



### Práctico de Laboratorio N°3: Simulación de un sistema térmico

Objetivos:

- \* Practicar con los equivalentes circuitales de sistemas térmicos.
- \* Comparar el comportamiento de un modelo no lineal y el correspondiente modelo linealizado alrededor de un punto de trabajo.
- \* Observar el efecto de un lazo de realimentación positivo sobre la velocidad de un sistema.

En la figura 1 se muestra un sistema para enfriamiento de un líquido (aceite) usando una camisa con agua. El líquido entra por el centro del tanque y sale por desborde a un caudal constante ( $Q_L=3\text{l/min}$ ). El proceso está aislado térmicamente del exterior. La tensión ( $V_B$ ) de control del actuador puede ser modificada de 0 a 10V y la temperatura del líquido que ingresa ( $T_i$ ) puede variar en el rango de  $70^\circ\text{C}$  a  $150^\circ\text{C}$ . La camisa está hecha de acero inoxidable AISI-304 de 0,55mm de espesor.

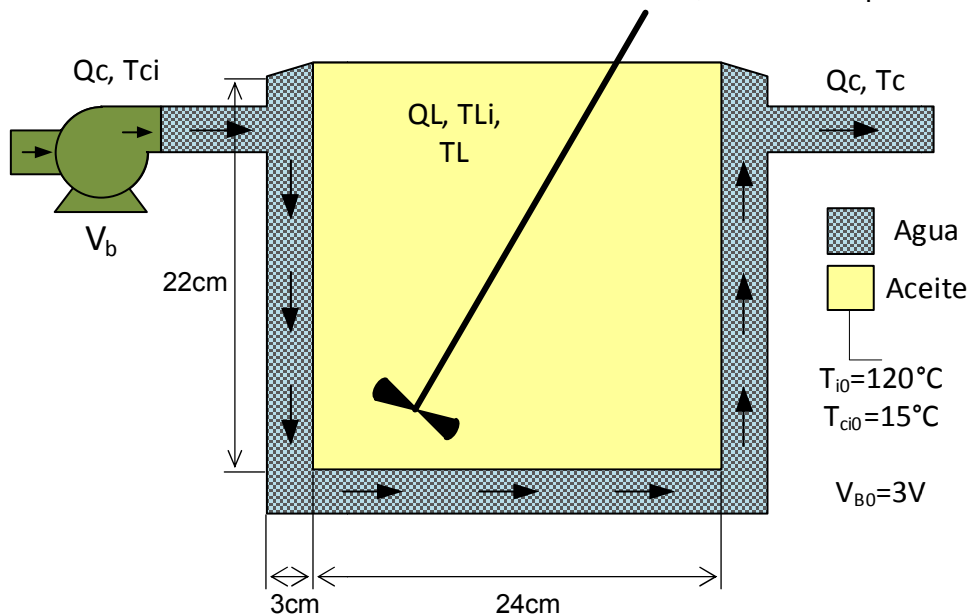


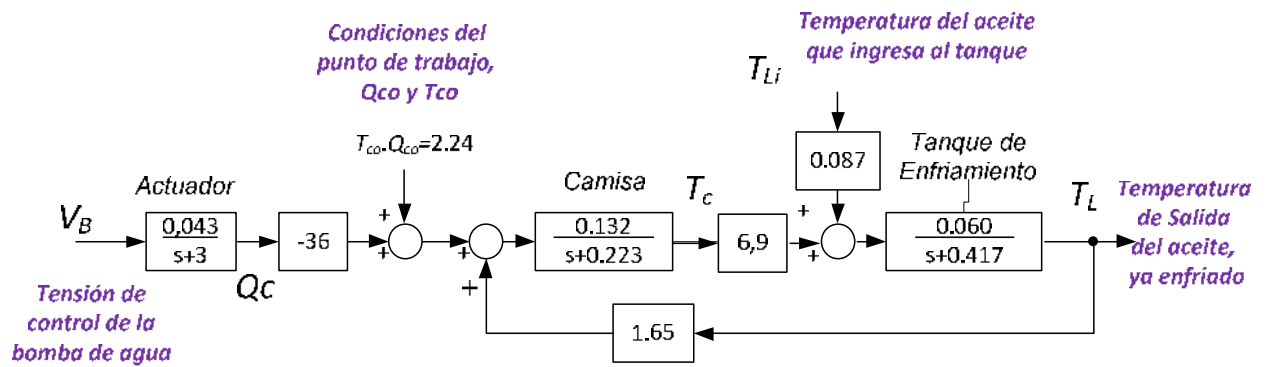
Figura 1: Proceso de Enfriamiento

Donde:

