Si quedo bien configurado el canal de comunicación entonces se debe poder desplegar del árbol de trabajo los elementos conectados al PLC, ver figura 7.

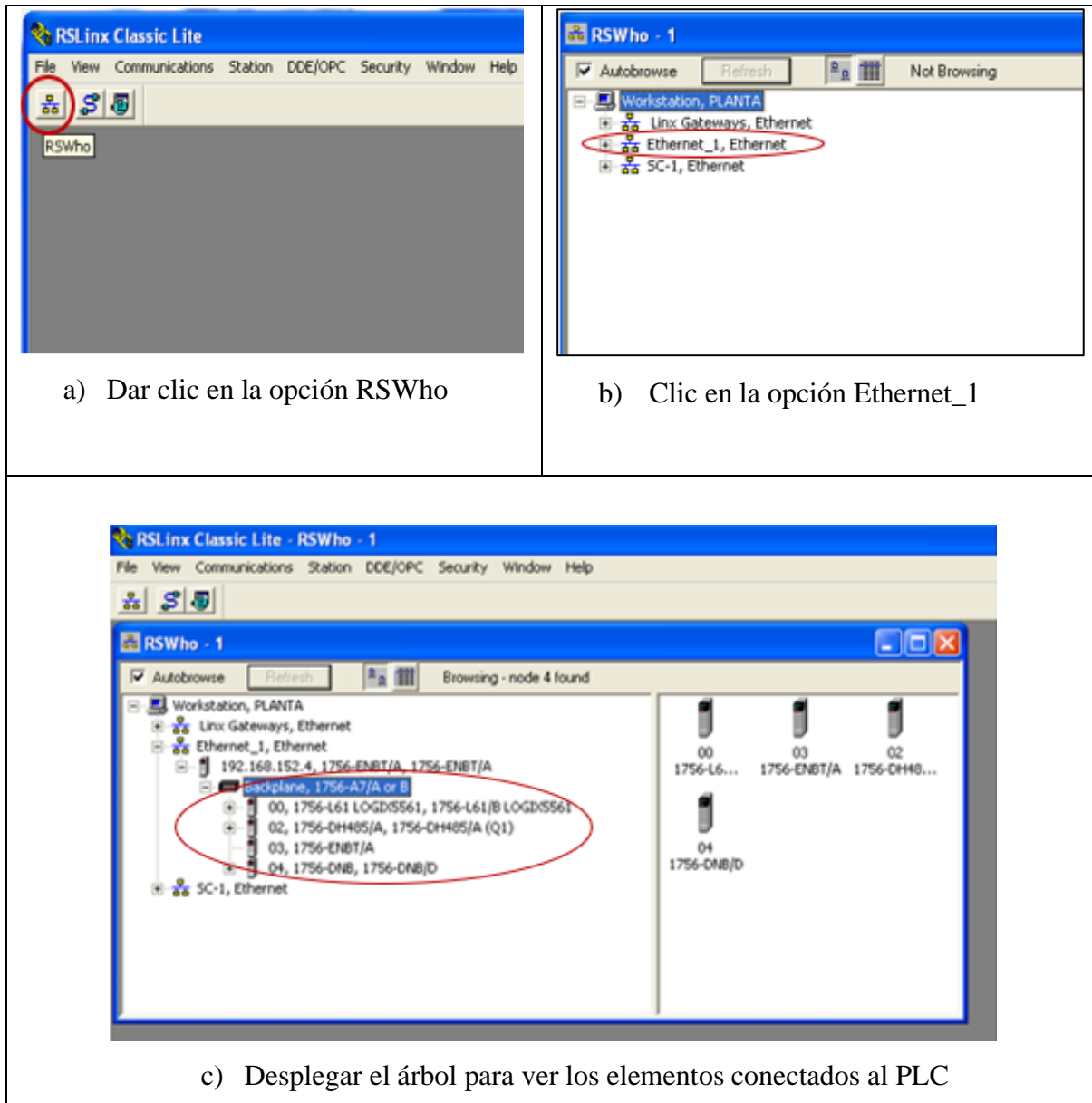


Figura 7. Canal de comunicación creado

7. Para verificar que hay comunicación entre los distintos dispositivos, se realiza una prueba de envío de datos entre el Host virtual, el Host real y el PLC, de la siguiente manera:
  - Para hacer una prueba de envío de datos desde el Host virtual hacia el PLC, se va a la pestaña de inicio en el Host virtual y se digita el comando .cmd o símbolo del sistema y una vez allí se digita “PING 192.168.152.4” y se oprime el botón Enter, ver figura 8.

```

Símbolo del sistema
Microsoft Windows XP [Versión 5.1.2600]
(C) Copyright 1985-2001 Microsoft Corp.

C:\Documents and Settings\YOGURES DE COLOMBIA>PING 192.168.152.4

Haciendo ping a 192.168.152.4 con 32 bytes de datos:

Respuesta desde 192.168.152.4: bytes=32 tiempo=6ms TTL=64
Respuesta desde 192.168.152.4: bytes=32 tiempo=1ms TTL=64
Respuesta desde 192.168.152.4: bytes=32 tiempo=1ms TTL=64
Respuesta desde 192.168.152.4: bytes=32 tiempo<1m TTL=64

Estadísticas de ping para 192.168.152.4:
    Paquetes: enviados = 4, recibidos = 4, perdidos = 0
    (0% perdidos),
    Tiempos aproximados de ida y vuelta en milisegundos:
        Mínimo = 0ms, Máximo = 6ms, Media = 2ms

C:\Documents and Settings\YOGURES DE COLOMBIA>

```

Figura 8. Prueba de envío de datos desde el Host virtual hacia el PLC

- Luego se realiza el envío de datos desde host real hacia el host virtual, para esto se va a la pestaña de inicio del Host real y se digita el comando .cmd o símbolo del sistema y una vez allí se digita “PING 192.168.152.3” y se oprime el botón Enter, ver figura 9.

```

Símbolo del sistema
Microsoft Windows [Versión 10.0.17134.1246]
(c) 2018 Microsoft Corporation. Todos los derechos reservados.

C:\Users\Automática1>ping 192.168.152.3

Haciendo ping a 192.168.152.3 con 32 bytes de datos:

Respuesta desde 192.168.152.3: bytes=32 tiempo<1m TTL=128
Respuesta desde 192.168.152.3: bytes=32 tiempo<1m TTL=128
Respuesta desde 192.168.152.3: bytes=32 tiempo<1m TTL=128
Respuesta desde 192.168.152.3: bytes=32 tiempo<1m TTL=128

Estadísticas de ping para 192.168.152.3:
    Paquetes: enviados = 4, recibidos = 4, perdidos = 0
    (0% perdidos),
    Tiempos aproximados de ida y vuelta en milisegundos:
        Mínimo = 0ms, Máximo = 0ms, Media = 0ms

C:\Users\Automática1>

```

Figura 9. Prueba de envío de datos desde el Host real hacia el Host virtual

Con esto se verifica que la conexión entre el Host real, el Host virtual y el PLC fue exitosa.

8. Posteriormente se ingresa a la carpeta llamada Planta de Kumis que se encuentra ubicada en el escritorio del computador N°3, se va a la carpeta llamada planta de kumis identificación y se ingresa a la carpeta RSLogix 5000, en esta se encuentra ubicado el

archivo denominado “Planta\_de\_Kumis\_Ident.ACD”, y se da doble clic para abrir, ver figura 10.

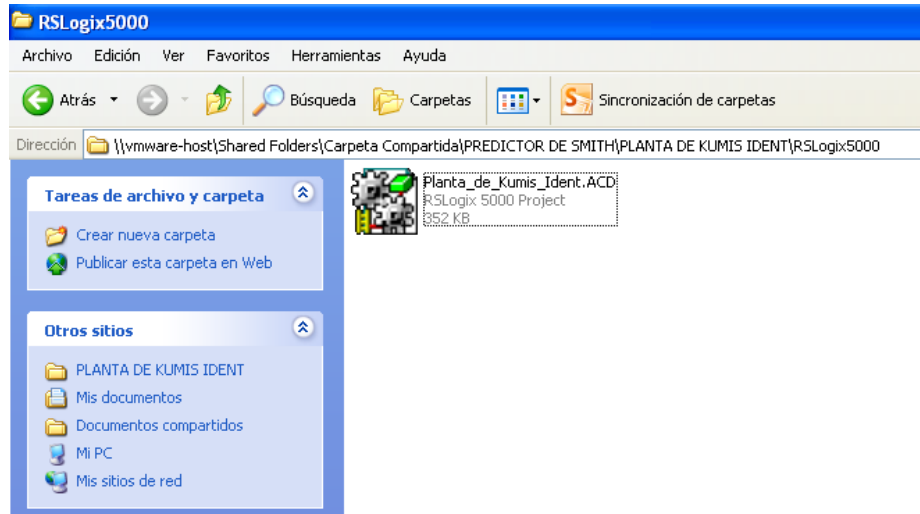


Figura 10. Selección del archivo ejecutable de la lógica de control

9. Se despliega el programa RSLogix 5000 donde reposa la prosa lógica de control de la planta de fabricación de kumis y se procede a descargarla en el PLC de la siguiente manera, ver los pasos en la figura 11.



a) Clic en la pestaña Communications, y luego dar clic en la opción Who Active

b) Se selecciona el procesador Logix5561 y luego dar clic en la opción Download

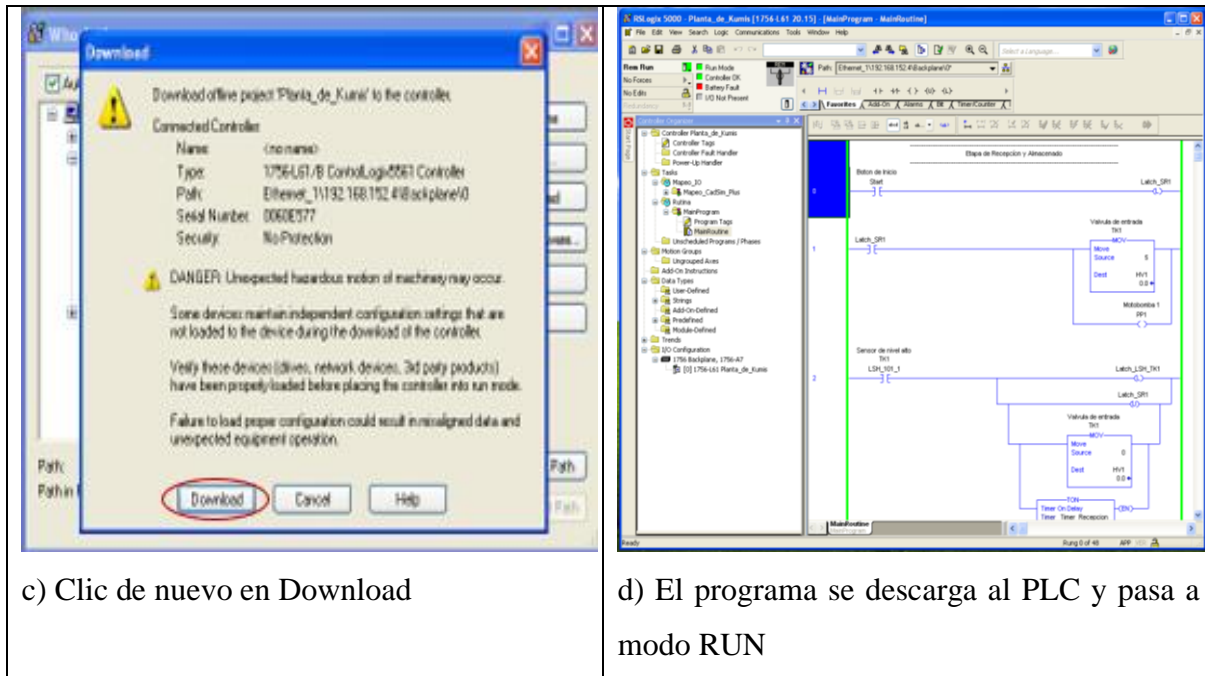


Figura 11. Pasos para descargar la lógica de control de la planta de fabricación de kumis al PLC

10. Ahora se procede a abrir el software KEPServerEX ubicado en el escritorio de la máquina virtual, los pasos a seguir se observan a continuación.

