



Máster en Ingeniería de Sistemas y Control

Diseño de un controlador borroso para la regulación  
de la adición de agua en el proceso de elaboración  
del aceite de oliva virgen

AUTOR: Antonio Jiménez Márquez  
DIRECTORA: Matilde Santos Peñas

Curso académico 2012-2013, Junio



Máster en Ingeniería de Sistemas y Control

Diseño de un controlador borroso para la regulación  
de la adición de agua en el proceso de elaboración  
del aceite de oliva virgen

AUTOR: Antonio Jiménez Márquez  
DIRECTORA: Matilde Santos Peñas

Proyecto tipo B: Propuesto por el alumno





## Autorización

Autorizamos a la Universidad Complutense y a la UNED a difundir y utilizar con fines académicos, no comerciales y mencionando expresamente a sus autores, tanto la memoria de este Trabajo Fin de Máster, como el código, la documentación y/o el prototipo desarrollado.

Firmado:

Antonio Jiménez Márquez



## **Resumen**

En este trabajo se ha analizado la viabilidad, tanto en simulación como en un sistema real, del empleo de un sistema de control implementado con lógica borrosa (fuzzy). Este sistema de control inteligente regula la cantidad de agua que se debe añadir a un Decanter Centrifugo Horizontal (DCH), encargado de realizar la separación del aceite de oliva virgen del resto de sus componentes, para que la masa que entra a su interior lo haga con una humedad determinada. El controlador actúa sobre la válvula. La evaluación de este sistema de control ha mostrado un buen comportamiento en los tiempos de respuesta y bajo ruido en el estado estacionario al someterlo a diferentes consignas y perturbaciones.

## **Palabras Clave**

Control inteligente, Lógica difusa, Controlador fuzzy, Almazara, Válvula, Modelado, Simulación, Aceite de oliva

## **Abstract**

In this work the feasibility of the application of intelligent control to a real problem has been analyzed. Different fuzzy controllers have been designed and simulated in order to control the amount of water that has to be added to a Horizontal Centrifugal Decanter, during the process of elaboration of Olive Oil. The controller performs the separation of virgin olive oil from its components, to keep the mass with a certain humidity percentage.

Different fuzzy controllers have been proposed and simulated. The best one has been implemented in the real plant. Both simulation and real results show the efficiency of these intelligent controllers. The system response with these controllers shows a good response time and lower noise in steady state than other control strategies, and keeps the system stable under disturbances and changes in the reference.

## **Key Words**

Intelligent control, Fuzzy Controller, Olive Oil Mill, Valve, Modelling, Simulation.



# Índice

1. Introducción y objetivos.....	1
1.1. Introducción.....	1
1.2. Objetivos.....	2
1.3. Estructura de la memoria.....	2
2. Estado del arte y antecedentes.....	5
2.1. El proceso de elaboración del AOVE.....	5
2.2. La adición de agua y necesidad de control.....	8
2.3. Estado actual del control en almazaras.....	11
2.4. El control basado en la lógica fuzzy.....	13
2.5. Software utilizado .....	18
3. Modelado y control del proceso.....	21
3.1. Descripción del sistema.....	21
3.1.1. Cálculo de la humedad de consigna.....	23
3.1.2. Modelado de la válvula .....	25
3.2. Diseño del controlador .....	31
3.2.1. Controlador 1: Apertura de la válvula.....	34
3.2.2. Controlador 2: Voltaje a válvula.....	38
3.2.3. Controlador 3: Caudal.....	39
4. Análisis y discusión de resultados.....	43
4.1. Simulación de los controladores.....	43
4.2. Aplicación del controlador fuzzy a la planta real.....	51
5. Conclusiones y trabajos futuros .....	59
Bibliografía.....	61
Listado de siglas.....	65
Listado de Figuras.....	67
Listado de tablas.....	71
Anexo I.....	73
Anexo II.....	74
Anexo III.....	75
Anexo IV.....	76
Anexo V.....	77



# Capítulo 1

## Introducción y objetivos

### 1.1 Introducción

Los sistemas de Control Fuzzy permiten diseñar reglas para actuar de forma semejante a como lo haría un ser humano con su conocimiento para controlar un proceso. Por las características de estos sistemas de control es razonable pensar que estos sistemas pueden tener una amplia utilización en el control del proceso de elaboración del aceite de oliva, ya que en este tipo de industria la regulación y la optimización de las variables de proceso se efectúan, de forma mayoritaria, de una manera subjetiva y sujeta al 'experto' maestro de almazara.

Dentro de los diferentes puntos de control del proceso, se ha escogido en este trabajo el de una de las fases más subjetivas del mismo, la adición de agua al proceso en el punto de entrada del Decanter Centrifugo Horizontal (DCH). El sistema de control que se propone está basado en una de las técnicas de la inteligencia artificial, la lógica fuzzy. Este regulador debe realizar la adición del agua mediante la gestión de la apertura/cierre de la válvula, y en función de unas consignas que tratará de alcanzar teniendo en cuenta las características cambiantes del producto al que se le añade el agua.

En este trabajo se han diseñado varios controladores fuzzy, bajo diferentes criterios en la salida del sistema, los cuales se han validado a nivel

de simulación para, una vez comparado su comportamiento respecto a un controlador PID trabajando en las mismas condiciones, seleccionar el mejor y aplicarlo en la planta real, en el circuito de adición de agua de la fábrica.

## **1.2 Objetivos**

El objetivo general de este trabajo es el diseño e implementación de controladores inteligente para la adicción de agua en el proceso de elaboración del aceite de oliva.

Los objetivos específicos son los siguientes:

- Identificación del proceso de adicción de agua y modelado del mismo
- Estimación del caudal
- Modelado de la válvula de control
- Diseño de controladores inteligente
- -Validación mediante simulación de los controladores inteligentes y comparación de su funcionamiento con el de otros controladores clásicos
- Experimentación del controlador en la planta real

## **1.3 Estructura de la memoria**

La memoria de este trabajo de investigación se estructura de la siguiente manera.

En el Capítulo 2 se resumen las principales características del proceso de elaboración del aceite de oliva virgen, haciendo especial hincapié en el proceso de adicción de agua. Se presentan también los antecedentes del mismo en términos de controladores que se han venido aplicando a esa fase del proceso.

El capítulo 3 está dedicado a la obtención del modelo del sistema, que será utilizado para diseñar y validar mediante simulación los controladores propuestos. A continuación se describen las propuestas de controladores borrosos que se plantean, describiendo sus variables y estrategia de control.

En el capítulo 4 se analizan los resultados de la aplicación de algunos de los controladores inteligentes diseñados, tanto en simulación, donde son comparados con controladores PID, como en la planta real.

Por último, el capítulo 5 glosa las principales conclusiones derivadas de esta investigación así como los trabajos futuros.

El trabajo termina con la bibliografía, y anexos donde se especifica información técnica referente al proceso o a los desarrollos.



# Capítulo 2

## Estado del arte y antecedentes

### **2.1. El proceso de elaboración del aceite de oliva virgen.**

La obtención de 'Aceite de Oliva Virgen' (AOVE) constituye un proceso de transformación agroalimentaria en el que una materia prima, como es la aceituna, es sometida a una serie de procesos exclusivamente físicos (*Uceda et al., 2006*) a fin de obtener como producto principal el aceite, con dos marcados objetivos finales: rentabilidad del proceso industrial y obtención de aceites de calidad.