- $Q_c$ : Caudal de agua en la camisa de enfriamiento. (Variable manipulada).
- $T_{ci}$ : Temperatura del agua que ingresa a la camisa;  $15^\circ\text{C}$ .
- $T_c$ : Temperatura del agua saliendo de la camisa.
- $V_b$ : Tensión de control de la bomba de agua. (Señal de control).
- $Q_L$ : Caudal del líquido a enfriar; 3 l/min (constante).
- $T_{Li}$ : Temperatura de entrada del líquido a enfriar.
- $T_L$ : Temperatura de salida del líquido enfriado. (Variable controlada).

El diagrama de bloques del modelo linealizado del proceso se muestra en la figura 2, para una temperatura de entrada del aceite  $T_{Li}=120^\circ\text{C}$ , temperatura de salida del aceite  $T_L=50^\circ\text{C}$  y las condiciones de trabajo correspondientes:  $T_{co}$  y  $Q_{co}$  (temperatura de salida del agua y caudal de agua en la camisa respectivamente).

Para realizar el ensayo de laboratorio utilizaremos un simulador analógico armado con amplificadores operacionales. Para la correcta visualización de las variables de proceso se utiliza el esquema de la figura 3. Este es el mismo esquema lineal de la figura 2 solo que fue desnormalizado para 30000 [rad/sec]



2: Diagrama de Bloques del Proceso Linealizado

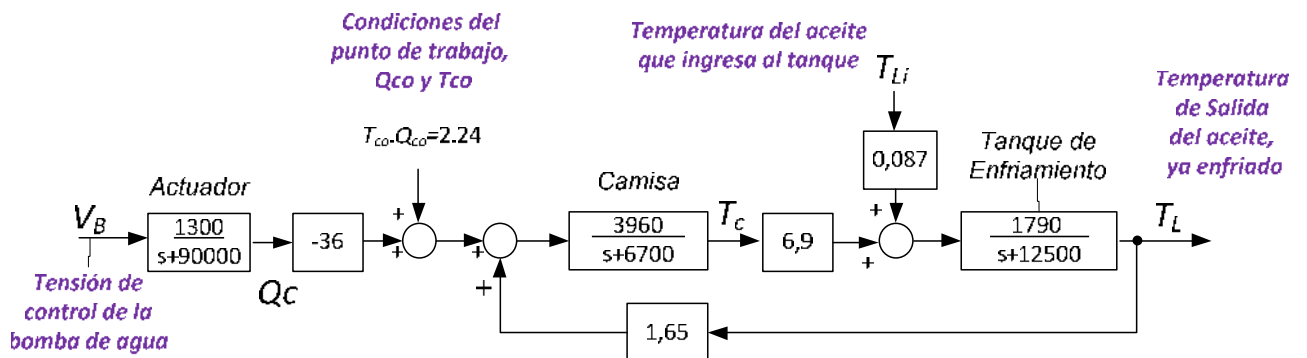


Figura 3: Diagrama de Bloques Desnormalizado

## ACTIVIDADES

### A) SIMULACIONES (para realizar en CASA)

**A.1.** Simule el modelo lineal de la figura 2 (ó 3), para observar las respuestas transitorias frente a cambios bruscos (positivos y negativos) del 20% en la tensión de alimentación de la bomba de agua ( $V_b$ ) y en la temperatura de entrada del aceite ( $T_{Li}$ ). A partir de las respuestas en el tiempo, estime la constante de tiempo principal del sistema realimentado, y compárelo con las constantes de tiempo con que se han modelado la camisa de agua y el contenedor de aceite.

**A.2.** Realice las mismas simulaciones (con Simulink o simulador de circuitos) sobre el modelo no lineal del sistema. Para construirlo puede tomar como base el análogo eléctrico del sistema térmico en cuestión, que se muestra en la figura 4. A partir del mismo, puede guiarse para rellenar los bloques de la figura 5.