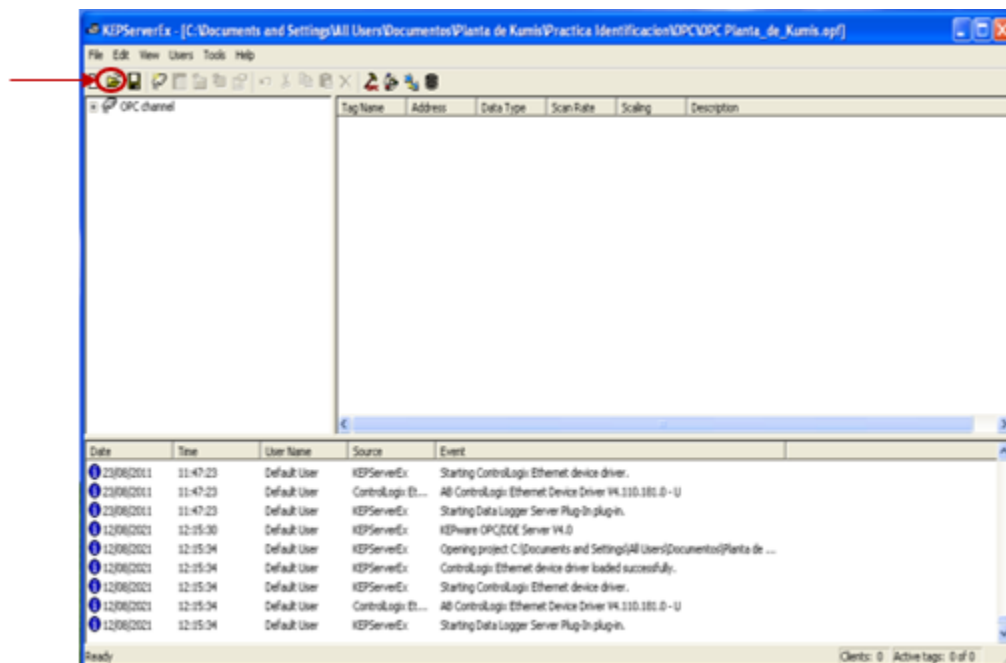
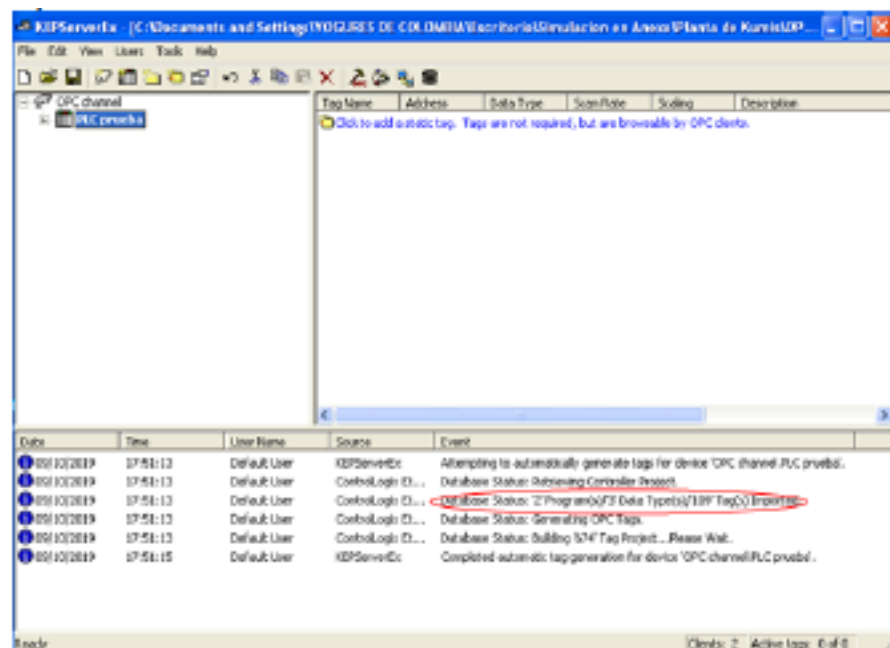
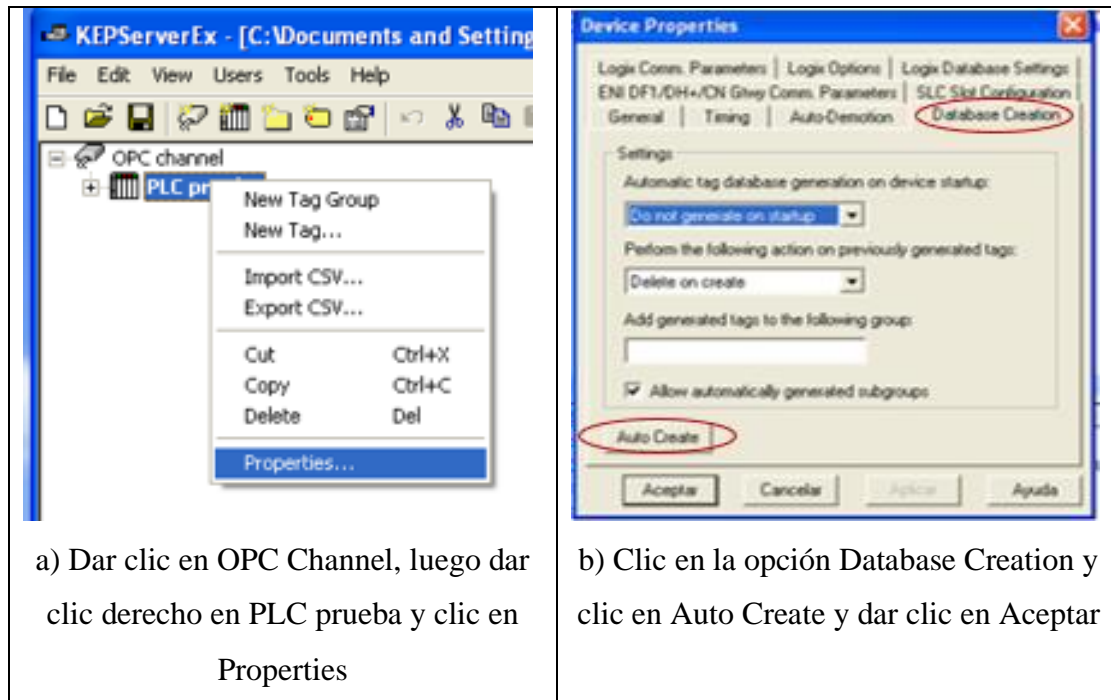


Figura 12. Abrir KepserversEx

Dar clic en la opción abrir y ubicar la carpeta planta de kumis, luego abrir la carpeta práctica de identificación y posteriormente abrir la carpeta OPC, para seleccionar el archivo OPC Planta\_de\_Kumis.opf. Luego se procede a importar las tags creadas en RSlogix 5000, ver los pasos a continuación.



c) Vinculación de KepserverEx con RSlogix 5000

Figura 13. Importación de las Tags creadas guardadas en RSlogix 5000.



11. Luego se debe activar la llave de seguridad de CadSim Plus, ver pasos en la figura 14.

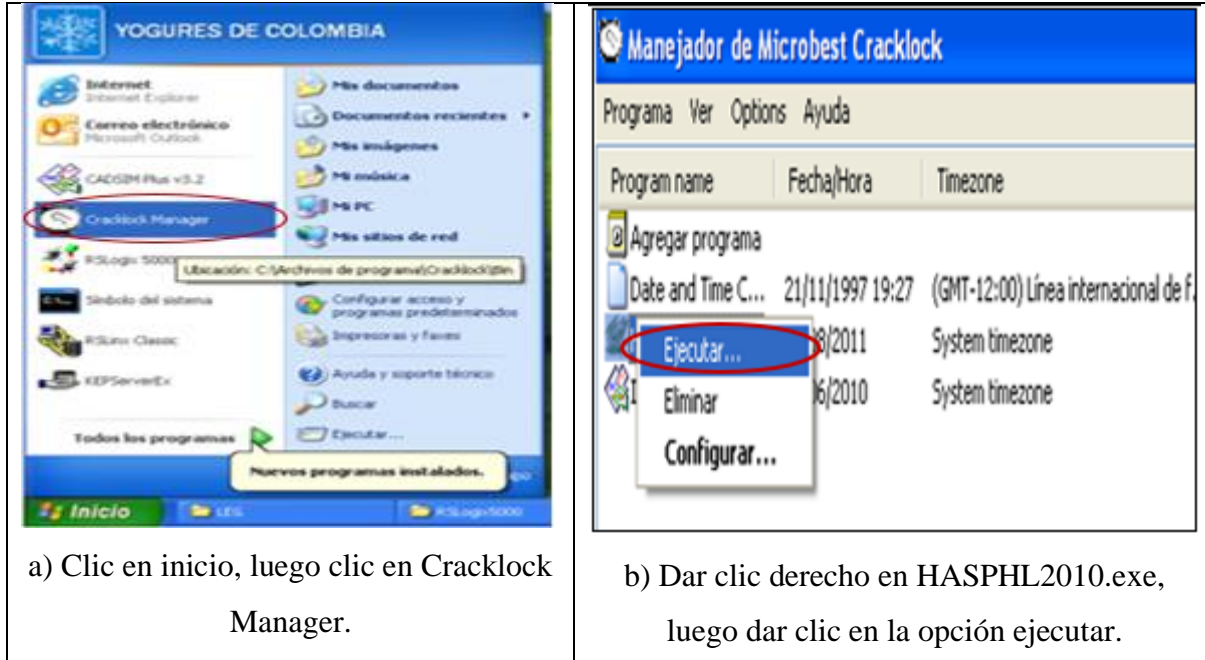


Figura 14. Abrir la llave de seguridad para su activación

12. Luego se despliega el asistente para seleccionar la llave de seguridad, ver los pasos en la figura 15.



Figura 15. Activación de la llave de seguridad de Cadsim Plus

Nota: Las ventanas anteriores no deben cerrarse, se pueden mantener minimizadas.

13. Abrir el archivo de Cadsim Plus para realizar la prueba de identificación, para esto ir a la carpeta planta de kumis, luego ir a la carpeta práctica de identificación y seleccionar y abrir el archivo denominado planta de kumis enlace OPC.dra, ver figura 16.

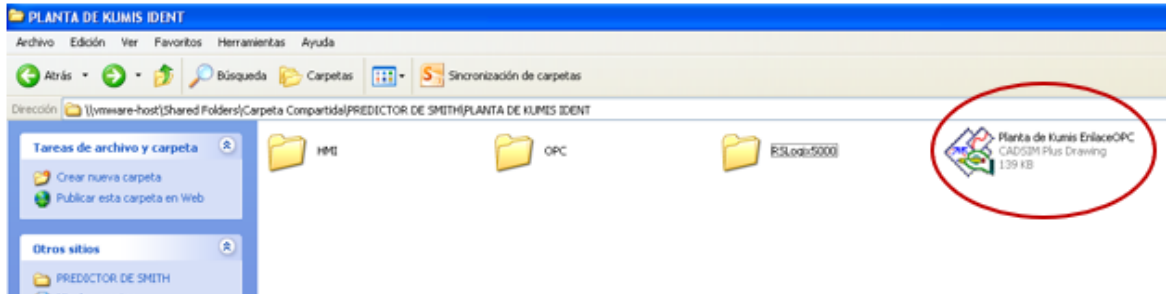


Figura 16. Archivo que contiene los intercambiadores de calor

- Si la llave de seguridad quedó activada se abre el archivo que contiene la planta virtual de fabricación de kumis con la cual se realizará la identificación del proceso, ver figura 17.

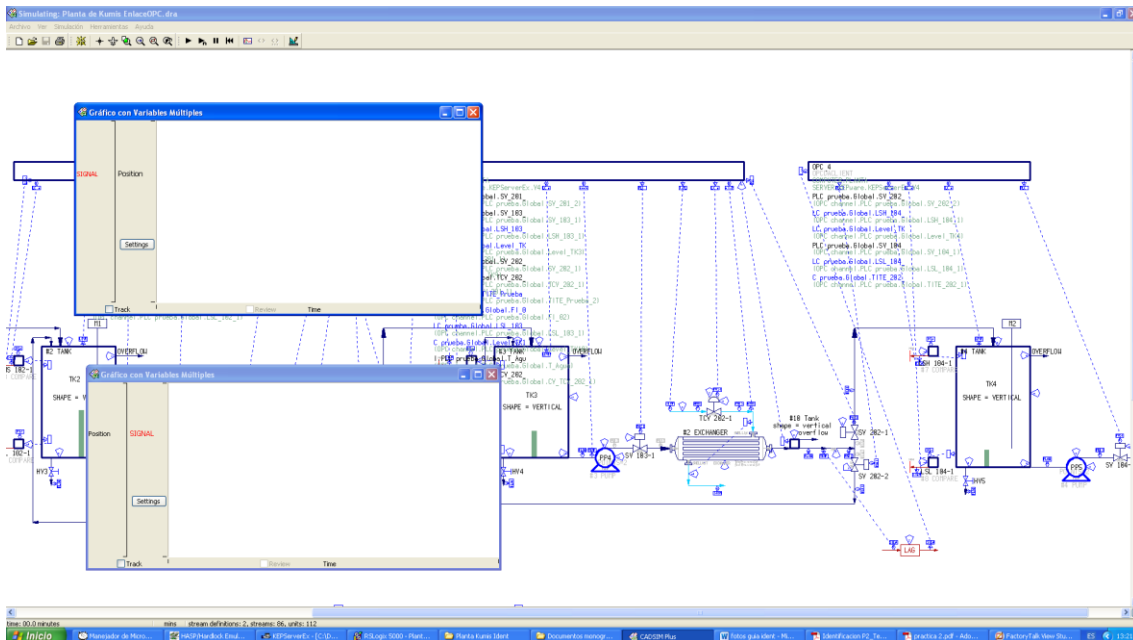



Figura 17. Planta virtual de fabricación de kumis

- En este punto se procedió a dar clic en el icono especificar y simular  para pasar al modo de simulación.

