

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR



CONTROL INTELIGENTE

Control del nivel de agua de un tanque mediante control borroso

JUAN JESÚS CILLA UGARTE

JUNIO DE 2018

Índice general

List of Figures	III
1. Introducción	1
1.1. Contexto	1
2. Modelo	2
3. Controlador Fuzzy	4
3.1. Reglas	6
4. Resultados	9
5. Conclusiones	14

Índice de figuras

2.1. Esquema Simulink del controlador PID	2
2.2. Esquema Simulink del controlador Fuzzy	3
3.1. Configuración controlador Fuzzy	4
3.2. Modelo de la entrada de nivel de agua	5
3.3. Modelo de la entrada del coste	5
3.4. Modelo de la salida de agua	6
3.5. Reglas	7
3.6. Visor de reglas	8
4.1. Sistema base: Controlador PID	9
4.2. Experimento 1: Controlador Fuzzy	10
4.3. Experimento 2	11
4.4. Experimento 3.1	12
4.5. Experimento 3.2	13

Capítulo 1

Introducción

1.1. Contexto

El presente trabajo desarrolla la implantación de un controlador basado en control borroso para ajustar el nivel de agua de un tanque. Se ha tomado como base para el desarrollo el ejemplo *watertank*¹ proporcionado por Mathworks e incluido dentro de Matlab.

El ejemplo proporcionado se encarga de controlar el nivel de agua presente en el tanque usando un controlador PID. El controlador está ajustado para regular la cantidad de agua introducida en el tanque y obtener el nivel deseado. El tanque cuenta con una abertura inferior por la cual se libera una cantidad de agua que depende de la altura del agua presente en el interior.

Usando el ejemplo como base, se plantea la sustitución del controlador PID por un controlador borroso (Fuzzy) que regule la cantidad de agua a introducir en función del nivel actual y teniendo en cuenta el coste del agua en ese instante.

Este trabajo se desarrolla en el marco de la asignatura de Control Inteligente del Máster de Robótica y Automatización de la Universidad Carlos III de Madrid. El controlador ha sido desarrollado mediante el programa Matlab y su librería de simulación Simulink.

Todos los archivos usados en el desarrollo de este proyecto junto con el presente documento se encuentran publicos en el perfil público del autor en la plataforma GitHub².

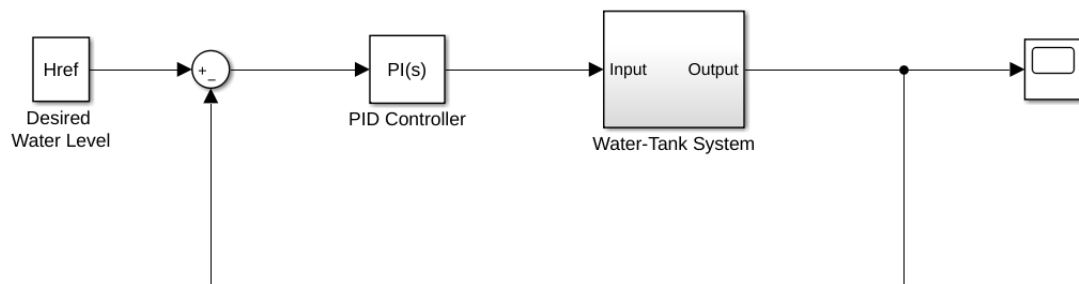
¹<https://es.mathworks.com/help/slcontrol/gs/watertank-simulink-model.html>

²<https://github.com/juanjecilla/WaterTankController>

Capítulo 2

Modelo

El ejemplo básico proporcionado por Mathworks para el control de un tanque de agua incluye un subsistema que modela el flujo del líquido a través del propio tanque junto con un controlador PID para gestionar la cantidad de agua introducida. La Figura 2.1 muestra el esquema de Simulink con los elementos nombrados. En dicho esquema, el nivel de agua deseado es una constante.



Copyright 2004-2012 The MathWorks, Inc.

FIGURA 2.1: Esquema Simulink del controlador PID

Como podemos comprobar en la figura, la entrada del PID es la diferencia entre el nivel de agua actual y el nivel de agua deseado o error. La salida de dicho controlador es la cantidad de agua que se introduce en el tanque para llegar al nivel deseado. Este tipo de configuración es muy común en los PIDs.

El presente trabajo propone la sustitución del PID de este sistema por un controlador borroso. Para la sustitución del controlador se han realizado una serie de modificaciones sobre el sistema original. Los cambios tienen como objetivo tanto adaptar el sistema a una mejor comprensión como la realización de un sistema con mayor funcionalidad y adaptado a un posible caso real.

La entrada de error que estaba presente en el controlador PID se ha decidido sustituir por el valor actual del nivel de agua del tanque. Esta entrada, al ser directamente medible, no requiere de cálculos adicionales y presenta un caso de uso más común. El controlador fuzzy nos permite introducir directamente esta entrada ya que el rango de valores se dividirá en funciones de pertenencia.

Por otro lado, se ha decidido introducir otra entrada adicional al sistema. El coste de la energía hoy en día sufre modificaciones a lo largo del día por lo que el coste de rellenar un tanque de agua variará depende de la franja horaria en la que nos encontremos. Se ha introducido en el esquema un generador de función con un factor aleatorio que pretende simular la evolución del precio. Esta entrada se introduce en el controlador borroso para que se tenga en cuenta a la hora de seleccionar la cantidad de agua que se introduce en el tanque.

