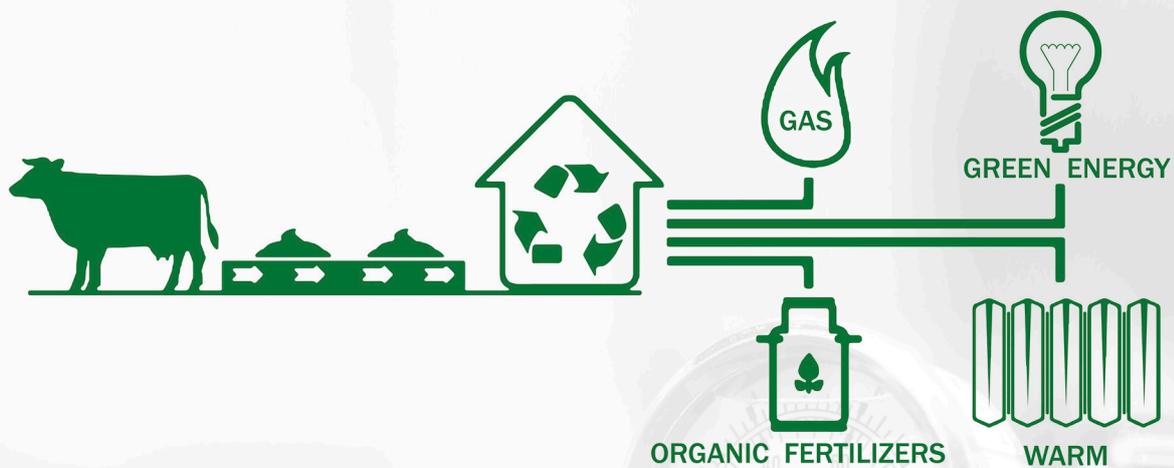


MODELACIÓN DE SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA DE UN **BIODIGESTOR DE CÁMARAS INDEPENDIENTES**

Hernan Olmi

Doctor en Ciencias de la Ingeniería, Mención en Automática



En el presente artículo, se muestra el desarrollo de un modelo matemático que representa el comportamiento de un sistema de control automático destinado a mantener la temperatura en las cámaras de un biodigestor anaeróbico.

La simulación, por medio de MATLAB® Simulink, del modelo obtenido ha permitido comprobar la factibilidad de la estrategia de control propuesta, iniciar el dimensionamiento de la etapa hidráulica y verificar o corregir los parámetros, globales, inicialmente estimados.

La Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Chile, por medio de un grupo de investigadores, ha postulado y se ha adjudicado un proyecto Fondo de Innovación a la Competitividad (FIC)-2017. El proyecto lleva por nombre "Transformación de Residuos Agropecuarios a Productos de Mayor Valor Agregado Mediante Biodigestor Anaeróbico de Alta Eficiencia, en María Pinto" BID:40002628-0. Este grupo de investigadores está formado por: Sergio Cárdenas, Juan Merchant, Hernán Olmí, Igor Ruiz-Tagle, Jadile Musa, y Bruno Montedónico.

El proyecto consiste, básicamente, en el diseño, construcción y puesta en marcha de tres nuevos biodigestores en tres localidades, previamente seleccionadas, de la comuna de María Pinto. El biodigestor propuesto, formado por cámaras independientes, permite reducir el tiempo de operación, reducir la cantidad de materia orgánica que entra, hasta transformarla en productos de valor, y obtener, en la última cámara, un gas combustible con alta cantidad de metano. Adicionalmente, las características intrínsecas del biodigestor propuesto, permiten masificar su utilización por pequeños o medianos agricultores.

Dentro de los diferentes procesos destinados a la operación, encontramos el sistema de control de temperatura. Este sistema está encargado de mantener la temperatura en el interior de las cámaras que forman el biodigestor, esto a pesar de posibles perturbaciones como cambios climáticos, entre otros. Para esto, el sistema regulará el caudal y temperatura de agua que "pasa" a través de serpentines ubicados en el interior de cada una de las cámaras del biodigestor.