14. Luego correr la planta virtual de Cadsim Plus dando clic sobre el icono Run para que la planta empiece a correr.



Figura 18. Correr la planta de fabricación de kumis de Cadsim Plus

15. Para abrir el HMI de la planta, ir a la carpeta planta de kumis, entrar a la carpeta práctica de identificación, dar doble clic a la carpeta llamada HMI y luego ejecutar el cliente Factory talk view llamado planta\_kumis\_Ident, ver figura 19.

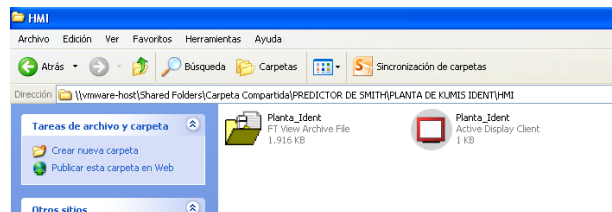


Figura 19. Cliente Factory Talk View

Finalmente se despliega la interfaz que está conformada por una ventana principal donde se visualiza el proceso de fabricación de kumis y en la parte de abajo se encuentran dos botones para acceder a las ventanas de tendencias de los intercambiadores de calor de aumento y disminución de temperatura.

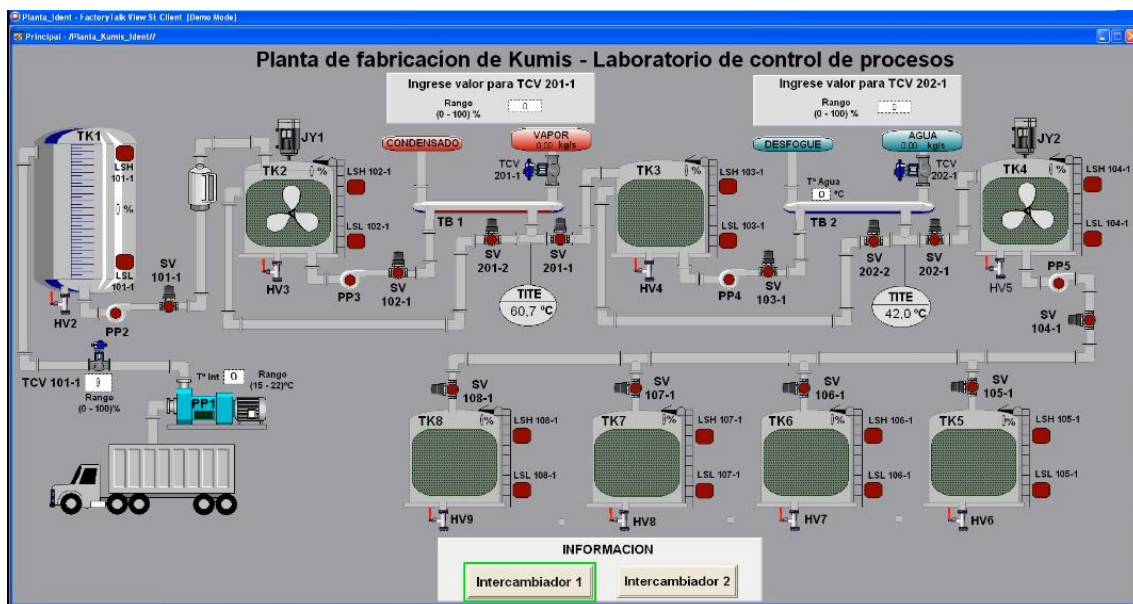


Figura 20. Ventana principal para la identificación del modelo de los intercambiadores de calor

En párrafos anteriores se describió el encendido y puesta en marcha de la planta de fabricación de kumis con lo cual se tuvo un acercamiento a como está conformada la planta virtual, de aquí en adelante el documento se enfoca en describir los pasos necesarios para obtener los datos entrada-salida de los intercambiadores de calor con los que posteriormente será realizada la identificación del modelo del proceso bajo estudio.

## Anexo B

### B.1 Identificación del modelo del proceso para el intercambiador de aumento de temperatura

Para identificar el modelo del proceso del intercambiador de calor de aumento de temperatura en la planta de fabricación de kumis por el método de la curva de reacción, en primer lugar, se realizó la obtención de los datos entrada – salida del proceso, para esto se asignaron las condiciones iniciales del sistema para que la planta se ubicara en un punto de equilibrio y posteriormente se generó un escalón a la entrada (apertura de la válvula TCV 201-1) y se esperó hasta que el sistema se estabilizara nuevamente en un valor constante, las condiciones iniciales se fijaron dentro de los siguientes rangos, ver tabla 2.

**Tabla 2**

*Condiciones iniciales para la prueba escalón del intercambiador de calor de aumento de temperatura*

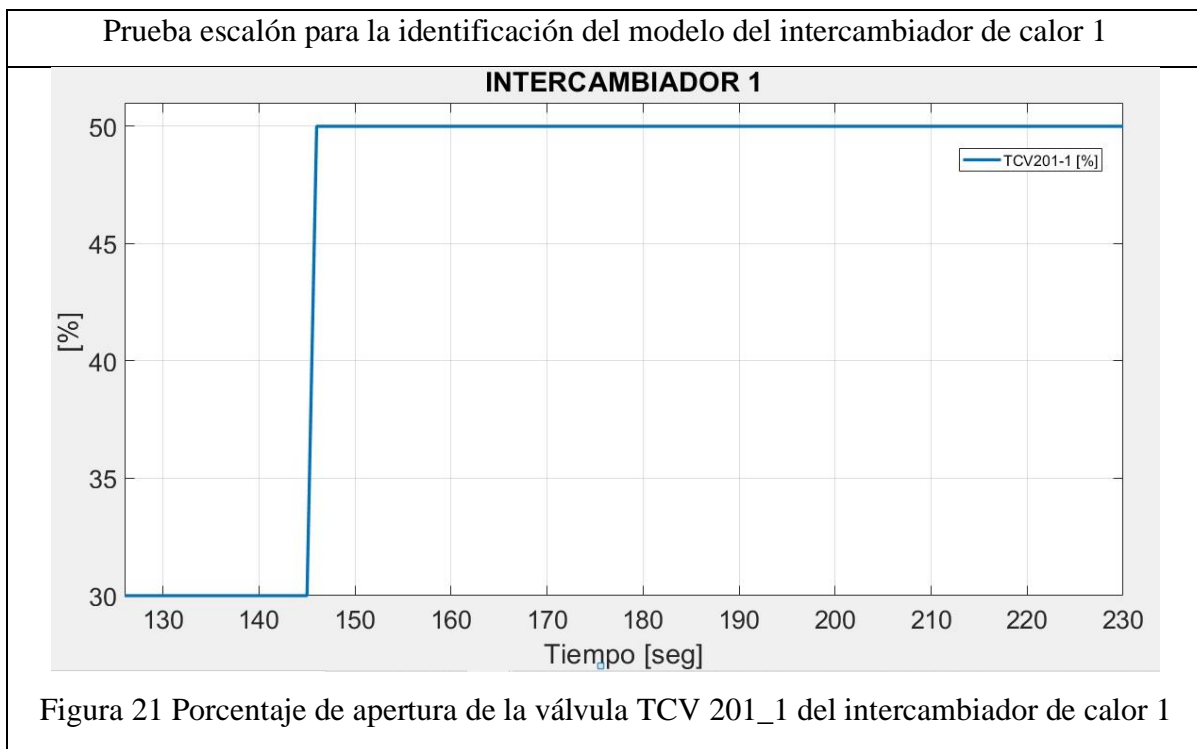
Tag	Rango	Condición inicial asignada	Unidad	Descripción
T_Int	15 – 22	18	°C	Temperatura de entrada de materia prima.
HV 101_1	0 – 100	100	%	Porcentaje de apertura de la válvula HV 101-1.
TCV 201_1	0 – 30	30	%	Porcentaje de apertura de la válvula TCV 201-1

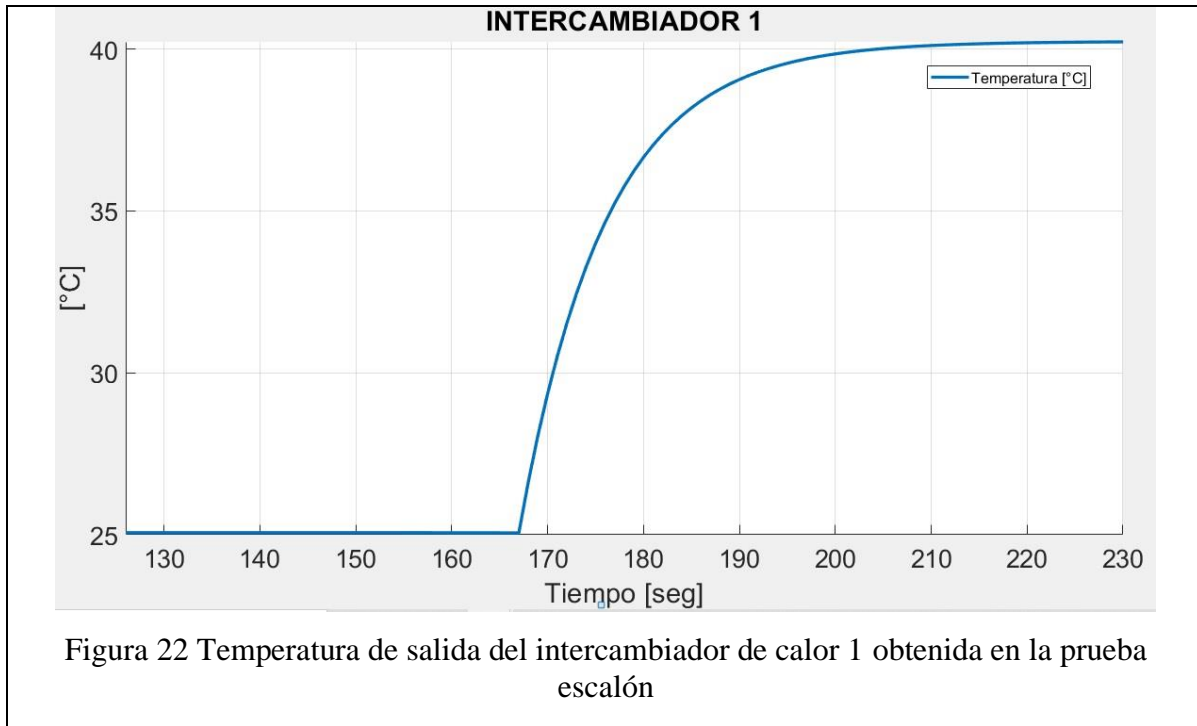
Después de asignadas las condiciones iniciales del proceso se esperó hasta que la temperatura de salida del intercambiador 1 (TITE 201\_1) se estabilizara en un valor constante, se observó que se estabilizó en 25 °C. Luego se procedió a generar un escalón a la entrada del sistema cambiando la posición de la válvula TCV 201-1 de 30% a 50% de apertura y se esperó hasta que la temperatura de salida del intercambiador de calor 1 se estabilizara nuevamente en un punto de operación, después de realizado esto se guardaron los datos obtenidos en un archivo .txt para posteriormente graficarlos en Matlab.

Luego se aplicó el método de dos puntos de Smith, en este se establecen dos ecuaciones con dos incógnitas utilizando dos puntos sobre la curva de reacción, los instantes seleccionados son los tiempos requeridos para que la respuesta alcance el 28.3% ( $t_{28.3}$ ) y el 63,2% ( $t_{63}$ ) del valor final. En la figura 21 se presenta la curva de reacción obtenida para el intercambiador 1.

**Tabla 3**

*Curvas de respuesta de la prueba escalón para el intercambiador de aumento de temperatura*





Lo primero que se debe encontrar es la ganancia del proceso de la siguiente manera:

$$K_p = \frac{\Delta Y}{\Delta U} = \frac{Y_f - Y_i}{U_f - U_i} = \frac{(40.21 - 25.06)^\circ\text{C}}{(50 - 30)\%} = 0.8^\circ\text{C}/\% \quad \text{Ecuación 1}$$

Luego se procede a ubicar dos puntos en la gráfica de respuesta al escalón tal que:

$$P1 = 28,3\% \Delta Y = 0.283 (40.21 - 25.06)^\circ\text{C} = 4.29^\circ\text{C} \quad \text{Ecuación 2}$$

Entonces el punto P1 sería en el valor de temperatura igual a  $P1 = (4.29 + 25.05)^\circ\text{C} = 29.34^\circ\text{C}$ .

$$P2 = 63,2\% \Delta Y = 0.632 (40.21 - 25.06)^\circ\text{C} = 9.57^\circ\text{C} \quad \text{Ecuación 3}$$

Entonces el punto P2 sería en el valor de temperatura igual a  $P2 = (9.57 + 25.05)^\circ\text{C} = 34.62^\circ\text{C}$

Ahora se ubica en la curva de respuesta al escalón el tiempo en el que se dieron estos valores, los tiempos son:

$$\text{Tiempo en P1} = t_{28} = t(29.34^\circ\text{C}) - t(\text{escalón}) = (170 - 145) \text{ segundos} = 25 \text{ segundos}$$

$$\text{Tiempo en P2} = t_{63} = t(34.62^\circ\text{C}) - t(\text{escalón}) = (176 - 145) \text{ segundos} = 31 \text{ segundos}$$

Después de encontrados los tiempos se procede a encontrar el  $\tau$  de la planta como se muestra a continuación.

$$\tau = 1.5 (t_{63} - t_{28}) = 1.5 (31 - 25) \text{ segundos} = 9 \text{ segundos} \quad \text{Ecuación 4}$$

Finalmente se encuentra el tiempo muerto del proceso.

$$t_m = t_{63} - \tau = (31 - 9) \text{ segundos} = 22 \text{ segundos} \quad \text{Ecuación 5}$$

Por lo tanto, el modelo del proceso obtenido para el intercambiador de calor 1 es:

$$G_P(s) = \frac{0,8 e^{-22s}}{9s + 1} \quad \text{Ecuación 6}$$

Después de obtenido el modelo del proceso del intercambiador de calor 1 se procedió a realizar su validación en Matlab, comparando la simulación del modelo obtenido con los tomados de la planta.