Industrialmente, éste proceso es llevado a cabo en tres etapas básicas (Figura1): una primera etapa de '*preparación de la masa de aceituna*' para facilitar la salida del aceite, constituida, a su vez, por una molienda del fruto y un termobatido posterior de la masa molida; una segunda etapa de '*centrifugación*', en la que el aceite es separado de la mayor parte de los componentes de la aceituna (sólidos y agua de vegetación) mediante empleo de sistemas centrífugos horizontales (Decantador Centrifugo Horizontal o DCH); y una tercera etapa de '*clarificación*', en la que son eliminados los restos de agua y partículas sólidas del aceite, antes de su almacenamiento definitivo,

mediante el empleo de sistemas basados en la acción de la gravedad (sedimentadores por gravedad) o mediante sistemas basados en la acción de la fuerza centrífuga a un régimen de revoluciones muy superior que las utilizadas en los DCH, como son las denominadas centrifugas verticales (*Hermoso et al., 1998*). Básicamente, el proceso se puede considerar como un conjunto de operaciones en las que tienen lugar procesos de transferencia de calor, transferencia de masas, filtraciones y sedimentaciones, gobernadas por unas determinadas leyes físicas y definidas por una serie de variables las cuales van a determinar la eficacia del proceso en su conjunto.

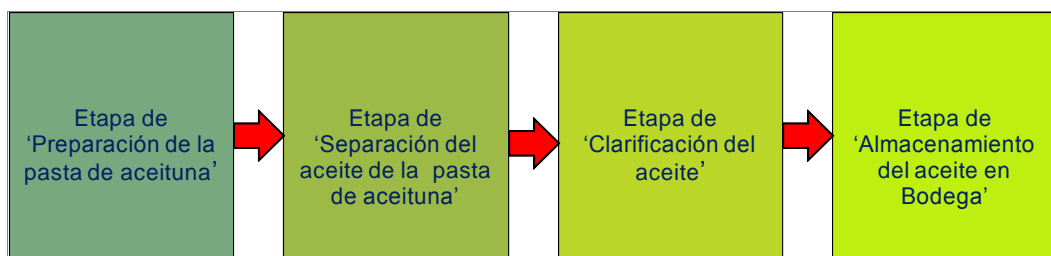


Figura1.- Diagrama esquemático de las diferentes etapas que constituyen el proceso de elaboración del aceite de oliva virgen.

En la actualidad, más del 90% de éste tipo de industria llevan a cabo la etapa de 'centrifugación' mediante centrifugas denominadas de '2-salidas', en las que por un lado sale el aceite, como producto principal, con algo de agua y sólidos, y por otro salen los sólidos con la mayor parte del agua y algo de aceite (el subproducto orujo). La eficacia de ésta etapa, así como las características de los aceites que se obtienen, están muy influenciados no sólo por cómo se ha preparado la masa de aceituna en las etapas previas sino, también, por las características propias del fruto, como son: su contenido en agua, su contenido en aceite, su grado de extractabilidad, etc. Sin embargo, el fruto que entra al proceso no es homogéneo y ni siquiera constante en sus características, por lo que debido a esta naturaleza cambiante, se hace necesario un ajuste continuado de las condiciones operativas de las diferentes etapas del proceso, si se quiere conseguir los objetivos marcados en cuanto a rendimiento y calidad del aceite, máxime cuando ambos objetivos se encuentran en una relación inversa tal que es preciso encontrar el punto de equilibrio o punto óptimo para los intereses de cada fábrica (*Jiménez et al.,*

2008).

El proceso, pues, se encuentra gobernado por un amplio número de variables de diferente naturaleza. En la tabla 1 se puede apreciar un detalle de éstas y las etapas en las que marcan su influencia, siendo los caudales de alimentación, el empleo de agua de adición al proceso, el empleo de coadyuvantes tecnológicos como el 'microtalco natural', las temperaturas de batido y del agua, y los tiempos de duración, las más habitualmente empleadas para la regulación y optimización de éste.

Tipo de variables	Parámetro	Utilización	Etapas influenciadas
Tecnológicas	rpm molienda	si	Molienda
	tiempo batido	si	Batido
	temperatura batido	si	Batido
	adición MTN batido	si	Batido
	adición agua a DCH	si	Centrifugación
	caudal masa a DCH	si	Centrifugación
	relación aceite:agua en CV	si	Clarificación
Mecánicas	diámetro criba molino	si	
	volúmen cuerpo batidora	no	Batido
	rpm aspas batidora		Batido
	posición caña DCH		Centrifugación
	diámetro del DCH		Centrifugación
	rpm del DCH		Centrifugación
	velocidad diferencial DCH	si	Centrifugación
	punto descarga aceite DCH	si	Centrifugación
	rpm de CV		Clarificación
	anillo regulación CV	si	Clarificación
Cualitativas			
	Entrada proceso		Todas
	Aceite aceituna	si	
	Agua aceituna	si	
	Salida proceso		Todas
	Aceite orujo	si	
	Agua orujo	si	
	Características físico-químicas de los aceites	si	

Tabla 1. – Principales variables que influyen en el control del proceso de elaboración del aceite de oliva virgen.

Esta regulación sigue efectuándose, en la mayor parte de las

'almazaras', de una forma manual y subjetiva, en base a la experiencia que el 'maestro de almazara' ha adquirido, a lo largo de los años, asociando ciertos controles visuales como: fluidez de la masa, consistencia de los orujos, turbidez de los aceites, etc, a datos analíticos de laboratorio y datos de producción, y a veces, con la ayuda de la información en tiempo real que proporcionan los sensores y actuadores de los sistemas SCADA implantados, la mayor parte de los cuales se centran en el mantenimiento de consignas de temperatura y de caudales, constituyéndose en simples visualizadores y registradores de datos de proceso.

Actualmente, y desde hace relativamente poco tiempo, viene realizándose un esfuerzo en la modernización general de este tipo de proceso industrial mediante la incorporación de sistemas de control automático y con un creciente interés por la aplicación de técnicas basadas en el control inteligente, como las 'Redes Neuronales Artificiales', a fin de conseguir una mejora en la optimización global del proceso (*Furferi et al., 2007; Jiménez et al., 2008, Jiménez et al., 2009*).

Esto hace pensar en un futuro prometedor para el desarrollo e implementación en ésta industria de sistemas de control basados en 'Redes Neuronales Artificiales', 'Lógica Difusa' o 'Sistemas Expertos', trabajando de forma individualizada o en hibridación con otras técnicas de control clásico, lo que permitirá ver favorecida su imagen, su rentabilidad y mejorar la calidad de sus productos (*Jiménez et al., 2013*).

## **2.2. La adición de agua y necesidad de su control.**

En relación a lo introducido hasta ahora, una de las variables de proceso de uso habitual es la adición de agua. Esta agua, de calidad potable, presenta un doble papel durante la elaboración del aceite ya que, por un lado, constituye un elemento coadyuvante para mejorar la extractabilidad de la masa y favorecer la salida del aceite del interior del tejido vegetal y, por otro lado, presenta un efecto secuestrante de componentes hidrosolubles del aceite, por lo que afecta a las características de éste.

