

ELO-372 Automatización Industrial

Tarea 1: Control y Supervisión de un Estanque Termo-Mezclador

Abril de 2025

Objetivos

- Simular el modelo dinámico de un estanque termo-mezclador, desarrollando un diagrama de bloques LabVIEW con componentes de la toolkit Control Design & Simulation
- Implementar lazos de control realimentado en cascada de temperatura y nivel, y de razón de flujos, en un PLC virtual FESTO, mediante bloques de control PID, desarrollando un programa en lenguaje de programación “FBD” con el software CoDeSys V3.5
- Desarrollar una interfaz HMI para supervisar la operación Manual y Automática del estanque termo-mezclador, agregando botones, controles, indicadores y gráficos de tendencia al Panel Frontal de LabVIEW, conectando el PLC virtual con la simulación del estanque mediante Datasockets OPC
- Analizar el desempeño de los lazos de control realimentado en cascada y compararlo con el desempeño del esquema de razón, ante cambios de referencia y perturbaciones

1. Modelo Dinámico del Estanque Termo-Mezclador

Considere el estanque termo-mezclador E-1 de la figura 1, formado por un estanque cilíndrico de área basal $A[m^2]$ con paredes térmicamente aislantes y un agitador de mezclado M-1, al cual ingresan líquidos a temperatura $T_1[^\circ C]$ y flujo $f_1[m^3/s]$, y a temperatura $T_2[^\circ C]$ y flujo $f_2[m^3/s]$, y sale líquido a temperatura $T_3[^\circ C]$ y flujo $f_3[m^3/s]$. Por diseño se considera que $T_2 > T_1$ y que por efecto de la mezcla se obtiene a la salida un producto líquido homogéneo a temperatura $T_1 < T_3 < T_2$.

Al realizar un balance de masa en $[kg]$ y de energía en $[J/s]$ del producto líquido mezclado en el estanque, y dado que los flujos de líquido de entrada y de descarga tienen todos la misma densidad $\rho[kg/m^3]$ y el mismo calor específico $c[J/(kgK)]$, se obtienen las ecuaciones simplificadas (1) y (2) las que constituyen el modelo dinámico del estanque termo-mezclador en unidades MKS:

$$A \frac{dh}{dt} = f_1 + f_2 - f_3 \quad (1)$$

$$A \cdot h \frac{dT}{dt} = f_1(T_1 - T) + f_2(T_2 - T) \quad (2)$$

En la ecuación (2) las temperaturas están en $[^\circ C]$, y se considera que al estar el agitador siempre activado, la temperatura T_3 del flujo de descarga f_3 es aproximadamente igual a la temperatura T de la mezcla al interior del estanque termo-mezclador, es decir $T_3 \approx T$.

Por simplicidad, se considera que los flujos de entrada $f_1[m^3/s]$ y $f_2[m^3/s]$ son proporcionales a los voltajes $u_1[V]$ y $u_2[V]$ aplicados a la válvulas V-1 y V-2, con ganancia K_1 y K_2 y constante