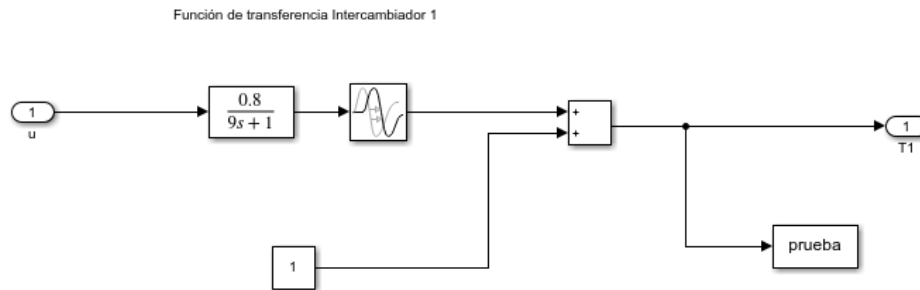


Figura 23. Diagrama de bloques de modelo FOPDT obtenido para el intercambiador de calor 1

El modelo de primer orden más tiempo muerto obtenido mediante el método de dos puntos de Smith se comparó con la curva de respuesta que se obtuvo de los datos tomados de la planta de fabricación de kumis dando el siguiente resultado, ver figura 24.



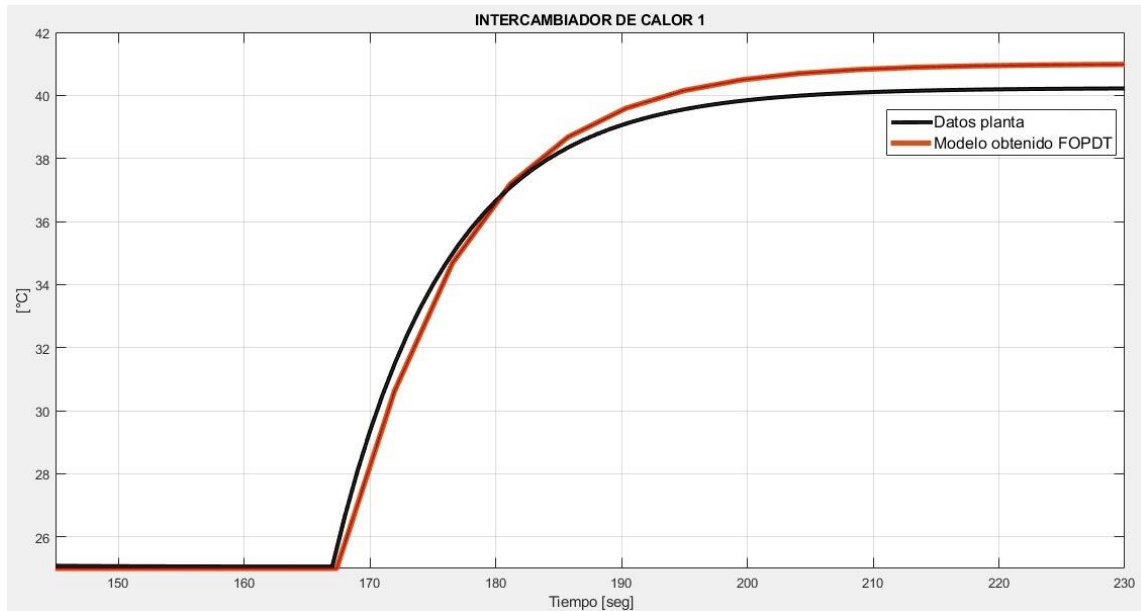


Figura 24. Validación del modelo FOPDT obtenido para el intercambiador de calor 1

Mediante la validación se observó que el modelo FOTDP obtenido por el método de dos puntos de Smith es aproximado al comportamiento del proceso del intercambiador de calor 1.

## B.2 Identificación del modelo del proceso para el intercambiador de disminución de temperatura

Para identificar el modelo del proceso del intercambiador de disminución de temperatura en la planta de fabricación de kumis por el método de la curva de reacción, en primer lugar, se realizó la obtención de los datos entrada – salida del proceso, para esto se asignaron las condiciones iniciales del sistema para que la planta se ubicara en un punto de equilibrio y posteriormente se generó un escalón a la entrada (apertura de la válvula TCV 202\_1) y se esperó hasta que el sistema se estabilizara nuevamente en un valor constante, las condiciones iniciales se fijaron dentro de los siguientes rangos, ver tabla 4

**Tabla 4.**

*Condiciones iniciales para la prueba escalón del intercambiador de disminución de temperatura*

Tag	Rango	Condición inicial asignada	Unidad	Descripción
T_Int	15 – 22	18	°C	Temperatura de entrada de materia prima
HV 101_1	0 – 100	100	%	Porcentaje de apertura de la válvula HV 101_1
T_enf	4 - 8	4	°C	Temperatura del agua del intercambiador de enfriado
TCV 202_1	0 – 20	20	%	Porcentaje de apertura de la válvula TCV 202_1

Después de asignadas las condiciones iniciales en la planta se esperó hasta que la temperatura de salida del intercambiador de calor 2 (TITE 202\_1) se estabilizara en un valor constante, se observó que se estabilizó en 67.2 °C y se procedió a generar un escalón a la entrada del sistema cambiando la posición de la válvula TCV 202\_1 de 20% a 40% de apertura y nuevamente se esperó hasta que la temperatura de salida del intercambiador de calor 2 se estabilizara en un punto de operación, los datos registrados se guardaron en un archivo.txt para posteriormente ser graficados en Matlab.

Luego se aplicó el método de dos puntos de Smith, tomando dos puntos sobre la curva de reacción, los instantes seleccionados fueron los tiempos requeridos para que la respuesta alcance el 28.3% ( $t_{28}$ ) y el 63,2% ( $t_{63}$ ) del valor final. En la figura 24 se presenta la curva de reacción obtenida para el intercambiador de calor 2.

**Tabla 5**

*Curvas de respuesta de la prueba escalón para el intercambiador de disminución de temperatura*

Prueba escalón para la identificación del modelo del intercambiador de calor 2
--

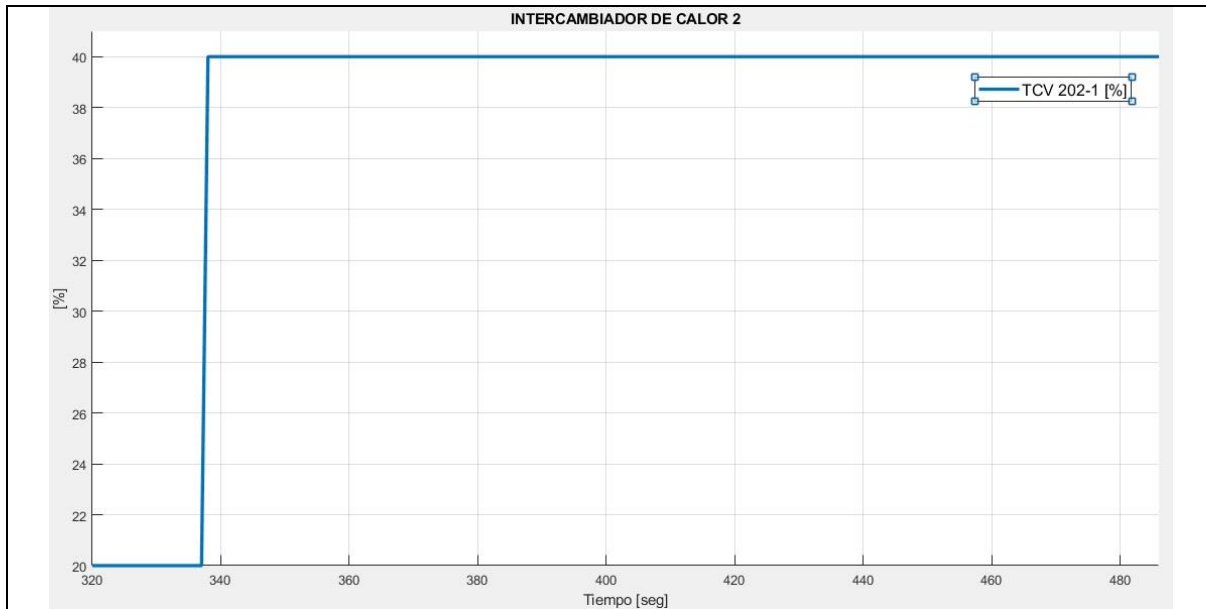


Figura 25 Porcentaje de apertura de la válvula TCV 202 – 1

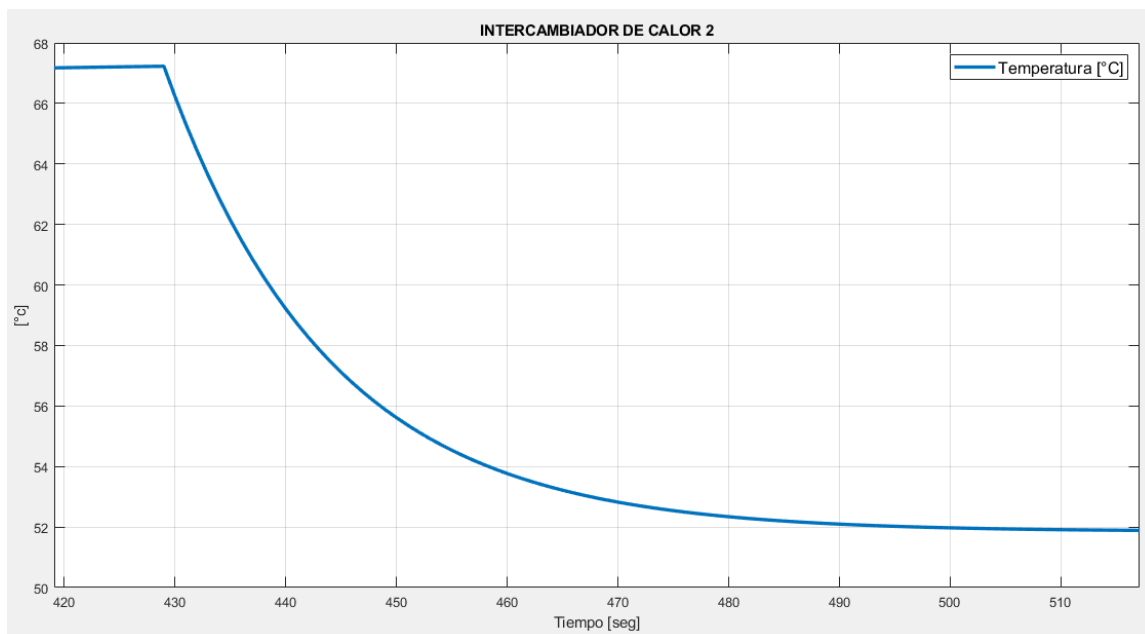


Figura 26 Temperatura de salida del intercambiador 2 obtenida con la prueba escalón

Aplicando el método de dos puntos de Smith se encuentra la ganancia del proceso.

$$K_p = \frac{\Delta Y}{\Delta U} = \frac{Y_f - Y_i}{U_f - U_i} = \frac{(51.89 - 67.19) \text{ } ^\circ\text{C}}{(40 - 20) \%} = \frac{-15.3 \text{ } ^\circ\text{C}}{20} = -0,8 \text{ } ^\circ\text{C}/\% \quad \text{Ecuación 7}$$

Luego se procede a ubicar dos puntos en la gráfica de respuesta al escalón tal que:

$$P1 = 28.3 \% \Delta Y = 0.283 (-15.3) ^\circ\text{C} = -4.33 ^\circ\text{C} \quad \text{Ecuación 8}$$

Entonces el punto P1 sería en el valor de temperatura igual a  $P1 = (67.19 - 4.33)^\circ\text{C} = 62.86 ^\circ\text{C}$ .

$$P2 = 63.2\% \Delta Y = 0.632(-15.3) ^\circ\text{C} = -9.67 ^\circ\text{C} \quad \text{Ecuación 9}$$

Entonces el punto P2 sería en el valor de temperatura igual a  $P2 = (67.19 - 9.67)^\circ\text{C} = 57.52 ^\circ\text{C}$ .