En los sistemas actuales de centrifugación de 2-salidas (Figura 2) la adición de agua al proceso se realiza en dos puntos diferentes de éste: con la

inyección de masa al DCH, en la etapa de ‘centrifugación’, y con la inyección de aceite a la ‘centrifuga vertical’, en la etapa de ‘clarificación’. En el primer punto, el mayor efecto es sobre la extractabilidad del proceso y debido a que los niveles de agua empleados están en un rango bajo (no más del 15% de la masa) su efecto sobre las características del aceites es menos acusado que cuando la adición se realiza en la centrifugación vertical, donde las dosis empleadas son mayores (más del 50% del aceite).

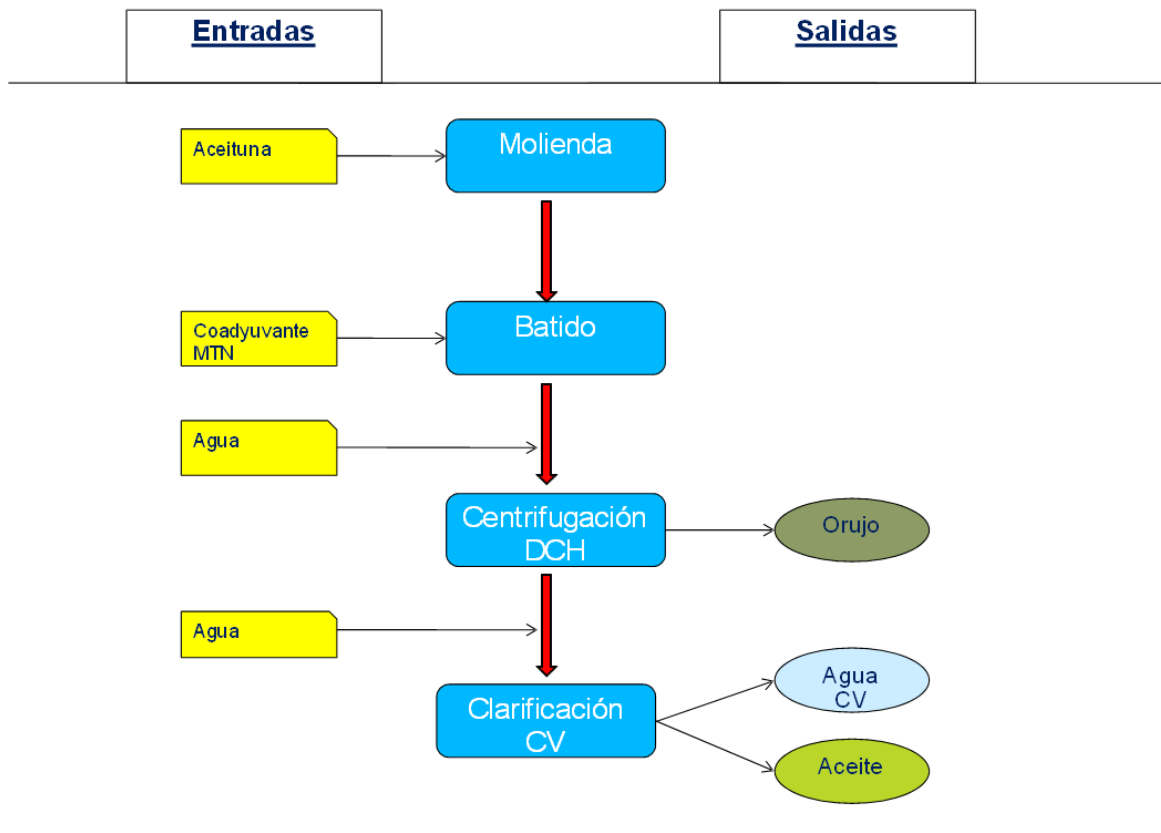


Figura 2.- Diagrama esquemático del proceso de elaboración del aceite de oliva virgen en ‘2-fases’.

En la Figura 3 se muestran dos circuitos reales donde añadir agua al decanter.



Figura 3. Dos circuitos reales de adición de agua al separador centrífugo horizontal

Para el propósito de este trabajo, el desarrollo experimental y discusión del estudio se va a centrar en el control de la adición de agua con la inyección de masa al DCH.

En los sistemas actuales de procesado de la aceituna la adición de agua en este punto adquiere la condición de 'coadyuvante tecnológico', ya que su utilización, manejo y regulación viene condicionada por las características que presenta el fruto a procesar y, en particular, por los niveles de agua de vegetación (humedad de la aceituna) que presenta.

Estas características varían notablemente a lo largo de la época en que tiene lugar el procesado, que suele estar entre los meses de noviembre a marzo. En ese periodo se producen importantes cambios como consecuencia de su estado de maduración, pasando de frutos de elevada humedad al principio hacia frutos más secos al final de la campaña de recogida, con rangos comprendidos entre el 40 – 60% de humedad.

Esta heterogeneidad no sólo tiene lugar como consecuencia del momento de recolección sino que, también, puede producirse a diario en una misma jornada de recepción de fruto en la fábrica, como consecuencia de la entrada de frutos de diferentes parcelas, diferentes fincas, diferentes tratamientos agronómicos (riego/secano), diferentes variedades, etc, lo que hace que el fruto que entra al proceso sea un producto muy heterogéneo y poco uniforme. Esto implica un ajuste continuado de aquellas variables de proceso relacionadas con este parámetro cualitativo, a fin de conseguir una estabilización mecánica en general y poder cumplir con los objetivos marcados.

La necesidad de controlar esta adición de agua viene asociada a la necesidad del mantenimiento del 'colchón hidráulico' que se genera en el interior del DCH como consecuencia de la acción de la fuerza centrífuga sobre las tres macro componentes de la aceituna: agua, aceite y materia sólida.

Este colchón, que se sitúa entre el aceite y la materia sólida, queda definido por la humedad del fruto y una serie de variables mecánicas, regulables por el 'maestro', como es el punto de descarga del aceite en el DCH, el cual se regula para un determinado nivel de humedad del fruto. De tal manera que a medida que se van produciendo variaciones en este parámetro, es necesario más o menos, o ninguna, cantidad de agua de adición para conseguir que la masa que entra al DCH lo haga con el nivel de humedad a la que se había regulado la máquina y ésta pueda trabajar en su interior con un producto uniforme en el tiempo.

Bajo el punto de vista extractivo, la adición de una cierta cantidad de agua puede ayudar a mejorar la capacidad de separación del DCH. Sin embargo, una adición excesiva, no controlada, puede originar importantes pérdidas extractivas al originarse aceites muy sucios, con un elevado nivel de partículas sólidas finas cargadas de aceite, las cuales no pasan los tamices y son evacuados con el resto de los residuos sólido, produciéndose, al mismo tiempo, una disminución en ciertas propiedades nutricionales del aceite como consecuencia de un efecto de lavado que el agua en exceso produce sobre ciertos componentes hidrosolubles naturales del aceite, como son los polifenoles.