En la Figura 2.2 podemos observar el esquema de Simulink que representa el sistema después de aplicar los cambios explicados. El sistema cuenta con dos *scopes* para visualizar el estado actual del nivel del tanque y el precio de la energía en cada momento.

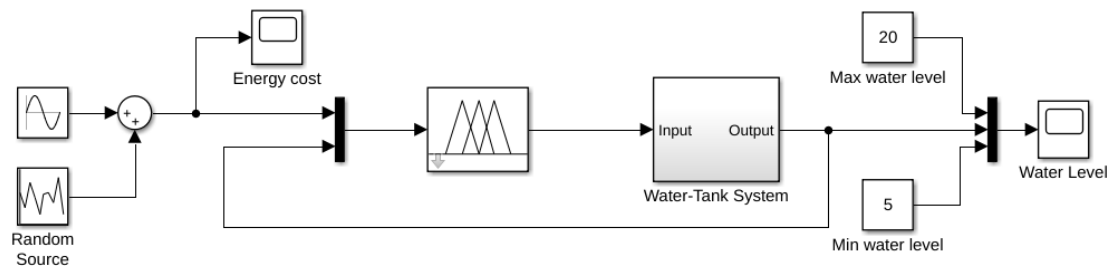


FIGURA 2.2: Esquema Simulink del controlador Fuzzy

Capítulo 3

Controlador Fuzzy

El controlador fuzzy usado en el proyecto se encarga de regular la cantidad de agua que se introduce en el tanque en función del estado actual y del coste de la energía en ese momento. El objetivo del controlador es que se mantenga el nivel de agua siempre dentro de unos valores de seguridad premiando el uso del agua cuando el coste de la energía es más bajo. Por lo tanto, las entradas del controlador son el nivel actual de agua en el tanque y el precio de la energía en dicho momento; y la salida es la cantidad de agua introducida al tanque.

La controlador fuzzy usado es del tipo *mandani*. Se ha desarrollado el script *create_fuzzy_controller.m* en el que se establecen todos los parámetros de configuración del controlador junto con las reglas aplicadas. La Figura 3.1 muestra la configuración usada en el controlador fuzzy.

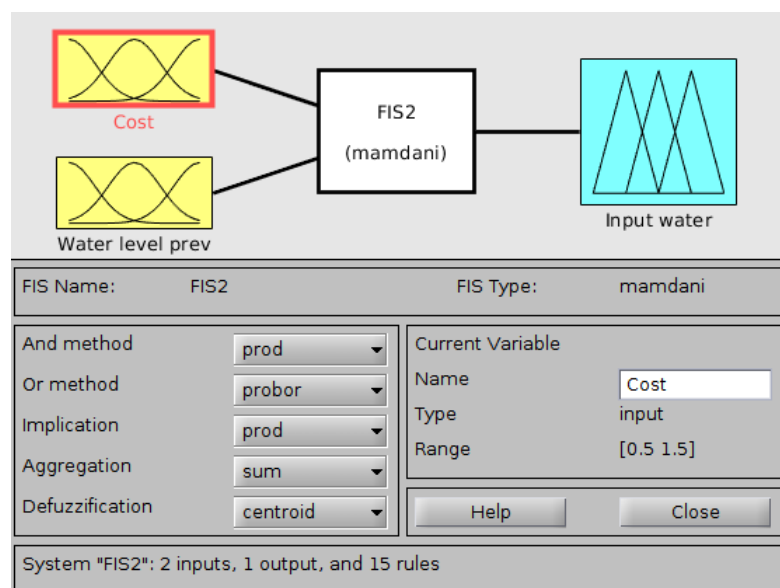


FIGURA 3.1: Configuración controlador Fuzzy

La entrada del nivel de agua actual del tanque se ha establecido entre los márgenes de seguridad 5 y 20, tomando estos valores como límites que no se deben sobrepasar. La entrada se ha dividido en 4 tramos triangulares para los extremos y 1 tramo trapezoidal central que como zona más estable. Con estas 5 zonas se marcan los posibles estados de la altura del agua presente en el tanque. En la siguiente figura (Figura 3.2) se puede distinguir el modelado de la señal de entrada.