Ahora se ubica en la curva de respuesta al escalón el tiempo en el que se dieron estos valores, los tiempos son:

Tiempo en P1 =  $t_{28} = 26$  segundos.

Tiempo en P2 =  $t_{63} = 36$  segundos.

Después de encontrados los tiempos se procede a encontrar el  $\tau$  de la planta como se muestra a continuación.

$$\tau = 1.5 (t_{63} - t_{28}) = 1,5 (36 - 26) \text{ segundos} = 15 \text{ segundos} \quad \text{Ecuación 10}$$

Finalmente se encuentra el tiempo muerto del proceso.

$$t_m = t_{63} - \tau = (36 - 15) \text{ segundos} = 21 \text{ segundos} \quad \text{Ecuación 11}$$

Por lo tanto, el modelo del proceso para el intercambiador de calor 1 es:

$$G_P (s) = \frac{-0.8 e^{-21 s}}{15s + 1} \quad \text{Ecuación 12}$$

Después de obtenido el modelo del proceso del intercambiador de calor 2 se procedió a realizar su validación en Matlab, comparando la simulación del modelo obtenido con los tomados de la planta, en la figura 27 se muestra el diagrama de bloques implementado en Matlab/Simulink para realizar la comparación de las curvas.

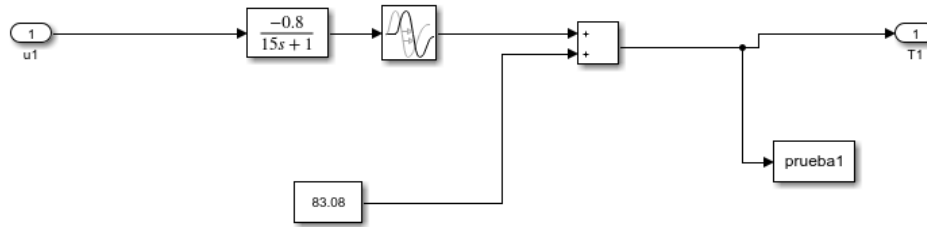


Figura 27. Diagrama de bloques de modelo FOPDT para el intercambiador 2

El modelo de primer orden más tiempo muerto obtenido mediante el método de dos puntos de Smith se comparó con la curva de respuesta que se obtuvo de los datos tomados en la prueba escalón realizada para el intercambiador de calor 2, dando el siguiente resultado, ver figura 28.

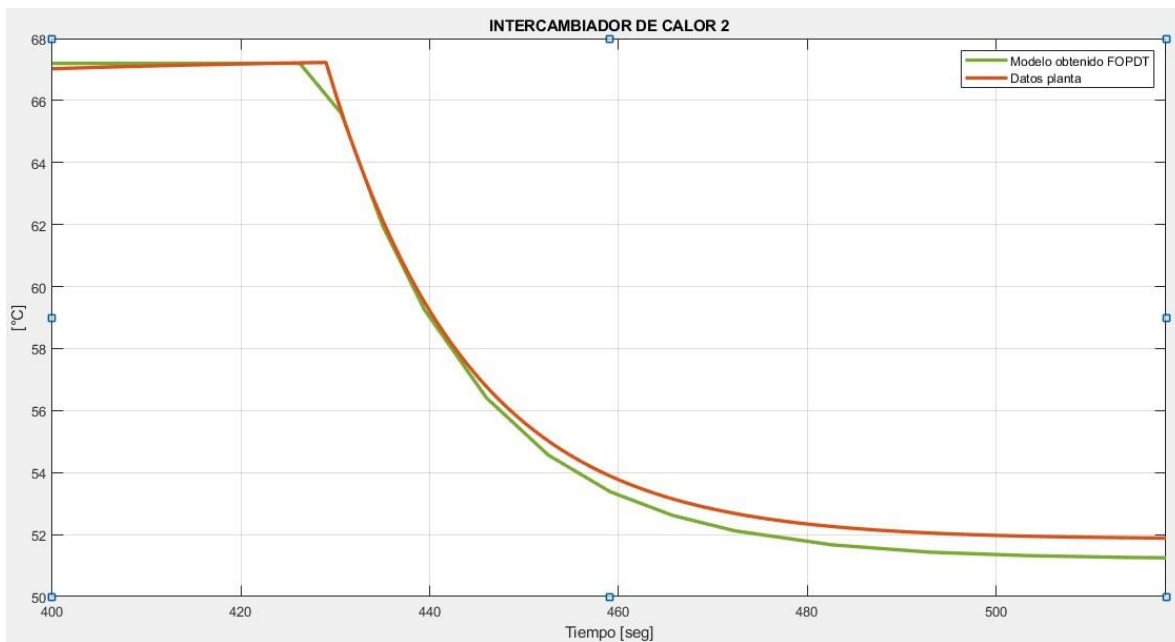


Figura 28. Validación del modelo FOPDT obtenido para el intercambiador de calor 2

Mediante la validación se observó que el modelo FOTDP obtenido por el método de dos puntos de Smith es aproximado al comportamiento del proceso del intercambiador de calor 2.

### B.3 Sintonización de PID convencional con diferentes métodos de sintonización para el intercambiador de aumento de temperatura

Después de obtenido el modelo del proceso que representa el comportamiento dinámico del intercambiador de aumento de temperatura se probaron diferentes métodos de sintonización PID mediante Matlab/Simulink, tales como el método propuesto por Ziegler y Nichols, el método de Chien Hrones y Reswick, el método de López et. Al., el método de Cohen – Coon, el método de Lambda, entre otros y se eligieron tres métodos que presentaran los mejores resultados en cuanto a sus parámetros de respuesta transitoria, las curvas de respuesta obtenidas con los métodos seleccionados se presentan a continuación.

**Tabla 6**

*Parámetros obtenidos para el PID I mediante tres métodos de sintonización seleccionados*

Método de sintonización	Kp [%/°C]	Ti [seg]	Td [seg]
CHR	0.486	12.213	10.406
López Et Al.	0.509	27.847	0
Lambda	0.232	9	11

Los anteriores métodos se simularon en Matlab/Simulink mediante el siguiente diagrama de lazo cerrado.

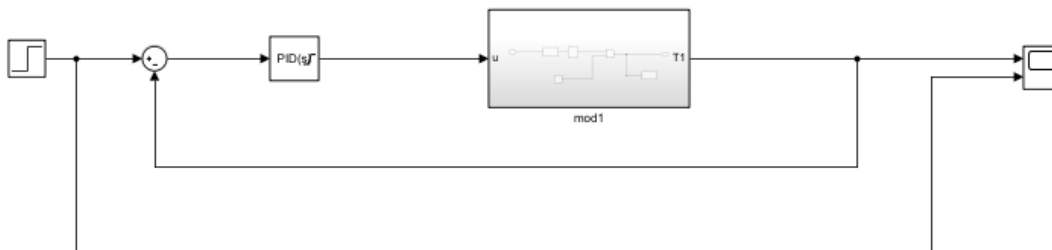
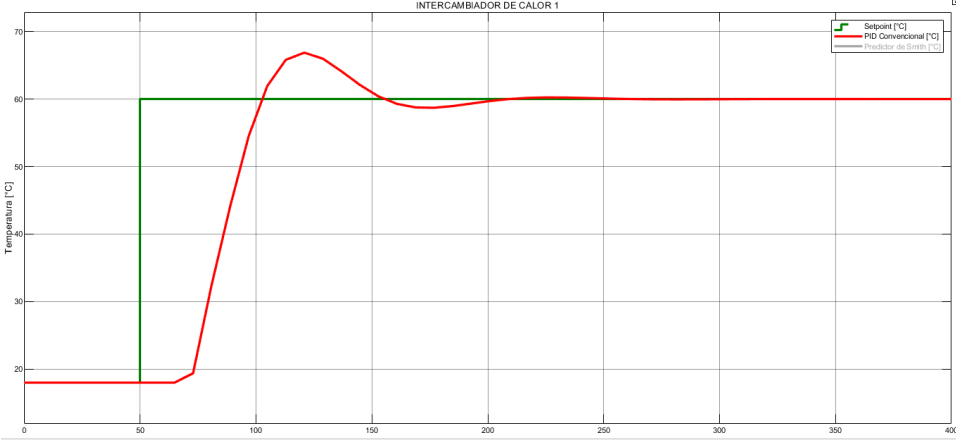
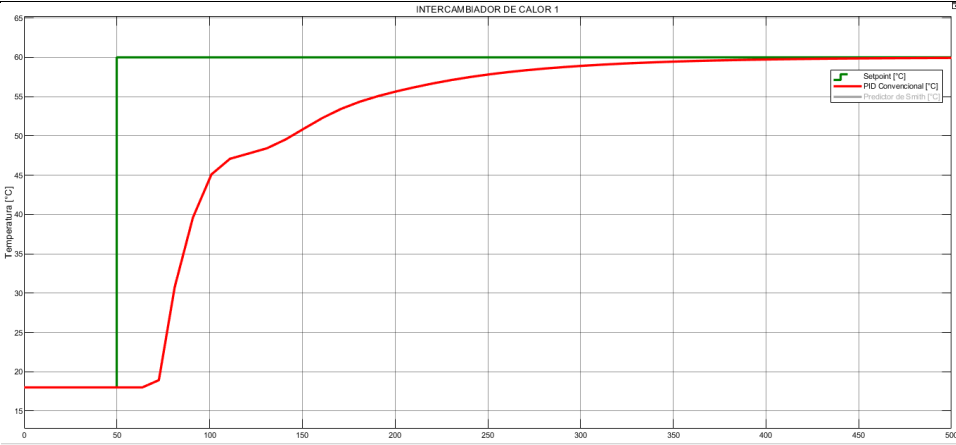


Figura 29. Diagrama de bloques de lazo cerrado para pruebas de sintonización del PID convencional

Las respuestas obtenidas para los métodos seleccionados se presentan a continuación

**Tabla 7**

*Curvas de respuesta obtenidas de los métodos de sintonización seleccionados para la etapa de aumento de temperatura*

Curva de respuesta obtenida para el PID1	Descripción
 <p data-bbox="240 961 1159 1033">Figura 30 Respuesta de la temperatura mediante el método sintonización de CHR</p>	<p data-bbox="1208 541 1393 793">En la figura 30 se presenta la curva de respuesta obtenida para el método de sintonización CHR. Los parámetros de respuesta temporal son:</p> <p data-bbox="1208 823 1393 907">Tiempo de levantamiento (<math>T_r</math>) = 26 seg.</p> <p data-bbox="1208 907 1393 991">Tiempo de establecimiento (<math>T_s</math>) = 130 seg.</p> <p data-bbox="1208 991 1393 1045">Sobrepulso (<math>M_p</math>) = 7 °C</p>
 <p data-bbox="240 1537 1159 1579">Figura 31 Respuesta de la temperatura mediante el método de López et Al.</p>	<p data-bbox="1208 1096 1393 1369">En la figura 31 se presenta la curva de respuesta obtenida para el método de sintonización de López Et Al.. Los parámetros de respuesta temporal son:</p> <p data-bbox="1208 1369 1393 1411"><math>T_r</math> = 221 seg.</p> <p data-bbox="1208 1411 1393 1453"><math>T_s</math> = 245 seg.</p> <p data-bbox="1208 1453 1393 1495"><math>M_p</math> = 0 °C</p>

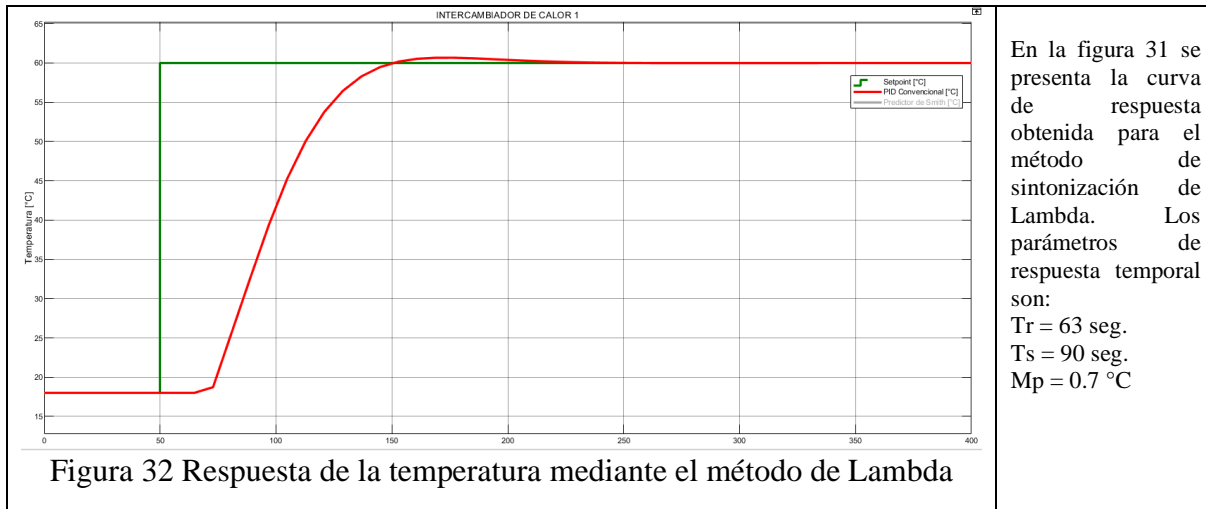


Figura 32 Respuesta de la temperatura mediante el método de Lambda

#### B.4 Sintonización de PID convencional con diferentes métodos de sintonización para el intercambiador de disminución de temperatura

Después de obtenido el modelo del proceso que representa el comportamiento dinámico del intercambiador de disminución de temperatura se probaron diferentes métodos de sintonización PID mediante Matlab/Simulink, tales como Ziegler y Nichols, CHR, López Et Al., Cohen – Coon, Lambda, entre otros y se eligieron tres métodos que presentaran los mejores resultados en cuanto a sus parámetros de respuesta transitoria, las curvas de respuesta obtenidas con los métodos seleccionados se presentan a continuación.