En este contexto, en el presente artículo se modela el sistema de control de temperatura propuesto, esto con la finalidad de analizar su factibilidad, comprobar estimaciones de parámetros globales del proceso, e iniciar el dimensionamiento hidráulico. Para esto, se desarrolla un modelo dinámico del proceso térmico y, posteriormente, es simulado por medio de MATLAB® Simulink.

DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL

Inicialmente se destaca que los parámetros de la planta, como por ejemplo las dimensiones de las cámaras del biodigestor, conductividad térmica de materiales, etc., corresponden a valores estimados, los cuales no necesariamente serán los valores reales o finales de los biodigestores construidos en la Comuna de María Pinto.

El biodigestor está formado por cuatro cámaras independientes, conectadas por rebalse. Para mantener la temperatura en cada una de las cámaras se hará circular un flujo de agua, a temperatura controlada, por serpentines tal como se muestra en la figura 1.

El agua que circula por los serpentines proviene de un estanque de almacenamiento o depósito, el que además de estar bajo tierra presenta una aislación térmica lo suficientemente elevada que permite despreciar su flujo de calor con el medio. Esta agua es bombeada desde el estanque y pasa a través de un calefont que posee un sistema de válvulas solenoides que permiten controlar, automáticamente la temperatura del agua que circula por los serpentines.

Para controlar la temperatura en el interior de cada una de las cámaras, se ha seleccionado una estrategia de control ON/OFF. Esto último, considerando el elevado costo que presentan las válvulas solenoides que permiten generar una acción de control proporcional. Específicamente, se implementan cuatro sistemas de control ON/OFF independientes, uno para cada cámara, todos los cuales serán implementados por medio de la utilización de una única tarjeta de desarrollo ARDUINO MEGA. La figura 2 muestra el diagrama de control de una de las cámaras que conforma el biodigestor.

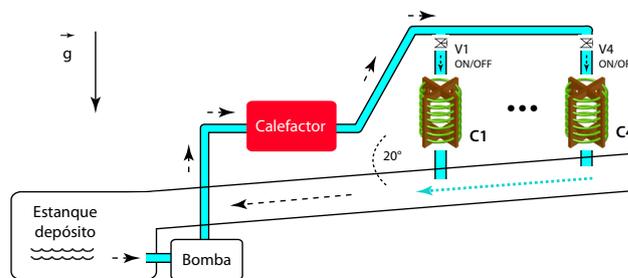


Figura 1

Diagrama hidráulico de biodigestor propuesto

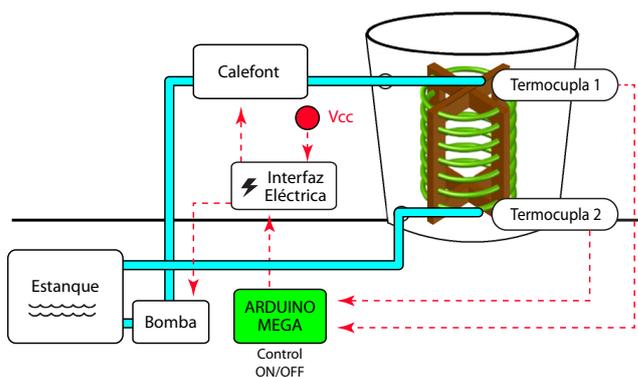


Figura 2

Diagrama de control ON/OFF de una cámara

Respecto a la cañería utilizada, esta corresponde a tubería de polietileno reticulado, o simplemente tubos PEX. La elección de esta cañería se basa en su elevada constante de conductividad térmica, y en que las cañerías metálicas no pueden ser utilizadas por sus propiedades antisépticas.

