

**APLICACIONES DEL
SIMULADOR HTST 1.0**

Aplicaciones del Simulador HTST 1.0

En esta sección se comentan varias aplicaciones que demuestran el potencial del simulador que se está presentando en particular, y de los Simuladores Dinámicos de Tiempo Real en general. La forma de exponer algunas de las aplicaciones es mediante trabajos prácticos, cuyas soluciones se presentan en la sección final de este libro. Debido a las limitaciones de espacio, no se exploran todas las posibilidades del simulador. Por ese motivo las aplicaciones que se exponen tienen como principal objetivo motivar al lector para que realice sus propias experiencias a fin de obtener el máximo provecho de este simulador. A continuación se hace referencia a actividades posibles que se pueden desarrollar.

Puesta en Marcha de los equipos

En cualquier planta esta operación al menos debe realizarse una vez para lo cual es necesario conocer las etapas lógicas de los procedimientos. En el proceso que se está analizando, la puesta en marcha debe hacerse diariamente. Como se verá, esta operación es bastante difícil debido a

que el proceso no está en condiciones estacionarias sino que evoluciona permanentemente. En esta etapa el operador debe supervisar y controlar esta evolución de forma que el proceso finalmente entre en régimen alcanzando el estado estacionario que corresponde al funcionamiento normal.

Lamentablemente, tanto los operadores como los estudiantes de ingeniería no están tan familiarizados con los estados transitorios como lo están con los estados estacionarios. Por el mismo motivo, le es poco comprensible las complicadas secuencias de operaciones que constituyen una puesta en marcha. En este caso, el simulador es ideal para que ellos obtengan estos conocimientos y habilidades por propia experiencia.

A fin de ver cómo esto es posible, a continuación se describe un intento de puesta en marcha tal como lo encararía una persona sin experiencia en el proceso que se está analizando. Primero se debe llevar el proceso a su estado inicial, para ello se presiona el botón Iniciar. Esto hace que la bomba B1 comience a funcionar impulsando la leche a través de todo el circuito. De esta manera se tiene leche circulando a 4 °C en todos los equipos. Esto se puede comprobar en la mesa de control. Por ejemplo, haga “click” sobre el rótulo FL5 en el *flow sheet*, la mesa de control se

desplaza para mostrar el Panel de Instrumentos correspondiente donde se puede verificar que la temperatura es de 4 °C, el caudal de 7550 kg/h y la presión de 1 atmósfera.

Presione el botón Simular para que el tiempo comience a correr. Se podrá notar que el cronómetro comienza a contar el tiempo a la vez que los Registradores comienzan a graficar los valores de las variables correspondientes. Sin embargo, todas las variables mantienen su valor, lo único que se está haciendo es introducir leche por FL1 y sacarla por FL9. El problema es que todavía no se está pasteurizando. Esta situación es reportada por la alarma de temperatura de FL5. En este caso la temperatura de FL5 es muy baja.

Aparentemente, la próxima acción debe ser encender el equipo calentador ICC. Para ello se hace “click” sobre el rótulo ICC a fin de visualizar el Panel de Instrumentos correspondiente. Luego se presiona el interruptor de encendido/apagado que se puede observar en la siguiente Figura 9.

Al encender el calentador, la temperatura de la leche va aumentando a lo largo del circuito.

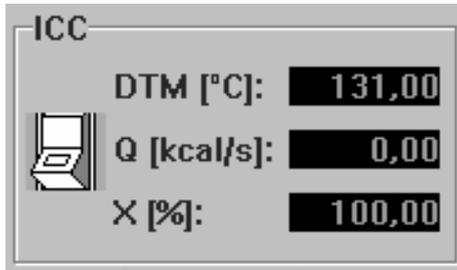


Figura 9.

Pasado un cierto tiempo, se observa que la temperatura de la corriente de salida FL9 también comienza a aumentar, hasta que se activa la alarma de FL9 indicando que la leche está saliendo a una temperatura más alta que la normal. Parece que es el momento de encender el equipo enfriador ICE. Los pasos para encender el equipo ICE son similares a los que se ejecutaron para el equipo ICC.

Por otra parte, la alarma de temperatura de FL5 sigue mostrando que aún no se alcanzó la temperatura de pasteurización. Parece lógico intentar acelerar el calentamiento abriendo la válvula V1 para aumentar la recirculación, que se realiza mediante el cursor correspondiente. Para ello, se debe colocar el control en el modo manual. Este es el estado inicial del controlador, por lo tanto sólo se debe hacer “click” sobre el rótulo V1 para acceder al Panel de Instrumentos correspondiente. Luego se actúa

sobre el cursor que aparece en la Figura 10, a fin de llevar la apertura X de la válvula al 100 %.

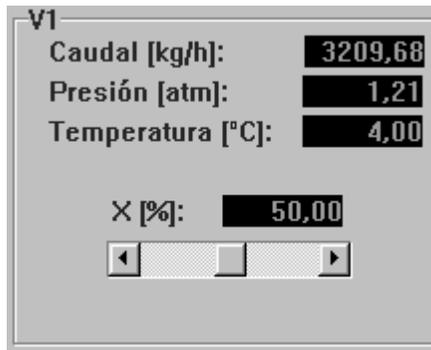


Figura 10.

Mientras se está realizando esta tarea, aparecerá sorpresivamente un mensaje indicando “*Leche congelada en ICE*”, la simulación se detiene automáticamente.

Presionando el botón OK de la ventana de mensaje, ésta será borrada. Analizando las lecturas en la mesa de control se podrá verificar que efectivamente la corriente FL9 alcanzó una temperatura inferior a la temperatura de congelamiento de la leche. Esto significa que deberá apagarse la bomba y el intercambiador ICC a fin de evitar mayores problemas, y luego de descongelar la leche se deberá reintentar la puesta

en marcha. Sin embargo, el simulador no permite continuar con la simulación luego de presentarse el mensaje de leche congelada, sino que debe presionarse el botón Iniciar para volver a intentar la puesta en marcha.

Se invita al lector a que pruebe diferentes secuencias de encendido a fin de optimizar la puesta en marcha del equipo. Esto es, no sólo alcanzar el estado estacionario de funcionamiento normal sino hacerlo en el menor tiempo posible. Una posible solución se da en la última sección de este libro.

Los propósitos respecto a la puesta en marcha tienden a que el usuario del simulador encuentre respuesta a algunas de las siguientes cuestiones: ¿Cuáles son los pasos seguidos para poner en marcha los equipos?, ¿Cuáles son los valores por ejemplo de las corrientes FL5.W, FL5.P y FL5.T en el estado estacionario?, ¿Cuál es el porcentaje de apertura de la válvula?, ¿Cuánto de leche se está recirculando en el estado estacionario?, ¿En que tiempo se alcanzó el estado estacionario?, ¿Cuál es el tiempo mínimo para la puesta en marcha de los equipos?.

Hay que recordar al operador que este simulador a diferencia de otros contempla el estado transitorio, además que no es un programa de aplicación más, sino que es adecuado por ejemplo para estudiar las propiedades físico químicas, los balances de materia, energía y cantidad de movimiento, la instrumentación y el control, etc..