**Tabla 8**

*Parámetros obtenidos para el PID 2 mediante tres métodos de sintonización seleccionados*

Método de sintonización	Kp [%/°C]	Ti [seg]	Td [seg]
CHR	0.848	20.355	9.933
López Et Al.	0.773	27.977	0
Lambda	0.298	15	0

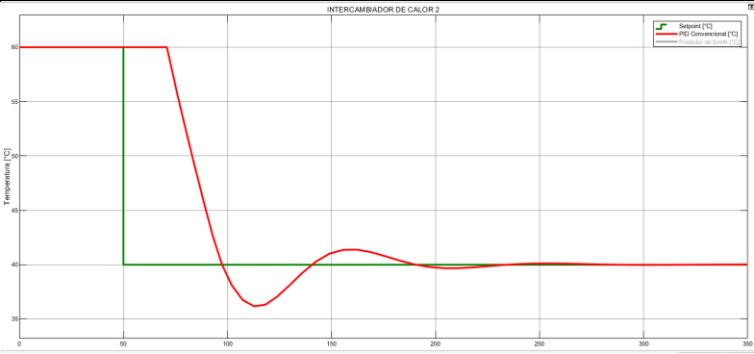
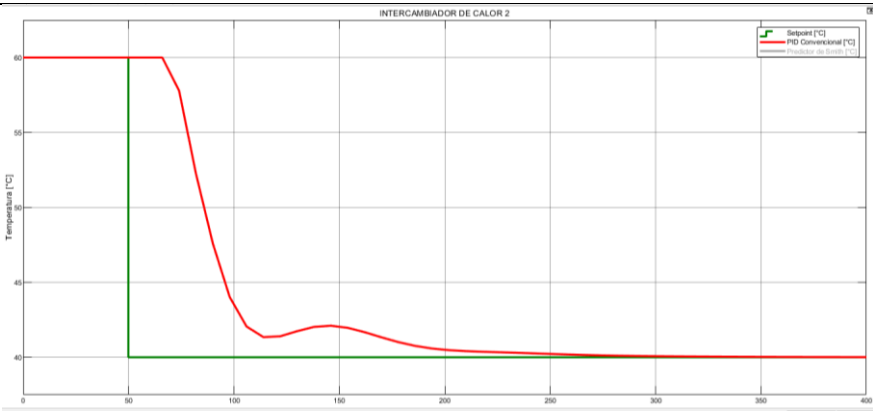
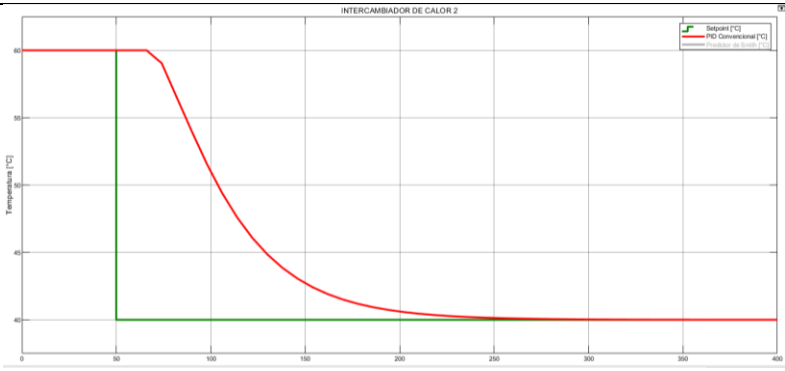
Los anteriores métodos se simularon en Matlab/Simulink de igual manera que para el intercambiador de calor 1, mediante el siguiente diagrama de lazo cerrado.

Las respuestas obtenidas para los métodos seleccionados se presentan a continuación.



Tabla 9

*Curvas de respuesta por los métodos de sintonización seleccionados para el intercambiador de disminución de temperatura*

Curva de respuesta obtenida para el PID1	Descripción
 <p data-bbox="293 814 1101 846">Figura 33 Respuesta mediante el método sintonización de CHR</p>	<p data-bbox="1198 457 1401 489">Se presenta la curva de respuesta de la temperatura (línea roja) obtenida por el método de sintonización CHR</p> <p data-bbox="1198 489 1401 741">Los parámetros de respuesta transitoria obtenidos son:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="1198 741 1328 772">-Tr = 24 seg.</li> <li data-bbox="1198 772 1336 804">-Ts = 120 seg.</li> <li data-bbox="1198 804 1312 835">-Mp = 6 °C</li> </ul>
 <p data-bbox="331 1308 1062 1339">Figura 34 Respuesta mediante el método de López Et Al.</p>	<p data-bbox="1198 871 1401 1060">Se presenta la curva de respuesta de la temperatura (línea roja) obtenida por el método de sintonización López.</p> <p data-bbox="1198 1060 1401 1281">Los parámetros de respuesta transitoria obtenidos son:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="1198 1186 1317 1218">Tr = 34 seg.</li> <li data-bbox="1198 1218 1328 1249">Ts = 135 seg</li> <li data-bbox="1198 1249 1300 1281">Mp = 0 °C</li> </ul>
 <p data-bbox="358 1797 1032 1829">Figura 35 Respuesta mediante el método de Lambda</p>	<p data-bbox="1198 1402 1401 1591">Se presenta la curva de respuesta de la temperatura (línea roja) obtenida por el método de sintonización Lambda.</p> <p data-bbox="1198 1591 1401 1812">Los parámetros de respuesta transitoria obtenidos son:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="1198 1717 1317 1749">Tr = 84 seg.</li> <li data-bbox="1198 1749 1336 1780">Ts = 142 seg.</li> <li data-bbox="1198 1780 1300 1812">Mp = 0 °C</li> </ul>

## Anexo C

### Discretización de funciones de transferencia que representan el comportamiento dinámico de los intercambiadores de calor

Cuando se desea controlar un sistema continuo por medio de algoritmos implementados en un sistema digital con procedimientos discretos se debe pasar la representación en forma continua del proceso a una representación en tiempo discreto, de esta manera el Predictor de Smith representado en forma discreta viene dado por:

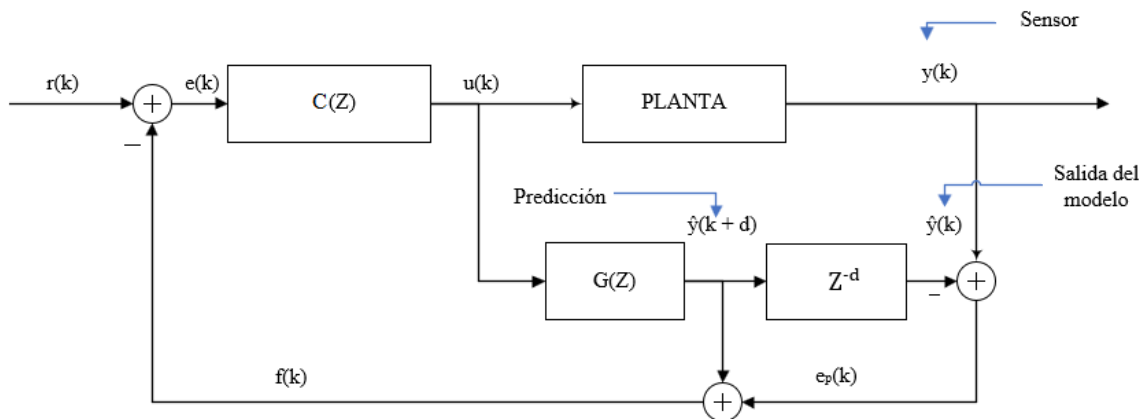


Figura 36 Implementación discreta del predictor de Smith

En la figura 36 se presenta la estructura del Predictor de Smith en forma discreta donde  $r(k)$  representa la referencia,  $e(k)$  es la señal de error,  $C(z)$  es un controlador que puede ser PI o PID,  $u(k)$  es la señal del esfuerzo de control,  $G(z)$  es el modelo matemático del proceso en tiempo discreto con el que se va a estimar el comportamiento del intercambiador de calor como si este no tuviera ningún retardo de tiempo y  $Z^{-d}$  representa al retardo de tiempo en tiempo discreto, cabe resaltar que las señales ahora no dependen del tiempo sino que dependen de muestras o instantes  $k$ .

Para implementar el Predictor de Smith en el PLC ControlLogix 1756-L61 de Allen Bradley uno de los parámetros importantes a considerar es el tiempo de muestreo, el cual está limitado por un valor mínimo de acuerdo a los equipos usados para su implementación y un valor máximo que dependerá de las características propias del proceso a controlar, el cual está definido como:

$$T = \frac{1}{f} \quad \text{Ecuación 13}$$

Donde  $f$  es la frecuencia de muestreo.

Para encontrar el tiempo de muestreo adecuado existen métodos que parten de la relación entre las raíces del denominador (polos) de la función de transferencia, donde de acuerdo al teorema del muestreo de Nyquist se debe seleccionar una frecuencia de muestreo que sea superior a 2 veces la mayor frecuencia del sistema muestreado.

$$f \geq 2 f_{max} \quad \text{Ecuación 14}$$

Sin embargo, como muchas veces se requiere mejorar la respuesta del sistema se recomienda usar una frecuencia de muestreo de al menos 10 veces la mayor frecuencia del sistema e incluso frecuencias más altas.

$$f \geq 10 f_{max} \quad \text{Ecuación 15}$$

Teniendo en cuenta que la frecuencia máxima del sistema viene dada por

$$f_{max} = \frac{w_{max}}{2\pi} \quad \text{Ecuación 16}$$

Si se reemplaza la ecuación 15 en la ecuación 16 se obtiene que

$$f \geq \frac{10 w_{max}}{2\pi} = \frac{5 w_{max}}{\pi}$$

Y teniendo en cuenta que el tiempo de muestreo es el inverso de la frecuencia entonces se obtiene que el tiempo de muestreo está dado por:

$$T \leq \frac{\pi}{5 W_{max}} \quad \text{Ecuación 17}$$

Donde  $W_{max}$  es la frecuencia máxima.

### **C.1 Discretización del modelo del proceso para la etapa de aumento de temperatura**

El modelo del proceso de aumento de temperatura está representado por la siguiente función de transferencia.

$$G(s) = \frac{0.8}{9s + 1} e^{-22s} \quad \text{Ecuación 18}$$

Se procede a encontrar el polo del sistema igualando el denominador de la función de transferencia a cero, de la siguiente manera:

$$9s + 1 = 0 \quad \rightarrow \quad s = -1/9$$

Entonces la frecuencia máxima es considerada como la magnitud de dicho polo, así:

$$S = -0.11 \quad \rightarrow \quad \|s\| = 0.11$$

Por lo tanto,  $W_{\max} = 0.11$  rad/seg

Como se indicó en la ecuación 17, en el caso del proceso de aumento de temperatura, se tiene que:

$$T \leq \frac{\pi}{5(0.11)} = 5.712 \text{ segundos}$$

Es decir que se puede elegir cualquier tiempo de muestreo menor o igual a 5.71 segundos.

Para el caso de la etapa de aumento de temperatura se definió un tiempo de muestreo de 1 segundo, teniendo en cuenta que en el manual de instrucciones generales de los controladores Logix5000 [2], se indica que el tiempo de muestreo asignado depende del proceso que se está controlando, tal que, para lazos muy lentos como por ejemplo los lazos de temperatura un periodo de actualización por segundo o incluso un periodo mayor, generalmente es suficiente para obtener un buen control.