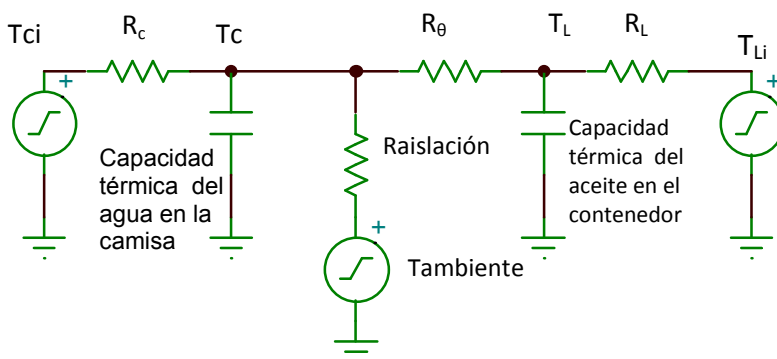


Figura 4. Modelo análogo eléctrico

En este modelo, la resistencia de aislación se considera lo suficientemente elevada como para hacer insignificante la perturbación debido a la temperatura ambiente.

Además se observan los restantes componentes, definidos como sigue:

$R_{\theta}$ : es la resistencia térmica de la pared de acero entre el agua y el líquido interno.

$R_L$ : es la resistencia térmica equivalente que tiene en cuenta el flujo de calor neto debido al cambio de temperatura del aceite al pasar por el dispositivo. Es constante, ya que el caudal del líquido lo es.

$$R_L = \frac{1}{Q_L \cdot \rho_L \cdot C_{pL}}; \quad (\rho_L, C_{pL} : \text{densidad y, calor específico del líquido})$$

$R_c$ : es la resistencia térmica equivalente que tiene en cuenta el flujo de calor neto debido al cambio de temperatura del agua al pasar por el dispositivo.

$$R_c = \frac{1}{Q_c \cdot C_{pc}}; \quad (\rho C_{pc} : \text{calor específico del agua de la camisa})$$

$R_{\theta L}$ : paralelo de  $R_{\theta}$  y  $R_L$ .

El modelo resulta no lineal a causa de que el caudal de agua dentro de la camisa ( $Q_c$ ) es la variable de entrada al sistema.

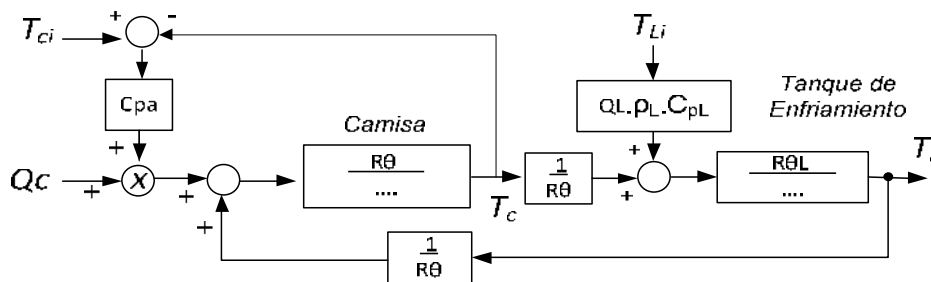


Figura 5. Diagrama de bloques no lineal.

**A.3.** Dado el circuito de simulación analógica, mostrado en la figura 6, calcule los valores de componentes de modo tal que la función de transferencia se corresponda al diagrama de bloques desnormalizado.

Repita las simulaciones indicadas antes. Compare las respuestas transitorias del modelo lineal con las obtenidas con el no lineal.