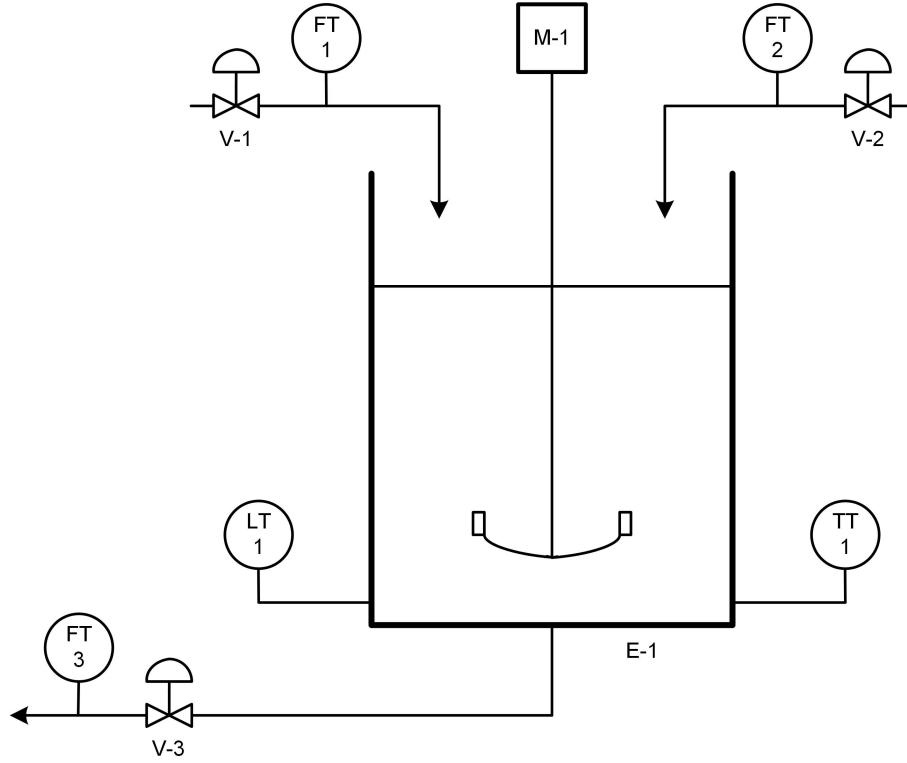


Fig. 1: P&ID Estanque Termo-Mezclador

de tiempo $\tau_1[s]$ y $\tau_2[s]$ respectivamente, según (3) y (4)

$$\tau_1 \frac{df_1}{dt} = K_1 u_1 - f_1 \quad (3)$$

$$\tau_2 \frac{df_2}{dt} = K_2 u_2 - f_2 \quad (4)$$

También se considera que, de acuerdo con la ley de Torricelli y el principio de Bernoulli, el flujo de descarga f_3 depende del voltaje $u_3[V]$ aplicado a la válvula V-3, del coeficiente de descarga y de la presión hidrostática del estanque, según (5)

$$f_3 = \begin{cases} K_3 u_3 \sqrt{h} & \text{si } h > 0 \\ 0 & \text{si } h \leq 0 \end{cases} \quad (5)$$

Las variables y parámetros del modelo dinámico son los indicados en la tabla 1.

2. Problema a Resolver

Se desea implementar los esquemas de control regulatorio avanzado ARC mostrados en la figura 2, para regular el nivel $h(t)$ del estanque y la temperatura $T(t)$ de la mezcla del líquido que ingresa a temperatura T_1 constante y flujo $f_1(t)$ variable, con el líquido que ingresa a temperatura T_2 constante y flujo $f_2(t)$ variable, de acuerdo con los siguientes requisitos funcionales de control y supervisión:

Tabla 1: Variables y parámetros del Estanque Termo-Mezclador

Símbolo	Descripción	Valor
A	Área basal del estanque termo-mezclador cilíndrico	$2[m^2]$
$h(t)$	Nivel del estanque termo-mezclador	$2[m^2]$
h_{max}	Nivel máximo	$10[m]$
h_{min}	Nivel mínimo	$0[m]$
$T(t)$	Temperatura de la mezcla	$[^{\circ}C]$
T_{max}	Temperatura máxima de la mezcla	$50[^{\circ}C]$
T_{min}	Temperatura mínima de la mezcla	$10[^{\circ}C]$
$f_1(t)$	Flujo del líquido enfriador	$[m^3/s]$
T_1	Temperatura del flujo de enfriamiento	$10[^{\circ}C]$
$f_{1_{max}}$	Flujo de enfriamiento máximo	$2[m^3/s]$
$f_{1_{min}}$	Flujo de enfriamiento mínimo	$0[m^3/s]$
$u_1(t)$	Voltaje de entrada a la válvula V-1	$0 - 10[V]$
K_1	Coeficiente de la válvula V-1	$0.2[m^3/(sV)]$
τ_1	Tiempo de respuesta de la válvula V-1	$2[s]$
$f_2(t)$	Flujo del líquido calefactor	$[kg/s]$
T_2	Temperatura del flujo de calefacción	$50[^{\circ}C]$
$f_{2_{max}}$	Flujo de calefacción máximo	$2[m^3/s]$
$f_{2_{min}}$	Flujo de calefacción mínimo	$0[m^3/s]$
$u_2(t)$	Voltaje de entrada a la válvula V-2	$0 - 10[V]$
K_2	Coeficiente de la válvula V-2	$0.2[m^3/(sV)]$
τ_2	Tiempo de respuesta de la válvula V-2	$2[s]$
$f_3(t)$	Flujo de descarga	$[m^3/s]$
$T_3(t)$	Temperatura del flujo de descarga	$[^{\circ}C]$
$f_{3_{max}}$	Flujo de descarga máximo	$4[m^3/s]$
$f_{3_{min}}$	Flujo de descarga mínimo	$0[kg/s]$
$u_3(t)$	Voltaje de entrada a la válvula V-3	$0 - 10[V]$
K_3	Coeficiente de la válvula V-3	$0.1789[m^3/(sVm^{1/2})]$