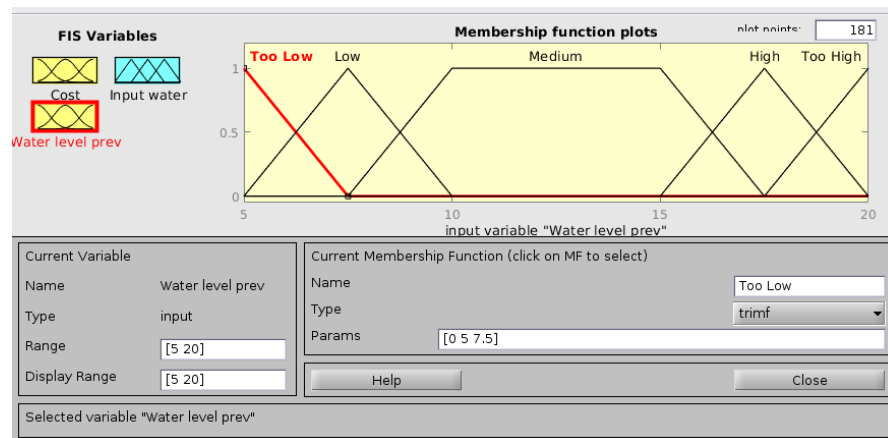


FIGURA 3.2: Modelo de la entrada de nivel de agua

Para la segunda entrada del controlador, el coste, se han establecido tres zonas, dos triangulares para marcar los bordes de precio y una trapezoidal central que alberga el precio medio de la energía. En el tramo caro del coste de la energía, se intentará disminuir el flujo de agua introducido a no ser que sea estrictamente necesario. La siguiente figura (Figura 3.3) representa el modelado de la señal de entrada con los intervalos de coste.

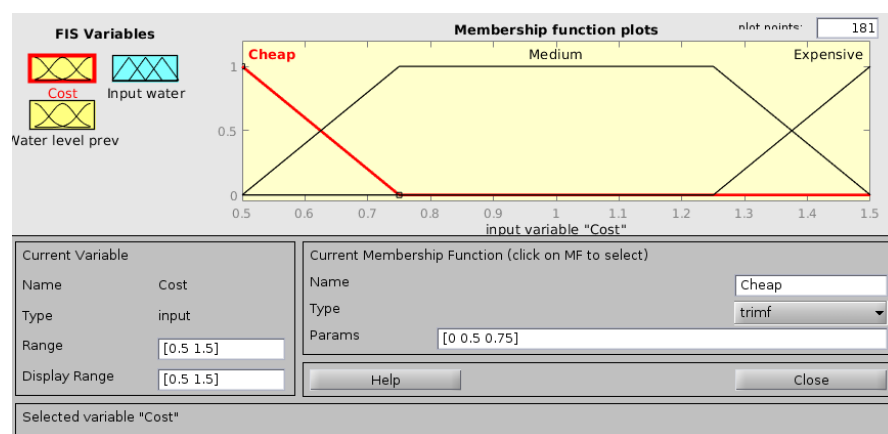


FIGURA 3.3: Modelo de la entrada del coste

La salida del controlador es la cantidad de agua que se introduce en el tanque. Se ha establecido un rango de valores entre 0 y 5, tomando 5 zonas diferenciadas, *poco*, *medio* y *mucho*. Como funciones de pertenencia se han usado funciones triangulares para los

extremos y una función trapezoidal que marca la zona media. En la Figura 3.4 se pueden observar las funciones de pertenencia que definen la salida del controlador.

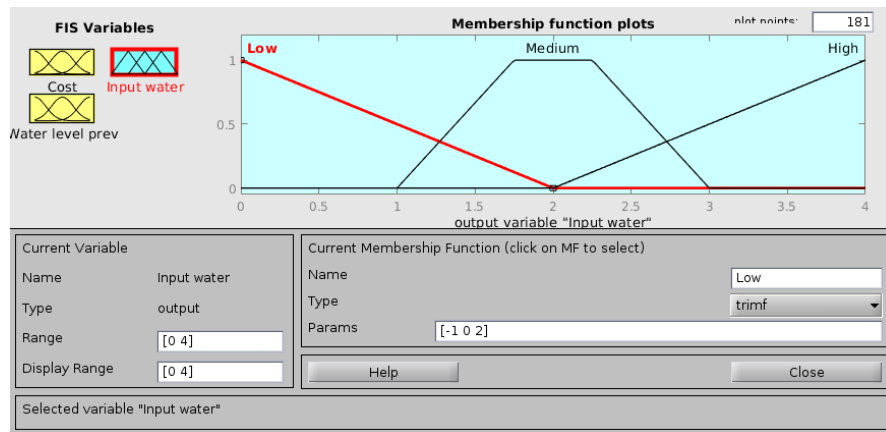


FIGURA 3.4: Modelo de la salida de agua

3.1. Reglas

Aunque se han modelado las entradas y salidas del controlador fuzzy, se necesitan marcar las reglas por las que se regirá el controlador. Las reglas de los controladores fuzzy establecen que función de pertenencia se aplica a la salida en función de la función o funciones de pertenencia que en las que se encuentre la entrada.

Para nuestro controlador es importante valorar 2 premisas:

- El valor del nivel de agua debe estar dentro de los límites marcados.
- Se premiará el uso del agua cuando el precio de la energía sea menor.

Por lo tanto, partiendo de estas dos premisas, se han desarrollado 15 reglas con las que se rige el controlador fuzzy que son las siguientes:

1. Si el coste es *bajo* y el nivel de agua *demasiado bajo* entonces la salida de agua es *alta*.
2. Si el coste es *bajo* y el nivel de agua *bajo* entonces la salida de agua es *alta*.
3. Si el coste es *bajo* y el nivel de agua *medio* entonces la salida de agua es *media*.
4. Si el coste es *bajo* y el nivel de agua *alto* entonces la salida de agua es *media*.
5. Si el coste es *bajo* y el nivel de agua *demasiado alto* entonces la salida de agua es *baja*.