### **2.3. Estado actual del control en almazaras**

Actualmente en la mayoría de las almazaras no realizan un control real de la adición de agua en DCH, limitándose a mantener un caudal constante de agua a juicio subjetivo del 'maestro', quien inyecta más o menos cantidad de agua según ciertas apreciaciones visuales del estado de la masa en la termobatidora o del aceite a la salida del propio DCH. Dicho control se realiza habitualmente con un simple rotámetro, para visualizar el caudal, y una válvula de bola manual, cuyo grado de apertura determina el caudal de agua de inyección.

El desarrollo, particularmente para este sector, de sistemas SCADA ha posibilitado que esta regulación pueda realizarse de una forma más automática, empleando caudalímetros digitales y válvulas motorizadas de desplazamiento proporcional, permitiendo al mismo tiempo la implementación de sistemas simples de control realimentado basados en controladores PID clásicos, los cuales suelen trabajar bajo consignas de caudal constante. Esta solución es la más extendida entre las fábricas que han incorporado algún tipo de control informatizado o regulación electrónica de las variables de proceso, pero sigue sin ser la adecuada al no poder gestionar de forma autónoma las dosis correctas de agua de adición.

En este sentido, existen algunos desarrollos en los que se incorpora un sensor analítico de humedad de la masa a la entrada del DCH y, bajo un sistema de control realimentado, el controlador PID trabaja bajo consigna de humedad. Esta solución, más realista, está poco implantada por el coste elevado del conjunto, porque suele ser poco preciso debido a una lenta estabilización de la respuesta y porque, en algunos casos, las oscilaciones de la fase transitoria del PID impiden alcanzar el valor de consigna. En particular en aquellos casos de masa muy secas en los cuales el agua que se adiciona no tiene tiempo suficiente para mezclarse adecuadamente, con lo que se producen fuertes oscilaciones en las medidas de humedad del equipo analítico.

En la Figura 4, se pueden observar, de forma gráfica, los diferentes esquemas de adición de agua comentados.

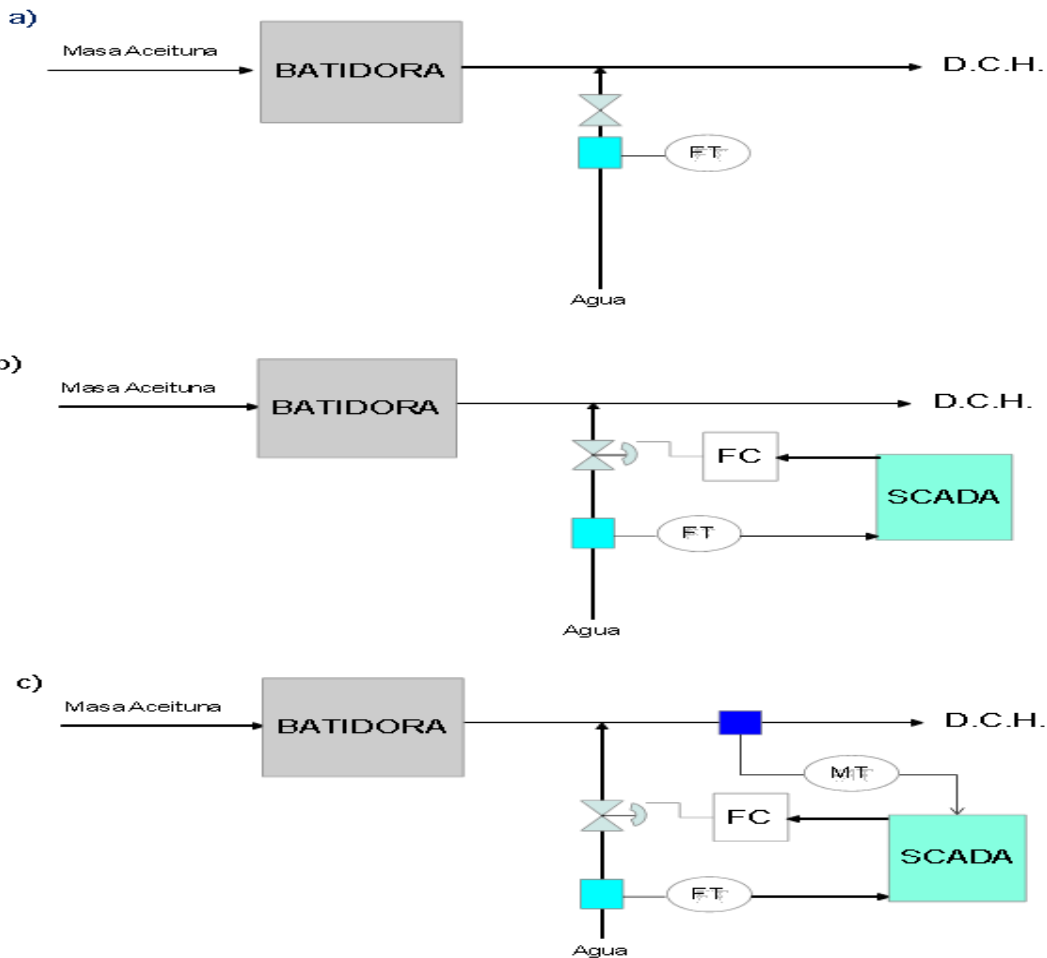


Figura 4.- Esquemas actuales de adición de agua al DCH. A) Manual; B) Automatizada con control PID y consigna de agua manual; y C) Automatizada con control PID y consigna de agua controlada por medidor de humedad a la entrada del DCH. FC, controlador de flujo; FT, transmisor de flujo; MT, transmisor de humedad.

## 2.4. El control basado en la lógica fuzzy.

Los sistemas de lógica difusa (borrosa o fuzzy), constituyen una herramienta desarrollada a partir una de las técnicas de la inteligencia artificial entre cuyos objetivos está el de dar soluciones a problemas de control de procesos complejos, no lineales, en los que el conocimiento adquirido de un proceso es transformado en un lenguaje regido por la teoría de conjuntos difusos y funciones de pertenencia, de manera que permita dar respuestas a los problemas planteados, aprovechando las ventajas que presenta la lógica fuzzy a medida que aumenta la complejidad de los sistemas y las imprecisiones de los datos (Guzmán & Castaño, 2006).

Una de las características de la lógica fuzzy es la de poder trabajar con valores intermedios a la hora de definir evaluaciones convencionales como:



las variables de entrada a todos los conjuntos difusos que se les han asignado;

- una segunda etapa constituida por el 'motor de inferencia' y las reglas, las cuales serán la que se apliquen mediante el algoritmo de control de proceso y que están constituidas como un conjunto de relaciones difusas entre las variables que condicionan el proceso a ser controlado y las variables de salida del propio proceso. Esas reglas lingüísticas son del tipo 'SI condiciones ENTONCES acciones', dándole a cada regla un peso que vendrá asignado por el grado de veracidad de sus antecedentes;
- una última etapa denominada 'defuzzyficación', en la cual se transforma el conjunto fuzzy final en un valor numérico empleando el método más habitual del centro de gravedad, o en un valor cualitativo empleando los métodos de las distancias, y estableciéndose las salidas difusas, a las que se les asigna el máximo valor de veracidad establecido en las reglas, las cuales son consideradas como los 'consecuentes' para cada variable de salida real.