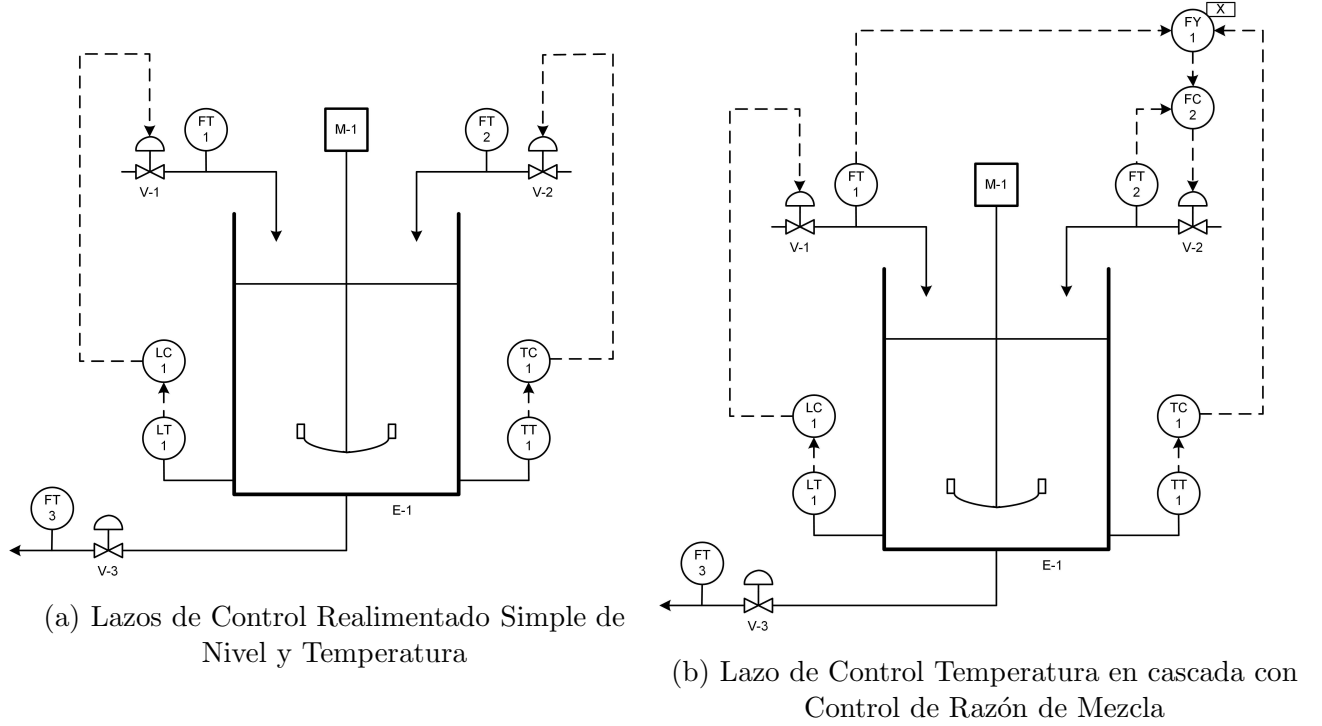


Fig. 2: P&ID de los esquemas de control ARC a implementar

Requisitos de Control: Programar controladores PID en un PLC virtual, en lenguaje FBD, para operar el sistema en modo Manual y en modo Automático, con transferencia suave entre modos

■ Operación en modo Manual:

- El usuario puede cambiar el flujo $f_1(t)$ de entrada del líquido de enfriamiento al pasar el lazo de control realimentado simple del nivel $h(t)$ de la mezcla al modo manual
- El usuario puede cambiar el flujo $f_2(t)$ de entrada del líquido de calefacción al pasar el lazo de control realimentado simple de la temperatura $T(t)$ de la mezcla al modo manual
- El usuario puede cambiar la proporción $K(t)$ de la razón de mezcla de líquidos de entrada al pasar el lazo de control de la temperatura $T(t)$ en cascada con el control de razón $f_2 = K f_1$ al modo manual

■ Operación en modo Automático:

Implementar dos esquemas de control para regular simultáneamente el nivel $h(t)$ y la temperatura $T(t)$ de la mezcla al interior del estanque, y compensar perturbaciones periódicas de apertura de la válvula de descarga V-3, del tipo tren de pulsos de valor medio \bar{u}_3 , amplitud δ_{u_3} y periodo P_{u_3} , con ciclo de trabajo de 50 %, según (6)

$$u_3(t) = \bar{u}_3 + \delta_{u_3} \operatorname{sgn} \left(\sin \left(\frac{2\pi}{P_{u_3}} t \right) \right) \quad (6)$$

donde $\bar{u}_3 = 5[V]$, $\delta_{u_3} = 0.5[V]$ y $P_{u_3} = 180[s]$

- Esquema de control realimentado simple (fig. 2a).
 - Regular el nivel $h(t)$ de la mezcla en el estanque mediante un lazo de control PID de realimentación simple que actúa directamente sobre el voltaje $u_1(t)$ de apertura de la válvula V-1 que regula el flujo de entrada $f_1(t)$ del líquido de enfriamiento
 - Regular la temperatura $T(t)$ de la mezcla mediante un lazo de control PID de realimentación simple que actúa directamente sobre el voltaje $u_2(t)$ de apertura de la válvula V-2 que regula el flujo de entrada $f_2(t)$ del líquido de calefacción
- Esquema de control regulatorio avanzado (fig. 2b):
 - Regular la temperatura $T(t)$ de la mezcla mediante un esquema de control PID en cascada que actúa sobre la razón $K(t)$ de proporción de flujos $f_2(t)/f_1(t)$, en el rango $0 \leq K \leq 4$, que a su vez actúa sobre el control PID del flujo $f_2(t)$ del líquido calefactor
- Transferencia Suave:
 - El traspaso desde el modo Manual al modo Automático no debe estar desequilibrado (balanceless), es decir, antes del traspaso la referencia debe ser igual a la variable medida respectiva
 - El traspaso desde el modo Automático al modo Manual no debe provocar perturbaciones (bumpless), es decir, antes del traspaso la actuación manual debe ser igual a la actuación calculada por el controlador respectivo

Requisitos de Supervisión: Desarrollar una interfaz HMI que permita supervisar la operación del sistema mediante botones, controles, indicadores y gráficos de tendencia, similar a la interfaz del esquema de control de razón en cascada implementado en [1]

- Botones binarios para
 - Definir el modo de operación Manual o Automático para cada esquema: control realimentado simple del nivel $h(t)$ y de la temperatura $T(t)$, y control de la temperatura $T(t)$ en cascada con el control de razón de flujos $f_2(t)/f_1(t)$
- Controles numéricos para
 - Ajustar el valor de las referencias SP_h y SP_T de los controladores de nivel y temperatura en tiempo de ejecución, en modo Automático
 - Ajustar el valor de la actuación manual de cada controlador, ajustando los valores $u_1(t)$ y $u_2(t)$ de apertura de las válvulas V-1 y V-2 del líquido de enfriamiento y de calefacción en tiempo de ejecución
 - Definir los parámetros de la señal periódica de perturbación $u_3(t)$ dados en (6)
- Indicadores numéricos para
 - Visualizar la magnitud instantánea de $u_1(t)$ y $u_2(t)$ y los flujos $f_1(t)$ y $f_2(t)$, del nivel $h(t)$, la temperatura $T(t)$, las referencias $SP_h(t)$ y $SP_T(t)$, así como la actuación $K(t)$ y la referencia $SP_{f_2}(t)$ del controlador en cascada, y de la perturbación $u_3(t)$