Ajuste de Controlador

Una vez realizada la etapa de puesta en marcha del simulador, lo que implica haber alcanzado las condiciones estacionarias en el proceso de pasteurización, se pueden estudiar los cambios en los valores de los parámetros del controlador que son el *set point*, K_c y T_i y observar el comportamiento ante los nuevos valores de las variables y los Registradores. Se propone comenzar a explorar el ajuste del controlador variando cada uno de los parámetros por vez.

Para cambiar uno de los parámetros haga “click” en el rótulo CT para habilitar el Panel de Instrumentos correspondiente al controlador, que contiene los cursores para modificar cada uno de los parámetros.

Por ejemplo, se puede probar llevando el cursor correspondiente al *set point* de 75 °C a 79 °C presionando con el mouse y arrastrando el botón de Desplazamiento. Esta situación se muestra en la Figura siguiente.

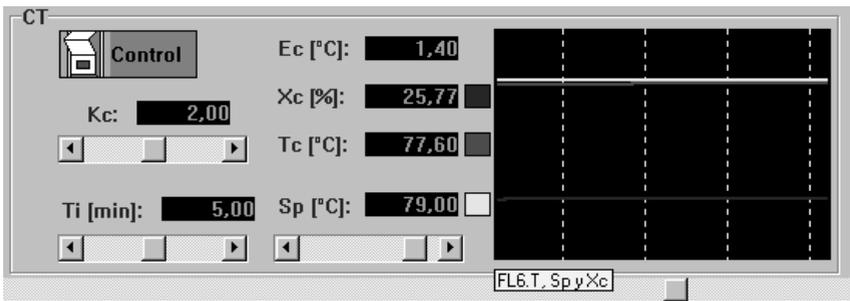


Figura 11: Panel de Control que muestra como se acerca en forma asintótica la temperatura al nuevo valor del *set point*.

El propósito básicamente es dar respuesta a algunas de las siguientes cuestiones: ¿Cómo evolucionan los valores de las variables y de los Registradores ante este cambio?, ¿Se alcanza el nuevo valor del *set point*?, ¿Alcanza el proceso un nuevo estado estacionario?, etc.. Hay que recordar, que para ver los valores de las variables de todos los equipos y los Registradores se puede presionar en los rótulos de los equipos o de las corrientes deseadas, o bien mediante la barra de desplazamiento. El paso siguiente que el usuario puede realizar es investigar que sucede cuando se varía K_c y T_i del controlador.

Para comenzar presione el botón Estabilizar y luego el botón Simular para que el sistema se encuentre en estado estacionario con un *set point* de 75 °C. Aumentar K_c utilizando las barras de desplazamiento correspondiente al máximo valor (4) y ver los cambios que son reportados en la mesa de control.

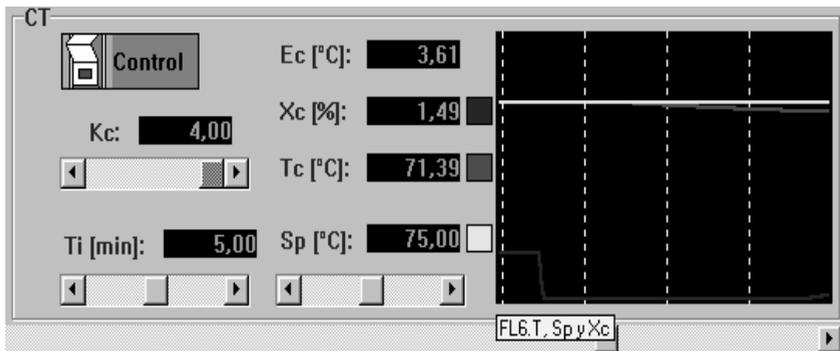


Figura 12.

¿Alcanza nuevamente el estado estacionario el sistema?

Repetir la simulación pero ahora disminuyendo T_i al mínimo, o variando K_c y T_i simultáneamente y estudiar el comportamiento del sistema. Observar si se desestabiliza o no, analizar el tiempo que tarda en llevarlo nuevamente al estado estacionario, la sensibilidad de las variables de estado, etc..

Los parámetros del controlador se pueden cambiar en cualquier momento, o sea, desde el inicio de la simulación hasta el estado estacionario pasando por cualquier situación correspondiente al estado transitorio.

Activación de Ruido

Hasta ahora se ha descrito el funcionamiento del simulador relacionado con situaciones ideales, pero en la mayoría de las situaciones las medidas reportadas tienen asociado el ruido correspondiente al aparato de medida a las variables. Para contemplar esta situación se utilizará otra de las herramientas que presenta este simulador, el ruido, que contempla el correspondiente al ruido interno y externo.

Para iniciar el estudio del ruido se propone partir desde el estado estacionario del proceso, luego presionar el botón de Activación de Ruido.

Se observará que en los Registradores e Indicadores se reportan lecturas oscilantes. A continuación se muestra la situación descripta.

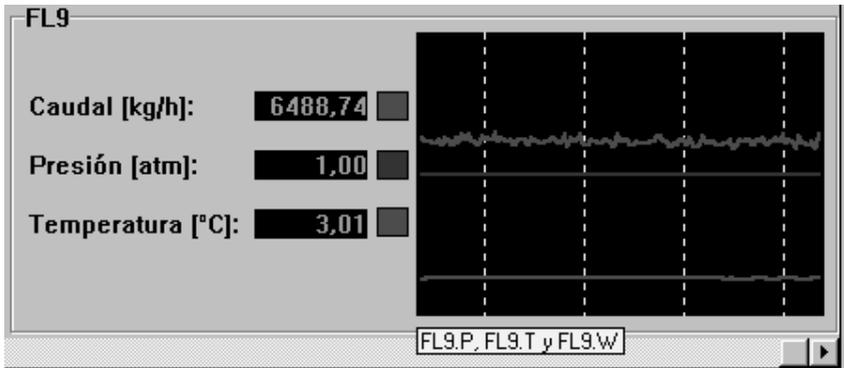


Figura 13: Panel de Control de la corriente FL9 y el Registrador correspondiente cuando está activado el ruido en el proceso.

El usuario puede activar el ruido en cualquier momento de la simulación presionando el botón de Ruido o a través del menú. Se propone realizar el estudio del ruido en las siguientes situaciones:

- * A partir del estado estacionario activar el ruido y cambiar los parámetros del controlador K_c , T_i y *set point*, tal como en el caso del ajuste del controlador.
- * Iniciar la simulación con el ruido activado.

En estas situaciones se debe observar el comportamiento del proceso de pasteurización: si se desestabiliza o no el sistema, el tiempo que tarda si es

que alcanza el estado estacionario, etc.. En la Figura 14 se muestra el ruido correspondiente al instrumento de control.