Una vez definido el tiempo de muestreo de la variable del proceso se procede a realizar la discretización de la función de transferencia obtenida para la etapa de aumento de temperatura (Ecuación 18), mediante el software Matlab/Simulink.

```

1 -   clc
2 -   clear all
3 -   close all
4 -   Ts = 1; % Tiempo de muestreo
5
6 -   %% Discretización de la función de transferencia
7
8 -   nP = 0.8; % Numerador de la planta
9 -   dP = [9 1]; % Denominador de la planta
10 -  P = tf(nP,dP); % Modelo del proceso
11 -  L = 22.0; % Retardo de tiempo de P(s)
12 -  P.iodelay = L; % Aplico el retardo en P(s)
13 -  Pd = c2d(P,Ts); % Discretizo el proceso con retenedor de orden cero P(Z)

```

Figura 37 Discretización de la función de transferencia en Matlab/Simulink

En la figura 37 se observa el código para la discretización de la función de transferencia de la etapa de aumento de temperatura, en este nP representa el numerador del proceso, dP es el denominador, P es la función de transferencia sin retardo de tiempo, L es el retardo de tiempo, y con el uso del comando iodelay se aplica el retardo a la función de transferencia en tiempo continuo y mediante el comando c2d de Matlab se obtiene la función de transferencia en tiempo discreto calculada con un tiempo de muestreo de 1 segundo.

```

>> Pd

Pd =

          0.08413
z^(-22) * -----
          z - 0.8948

Sample time: 1 seconds
Discrete-time transfer function.

```

Figura 38 Función de transferencia en tiempo discreto obtenida para la etapa de aumento de temperatura

Entonces se tiene que la función de transferencia de la etapa de aumento de temperatura viene dada por,

$$G(z) = \frac{b_0 z + b_1}{z + a_1} z^{-d} \quad \rightarrow \quad G(z) = \frac{0.08413}{z - 0.8948} z^{-22} \quad \text{Ecuación 19}$$

Después de realizada la discretización de la función de transferencia del proceso de aumento de temperatura se procedió a realizar el código que se implementó mediante texto estructurado en el PLC .

### Código implementado en la etapa de aumento de temperatura

El predictor de Smith es una estructura cuya finalidad es predecir lo que va a suceder en la salida real en base a un modelo sin retardo de tiempo, también llamado modelo rápido, con este modelo el predictor de Smith consigue anticiparse en un tiempo igual al atraso, en este caso un tiempo  $d= 22$  segundos, y la salida obtenida es realimentada hacia el error con el que se calculará la ley de control del PID que será aplicada al proceso real, es así como esta estructura predice la salida como si no existiera retardo de tiempo.

Para implementar el código del predictor de Smith en la etapa de aumento de temperatura, en primer lugar, se asignó un nombre a cada una de las salidas de la estructura del predictor, de la siguiente manera.

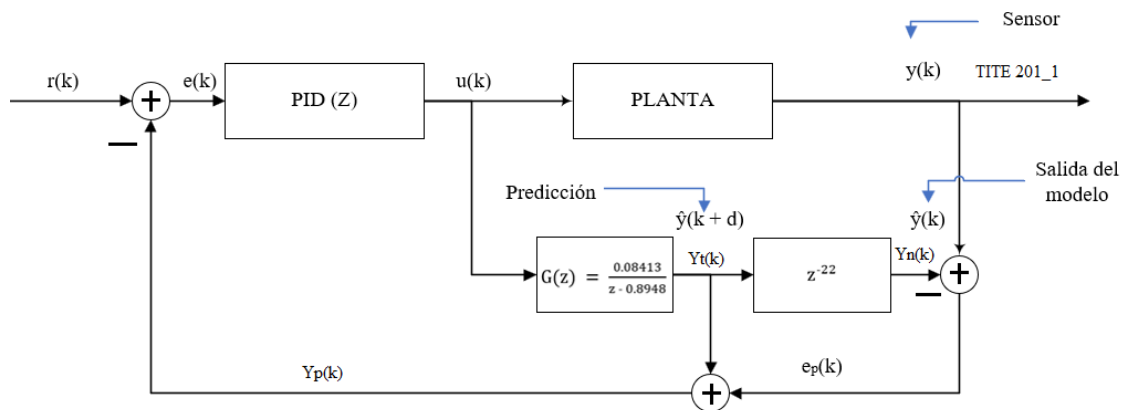


Figura 39 Predictor de Smith discreto de la etapa de aumento de temperatura

Donde  $y(k)$  es la salida del proceso de aumento de temperatura, sensada mediante el sensor TITE 201\_1, la salida del modelo nominal, es decir el modelo con retardo de tiempo (Ecuación 19) se denominó  $Y_n(k)$ , la salida del modelo rápido, es decir, el modelo sin retardo de tiempo, con la que será calculada la predicción se denominó  $Y_t(k)$ , el error de predicción viene dado por  $e_p(k)$ , que es la resta entre el valor medido en el sensor TITE 201\_1 y la salida del modelo nominal  $Y_n(k)$ , este error de predicción se suma a la salida del

modelo sin retardo para poder predecir el comportamiento del intercambiador de calor antes de que el retardo suceda.

Para poder ingresar al PLC la función de transferencia en tiempo discreto se debe de transformar esta en una ecuación en diferencias, para esto, partiendo de la ecuación en tiempo discreto es necesario transformarla a una ecuación de potencias negativas, dividiendo el numerador y denominador por el máximo grado del denominador ,es decir por  $z$ , de la siguiente forma,

$$G(z) = \frac{Yn(k)}{U(k)} = \frac{0.08413}{z - 0.8948} z^{-22} \rightarrow G(z) = \frac{Yn(k)}{U(k)} = \frac{\frac{0.08413}{z}}{\frac{z - 0.8948}{z}} z^{-22}$$

Dando como resultado,

$$G(z) = \frac{Yn(k)}{U(k)} = \frac{0.08413 z^{-1}}{1 - 0.8948 z^{-1}} z^{-22} \quad \text{Ecuación 20}$$

Y haciendo las operaciones correspondientes para despejar  $Yn(k)$  se tiene que,

$$Yn(k)[1 - 0.8948 z^{-1}] = U(k) [0.08413 z^{-1}] z^{-22}$$

$$Yn(k) - 0.8948 Yn(k) z^{-1} = U(k) [0.08413 z^{-1}] z^{-22}$$

$$Yn(k) - 0.8948 Yn(k - 1) = 0.08413 U(k - 1 - 22) \leftarrow \text{Ecuación en diferencias}$$

Despejando  $Yn(k)$  entonces se tiene que la salida del modelo con retardo de tiempo es,

$$Yn(k) = 0.08413 U(k - 1 - 22) + 0.8948 Yn(k - 1) \quad \text{Ecuación 21}$$

Cabe resaltar que  $Yn(k - 1)$  es la salida del modelo del proceso un instante pasado y  $U$  es un vector de 24 posiciones que almacena las posiciones pasadas del esfuerzo de control, se utilizó un vector de 24 posiciones debido a que  $Yn(k)$  es calculada con  $U$  en 23 instantes pasados, como se observa en la ecuación anterior.

Del mismo modo se transforma el modelo rápido (sin retardo de tiempo)  $Yt(k)$ , a una ecuación en diferencias, y teniendo en cuenta que es la misma función de transferencia que  $Yn(k)$  pero sin el retardo de tiempo, entonces queda de la siguiente manera,

$$Yt(k) = 0.08413 U(k - 1) + 0.8948 Yt(k - 1) \quad \text{Ecuación 22}$$

Donde  $Y_t(k - 1)$  es la salida del modelo del proceso sin retardo de tiempo, un instante antes.

Una vez encontradas las ecuaciones en diferencias del modelo con retardo y sin retardo de tiempo, el siguiente paso es el cálculo del error de predicción, que es la resta entre el valor sensado por el sensor del intercambiador de calor y la salida  $Y_n(k)$ , como se describe a continuación,

$$E_p(k) = TITE\ 201\_1 - Y_n(k) \quad \text{Ecuación 23}$$

Este error de predicción se suma al modelo sin retardo de tiempo,

$$Y_p(k) = Y_t(k) + E_p(k) \quad \text{Ecuación 24}$$

Y el valor de  $Y_p(k)$  se realimenta para encontrar el valor del error con el que el PID calcula el esfuerzo de control, el error viene dado por la resta entre la referencia  $R(k)$  y el valor obtenido para  $Y_p(k)$ , así,

$$E(k) = R(k) - Y_p(k) \quad \text{Ecuación 25}$$

De esta manera quedan descritas las ecuaciones utilizadas en la implementación del Predictor de Smith en el PLC y de acuerdo a lo anteriormente mencionado se utilizó el siguiente código para la etapa de aumento de temperatura.

// Inicialización de variables

KTA:=23; // Posición actual del vector de esfuerzo de control

d := 22; // Retardo de tiempo discreto

I := 1; // Índice

// Parámetros del modelo del proceso de aumento de temperatura en tiempo discreto

b1 := 0.08413;

a1 := -0.8948;

Ep := 0; // Error de predicción

Yp := 0; // Salida predicha



// Inicialización de las salidas del predictor de Smith, que son el modelo nominal y el modelo rápido, las cuales se inicializan en el valor que detecte el sensor del intercambiador de calor, en este caso la leche ingresa al proceso con una temperatura de 18 °C, por lo tanto, TITE 201\_1 = 18 °C

Yn := TITE\_201\_1; // Salida del modelo nominal (Con retardo)

Yn1 := TITE\_201\_1; // Salida del modelo nominal (Con retardo) 1 instante pasado

Yt := TITE\_201\_1; // Salida del modelo nominal rápido (Sin retardo)

Yt1 := TITE\_201\_1; // Salida del modelo nominal rápido (Sin retardo) 1 instante pasado

// Inicialización del vector de esfuerzo de control, como ya se había mencionado U es un vector que guarda los valores pasados del esfuerzo de control.

FOR I:=0 TO KTA DO

VEC\_U [I] := 0;

END\_FOR;

// Salida del modelo nominal con retardo

Yn := (b1 \* VEC\_U [KTA - 1 - d]) - (a1 \* Yn1); // Yn1 es el valor de Yn un instante pasado

// Error de predicción : Diferencia entre el proceso real y nominal

Ep := TITE\_201\_1 - Yn;

// Modelo nominal rápido (sin retardo)

Yt := (b1 \* VEC\_U[KTA - 1]) - (a1 \* Yt1); // Yt1 es el valor de Yn un instante antes

// Suma del error de predicción y la salida del modelo nominal rápido (sin retardo)

Yp := Yt + Ep;

// Cálculo del error: Error = Setpoint – Yp

```
PID_Exchanger_1.ERR := PID_Exchanger_1.SP - Yp;
```

```
// Con el valor del error encontrado anteriormente el PID calcula el esfuerzo de control y lo envía a TCV 201_1 que es la posición de la válvula de vapor del intercambiador de aumento de temperatura y ese valor del esfuerzo de control lo almacena en el vector U.
```

```
VEC_U [KTA] := TCV_201_1;
```

```
// Desplazamiento y actualización de valores en el vector de la ley de control
```

```
// Se utilizó una función FOR para que cuando llegue un nuevo valor de esfuerzo de control los valores guardados anteriormente se corran una posición antes y se almacene el nuevo valor de esfuerzo de control.
```

```
FOR I:=1 TO KTA DO
```

```
    VEC_U[I - 1] := VEC_U[I];
```

```
END_FOR;
```

```
// Actualización de valores pasados del modelo con retardo de tiempo y el modelo rápido
```

```
Yn1 := Yn;
```

```
Yt1:= Yt;
```

Después de realizado el código del predictor de Smith para el control del intercambiador de calor de aumento de temperatura se pasó a realizar la discretización del modelo del proceso para el intercambiador de disminución de temperatura.

## **C.2 Discretización del modelo del proceso para la etapa de disminución de temperatura**

Del mismo modo que en la etapa de aumento de temperatura, se procedió a encontrar el periodo de muestreo para la etapa de disminución de temperatura, cuya función de transferencia viene dada por,

$$G(s) = \frac{-0.8}{15s + 1} e^{-21s} \quad \text{Ecuación 26}$$

Y encontrando el polo del sistema se tiene que,

$$15s + 1 = 0 \quad \rightarrow \quad s = -1/15 = 0.067$$

Entonces la frecuencia máxima es considerada como la magnitud de dicho polo, así:

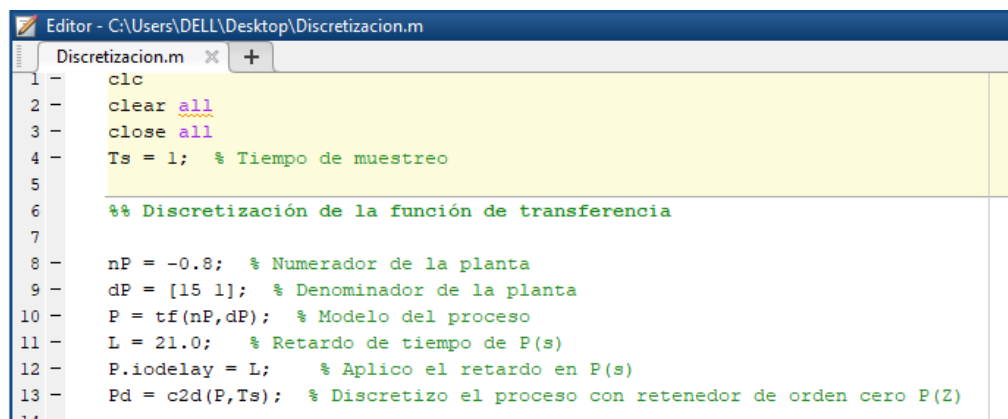
$$S = -0.067 \quad \rightarrow \quad ||s|| = 0.067$$

Por lo tanto,  $W_{\max} = 0.067$  rad/seg y reemplazando en la ecuación 17,

$$T \leq \frac{\pi}{5 (0.067)} = 9.8 \text{ segundos}$$

Lo cual indica que el periodo de muestreo puede ser cualquier valor menor o igual que 9.8 segundos. Para el caso del proceso de disminución de temperatura se tomó un tiempo de muestreo de 1 segundo, se definió este tiempo teniendo en cuenta lo indicado en el manual de instrucciones generales de los controladores Logix5000 [2], donde menciona que para lazos muy lentos como por ejemplo los lazos de temperatura un periodo de actualización por segundo o incluso un periodo mayor, generalmente es suficiente para obtener un buen control.