■ Gráficos de tendencia para

- Visualizar la evolución temporal del nivel $h(t)$ de la mezcla, junto con la referencia $SP_h(t)$
- Visualizar la evolución temporal de la temperatura $T(t)$ de la mezcla, junto con la referencia $SP_T(t)$
- Visualizar la evolución temporal del flujo $f_1(t)$ del líquido de enfriamiento, del flujo $f_2(t)$ del líquido calefactor y del flujo de descarga $f_3(t)$

3. Resultados Esperados

Simulación del Modelo Dinámico: Validar la simulación dinámica del estanque termo-mezclador de la figura 1, descrito por las ecuaciones (1), (2), (3), (4) y (5) obteniendo respuestas en lazo abierto ante diversas condiciones iniciales y estímulos de tipo escalón, como la que se observa en la figura 3:

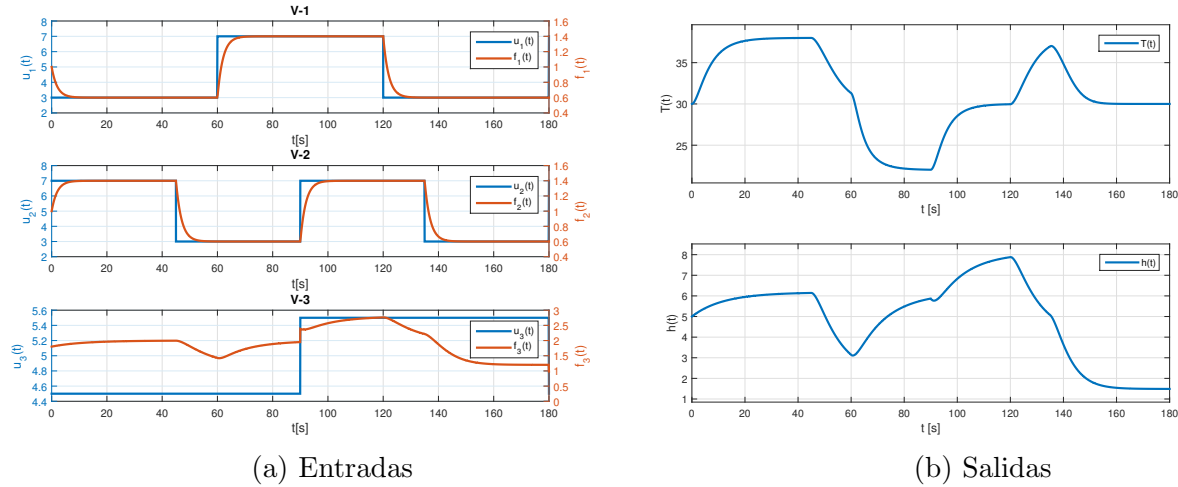
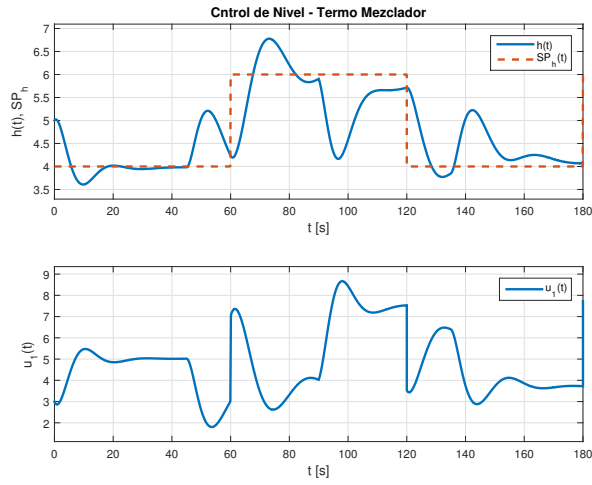