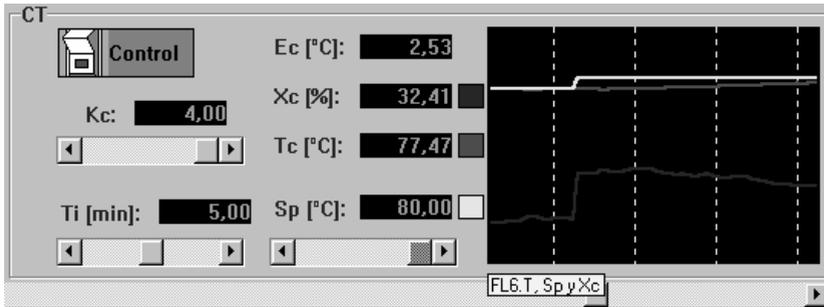


Figura 14.

Hay muchas otras situaciones que en este manual no están descritas pero en el simulador pueden ser estudiadas, y se deja que el usuario descubra diversos comportamientos teniendo como variable el ruido del proceso. ¿Cuáles son las variables que son más influenciadas por el ruido en el proceso de pasteurización?.

Activación de Fallas

Otro de los problemas con los que seguramente puede enfrentarse un operador en una planta química es la ocurrencia de diversas fallas. Este

simulador contempla la posibilidad de introducir algunas fallas en el proceso que se activan con el botón correspondiente a las fallas. Al ser presionado muestra el cuadro de fallas tal como se describió anteriormente, deben seleccionarse las fallas y sus características.

El estudio de fallas se dividió en dos secciones. En la primera (fase de entrenamiento), se explica como usar el simulador para estudiar el comportamiento del proceso cuando es afectado por fallas. En la segunda sección (fase de diagnóstico), se usa el simulador para evaluar la capacidad de un operador para manejar situaciones provocadas por fallas.

Fase de Entrenamiento

Supongamos que ya se logró superar la etapa de puesta en marcha y el proceso de pasteurización entró en régimen estacionario. Ahora se puede iniciar el estudio de las fallas partiendo del estado estacionario tal como en el caso de la consideración del ruido, para ser activada se presiona el botón correspondiente a las fallas y en el Cuadro de Fallas seleccionar la falla de la bomba, B1_Baja al 20 %, para un tiempo de activación de 2 minutos y un tiempo de desarrollo de 1 minuto. Esto implica que la bomba

envía un caudal menor al correspondiente del valor normal, tal como se muestra en la Figura 15.

Observe que no solo los caudales son afectados por la falla. En efecto, la mayoría de las variables dejaron de ser normales. Es responsabilidad del operario tomar las acciones correspondientes para normalizar el proceso o minimizar las pérdidas. Para adoptar una buena decisión, el operario debe analizar las posibles causas y consecuencias del actual estado del proceso.

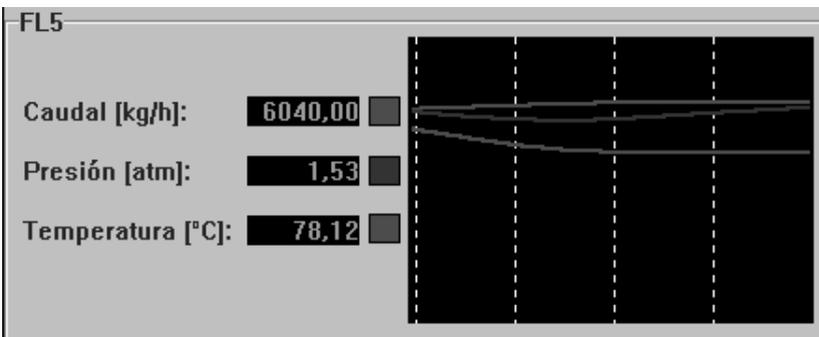


Figura 15.

En el primer caso, a partir de las lecturas reportadas en el panel de control, el operario debería ser capaz de determinar que la causa de la

presente es debido a una falla en la bomba. Luego, deberá informar ésto al grupo de mantenimiento.

En el segundo caso, a partir de las tendencias de las lecturas, el operador debe identificar estados peligrosos e inminentes, luego, deberá adoptar las medidas pertinentes para evitar que el proceso evolucione hacia dicho estado.

Es de destacar las dificultades que se presentan en el estudio de las causas. El operador debe enfrentar el ruido, el *stress*, la complejidad de las lecturas, etc.. Son estos los motivos que impulsaron el desarrollo de Sistemas de Diagnósticos de Fallas para asistir a los operarios en estas situaciones.

La tendencia de las líneas en el Registrador, permite apreciar que en este caso el proceso luego de transcurrir un cierto tiempo vuelve al estado estacionario, y no es necesario la intervención del operador. El usuario del simulador HTST podrá observar los nuevos valores de las variables y los registrados para el estado estacionario que se alcanza en el tiempo correspondiente.

En este caso, si bien se alcanza un nuevo estado estacionario, la falla en el proceso sigue actuando. La eliminación de la falla del equipo, por reparación o cambio, en el simulador equivale a presionar el botón de Fallas para desactivarla.

Si ahora, el usuario aumenta la amplitud al 50 % (es decir que la bomba envía un caudal del 50 % menor al valor normal), en todo el circuito el caudal disminuirá y luego de transcurrido un cierto tiempo aparecerá un mensaje en la mesa de control, como se aprecia abajo.

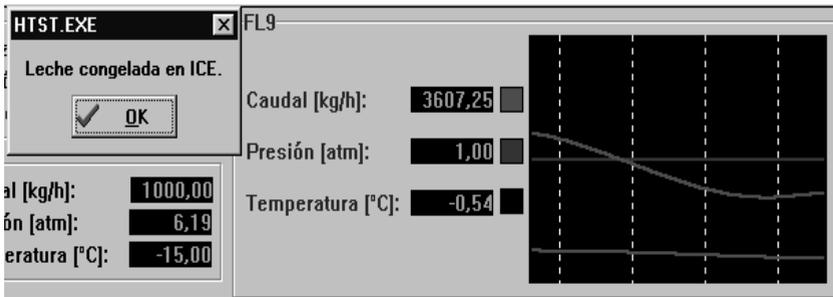


Figura 16.

Esta situación muestra la necesidad de la intervención del operador. El mensaje de leche congelada aparece porque la temperatura es inferior al punto de congelamiento de la leche ($-0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$). Note que, para el mismo tipo de falla, se obtienen efectos diferentes. En este caso las amplitudes diferentes provocaron las dos situaciones planteadas.

Ahora seleccione una falla correspondiente al controlador CT_Entrada_Alta con una amplitud del 20 %, es decir que el sensor de temperatura del controlador CT indica una temperatura mayor que la normal. Debido a que detecta una temperatura alta, el controlador envía una señal a la válvula V1 para que se cierre y así evitar la recirculación y disminuir la temperatura aparente. En este caso, se observa que luego de un cierto tiempo el sistema se estabiliza rápidamente (en alrededor de 7 minutos), el sensor detecta 90 °C , no hay recirculación, o sea que la válvula V1 se cierra completamente y la alarma de la corriente FL5 muestra que la leche no alcanza la temperatura de pasteurización, situación que se muestra en la Figura de adelante.