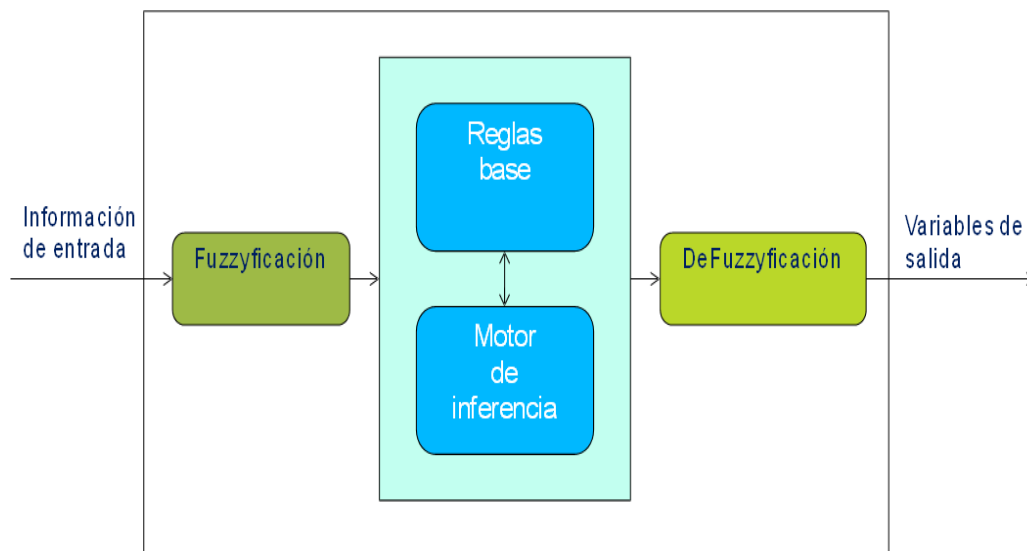


Figura 6.- Esquema genérico de un sistema fuzzy

Una de las aplicaciones más importantes de la lógica difusa es su empleo en el diseño de 'controladores fuzzy'. Su forma de trabajo general es similar a la de cualquier controlador convencional, es decir, toman los valores de las variables de entrada, los procesan y actúan sobre las salidas para

realizar el control de la planta. Sin embargo, mientras que los controladores convencionales necesitan describir el modelo del sistema mediante ecuaciones matemáticas, los controladores fuzzy aplican la lógica difusa basada en el conocimiento experto del proceso, el cual es trasladado a reglas, y en donde el manejo de las variables, evaluación, verificación de las reglas y toma de decisiones se realiza empleando un lenguaje común cercano al experto humano.

El control fuzzy se caracteriza por varios aspectos: es un control lógico, es un tipo de control dispersivo que permite su coexistencia en paralelo con otros controladores y es, además, un sistema de control lingüístico que permite el uso de variables imprecisas pero fáciles de entender en el diálogo que se establece con el operador en las tareas de control del proceso (Santos, 2011).

Estos controladores fuzzy pueden ser aplicados bajo diferentes esquemas (*Jantzen, 2010*): como sistemas sustitutivos de controladores convencionales, como es el caso de los controladores PID, o como controladores suplementarios trabajando en paralelo o suministrando información de control a controladores convencionales (Figura 7), siendo la forma de aplicación más difundida como sistema de control de lazos simples, en los que la salida de la planta es comparada con la señal de referencia y, ante la existencia de desviaciones, el controlador lleva a cabo las acciones sobre la planta de acuerdo a la estrategia de control establecida (Figura 7a).

Aunque no existe una metodología específica para el diseño de un sistema borroso, hay sin embargo unas directrices similares a las del desarrollo de cualquier controlador clásico. Bajo un punto de vista práctico, las tareas típicas en el diseño de los controladores fuzzy pasan por las etapas:

- Identificar las variables de entrada al sistema para definir las variables de estado, y las variables de control para definir las salidas.
- Identificar los términos lingüísticos vinculados a cada variable y sus respectivas definiciones. Asignación de las etiquetas lingüísticas a cada variable y definición de las funciones de pertenencia asociadas a cada etiqueta (conjunto borroso).
- Construir las reglas difusas apoyándose en las denominadas 'matrices de asociación difusa' o FAM, en las que se realiza la

asociación, para cada variable de control, de las variables de estado (antecedentes) con consecuentes.

- Parametrizar el controlador seleccionando la implementación y los parámetros de los operadores difusos a utilizar.

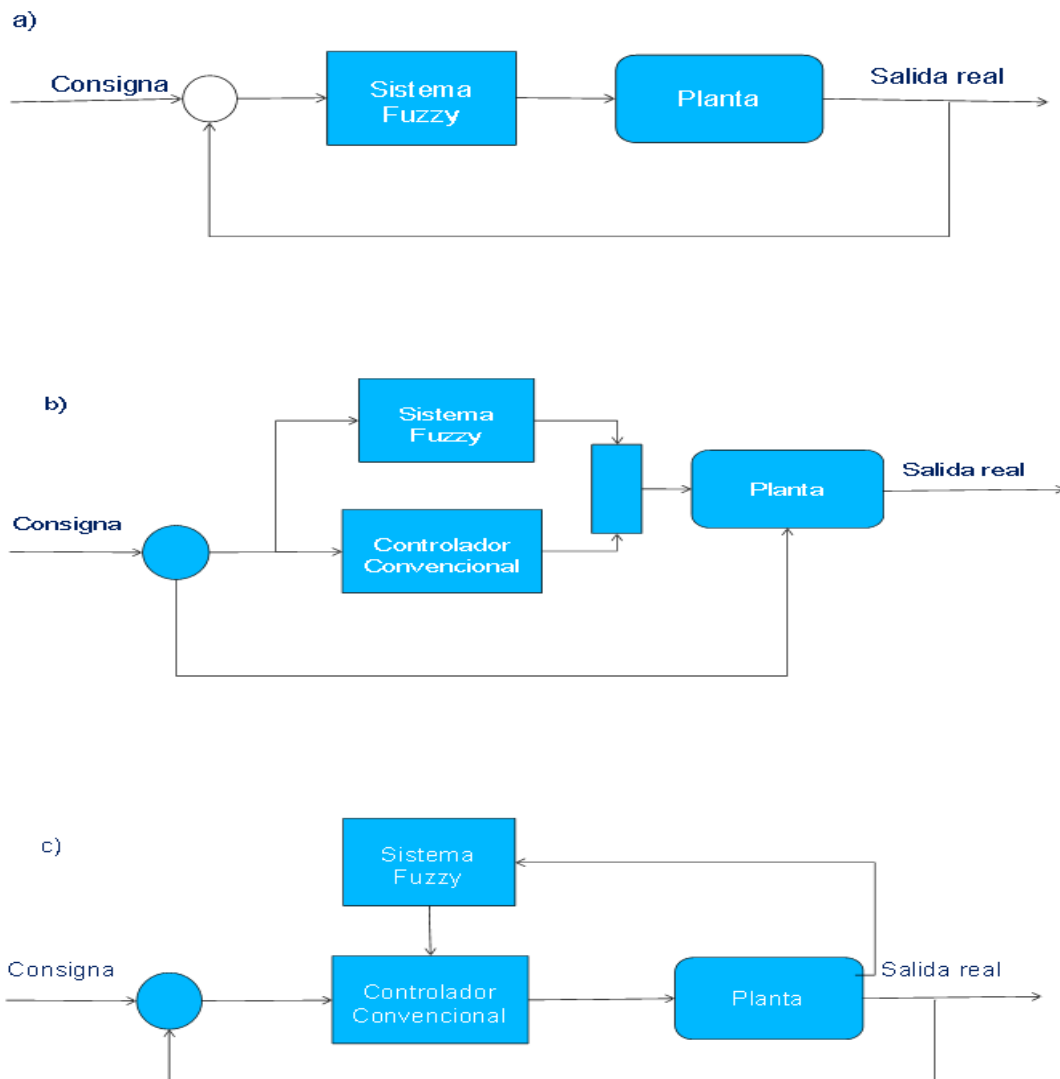


Figura 7.- Diferentes esquemas de configuración de trabajo de un sistema de control Fuzzy. a) Control directo; b) Control Feedforward; y c) Control adaptativo.