Fig. 3: Respuesta en Lazo Abierto

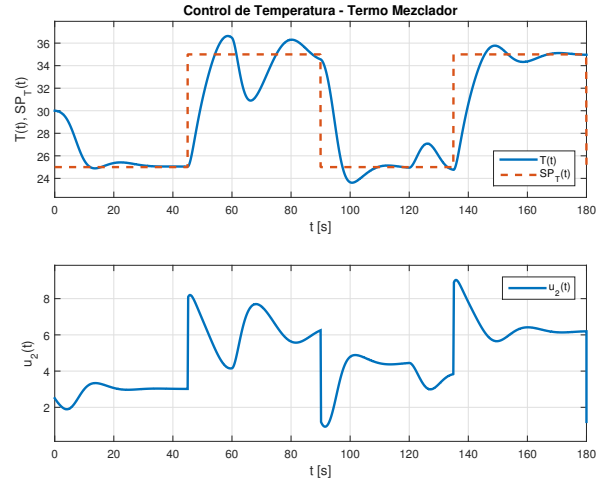
Control Realimentado Simple: Validar la estrategia de control realimentado simple mostrada en la figura 2a, y el ajuste experimental de parámetros de los controladores PID respectivos, obteniendo respuestas en lazo cerrado ante diversas condiciones iniciales y estímulos de tipo escalón, como las que se observan en la figura 4

Control Regulatorio Avanzado - ARC: Validar la estrategia de control de temperatura en cascada con el control de razón mostrada en la figura 2b, y el ajuste experimental de parámetros de los controladores PID respectivos, obteniendo respuestas en lazo cerrado ante diversas condiciones iniciales y estímulos de tipo escalón, como las que se observan en la figura 5

Traspaso entre Modos Manual y Automático: Validar el traspaso suave “bumpless” y “balanceless” realizando pruebas de cambio de modo Automático a Manual y de modo Manual a Automático para cada una de las estrategias de control incluidas en las figuras 2a y 2b

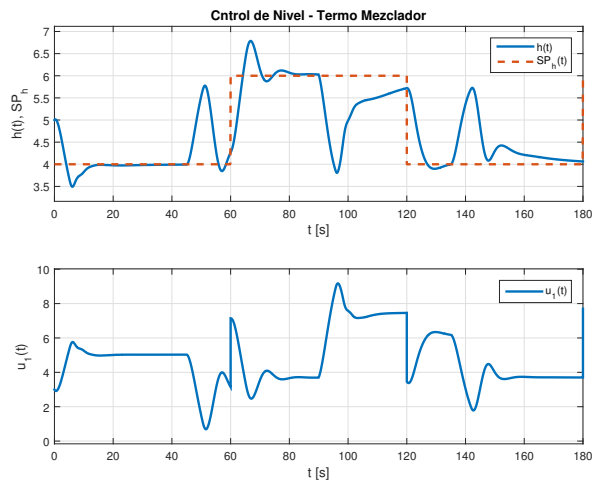


(a) Control de Nivel

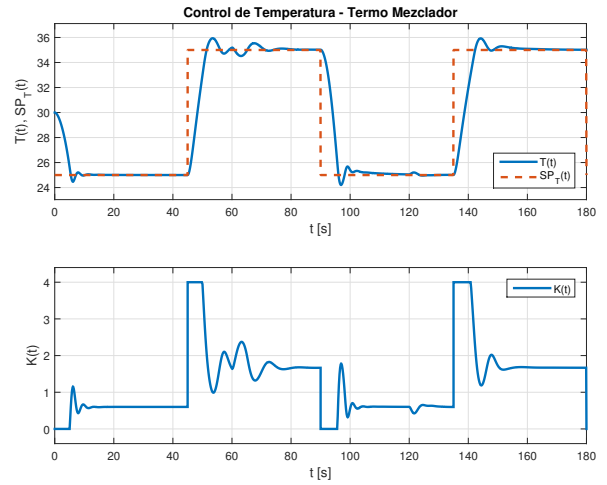


(b) Control de Temperatura

Fig. 4: Respuestas de Control Realimentado Simple



(a) Control de Nivel



(b) Control de Temperatura

Fig. 5: Respuestas de Control Regulatorio Avanzado - ARC

Evaluación del Desempeño: Comparar el desempeño obtenido al aplicar la estrategia de control realimentado simple, con el desempeño obtenido al aplicar la estrategia de control regulatorio avanzado, mediante el índice (7) de la integral del valor absoluto del error

$$IAE = \int_0^{T_f} |e(t)| dt \quad (7)$$

donde $e(t) = SP_T - T(t)$ y T_f es el tiempo final de la evaluación

Referencias

- [1] Finn Haugen. Control of Product Quality and Flow Including Ratio Control, 2017. URL: https://techteach.no/simview/quality_flow_control.