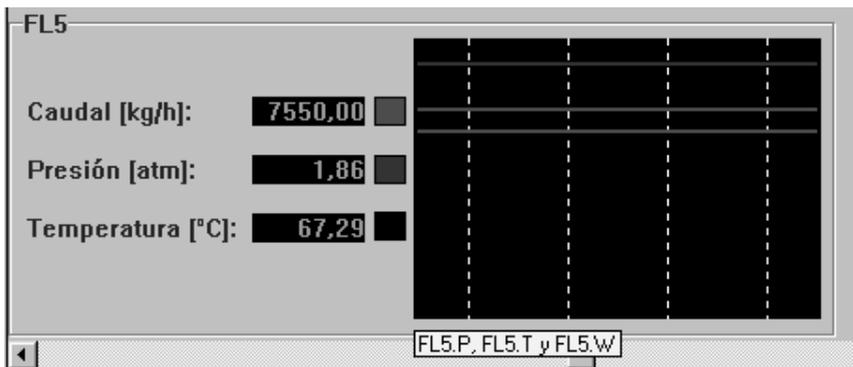


Figura 17.

Es otra situación donde debe intervenir el operador que tiene dos alternativas para alcanzar las condiciones de pasteurización: pasar a control manual y variar la apertura de la válvula V1, reparar o cambiar el sensor, lo que equivale a desactivar el botón de Fallas.

Las fallas pueden activarse en cualquier momento, en este caso se propone estudiar cada una de las fallas en dos situaciones con amplitudes del 20 % y del 50 % para ver que decisión debe adoptar el operador. El simulador también contempla la posibilidad de iniciar la simulación con fallas.

En las situaciones analizadas el operador conoce la causa, la falla del equipo, y con su entrenamiento podrá luego hacer frente a fallas que aparecerán tal como pueden manifestarse en una sala de control.

Fase de diagnóstico

En los problemas planteados en la fase de entrenamiento se conoce la causa, al correr la simulación se ve como evoluciona el sistema ante la presencia de una falla. A continuación se plantea otra de las posibilidades que le brinda el simulador y para tener éxito se recomienda haber probado todas las fallas con distintas características analizando su

evolución en el tiempo, fundamentalmente a través de los Registradores. Este planteo permitirá una mayor aproximación a una sala de control de una planta química en donde hay que enfrentarse con diversas situaciones y el operador debe decidir muchas veces en tiempos muy cortos.

Imaginemos que es el operador de la sala de control y en un momento dado observa en el Registrador, que la corriente de leche ya pasteurizada y enfriada en el sistema sale del régimen estacionario y evoluciona tal como se ve en la Figura que esta a continuación.

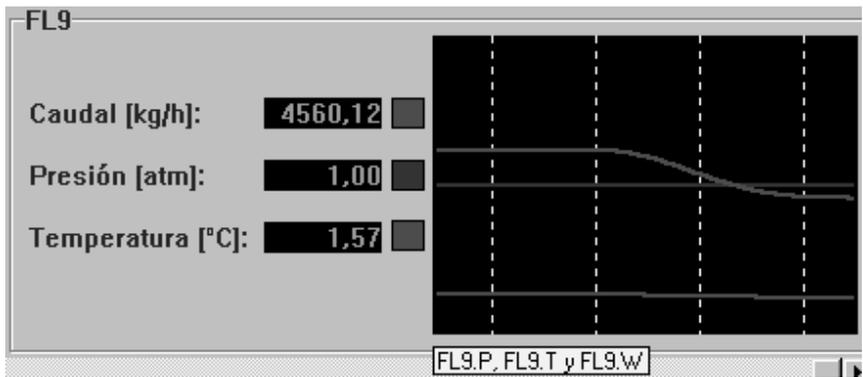


Figura 18.

La temperatura y el caudal de la corriente de salida FL9 disminuyen. ¿Qué es lo que provoca estos cambios?, ¿Cómo continuará evolucionando el sistema?, ¿Cuál será la próxima acción del operador?, ¿En que equipo se ha producido una falla?.

Aquí debe identificar posibles causas de los cambios en la corriente FL9. Podrá ayudarse con la lectura de Registradores de otras corrientes o equipos a los que puede acceder mediante la barra de desplazamiento o haciendo click en cada uno de los rótulos de las corrientes o equipos que permiten acceder directamente. Si usted logra encontrar posibles causas puede seguir adelante, sino repita la fase de entrenamiento. Para que este ejercicio sea de utilidad, es necesario que otra persona programe las fallas que usted deberá enfrentar.

Pruébese a usted mismo respondiendo algunas de las cuestiones siguientes: ¿Qué haría como responsable de una sala de control?, ¿Hay que detener el proceso?, ¿Cuál es la alternativa de solución más conveniente?, ¿En cuál de los equipos ocurrió la falla? .

Finalmente podrá decir con un cierto grado de certeza dónde ocurrieron las fallas, qué decisión se debe tomar, cómo evolucionará el proceso ante una perturbación, etc..

Parada de equipo

Todo proceso debe en algún momento detenerse, como puede ser por reparación, mantenimiento, cambio de la naturaleza de la alimentación (Ej. leche descremada, leche entera).

En el proceso de pasteurización están involucrados las tres formas de transferencia: materia, energía y cantidad de movimiento que ocurren en equipos diseñados para tal fin. Apagar un equipo implica que dichos fenómenos de transferencia no se cumplan, para lo cual es necesario ejecutar procedimientos lógicos de parada. Supongamos que se necesita detener el funcionamiento del proceso ¿Cuál sería el procedimiento correcto?, ¿Hay sólo un procedimiento de parada en el proceso de pasteurización?

En los equipos involucrados en el proceso de pasteurización, las variables que se puede manipular son el botón de On / Off del intercambiador de calor calentador ICC y del intercambiador de calor enfriador ICE, la válvula de control, pero se debe tener en cuenta que la parada de los equipos debe lograrse en el menor tiempo posible y con la mínima cantidad de leche no pasteurizada.

Por ejemplo, teniendo el proceso en estado estacionario, hacer click en el rótulo correspondiente al calentador ICC para habilitar el Panel del Instrumentos, cambiar la posición del botón de On a Off.. ¿Qué sucede

con la temperatura y el caudal de la corriente FL9?, ¿Cuál es el equipo que se apaga al último?, ¿Cómo influye en el costo la parada de equipos?. Finalmente luego de varios intentos será el lector un experto en realizar la parada de los equipos. Proponga una mejor secuencia de apagado de los equipos del pasteurizador, indicando los tiempos que demanda dicha secuencia.

Soluciones

En esta sección se presentan algunas alternativas de solución para la puesta en marcha, el ajuste del controlador y la parada de los equipos. Hay que recordar que pueden existir varias soluciones, pero se intenta buscar la mejor solución.

Solución 1: Puesta en Marcha

- Encender el calentador ICC.
- Esperar a que la temperatura de la corriente FL9 alcance la temperatura de 12 °C.

- Cambiar en el Panel de Instrumentos del control de manual a automático.
- Encender el enfriador ICE.

Con estos pasos se llega al estado estacionario en el tiempo de 8 minutos aproximadamente.

Solución 2: Puesta en Marcha

- Encender el calentador ICC.
- Presionar en el rótulo de la válvula V1 y cambiar la apertura de la misma al 100 %.
- Esperar hasta que la temperatura de la corriente FL9 alcance un valor de 15 °C.
- Cambiar en el Panel de Instrumentos del control de manual a automático.
- Encender el enfriador ICE.