Algunos de los múltiples ejemplos que se puede encontrar en bibliografía respecto a aplicaciones prácticas del control fuzzy en el ámbito industrial son; control de pH en procesos de neutralización (*Fuente et al., 2002*); tratamiento de aguas residuales (*Adroer et al., 1999*); control de aguas en depuradoras urbanas (*Alex et al., 1994*); control de temperaturas en hornos e incubadoras (*Avilés, 2010; Kemper and Kemnper, 2000*); en duchas y piscinas (*Fernández*

de Alba and Garmendia, 2000; Delgado et al., 2009); control automático de columnas de destilación (Stenz, 1995; Flavio et al., 2003); control de digestores anaeróbicos (Estaben et al., 1997); control de llenado en plantas de embotellado (Ramirez et al., 2011); aplicaciones en plantas didácticas para el control del flujo de fluidos (Castro-Montoya et al., 2004); aplicaciones agrícolas como el control de dosificación de productos fitosanitarios (Burgos-Artizzu et al., 2007; Santos, 2011), el control inteligente de riegos (Mata-García et al., 2009), o el control de clima en invernaderos (Carrillo et al., 2008).

## 2.5. Software utilizado.

Para el diseño del controlador borroso se emplea la ‘toolbox’ de Matlab denominada ‘fuzzy’. Esta herramienta (Figura 8) permite de forma gráfica y sencilla definir los conjuntos de entrada y salida, establecer las funciones de pertenencia, y definir las reglas de actuación, proporcionando la salida en varias formas gráficas que permiten ver el comportamiento del sistema con sólo variar los valores de los parámetros de entrada.

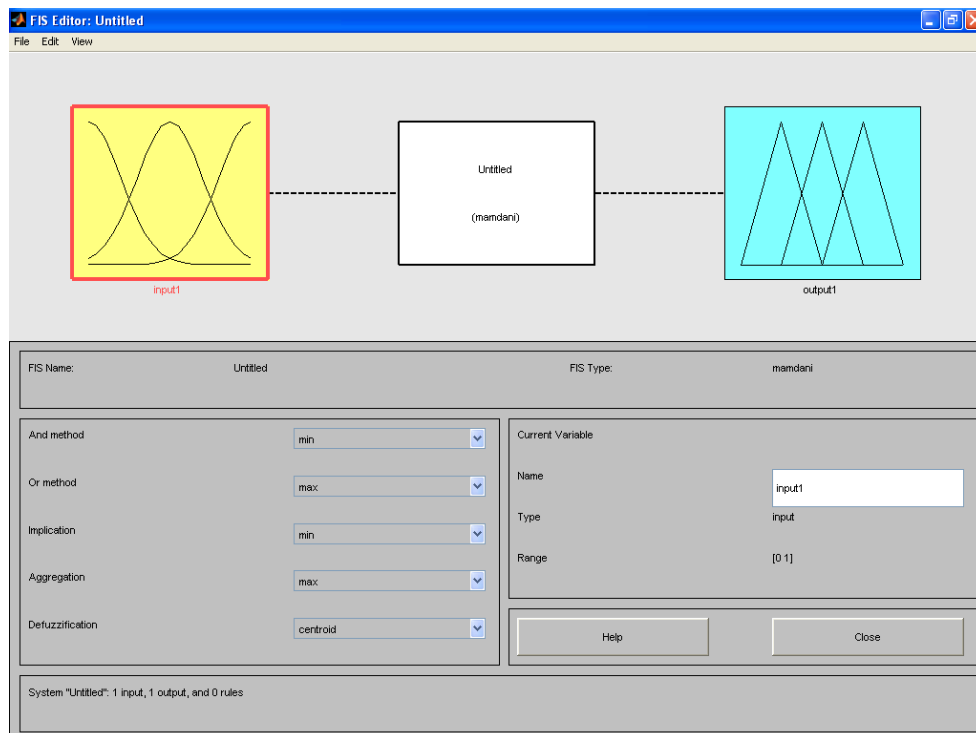


Figura 8. Pantalla inicial de la toolbox ‘fuzzy’ del programa Matlab.

Esta 'toolbox' permite, además, guardar el controlador diseñado no sólo en el formato habitual, para que pueda utilizarse en otras ocasiones, sino que también permite la exportación del modelo como bloque 'Simulink', el cual puede ser implementado en esquemas de control para simulaciones.

El manejo de la 'toolbox' se realiza de acuerdo al tutorial proporcionado por (*Roger & Culley, 2000*).



# Capítulo 3

## Modelado y Control del Proceso

### 3.1. Descripción del sistema.

Este trabajo se centra en el diseño e implementación de un sistema de control, basado en la lógica borrosa, que permita la regulación del caudal de agua que se inyecta en un Decanter Centrifugo Horizontal (DCH) de acuerdo a unas consignas de humedad establecidas previamente.

Básicamente, el sistema en general estaría constituido por tres grandes bloques, los cuales se podría definir como: '*Bloque-Consigna*', '*Bloque-Controlador*', y '*Bloque-Planta*'. En la Figura 9 se muestra un esquema global del mismo, junto con las variables de entrada y salida que lo constituyen.

Como entradas, el sistema maneja las variables de: humedad real de la aceituna o masa de aceituna, ' $H_R$ '; la consigna de la humedad con que se quiere que la masa batida entre al DCH, ' $H_C$ '; y el caudal con que esta masa entra al DCH, ' $Q_M$ '. Como salida el sistema se centra en la variable del caudal de agua a añadir al decanter, ' $Q_{RDCH}$ '.

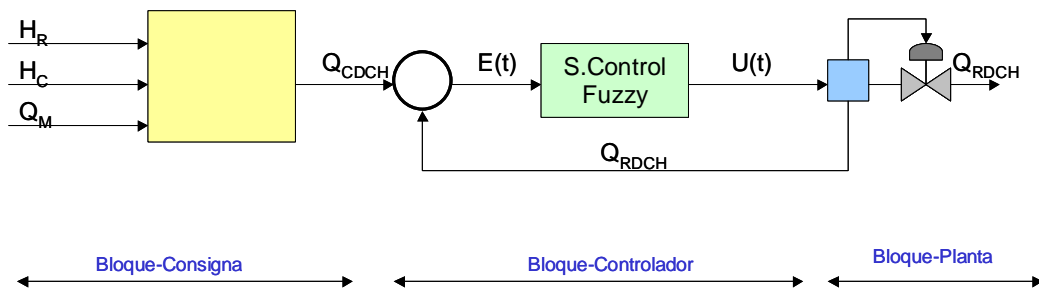


Figura 9. Bloques constituyentes del sistema de control.