MARCO TEÓRICO

La potencia de transferencia de calor está dada por la ley de conducción térmica (ley de Fourier de la conducción térmica):

$$P = k \cdot A \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

Donde: P = rapidez del flujo de calor $\left[\frac{J}{s}\right]$, k = conductividad térmica $\left[\frac{W}{^{\circ}C \cdot m} = \frac{J}{^{\circ}C \cdot m \cdot s}\right]$, A = Área transversal de objeto $[m^2]$, y x = profundidad $[m]$

La ecuación de conducción térmica es generalizada al caso de convección por medio de la definición de coeficientes térmicos.

COEFICIENTE TÉRMICO SUPERFICIAL K

Estos coeficientes consideran directamente el área de contacto térmico. Los coeficientes térmicos para la transferencia por conducción y por convección están dados por las ecuaciones (2) y (3) respectivamente.

$$K = \frac{k \cdot A}{dx} \left[\frac{J}{^{\circ}C \cdot s}\right] \quad (2)$$

$$K = H \cdot A \left[\frac{J}{^{\circ}C \cdot s}\right] \quad (3)$$

Donde $H \left[\frac{J}{m^2 \cdot s \cdot ^\circ C} \right]$ es el coeficiente de convección.

De este modo la ley de Fourier puede ser escrita como:

$$P = K \cdot dT \quad (4)$$

Si definimos la resistencia térmica superficial R como el inverso del coeficiente térmico superficial K , la ley de Fourier puede ser descrita como:

$$P = \frac{dT}{R} \quad (5)$$

Donde la resistencia térmica superficial para la transferencia por conducción es:

$$R = \frac{1}{K} = \frac{dx}{k \cdot A} \left[\frac{^\circ C \cdot s}{J} \right] \quad (6)$$

Mientras que la resistencia térmica superficial para la transferencia por convección es:

$$R = \frac{1}{K} = \frac{1}{H \cdot A} \left[\frac{^\circ C \cdot s}{J} \right] \quad (7)$$

MODELACIÓN DE PROCESO TÉRMICO

Para simplificar la modelación del proceso térmico se considera al serpentín como una sola cañería vertical, de largo igual a la trayectoria total del serpentín, tal como se muestra en la figura 3. Para que esta simplificación sea válida debemos asegurar que el distanciamiento entre las espiras del serpentín sea elevado en comparación con el diámetro de la cañería. Esto, para evitar la "sombra térmica", es decir que la diferencia de temperatura tienda a cero en un punto cercano al serpentín.

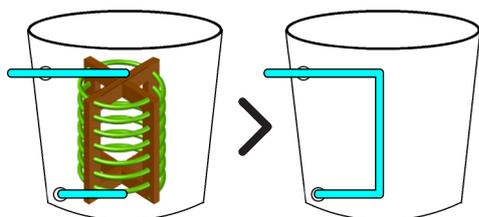


Figura 3

Simplificación en la modelación del serpentín

En este contexto, y considerando un estanque (cámara) con una altura de 0,98 [m] y un diámetro de 1,15 [m], el número máximo de espiras de un serpentín, de 0,54 [m] de diámetro, debe ser igual a 9 vueltas, lo que nos entrega una trayectoria total aproximada de 15 [m].

En base a esta simplificación, el sistema térmico está compuesto por 6 cilindros concéntricos, en donde el primero corresponde a la cañería donde circula el agua, y el último cilindro corresponde a la capa límite (capa imaginaria), tal como se muestra en la figura 4.

De este modo las resistencias térmicas del sistema térmico son:

R1: Resistencia térmica de convección interna Agua- Cañería $\left[\frac{^\circ C \cdot s}{J} \right]$