Con esta secuencia se alcanza el estado estacionario en menor tiempo.

Solución 3: Ajuste de Controlador (SP)

Primero se debe recordar que debe presionar el botón Estabilizar y luego simular para que el sistema se encuentre en régimen estacionario. Luego:

- Hacer “click” en el rótulo del controlador para ver el Panel de Instrumentos correspondiente.
- Con el cursor perteneciente al *set point* aumentar este al valor de 79 °C.

Sería el caso en que las condiciones microbiológicas de la leche requieren de una pasteurización más rigurosa. Se observará que la temperatura de la corriente FL6 se incrementará hasta alcanzar la nueva temperatura objetivo.

Solución 4: Ajuste del controlador (K_c)

Igual que para la solución 3, el sistema debe estar en régimen estacionario y luego hacer:

- En el Panel de Instrumentos del controlador con el cursor correspondiente a la ganancia del controlador K_c aumentar el valor a 4.

En esta situación el sistema alcanza el estado estacionario asintóticamente.

Solución 5: Parada de planta

Una vez que se ha procesado la casi totalidad de leche fresca, se debe detener el funcionamiento de los equipos, esto se denomina “parada de planta”. Durante la misma, la planta abandona el régimen estacionario de operación normal para evolucionar hacia un nuevo estado (planta detenida).

El procedimiento óptimo de parada debe minimizar la cantidad de leche que queda sin pasteurizar y evitar situaciones inconvenientes durante el transiente.

Una solución aceptable es apagar los equipos ICC, ICP y CT simultáneamente y luego apagar la bomba B1. Esto hace que la toda la leche que sale hasta que se detiene la bomba está pasteurizada, mientras que sólo queda sin pasteurizar la leche que quedó retenida en los equipos.

Observe que lo más importante de este procedimiento es que la bomba se apaga al final, de lo contrario se correría el riesgo de quemar la leche en el calentador ICC o de congelarla en el enfriador ICE.

Análisis de un caso particular de Puesta en Marcha

A continuación se describe y se analiza el caso de puesta en marcha presentado en la solución 1. El procedimiento seguido es el siguiente.

- Presionar el botón Iniciar y luego encender el calentador ICE.
- Esperar a que la temperatura de la corriente FL9 alcance los 13 °C. Esto ocurre en aproximadamente 2 minutos.
- Inmediatamente en el Panel de Instrumentos cambiar de control de manual a automático.
- Al mismo tiempo encender el enfriador ICE.

Diez minutos después de ejecutar estos pasos, se puede ver que las lecturas de los registradores de FL5 y FL9 tienden a estabilizarse indicando que el proceso alcanza el estado estacionario correspondiente a la operación normal.

La solución que se presentó es una de las varias posibles. La mejor alternativa será aquella que minimice el tiempo que demora el proceso en alcanzar el estado estacionario, porque ello hará también mínimas la cantidad de leche mal pasteurizada. La selección de la mejor alternativa implica realizar una serie de experimentos donde se probarán distintos procedimientos de puesta en marcha. Para esta tarea se podrá emplear alguna técnica de optimización. Sin embargo, es posible alcanzar una buena solución (sino la óptima) realizando un estudio de la dinámica de la puesta en marcha a fin de determinar cuáles son los pasos críticos de la misma. Esto, además de eliminar la necesidad de aplicar alguna técnica de optimización, brinda la oportunidad de alcanzar una mayor comprensión de la operación del proceso.

A modo de ejemplo, se puede analizar el procedimiento de puesta en marcha propuesto como solución. Para ello se estudiarán los cambios que se producen en cada uno de los equipos a lo largo de aproximadamente 20 minutos a partir del inicio de la puesta en marcha.

Mezclador (M1)

En este equipo se produce la mezcla de la corriente FL1 que tiene una temperatura de 4 °C y una presión de una atmósfera con caudal variable que depende de la cantidad de la leche que se recicla a través de la corriente FL11 cuya temperatura, presión y caudal son variables. Ambas corrientes producen la corriente FL2 que tiene un caudal constante, pero la temperatura y la presión varían a medida que aumenta el tiempo de proceso de pasteurización, tal como se muestra en la siguiente Figura.

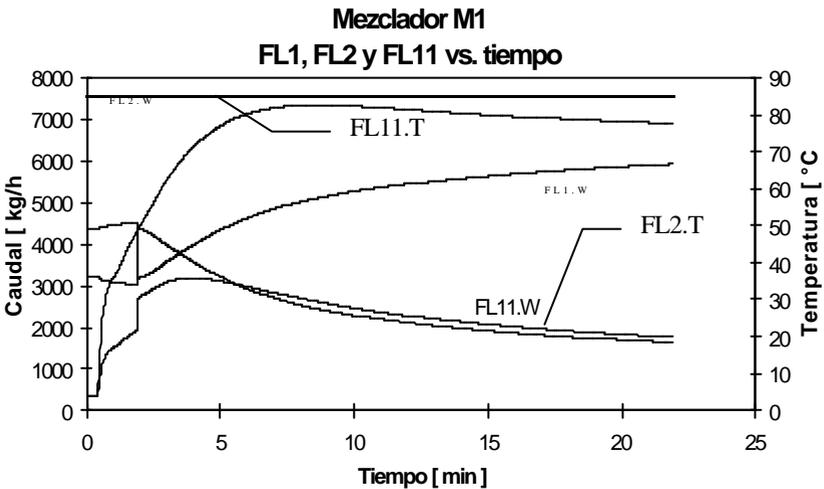


Figura 19: Variación de las propiedades de las corrientes FL2 y FL11 en función del tiempo

En la Figura 19 se observa que al inicio de la puesta en marcha la cantidad de leche que circula en la corriente FL2 es de 7550 kg/h y se mantiene constante. Para que esto suceda, varían los caudales de las corrientes FL1 y FL11. Al principio el caudal de la corriente FL11 tiene una tendencia decreciente hasta el cambio de control manual a control automático donde aumenta bruscamente (se abre por completo la válvula) y luego sigue con la tendencia decreciente hasta alcanzar un valor de 1341 kg/h en el estado estacionario. Por lo contrario, el caudal de la corriente FL1 tiene una tendencia creciente hasta que se activa el control automático. A partir de allí disminuye bruscamente para luego evolucionar con una tendencia creciente hasta alcanzar en el estado estacionario el valor de 6210 kg/h. Al cambiar a la forma de control automático la recirculación de leche es máxima, la apertura de la válvula es del 100 %. Esto ocurre porque el sensor del controlador indica que la leche todavía no alcanzó la temperatura de pasteurización y el controlador intenta corregir la situación aumentando la recirculación.

También en la Figura 19 se puede observar que al principio la temperatura de las corrientes que ingresan y salen de M1 no varían, esto se debe principalmente al retardo que de 26 segundos que introduce el equipo TP. Luego la temperatura de la corriente FL2 aumenta al principio

y alcanza el valor máximo de 35.76 °C cuando el caudal de recirculación es máximo y luego disminuye para alcanzar un valor de 16.61 °C en el estado estacionario. La corriente FL11 tiene una tendencia creciente hasta llegar a la temperatura de 82.5 °C para luego descender y alcanzar en el estado estacionario el valor de la temperatura de pasteurización, o sea de 75 °C.