6. Si el coste es *medio* y el nivel de agua *demasiado alto* entonces la salida de agua es *baja*.
7. Si el coste es *medio* y el nivel de agua *alto* entonces la salida de agua es *baja*.
8. Si el coste es *medio* y el nivel de agua *medio* entonces la salida de agua es *media*.
9. Si el coste es *medio* y el nivel de agua *bajo* entonces la salida de agua es *media*.
10. Si el coste es *medio* y el nivel de agua *demasiado bajo* entonces la salida de agua es *media*.
11. Si el coste es *alto* y el nivel de agua *demasiado bajo* entonces la salida de agua es *media*.
12. Si el coste es *alto* y el nivel de agua *bajo* entonces la salida de agua es *media*.
13. Si el coste es *alto* y el nivel de agua *medio* entonces la salida de agua es *media*.
14. Si el coste es *alto* y el nivel de agua *alto* entonces la salida de agua es *media*.
15. Si el coste es *alto* y el nivel de agua *demasiado alto* entonces la salida de agua es *baja*.

La figura 3.5 muestra las reglas descritas dentro del controlador fuzzy. Por otro lado, en la figura 3.6 se puede comprobar el proceso que sigue el controlador para seleccionar el valor de la salida teniendo en cuenta todas las reglas marcadas. El visor de reglas muestra las salidas parciales que produce cada regla por separado. Se puede observar que en la última celda, la salida final aplicada al sistema, es el resultado de la combinación de todas las salidas parciales, en este caso la suma.

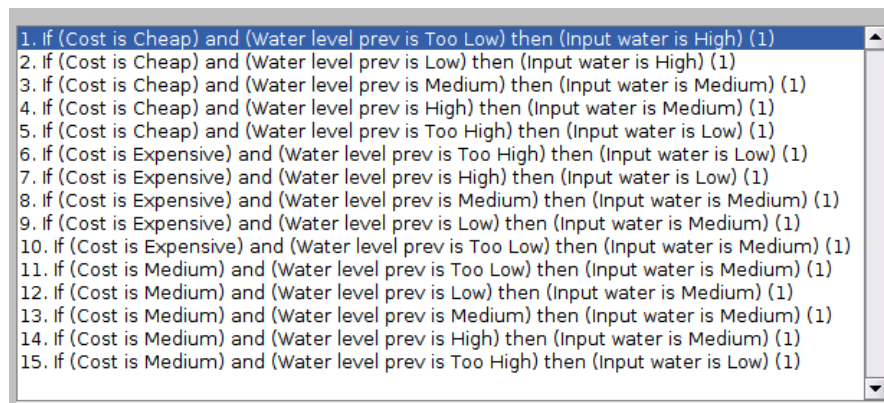


FIGURA 3.5: Reglas

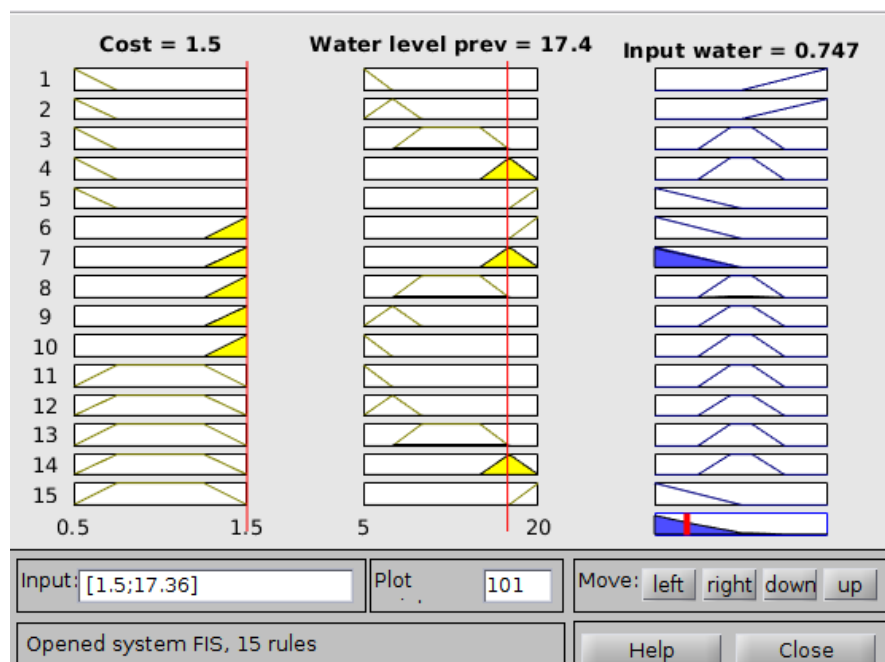


FIGURA 3.6: Visor de reglas

Capítulo 4

Resultados

El controlador se ha usado en distintos escenarios para comprobar la respuesta que tiene ante distintos estímulos. Se han realizado distintos experimentos observando la evolución del nivel de agua presente en el tanque variando parámetros como las funciones de pertenencia o la evolución del coste de la energía.