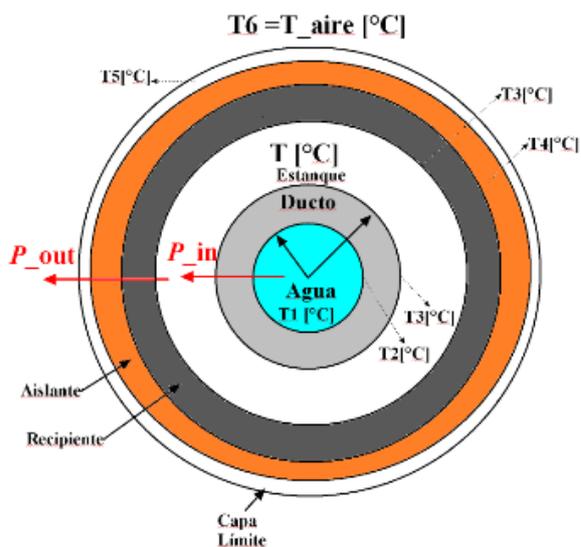


Figura 4

Sistema térmico

R2: Resistencia térmica de conducción de Cañería $\left[\frac{^\circ C \cdot s}{J} \right]$

R3: Resistencia térmica de conducción de estanque $\left[\frac{^\circ C \cdot s}{J} \right]$

R4: Resistencia térmica de conducción de aislante $\left[\frac{^\circ C \cdot s}{J} \right]$

R5: Resistencia térmica de convección aislante-aire (capa límite) $\left[\frac{^\circ C \cdot s}{J} \right]$

Para desarrollar el modelo, consideramos la ecuación de balance térmico, ésta es:

$$C \cdot \frac{dT}{dt} = P_{int} - P_{out} \quad (8)$$

Dado que: $P = \frac{dT}{R}$, La potencia de salida, P_{out} , es:

$$P_{out} = \frac{T - T_6}{R_3 + R_4 + R_5} \quad (9)$$

Paralelamente, la potencia de entrada, P_{in} , es:

$$P_{in} = \frac{T_1 - T}{R_1 + R_2} \quad (10)$$

De este modo:

$$C \cdot \frac{dT}{dt} = \frac{T_1 - T}{R_1 + R_2} - \frac{T - T_6}{R_3 + R_4 + R_5} \quad (11)$$

Sea: $R_i = R_1 + R_2$ y $R_o = R_3 + R_4 + R_5$, tal que:

$$C \cdot \frac{dT}{dt} = \frac{T_1 - T}{R_1 + R_2} - \frac{T - T_6}{R_3 + R_4 + R_5} \quad (12)$$

Desarrollando y reescribiendo la ecuación (12) obtenemos que la variación de temperatura con respecto al tiempo, de cada cámara, está dada por:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{R_o \cdot T_1}{R_i \cdot R_o \cdot C} + \frac{R_i \cdot T_6}{R_i \cdot R_o \cdot C} - \frac{T \cdot (R_o + R_i)}{R_i \cdot R_o \cdot C} \quad (13)$$

Para resolver la ecuación diferencial (13), podemos llevar el modelo a un diagrama de bloques y simularlo en MATLAB® Simulink. La figura 5, muestra el diagrama de bloques de la ecuación (13).

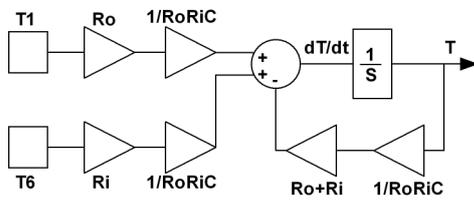


Figura 5

Diagrama de bloques de sistema térmico

Para determinar el valor de las resistencias térmicas se requiere resolver un considerable número de ecuaciones que dependen de variables como: diámetros de los distintos cilindros (ver figura 4), caudal del fluido, conductividad térmica de los materiales, coeficientes de convección, entre otros. Para facilitar estos cálculos, se desarrolló un módulo computacional, mostrado en la figura 6, que entrega la temperatura del estanque en función de solo cinco variables, destacándose que el resto de variables están declaradas dentro del módulo.