Intercambiador de calor precalentador (ICP)

Este es un intercambiador de calor de doble tubo cuyo objetivo es precalentar la alimentación aprovechando que la corriente caliente debe ser enfriada nuevamente. El caudal que circula por el tubo mantiene un valor constante de 7550 kg/h, pero está acompañado de variaciones de temperatura y presión.. En cambio, en el ánulo además de las variaciones de temperatura y presión, hay variaciones de caudal de las corrientes FL7 o FL8 que dependen de la cantidad de leche reciclada.

En la Figura 20 se muestra la variación de caudal que pasa por el ánulo y que no se recicla.

Al inicio de la puesta en marcha la cantidad de leche que no se recicla es del 50 %, lo que equivale a un caudal de 3750 kg/h, siguiendo una

tendencia creciente hasta alcanzar aproximadamente 4529 kg/h, luego disminuye en forma rápida cuando se cambia de control manual a control automático hasta un valor de 3184 kg/h y a continuación sigue una tendencia creciente hasta alcanzar en el estado estacionario un valor de 6209 kg/h.

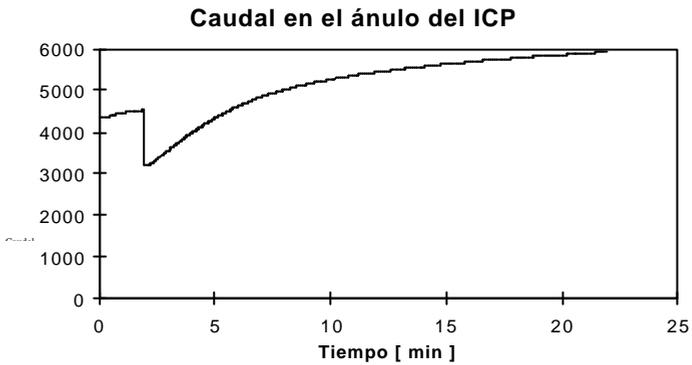


Figura 20: Evolución del caudal en la puesta en marcha

El calor intercambiado entre la corriente del tubo y del ánulo es variable en el periodo de puesta en marcha y está directamente relacionado con los rangos y las diferencias de temperatura cuya variación con el tiempo se muestra a continuación.

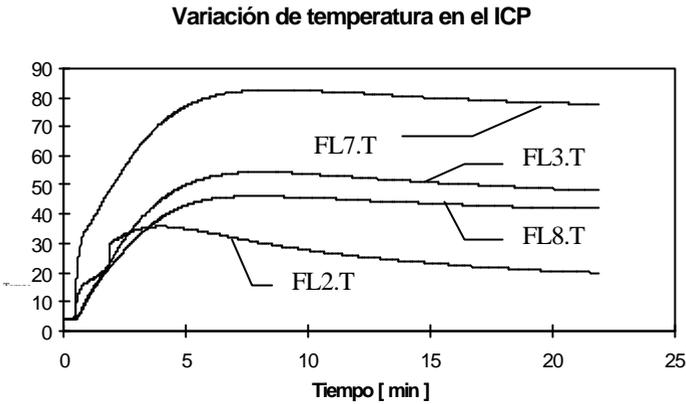


Figura 21: Evolución de la temperatura en el tubo y ánulo

Al igual que en el mezclador M1, en la Figura 21 se observa que las temperaturas de las corrientes no varían hasta que transcurren 26 segundos, tiempo que necesita para llegar la leche caliente desde el ICC. En este equipo la corriente que circula por el ánulo es la corriente caliente y la que circula por el tubo la corriente fría que se debe precalentar. Se observa que la temperatura de la corriente FL7 (corriente caliente de entrada al ánulo) tiene una tendencia creciente, alcanza un valor máximo de 82.5 °C y luego disminuye hasta 75 °C en el estado estacionario. Se mantiene siempre un rango de temperatura respecto a la corriente FL3, lo que permite que la transferencia de calor a la corriente que circula por el tubo sea posible y ésta pueda aumentar su temperatura desde un valor inicial de 4 °C hasta un máximo de 54.38 °C para luego disminuir hasta el estado estacionario donde la temperatura es de 45.37 °C.

En el otro extremo del intercambiador de calor la transferencia está relacionada con los valores de temperatura de las corrientes FL2 y FL8. En este caso se puede ver que, durante la evolución de la puesta en marcha, la temperatura de la corriente FL2 es mayor que la temperatura de la corriente FL8, lo que implica que la transferencia de calor es del fluido que circula por el tubo al fluido que circula por el ánulo, o sea en sentido inverso a la situación en estado estacionario. Esto es debido a la cantidad de leche fría que existe inicialmente en el ánulo y a la elevada cantidad de recirculación de leche caliente. Esta situación ocurre al principio de la simulación, cuando se cambia de control manual a control automático, donde la válvula tiene una apertura del 100 % . Esto implica que en algún momento la corriente FL8 es calentada y el ICP actúa como un enfriador de la corriente FL2. La temperatura de la corriente FL2 evoluciona desde 4 °C, alcanza un valor máximo de 35.76 °C a los 22 minutos desde que se inicia el proceso y cuando llega al estado estacionario la temperatura es de 16.61 °C. En cambio la corriente FL8 desde el comienzo tiene una tendencia creciente desde los 4 °C hasta alcanzar un valor máximo de 46.18 °C y luego evoluciona hasta llegar al estado estacionario con una temperatura de 40 °C.

Se destaca en la Figura 21 una mayor sensibilidad de cambio de la temperatura la corriente FL2 ante una perturbación en el proceso, tal como sucede cuando se cambia de la forma de control manual a control automático. Otra de las variables que sufren cambios importantes durante la puesta en marcha es la presión, la Figura 22 muestra la evolución de la misma en el precalentador ICP para las corrientes que circulan por el tubo y ánulo tanto para las entradas como las salidas.

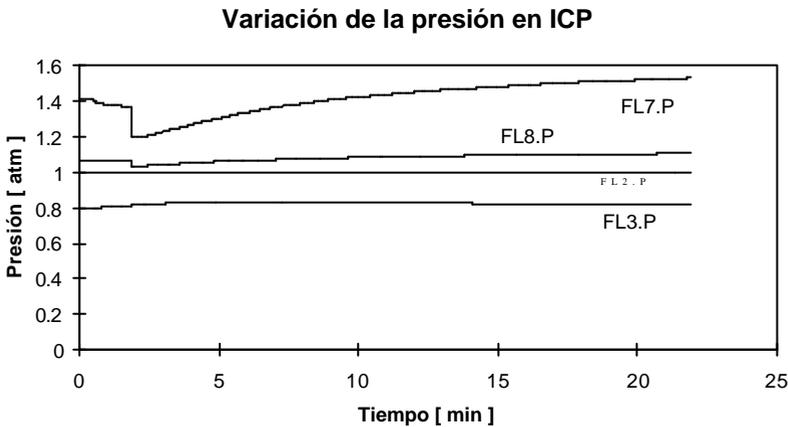


Figura 22: Evolución de la presión en ICP.