El sistema del que parte este proyecto es el ejemplo *watertank* proporcionado por Mathworks. Como ya se ha mencionado anteriormente en este documento, el controlador usado en el sistema es un PID que produce los resultados visibles en la Figura 4.1. Cabe mencionar que este modelo pretende conseguir que el sistema consiga mantener el nivel de agua presente en tanque a un valor fijo mientras que en los experimentos expuestos en este trabajo se han introducido otros factores a tener en cuenta.

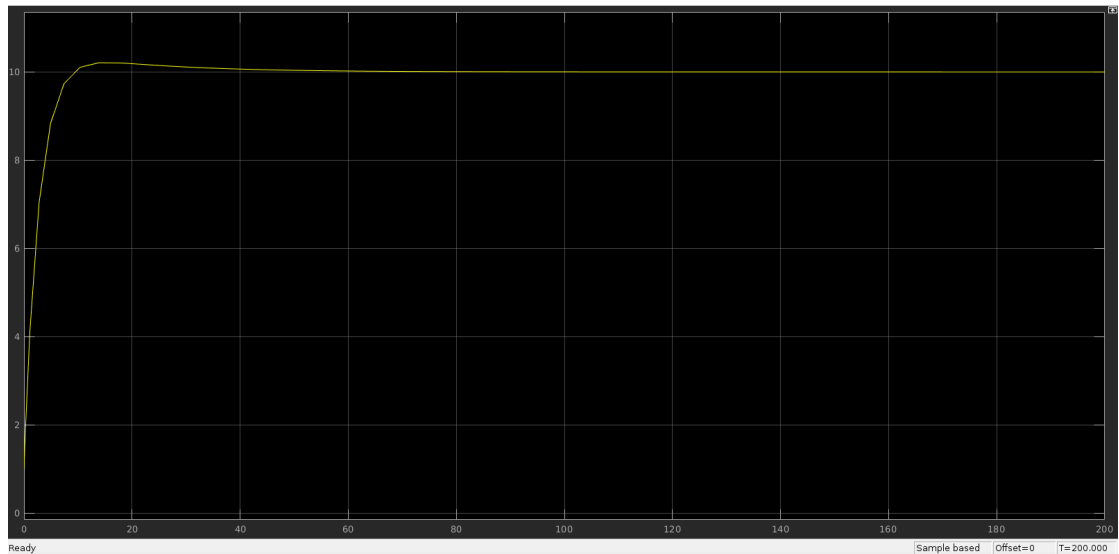


FIGURA 4.1: Sistema base: Controlador PID

Se ha tomado como referencia el experimento con un controlador como el expuesto en la sección anterior. En dicho experimento se ha tomado como generador del coste de la energía una señal senoidal de 0.1 Hz, de amplitud 0.5 y 1 de offset como portadora en la que se le ha sumado un factor aleatorio.

Los resultados obtenidos tras simular el sistema para un $T=500.0$ se pueden observar en la Figura 4.2.

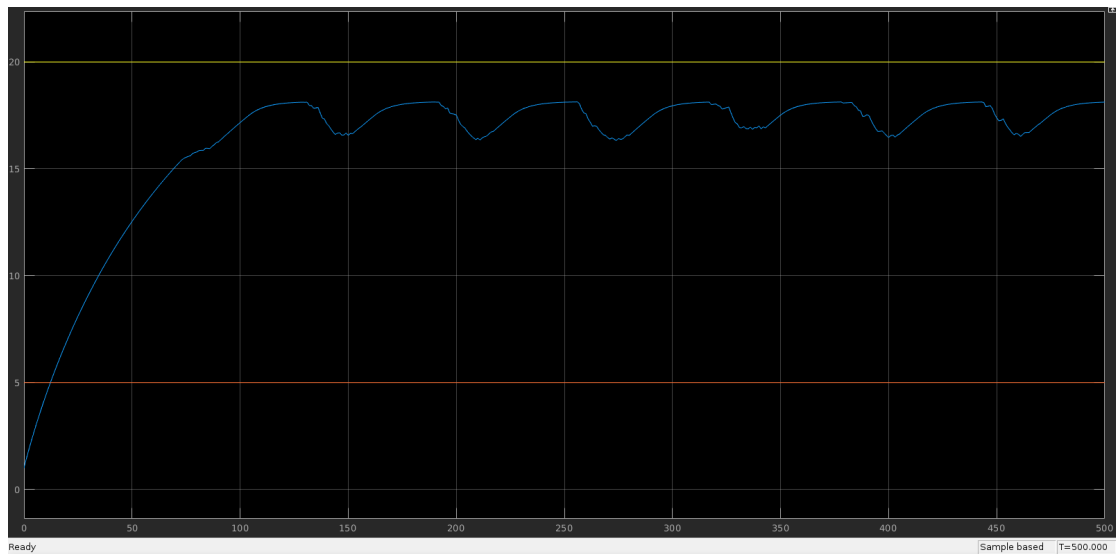
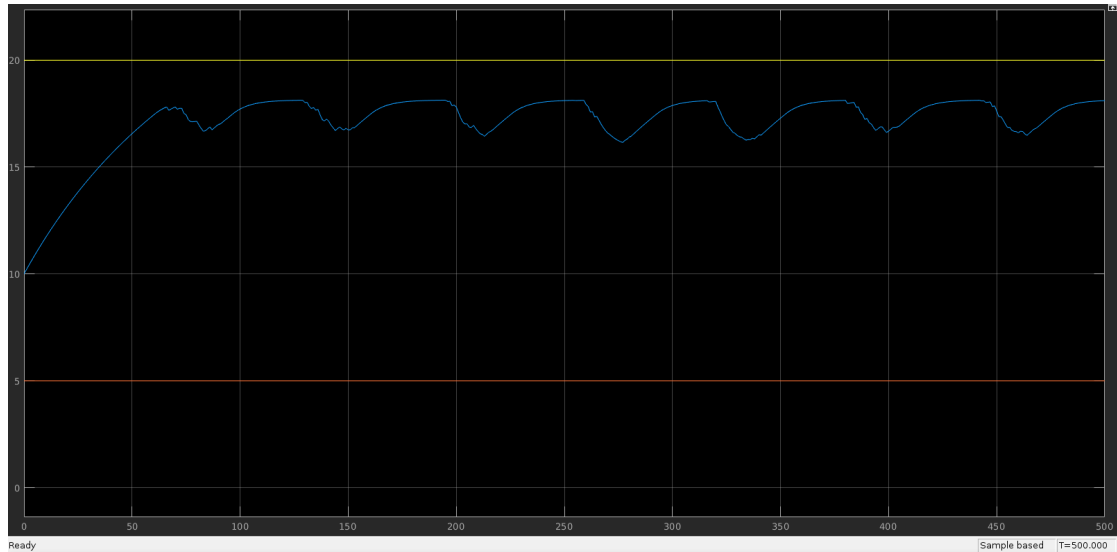