SISTEMA DE CONTROL ON/OFF

Para el desarrollo del sistema de control ON/OFF, se consideró la utilización de una Brecha Diferencial (B.D.). Esto principalmente

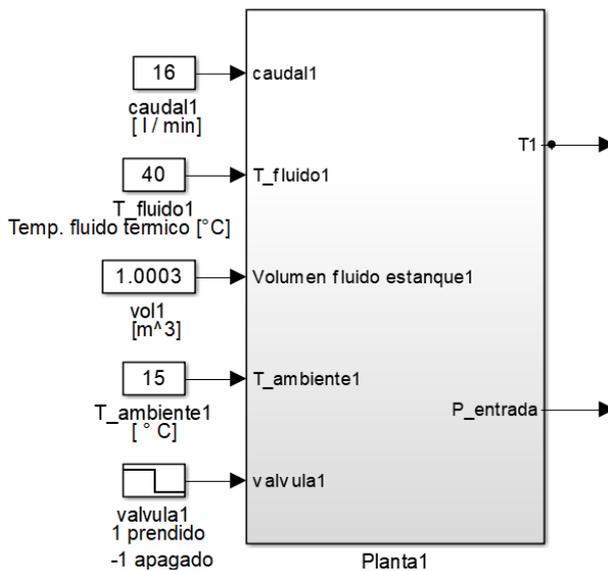


Figura 6

Módulo, basado en diagrama de bloques, que representa el proceso térmico de cada estanque o cámara.

Tabla 1. Entradas aplicadas al bloque de la figura 6

Caso	(a)	(b)
Caudal [l/min]	0	16
T°_fluido [°C]	---	40
Volumen estanque [m^3]	1	1
Temp. Ambiente [°C]	15	15
Temp. Inicial de estanque [°C]	33	33

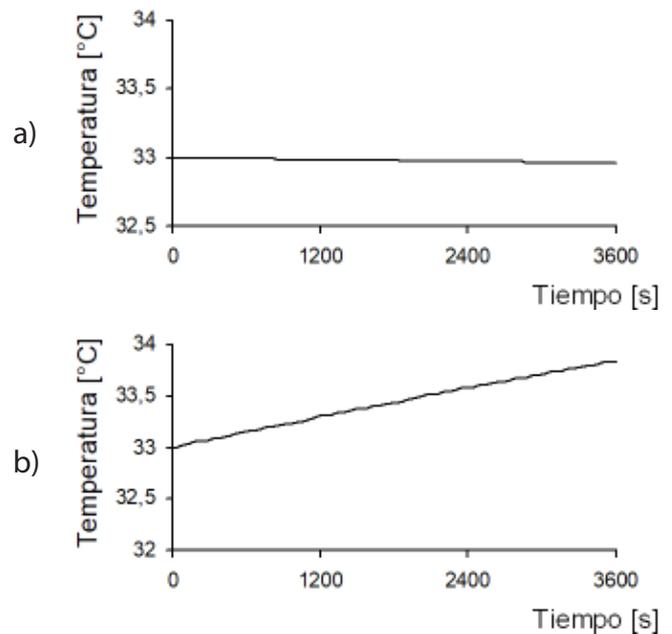


Figura 7

Simulación de sistema térmico durante 3600 [s]. (a) $P_{in}=0$, (b) $P_{in} \neq 0$

para evitar encendidos y apagados demasiado seguidos de la bomba y calefont.

La figura 8, muestra el diagrama de bloques utilizado para la simulación de la estrategia de control.

La figura 9(a) muestra la respuesta del sistema de control considerando una señal de referencia de 33° C y una simulación de 10800[s]. La figura 9(b), muestra el instante específico en que el sistema de control activa la entrada de agua caliente al serpentín.

La figura 10 muestra un extracto del modelo de control para los cuatro estanques o cámaras. En la figura podemos observar como el modelo considera otros procesos dinámicos como: aumento de temperatura debido al uso del calefont, el caudal entregado por la bomba y el que llega a los estanques, entre otros. Finalmente, la figura 11 muestra la respuesta de este sistema, para un tiempo de simulación igual a 50000 [s]; donde, la línea negra representa la temperatura del estanque 1, y las líneas rojas, sobrepuestas, representan la temperatura del resto de los estanques.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos por la simulación del proceso térmico y del proceso de control, muestran la factibilidad de la estrategia de control propuesta. Esto, principalmente al considerar que la diferencia de energía que entra al sistema supera a la que sale.