El sistema maneja estas variables, a través de los diferentes bloques, de la siguiente manera:

- El '**Bloque-Consigna**', se encarga de establecer la consigna de caudal de agua ' $Q_{CDCH}$ ' que hay que añadir al DCH en función de las tres variables de entrada. Para ello se determina mediante técnicas analíticas, 'on-line', es decir, en tiempo real, la humedad de la aceituna o masa de aceituna que entra en la fase de batido ( $H_R$ ), se establece manualmente la consigna de la humedad ( $H_C$ ) que deseamos que tenga la masa batida a la entrada del separador DCH, y con la medida en tiempo real proporcionada por un caudalímetro del caudal de masa que entra al DCH ( $Q_M$ ) se estima, a través de un modulo de cálculo, el caudal de agua,  $Q_{CDCH}$  que debería acompañar a la masa para que ésta presente en el momento de su entrada al DCH la humedad de consigna  $H_C$ .
- El '**Bloque-Controlador**', es el que contiene al sistema de control borroso. Bajo un esquema de lazo cerrado, el caudal de agua de consigna ' $Q_{CDCH}$ ' es comparado con el caudal real de agua que entra al DCH ' $Q_{RDCH}$ ', medido por el caudalímetro, siendo su diferencia el error ' $e_Q$ ' la señal que alimenta al controlador fuzzy. La salida del controlador es la señal de control  $u(t)$ , que entrará en el 'Bloque-Planta'.
- El '**Bloque-Planta**' está constituido por aquellos elementos que forman el sistema a controlar, en el caso de este proyecto un sensor y un actuador. El sensor es el caudalímetro electromagnético que tiene como

misión la de informar en tiempo real del valor, en  $Lh^{-1}$ , del caudal real de agua que se está añadiendo al DCH ( $Q_{RDCH}$ ). El actuador es la válvula, ya que lo que se pretende es regular el porcentaje de apertura de ésta para conseguir el nivel de caudal adecuado y por lo tanto la humedad necesaria para la masa.

Por lo tanto la señal de control del sistema borroso actuará sobre la válvula abriéndola, cerrándola o no actuando sobre ella para que proporcione el caudal adecuado en cada momento.

### **3.1.1 Cálculo de la humedad de consigna**

Una solución adoptada para este trabajo ha sido la de establecer la consigna de humedad de entrada de masa al DCH a partir de la humedad real de la masa de aceituna que entra en la termobatidora y del caudal real de inyección de masa al DCH. El sensor de humedad, en este caso, pasa de estar a la entrada del DCH a la entrada de la termobatidora con lo que se consigue:

1. conocer el contenido en agua con más antelación;
2. eliminar la necesidad de un sensor de humedad específico colocado a la entrada del DCH, ya que la localización más útil de éste tipo de sensor, para la optimización integral del proceso, es precisamente sobre la masa que entra a la termobatidora;
3. permitirá modificar el punto de adición del agua directamente al interior del DCH;
4. la posibilidad de prescindir de éste sensor 'on-line' si se dispone de un equipo 'off-line' que permita determinar éste parámetro durante el periodo que dura el batido (60 – 90 minutos).

La humedad de consigna se estima indirectamente para conseguir alcanzar y/o mantener los valores de humedad deseada en la masa de aceituna batida que entra al decanter, ' $H_C$ '. El agua que es necesario añadir es determinada a partir del conocimiento del caudal de masa  $Q_0$ , el cual es medido en tiempo real mediante el caudalímetro, y del contenido real de agua en esa masa,  $H_R$ , la cual es determinada previamente al batido mediante alguna técnica analítica, preferiblemente 'on-line'. Para este cálculo se utiliza la

formula siguiente:

$$\frac{\left(\frac{Q_o * H_R}{100}\right) + X}{Q_o + X} * 100 = H_{CDCH}.$$

donde:

$Q_o$ ( $kg h^{-1}$ ), es el caudal de masa.

$H_R$  (%), es la humedad de la masa a la entrada de batidora.

$H_C$  (%), es la humedad de consigna.

$X$  ( $kg h^{-1}$ ), es el caudal de agua a añadir.

Despejando  $X$  de dicha ecuación se obtiene que la cantidad de agua a añadir al DCH, en  $kg h^{-1}$  o  $L h^{-1}$  (asumiendo que la densidad del agua es  $\rho_{agua} = 1 kg m^{-3}$ ) se puede estimar con la ecuación (2):

$$X(Lh^{-1}) = \frac{0.01 * Q_o(H_C - H_R)}{1 - 0.01 * H_C}$$

Para su simulación en Simulink, se ha implementado esta última ecuación en un bloque de cálculo, como el reflejado en la Figura 10.

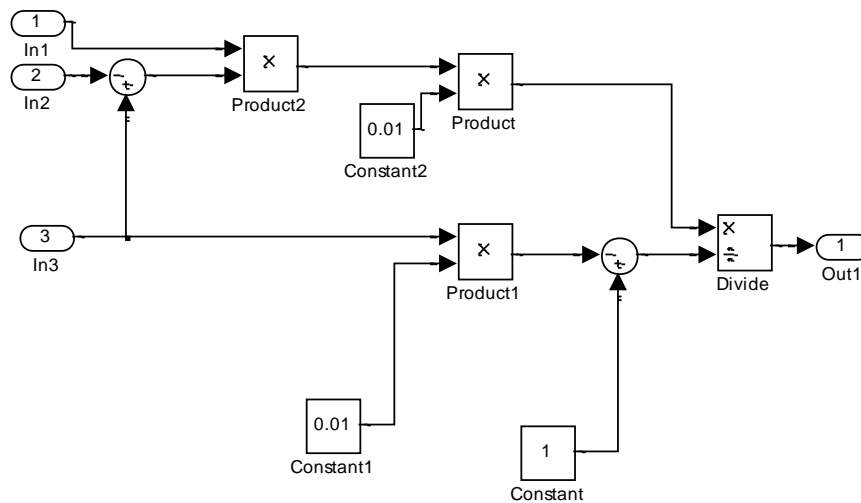


Figura 10. Bloque de cálculo de la consigna de caudal:  $In1 = Q_o$  ( $kg h^{-1}$ ),  $In2 = H_R$  (%),  $In3 = H_C$ (%) y  $Out1 = X$  ( $kg h^{-1}$ ).

Así, una situación real que puede darse en el proceso sería, por ejemplo, que para que la masa entre al DCH con una humedad  $H_C = 51.18\%$ , si el caudal de masa está en  $1000 \text{ kg h}^{-1}$  y la humedad medida de la masa es del  $H_R = 45.00\%$ , será preciso añadirle agua con un caudal de unos  $150.1 \text{ Lh}^{-1}$ .

### 3.1.2 Modelado de la válvula

Para poder validar la eficiencia del controlador inteligente es necesario conocer el comportamiento del sistema sobre el que va a actuar. En este caso, la planta está constituida por el conjunto 'actuador-válvula'.