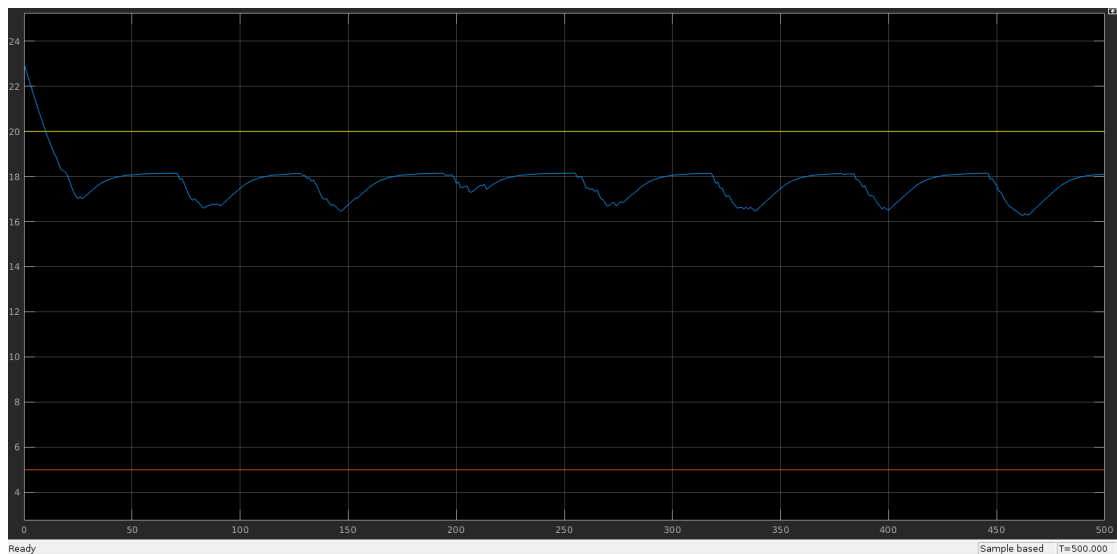
FIGURA 4.2: Experimento 1: Controlador Fuzzy

En la figura aparecen representadas dos líneas horizontales auxiliares que marcan los límites de seguridad del tanque. En azul podemos ver la evolución del nivel de agua presente en el tanque. Como valor inicial podemos ver que el nivel de agua comienza en el valor 1 y crece rápidamente ya que se encuentra fuera de los valores de referencia. Una vez dentro de los valores marcados, podemos comprobar que el nivel de agua tiene un cierto comportamiento periódico. Esta característica viene dada ya que una vez dentro de los valores de referencia, el factor del coste de la energía es el que rige la evolución del nivel. El coste de la energía sigue una función senoidal a la que se le ha aplicado un factor aleatorio por lo que el nivel de agua va a seguir dicho patrón.

Se han realizado dos experimentos adicionales variando la condición inicial del tanque. Las figuras 4.3(a) y 4.3(b) muestran la evolución del nivel de agua del tanque para los valores 10 y 23 respectivamente. En el primero, se puede comprobar que el nivel de agua, al estar dentro de los valores, evoluciona según el coste de la energía. En el segundo, al igual que sucedía en el primer experimento, al estar el nivel de agua fuera de los límites marcados, esta vez sobrepasándolo, decrece rápidamente hasta llegar a la zona de estabilidad.