Después de definido el tiempo de muestreo de la variable del proceso se procede a realizar la discretización de la función de transferencia obtenida para la etapa de disminución de temperatura (Ecuación 26), mediante Matlab/Simulink.



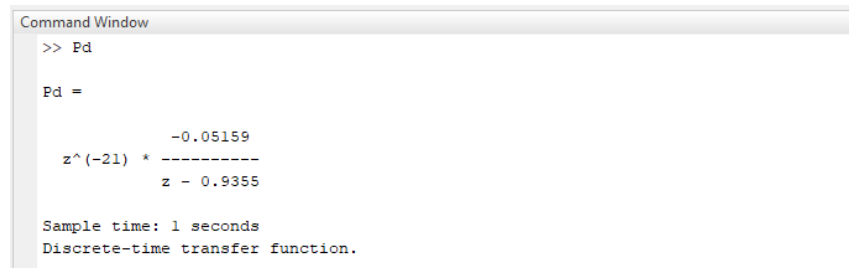
```

Editor - C:\Users\DELL\Desktop\Discretizacion.m
Discretizacion.m x +
1 -   clc
2 -   clear all
3 -   close all
4 -   Ts = 1; % Tiempo de muestreo
5
6   %% Discretización de la función de transferencia
7
8 -   nP = -0.8; % Numerador de la planta
9 -   dP = [15 1]; % Denominador de la planta
10 -  P = tf(nP,dP); % Modelo del proceso
11 -  L = 21.0; % Retardo de tiempo de P(s)
12 -  P.iodelay = L; % Aplico el retardo en P(s)
13 -  Pd = c2d(P,Ts); % Discretizo el proceso con retenedor de orden cero P(Z)
14

```

Figura 40 Discretización de la función de transferencia de disminución de temperatura en Matlab/Simulink

En la figura 40 se observa el código para la discretización de la función de transferencia de la etapa de disminución de temperatura, en este nP representa el numerador del proceso, dP es el denominador, P es la función de transferencia sin retardo de tiempo, L es el retardo de tiempo, y con el uso del comando iodelay se aplica el retardo a la función de transferencia en tiempo continuo y mediante el comando c2d de Matlab se obtiene la función de transferencia en tiempo discreto calculada con un tiempo de muestreo de 1 segundo.



```

Command Window
>> Pd

Pd =

          -0.05159
z^(-21) * ----
          z - 0.9355

Sample time: 1 seconds
Discrete-time transfer function.

```

Figura 41 Función de transferencia en tiempo discreto obtenida para la etapa de disminución de temperatura

Se tiene que la función de transferencia de la etapa de disminución de temperatura viene dada por,

$$G(z) = \frac{b_0 z + b_1}{z + a_1} z^{-d} \quad \rightarrow \quad G(z) = \frac{-0.05159}{z - 0.9355} z^{-21} \quad \text{Ecuación 27}$$

Donde  $b_0=0$  ;  $b_1= -0.05159$  ;  $a_1 = -0.9355$ .

Después de realizada la discretización de la función de transferencia del proceso de disminución de temperatura se procedió a realizar el código que se implementó mediante texto estructurado en el PLC .

### **Código implementado en la etapa de disminución de temperatura**

Para implementar el código del predictor de Smith de la etapa de disminución de temperatura, se tiene,

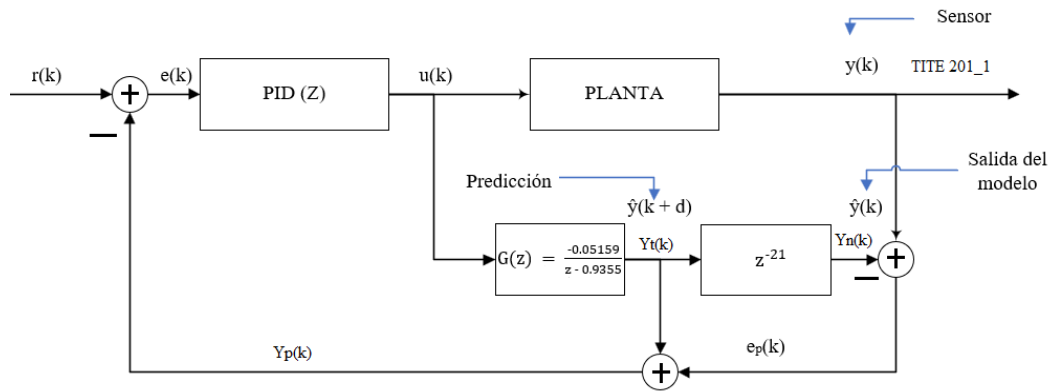


Figura 42 Predictor de Smith discreto de la etapa de disminución de temperatura

Donde  $y(k)$  es la salida del proceso de disminución de temperatura, sensada mediante el sensor TITE 202\_1, la salida del modelo nominal, es decir, el modelo con retardo de tiempo (Ecuación 27) es  $Yn(k)$ , la salida del modelo rápido (sin retardo de tiempo) con la que será calculada la predicción se denominó  $Yt(k)$ , el error de predicción es  $ep(k)$  que es la resta entre el valor medido en el sensor TITE 202\_1 y la salida del modelo nominal  $Yn(k)$ , este error de predicción se suma a la salida del modelo sin retardo para poder predecir el comportamiento del intercambiador de calor antes de que el retardo suceda.

Para ingresar al PLC la función de transferencia en tiempo discreto se debe de transformar a una ecuación en diferencias, como en el caso anterior, de la siguiente forma,

$$G(z) = \frac{Yn(k)}{U(k)} = \frac{-0.05159}{z - 0.9355} z^{-21} \rightarrow G(z) = \frac{Yn(k)}{U(k)} = \frac{\frac{-0.05159}{z}}{\frac{z - 0.9355}{z}} z^{-21}$$

Dando como resultado,

$$G(z) = \frac{Yn(k)}{U(k)} = \frac{-0.05159 z^{-1}}{1 - 0.9355 z^{-1}} z^{-21} \quad \text{Ecuación 28}$$

Y haciendo las operaciones correspondientes para despejar  $Yn(k)$  se tiene que,

$$Yn(k)[1 - 0.9355 z^{-1}] = U(k) [-0.05159 z^{-1}] z^{-21}$$

$$Yn(k) - 0.9355 Yn(k) z^{-1} = U(k) [-0.05159 z^{-1}] z^{-21}$$

$$Y_n(k) - 0.9355 Y_n(k - 1) = -0.05159 U(k - 1 - 21) \leftarrow \text{Ecuación en diferencias}$$

Despejando  $Y_n(k)$  entonces se tiene que la salida del modelo con retardo de tiempo es,

$$Y_n(k) = -0.05159 U(k - 1 - 21) + 0.9355 Y_n(k - 1) \quad \text{Ecuación 29}$$

Como en el caso anterior,  $Y_n(k - 1)$  es la salida del modelo del proceso en 1 instante pasado y  $U$  es un vector de 23 posiciones que almacena las posiciones pasadas del esfuerzo de control, se utilizó un vector de 23 posiciones debido a que  $Y_n(k)$  es calculada con  $U$  en 22 instantes pasados, como se observa en la ecuación anterior.

Del mismo modo se transforma el modelo rápido (sin retardo de tiempo)  $Y_t(k)$  a una ecuación en diferencias, y teniendo en cuenta que es la misma función de transferencia que  $Y_n(k)$  pero sin el retardo de tiempo, entonces queda de la siguiente manera,

$$Y_t(k) = -0.05159 U(k - 1) + 0.9355 Y_t(k - 1) \quad \text{Ecuación 30}$$

Donde  $Y_t(k - 1)$  es la salida del modelo del proceso sin retardo de tiempo, un instante de tiempo pasado.

Una vez encontradas las ecuaciones en diferencias del modelo con retardo y sin retardo de tiempo, el siguiente paso es el cálculo del error de predicción, que es la resta entre el valor sensado por el sensor del intercambiador de calor TITE 202\_1 y la salida  $Y_n(k)$ , como se describe a continuación,

$$E_p(k) = \text{TITE 202}_1 - Y_n(k) \quad \text{Ecuación 31}$$

Este error de predicción se suma con el modelo sin retardo de tiempo,

$$Y_p(k) = Y_t(k) + E_p(k) \quad \text{Ecuación 32}$$

Y el valor de  $Y_p(k)$  se realimenta para encontrar el valor del error con el que el PID calcula el esfuerzo de control, el error viene dado por la resta entre el valor que se obtuvo de  $Y_p(k)$  y la referencia  $R(k)$ , debido a que el PID se seleccionó de acción inversa por ser un proceso de disminución de temperatura entonces la ecuación queda de la siguiente manera,

$$E(k) = Y_p(k) - R(k) \quad \text{Ecuación 33}$$

De esta manera quedan descritas las ecuaciones utilizadas en la implementación del Predictor de Smith en el PLC para la etapa de disminución de temperatura y de acuerdo a lo anteriormente mencionado se utilizó el siguiente código para la etapa de aumento de temperatura.

```
// Inicialización de variables
```

```
    KTA:=22; // Ultima posición del vector de esfuerzo de control
```

```
    d := 21; // Retardo de tiempo discreto
```

```
    I := 1; // Índice
```

```
// Parámetros del modelo del proceso en tiempo discreto
```

```
    a1 := -0.9355;
```

```
    b1 := -0.05159;
```

```
    Ep := 0; // Error de predicción
```

```
    Yp := 0; // Salida predicha
```

```
// Inicialización de las salidas del predictor de Smith
```

```
    Yn := TITE_202_1; // Salida del modelo nominal (Con retardo)
```

```
    Yn1 := TITE_202_1; // Salida del modelo nominal (Con retardo) 1 instante antes
```

```
    Yt := TITE_202_1; // Salida del modelo nominal rápido (Sin retardo)
```

```
    Yt1 := TITE_202_1; // Salida del modelo nominal rápido (Sin retardo) 1 instante antes
```

```
// Inicialización del vector de esfuerzo de control, como ya se había dicho U es un vector que guarda los valores pasados del esfuerzo de control.
```

```
    FOR I := 0 TO KTA DO
```

```
        VEC_U [I] := 0;
```

```
    END_FOR;
```

```

// Salida del modelo nominal con retardo

  Yn := (b1 * VEC_U [KTA - 1 - d]) - (a1 * Yn1);    // Yn1 es el valor de Yn un
instante antes

// Error de predicción : Diferencia entre el proceso real y nominal

  Ep := TITE_202_1 - Yn;

// Modelo nominal rápido (sin retardo)

  Yt := (b1 * VEC_U[KTA - 1]) - (a1 * Yt1);    // Yt1 es el valor de Yn un instante de
tiempo pasado

// Suma del error de predicción y la salida del modelo nominal rápido (sin retardo)

  Yp := Yt + Ep;

// Cálculo del error: Error = Yp - Setpoint

  PID_Exchanger_1.ERR := Yp - PID_Exchanger_1.SP;

// Con el valor del error encontrado anteriormente el PID calcula el esfuerzo de control y lo
envía a TCV 202_1 que es la posición de la válvula de ingreso de agua fría del
intercambiador de disminución de temperatura y el valor del esfuerzo de control lo guarda
en el vector U.

  VEC_U [KTA] := TCV_202_1;

// Desplazamiento y actualización de valores en el vector de la ley de control

// Se utilizó una función FOR para que cuando llegue un nuevo valor de esfuerzo de control
los valores guardados anteriormente se corran una posición antes y se almacene el nuevo
valor de esfuerzo de control.

  FOR I :=1 TO KTA DO

    VEC_U [I - 1] := VEC_U[I];

  END_FOR;

// Actualización de valores pasados del modelo con retardo de tiempo y el modelo rápido

```



$Y_{n1} := Y_n;$

$Y_{t1} := Y_t;$

El periodo de muestreo utilizado para realizar el control de en las etapas de aumento y disminución de temperatura de la leche fue de  $T_s = 1$  segundo.

Se dejan videos de soporte para el desarrollo de prácticas de laboratorio.

### **Bibliografía**

- [1] M. Revelo, “Plataforma Hardware in the Loop Simulation para el laboratorio de control de procesos del PIAI,” 2019.
- [2] J. Sánchez, “Instrucciones generales de los controladores Logix 5000,” pp. 1–17, 2003.