Las variaciones de presión están relacionadas con las caídas de presión debidos a la variación de la apertura de la válvula, a la variación de las propiedades físico-químicas dependientes de la temperatura, a la variación de la rugosidad relativa y a los cambios de la velocidad.

La corriente FL7 tiene al momento de iniciar la simulación una presión de 1.42 atm que disminuye paulatinamente hasta los 1.37 atm y cuando se cambia de control manual a control automático disminuye rápidamente hasta alcanzar un valor mínimo de 1.20 atm para continuar luego con una tendencia creciente hasta alcanzar en el estado estacionario 1.59 atm. Además, la corriente FL7 es la más sensible ante cualquier perturbación, tal como el cambio en la forma de control, que está también relacionado con la cantidad de horquillas que tiene el intercambiador de calor.

En la corriente FL2 prácticamente no cambia la presión, y en las otras corrientes FL3 y FL8 los cambios de la presión son pequeños, pero la primera muy pronto alcanzan el valor correspondiente al estado estacionario que es de 0.82 atm.

El planteo realizado para el intercambiador de calor ICP considerando las variaciones de la presión, la temperatura y el caudal permite descubrir situaciones que no se presentan en el estado estacionario, y resulta de esta forma un recurso muy importante para el análisis del proceso y el entrenamiento de estudiantes y operadores.

Bomba

Este equipo tiene la función de mantener constante el caudal en $7550 \text{ m}^3/\text{h}$ y de suministrar la potencia necesaria para la circulación de la leche en todo el circuito de pasteurización. Además del valor constante del caudal se considera que la temperatura no cambia al atravesar la leche a través de la bomba, solo hay cambio de la presión media de la bomba B1.P.

A partir del comienzo del proceso de pasteurización la presión disminuye lentamente desde 1.13 atm hasta 1.11 atm, luego de cambiar la forma de control de manual a automática disminuye rápidamente hasta un valor mínimo de 1.03 atm, para luego aumentar paulatinamente hasta alcanzar 1.22 atm en el estado estacionario.

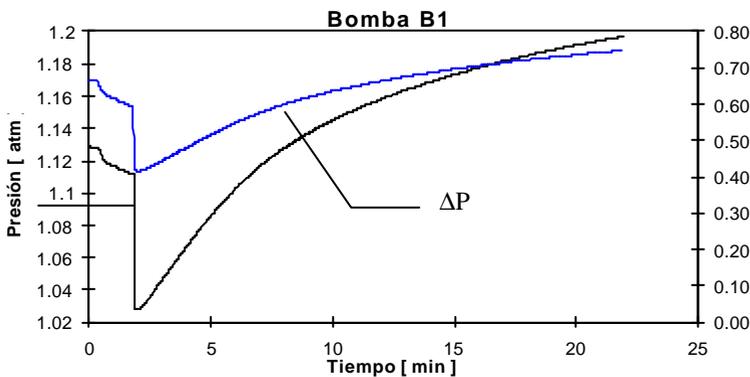


Figura 23: Evolución de la presión media y ΔP durante la puesta en marcha.

La bomba B1 aumenta la presión de la corriente FL3 en un valor ΔP que al inicio del proceso es igual a 0.67 atm, y evoluciona de igual forma que la presión media. El valor mínimo de ΔP corresponde a 0.42 atm y ocurre justo cuando se cambia a control automático, y el valor mayor corresponde a 0.8 atm en el estado estacionario.

Intercambiador de calor ICC

La función del intercambiador de calor ICC es calentar la leche para que alcance la temperatura de pasteurización de 75 °C. Para ello se utiliza vapor saturado a 135 °C que condensa isotérmicamente. Entonces, se considera solamente las variaciones que sufren la temperatura y la presión del tubo durante la puesta en marcha, el caudal que circula por el mismo es constante; en la camisa hay variaciones de la presión de vapor y el título del fluido que circula por la camisa calefactora. El calentador ICC es el primero de los equipos que se enciende para la puesta en marcha. Los cambios de temperatura originados se muestran en la Figura 24.

La temperatura de FL5 aumenta inmediatamente ya que el calentador es el primer equipo que se enciende, mientras que la temperatura de la corriente FL4 aumenta recién después de que la leche se recicla.

La Figura 24 permite ver que en todo momento de la puesta en marcha hay una gran diferencia de temperatura entre la corriente fría que circula por el tubo y la corriente caliente que circula por el ánulo cuya temperatura permanece constante a 135 °C, lo que implica que se transfieren grandes cantidades de calor.

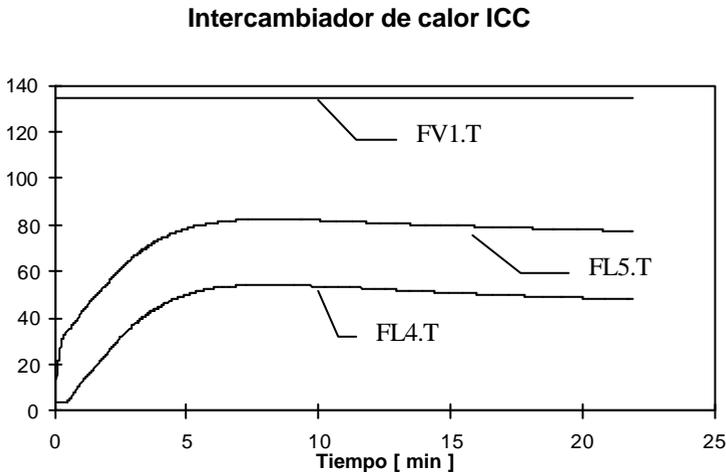


Figura 24: Variación de temperatura en ICC en función del tiempo

La temperatura de las corrientes FL4 y FL5 tienen una tendencia creciente al comienzo, luego la temperatura de la corriente FL4 alcanza un máximo de 54.38 °C y evoluciona hasta alcanzar el estado estacionario donde la temperatura es de 45.37 °C, mientras que la corriente de salida del intercambiador ICC llega a un valor máximo de 82.49 °C y luego disminuye lentamente hasta alcanzar en el estado estacionario el valor requerido de 75 °C.

La caída de presión en el tubo ICC depende de los cambios de temperatura, de la apertura de la válvula, y de los caudales. En la Figura 25 se muestran los cambios de la presión de entrada FL4 y salida FL5 durante el proceso de puesta en marcha. Tanto la presión de FL4 como la de FL5 evolucionan con una tendencia decreciente partiendo de 1.46 atm y 1.42 atm hasta alcanzar 1.41 atm y 1.37 atm respectivamente.