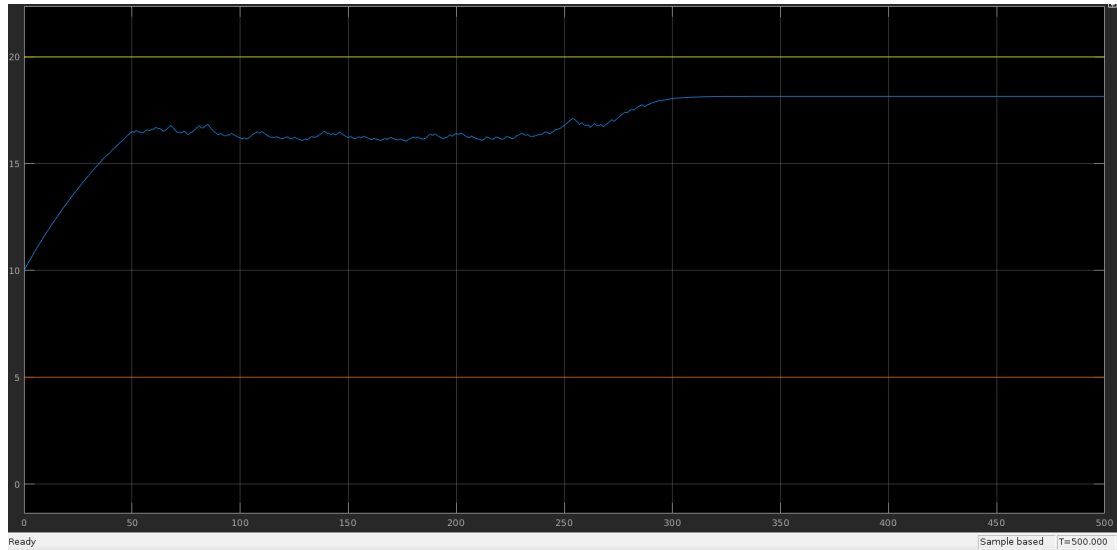
(a) Experimento 2.1: Condición inicial dentro de la zona de seguridad



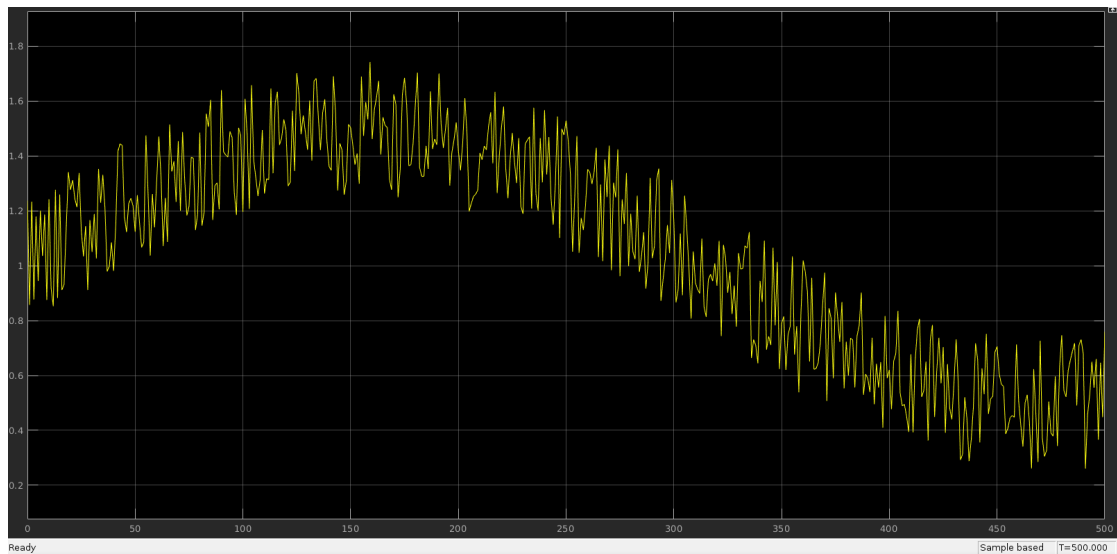
(b) Experimento 2.2: Condición inicial fuera de la zona de seguridad

FIGURA 4.3: Experimento 2

En otra línea de experimentos, se ha explorado como varía la respuesta del sistema cuando cambiamos el generador de la función de coste de la energía. En la figura 4.4(b) podemos ver la señal producida para la señal de coste cuando se configuran establece una frecuencia de 0.01 Hz. Dicha generación produce una señal que cambia rápidamente y genera que los cambios producidos en el nivel del agua del tanque pierdan el factor periódico que se había observado en los experimentos anteriores. La figura 4.4(a) muestra la salida generada con estos parámetros. En la segunda mitad de la gráfica, podemos ver cómo se llega a una zona más plana producida por la etapa en la que la energía es mas barata. Esta zona plana se produce porque aunque el precio de la energía es barato, el nivel de agua está cercano al límite superior.