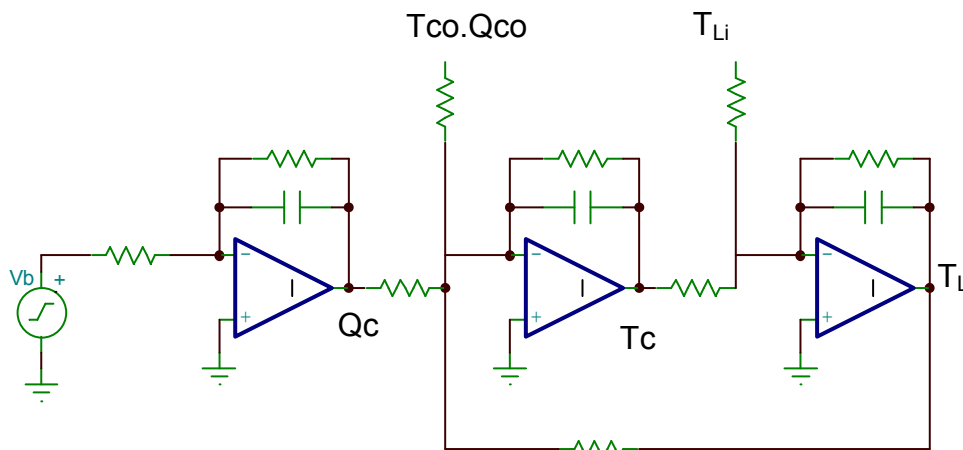


Figura 6. Simulador analógico propuesto.

## B) TEÓRICAS

1. Basándose en el esquema de la figura 4 ¿Cual es el caudal aproximado de agua necesario para que la temperatura de salida del aceite ( $T_L$ ) sea de alrededor de  $50^{\circ}\text{C}$ , habiendo ingresado al dispositivo con  $T_{Li}=120^{\circ}\text{C}$ ? (Esto es, calcular  $Q_c$ ). ¿Cuál es la temperatura de la camisa, ( $T_{co}$ )?

2. ¿Siendo la función de transferencia de la bomba:

$\frac{Q_c}{V_b} = \frac{0,043}{s+3}$  y la tensión de trabajo máxima =10V, ¿Cuál será la mínima temperatura a la que se puede hacer caer al aceite que ingresó a 120°C?

3. Teniendo en cuenta el modelo linealizado (de las figuras 2, 3 y 6)... ¿Qué ocurre con la respuesta transitoria si se elimina  $Q_o.T_{co}$ ?

4. Tomando como base el diagrama de la figura 6, linealice la parte no lineal, y verifique los valores numéricos mostrados en la figura 2. Para  $T_{Li}=120^\circ\text{C}$ , y  $T_L=50^\circ\text{C}$ .

5. El lazo de retroalimentación desde la variable  $T_L$  hacia el comparador... ¿Se arma utilizando un sensor de temperatura externo al sistema? ¿Es esta una realimentación intrínseca del sistema, o artificial, para lograr el control de la variable de salida? ¿Cómo interpreta que la realimentación de esa variable sea positiva?

6. La tensión de control de la bomba de agua ( $V_B$ ) ¿Es una variable de tipo “set point”?

Responda el siguiente cuestionario:

7. ¿A qué se debe, o cual es la interpretación del signo negativo contenido en el segundo bloque de la Figura 2?

8. Por qué el lazo signo de la realimentación del camino de retorno desde la variable de salida ( $T_L$ ) es positivo?

9 ¿Qué efecto produce en la respuesta en el tiempo?¿Y en la respuesta en la frecuencia?

### C) EXPERIMENTALES (en el Laboratorio)

Para realizar la práctica de laboratorio debe traer el circuito montado en protoboard.

Arme el simulador analógico en una placa de ensayo.

Obtenga mediante ensayo:

Respuesta en el tiempo de  $T_L(t)$  cuando varia  $V_B(t)$ .

Respuesta en el tiempo de  $T_L(t)$  cuando varia  $T_{Li}(t)$ .

Observe (mida) las constantes de tiempo propia de cada bloque integrador, y compárelas con la constante de tiempo del sistema completo.

**Nota:** Los puntos del apartado “para realizar en CASA” deben estar realizados antes de comenzar los ensayos en laboratorio. El grupo que no tenga sus procedimientos planteados, **NO PODRA REALIZAR EL ENSAYO**.

**IMPORTANTE:** El ensayo COMPLETO debe ser entregado al final del turno de laboratorio

DATOS NECESARIOS:

$C_{pa}$ ; calor específico del agua: 4,18kJ/kg.

$k$ ; conductividad térmica del acero AISI-304: 18J/(m.°C).

$\rho_L$ ; densidad del aceite considerado: 0,87kg/l

$C_{pL}$ ; calor específico del aceite (líquido) a enfriar: 2kJ/kg.

Capacidad térmica del aceite en el contenedor = volumen. $\rho_L$ . $C_{pL}$ .

Ídem para el agua en la camisa.