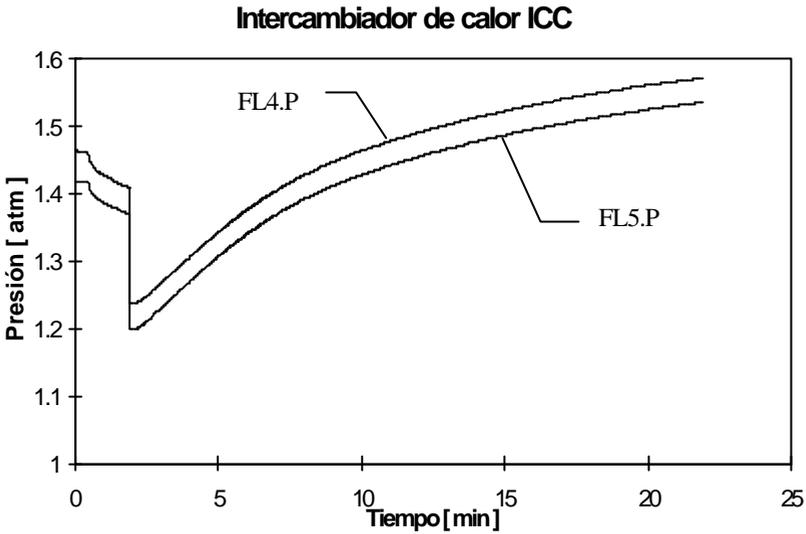


Figura 25: Variación de la presión de entrada y salida de ICC

Luego disminuyen bruscamente alcanzando sus valores mínimos cuando se cambia de control manual a control automático, y a partir de allí aumentan para estabilizarse en 1.62 atm y 1.59 atm para la corriente FL4 y FL5 respectivamente. Es decir que la caída de presión en el estado estacionario en el tubo intercambiador de calor ICC es de 0.03 atm.

Tubo Pasteurizador TP

La función del tubo pasteurizador TP es la de mantener por un tiempo de 26 segundos la leche a la temperatura de pasteurización, es decir, a 75 °C. Esto se logra con un recubrimiento aislante que hace que el comportamiento del tubo pasteurizador se aproxime a la de un sistema adiabático.

Los cambios de temperatura observados durante la puesta en marcha se deben exclusivamente a las variaciones de la temperatura del fluido que pasa por él debido a que la corriente de salida del ICC varía. Cuando se alcanza el estado estacionario la temperatura de entrada y salida son iguales.

En cuanto las presiones, sólo hay una caída de presión muy pequeña debido a fricción de forma y superficie. En la Figura 26 se muestran los cambios de las temperaturas de entrada y salida, y cómo a medida que pasa el tiempo están temperaturas se aproximan.

Variación de la temperatura en el TP

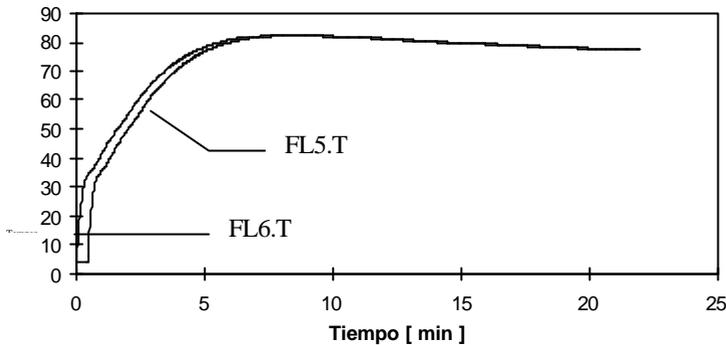


Figura 26: Evolución de la temperatura de pasteurización

Intercambiador de calor ICE

La leche proveniente de TP debe ser enfriada rápidamente para lo cual primero pasa por el ICP para precalentar la alimentación de leche fresca. De esta forma se recupera parte de del calor utilizado y se enfría la leche ya Pasteurizada. Sin embargo, aún no se alcanza la temperatura de almacenamiento (4 °C). Esta es la misión del equipo ICE que emplea amoníaco líquido para continuar con el enfriamiento.

En el periodo de puesta en marcha las variables que se analizan son el caudal, la temperatura y presión de la corriente del tubo (Figura 27). El

fluido refrigerante se mantiene a una temperatura de $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ y circula por la camisa.

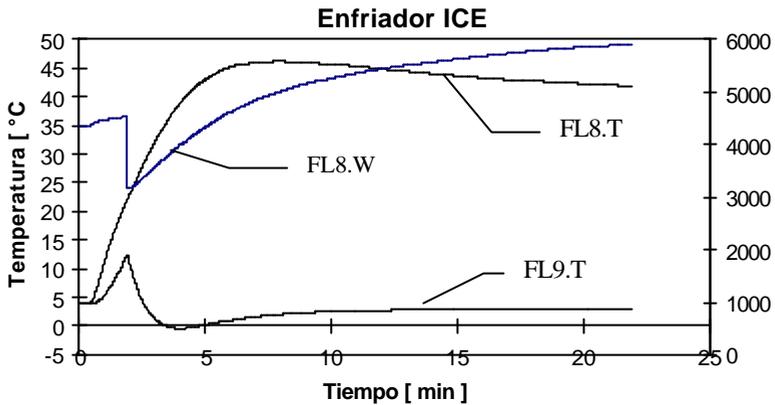


Figura 27: Variación de la temperatura de FL8, FL9 y caudal.

Válvula V1

La Figura 28 muestra el comportamiento de la válvula V1 durante la puesta en marcha. La apertura X permanece inicialmente constante debido a que el controlador CT está en modo manual. Cuando CT pasa a modo automático, el mismo provoca un brusco incremento de la apertura a fin de aumentar lo más rápidamente posible la temperatura de la corriente FL5.

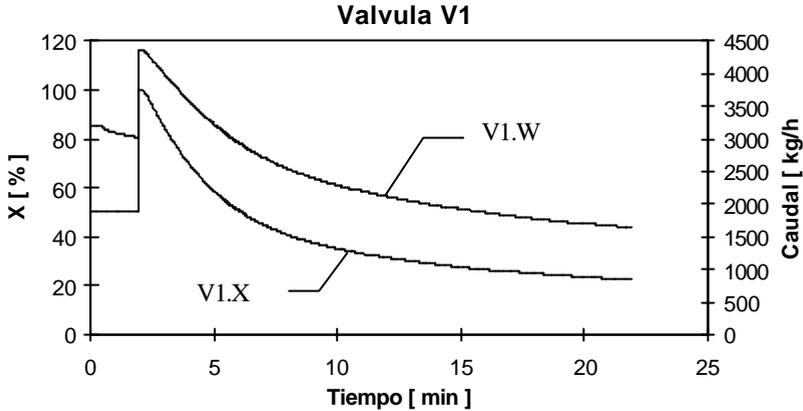


Figura 28: Cambio en la apertura de la válvula y el caudal

Este tipo de análisis puede realizarse también para estudiar otros estados transientes como los originados por fallas, acciones del operador, o la parada de planta. De esta forma es posible adquirir un conocimiento profundo de la dinámica del proceso que será de suma utilidad a la hora de operar el mismo. Además, este tipo de análisis permite a los estudiantes de ingeniería familiarizarse con los distintos fenómenos de transporte y con la dinámica de cada equipo utilizado para llevar a cabo una operación unitaria. De esta manera el estudiante adquiere un experiencia que puede utilizar para comprender otros procesos.