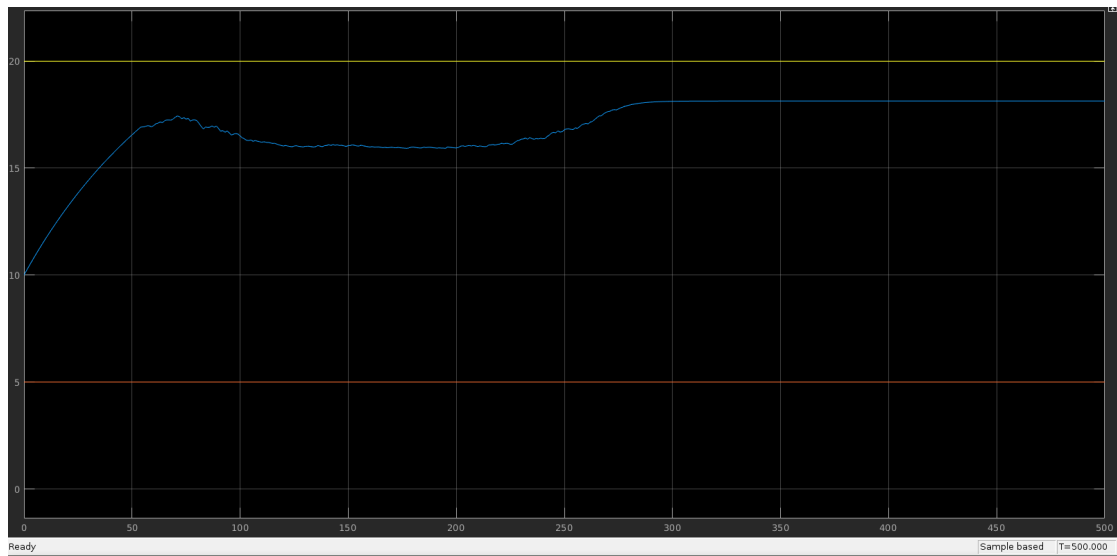
(a) Experimento 3.1: Variación del nivel de agua



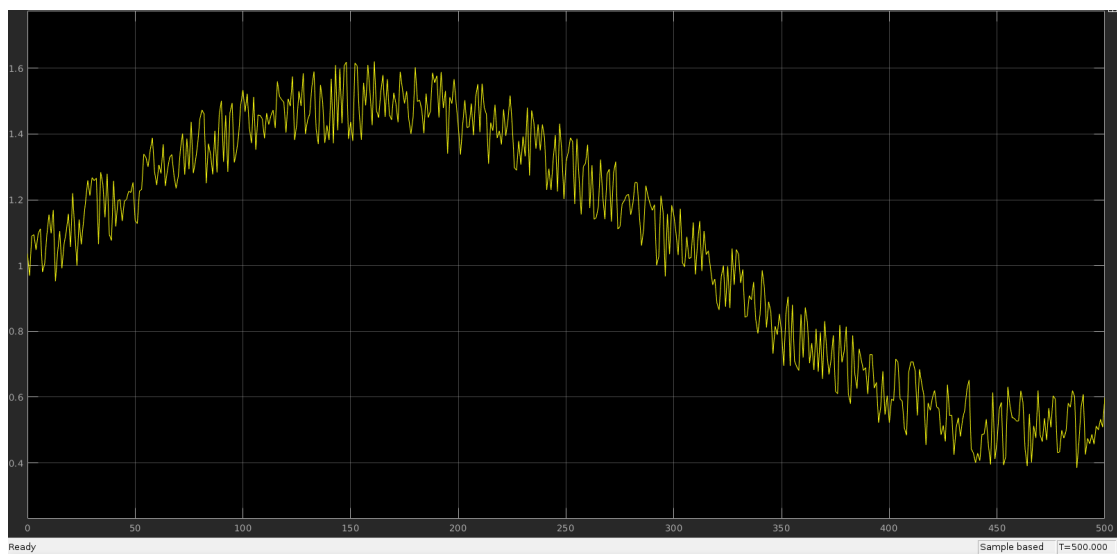
(b) Experimento 3.1: Variación del coste de la energía

FIGURA 4.4: Experimento 3.1

Por último, se ha variado el componente aleatorio que se ha introducido a la portadora del coste de la energía. En la figura 4.5(b) podemos ver el resultado del coste de la energía cuando se reduce el factor aleatorio a la mitad de su amplitud. Esta nueva señal de entrada produce la señal que se puede observar en la figura 4.5(a) donde se puede ver que dado los rangos que se han establecido en las funciones de pertenencia, no se aprecian cambios remarcables.



(a) Experimento 3.2: Variación del nivel de agua



(b) Experimento 3.2: Variación del coste de la energía

FIGURA 4.5: Experimento 3.2

Capítulo 5

Conclusiones

El trabajo desarrollado ha planteado un nuevo sistema de control para el modelo del tanque de agua proporcionado por Mathworks en el que se sustituye el PID base por un controlador fuzzy.

Por otro lado, se ha incrementado la complejidad del sistema mediante la inclusión del coste de la energía como parámetro de entrada. Esta nueva entrada proporciona al sistema un enfoque realista que permite controlar el modelo teniendo en cuenta más parámetros además del estado actual.

Se han desarrollado y expuesto los resultados de varios experimentos donde se han variado las condiciones iniciales y el efecto de las entradas del sistema. Se ha comprobado como se comporta el sistema cuando el nivel de agua se encuentra fuera de los valores establecidos y la importancia que tiene el coste de la energía para nuestro modelo.

El controlador fuzzy ha demostrado ser cumplir con las mismas especificaciones que el controlador PID básico. Por otro lado, se pueden asumir las variaciones en la salida gracias a los rangos establecidos por las funciones de pertenencia.