Las características hidráulicas consideradas en el modelo, permiten obtener valores iniciales del dimensionamiento hidráulico. Logrando, de este modo, seleccionar algunos materiales como: cañería, bomba de agua, calefont, entre otros.

Con respecto al tiempo de respuesta del sistema térmico, se demostró que la utilización de un aislante térmico aumenta considerablemente la constante de tiempo, permitiendo, de este modo, una baja rapidez de flujo de calor.

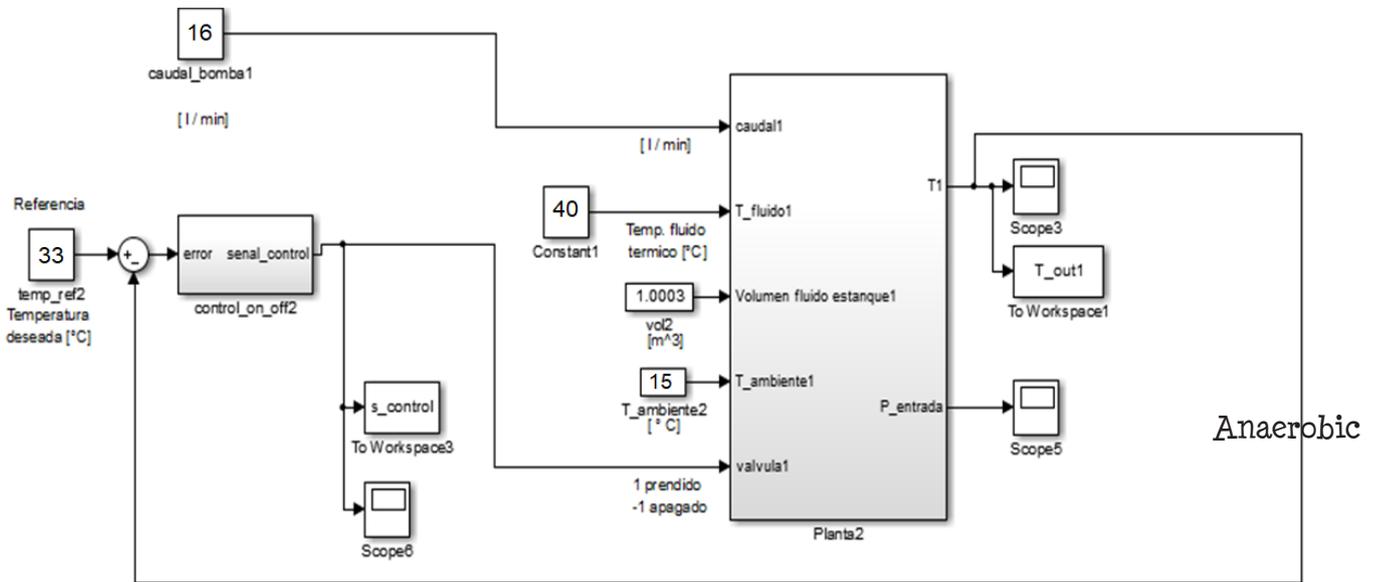


Figura 8

Simulación de control ON/OFF aplicado a sistema térmico de la figura 6.

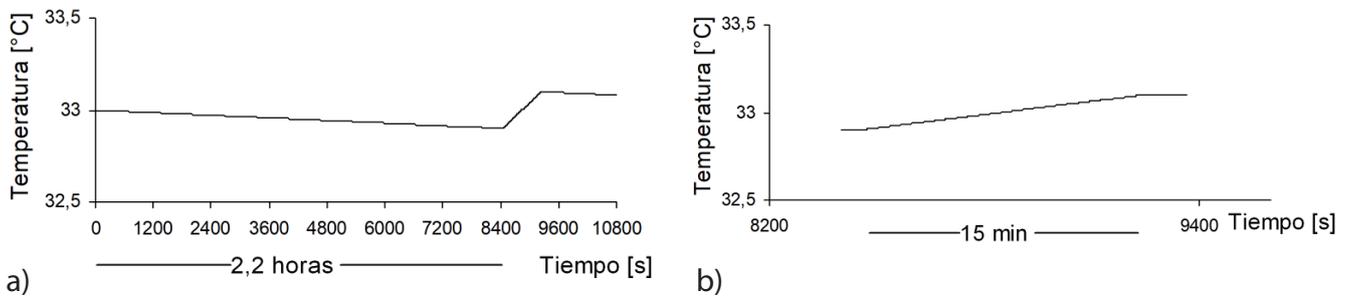


Figura 9

Simulación de control ON/OFF de la figura 8. (a) Simulación de 10800[s];

(b) Instante específico en que el sistema de control activa la señal de actuación.

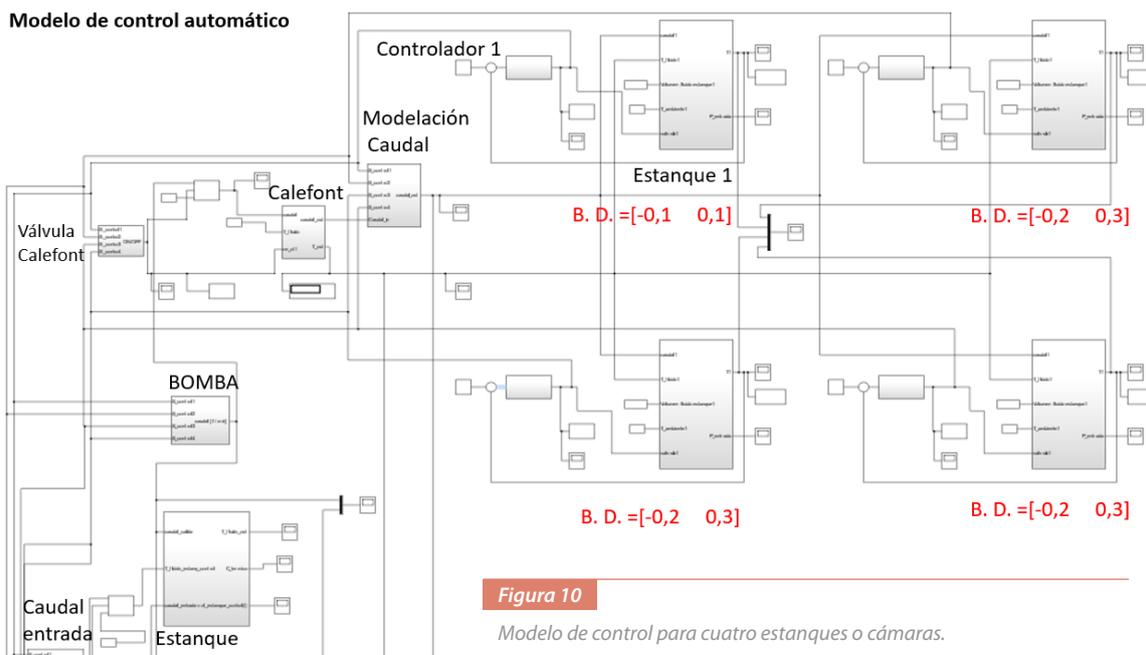


Figura 10

Modelo de control para cuatro estanques o cámaras.

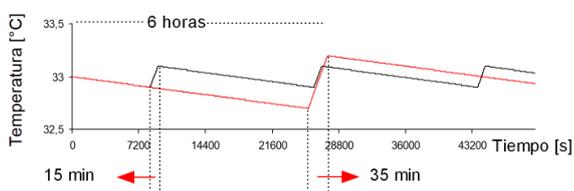


Figura 11

Simulación de control ON/OFF aplicado a las cuatro cámaras