El actuador es de tipo eléctrico y de acción inversa, de tal manera que cuando el actuador se queda sin tensión eléctrica en la señal de entrada, el vástago de la válvula se posiciona para que ésta quede completamente cerrada. El conjunto 'actuador-válvula' tiene capacidad para controlar un rango de caudal teórico de  $0 - 450 \text{ Lh}^{-1}$ , y responde a la entrada de una señal analógica de voltaje dentro del rango de  $0 - 10\text{v}$ .

Para determinar el comportamiento de este conjunto 'actuador-válvula' y extraer una función de transferencia que permita simular su comportamiento, se han realizado algunos ensayos en el sistema real, midiendo el caudal real para diferentes voltajes y pesando la cantidad de agua que deja pasar en un determinado tiempo (Tabla 2).

Voltaje aplicado (v)	Tiempo medida (s)	Peso Agua (kg)	Caudal Medido (L h <sup>-1</sup> )
0	0	0.00	0.00
1	180	0.34	6.80
2	180	0.71	14.20
3	180	1.36	27.20
4	180	1.95	39.00
4.5	180	1.79	35.80
5	180	1.80	36.00
5.2	180	2.02	40.40
5.5	180	4.27	85.40
5.7	180	6.20	124.00
6	120	7.41	222.30
6.5	120	7.06	211.80
8	120	7.05	211.50
9	120	7.05	211.50
10	120	7.05	211.50

Tabla 2. Resultados experimentales del ensayo para obtener la relación entre voltaje aplicado al actuador y el caudal.

Se puede observar que aunque el valor teórico máximo de caudal es  $250 \text{ Lh}^{-1}$ , la válvula alcanza el caudal máximo de  $222.30 \text{ Lh}^{-1}$  a partir de los 6v aplicados.

El comportamiento del conjunto 'actuador-válvula' corresponde al de los denominados de 'igual porcentaje' o 'isoporcentual' (Figura 11, línea roja), en los cuales el caudal es proporcional al porcentaje de apertura de la válvula y al caudal de paso que existía antes del incremento del recorrido, de manera que iguales incrementos de recorrido del vástago de la válvula proporcionan iguales incrementos de porcentaje en el caudal que pasa en ese momento.

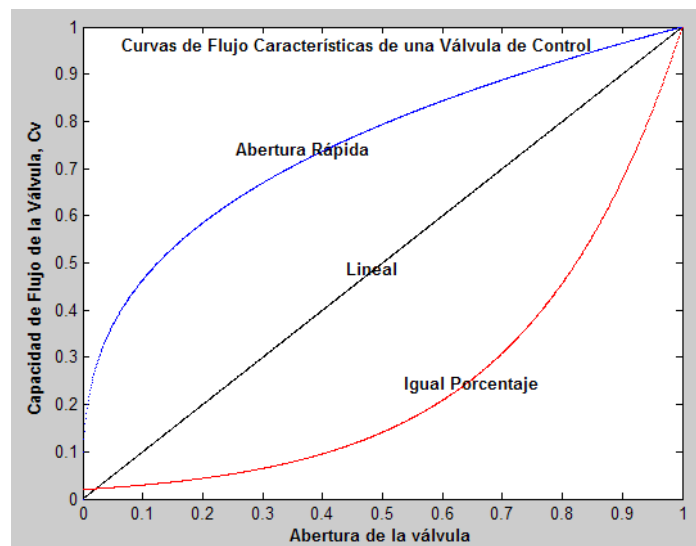


Figura 11. Curvas características del comportamiento de válvulas de control.

Este comportamiento 'isoporcentual' supone que hasta los 5v, grandes cambios de voltaje producen pequeños cambios de caudal, mientras que a partir de esos 5v, la aplicación de pequeños cambios de voltaje se traduce en grandes cambios de caudal, como se puede apreciar en la Figura 12, en la que se expone la fórmula matemática que permite la conversión del voltaje aplicado a la válvula al caudal de agua de paso por ésta.

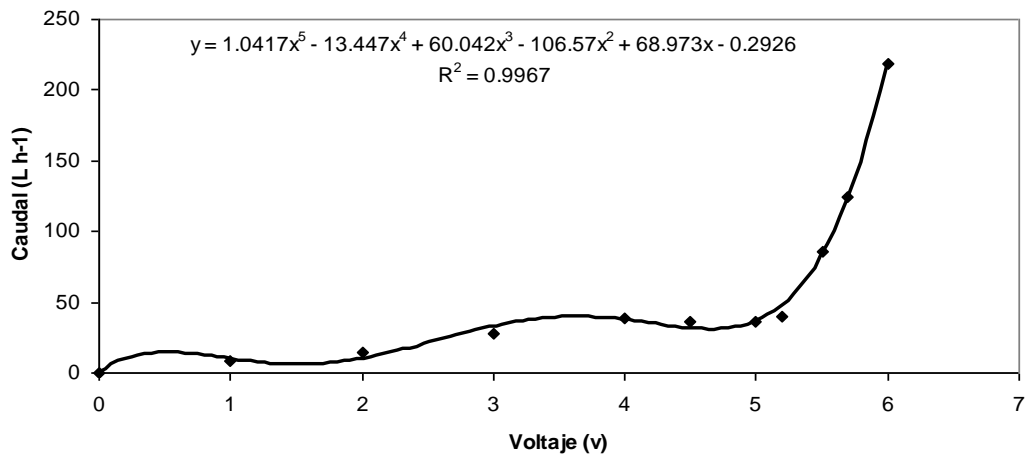


Figura 12. Correlación Voltaje aplicado a válvula vs Caudal real medido.

El mejor ajuste obtenido entre el voltaje aplicado al actuador y el caudal que deja pasar la válvula es una función polinómica de 5º grado, función que será empleada en los modelos 'Simulink' para realizar la conversión entre ambos parámetros.

Para modelar el comportamiento de este conjunto 'actuador-válvula' (planta), generalmente se asume que la función de transferencia corresponde a un sistema de primer orden (Acedo, 2006); no obstante, en esta función de transferencia hay que considerar la existencia de dos dinámicas que pueden hacer modificar este comportamiento: la del actuador eléctrico y la de la propia válvula (Figura 13).

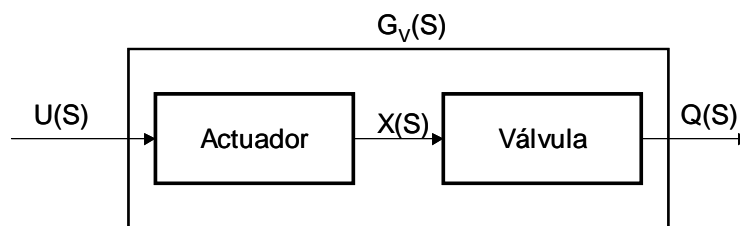


Figura 13. Función de transferencia de la planta.

- Q(S), es la variable manipulada o caudal de agua a controlar.
- U(S), es la señal que proviene del controlador fuzzy (porcentaje de apertura, voltaje, caudal, etc) y que actuará sobre el sistema electrónico del actuador para producir la apertura o cierre de la válvula.

- $X(S)$ , es el desplazamiento del vástago de la válvula.

El hecho de que la señal de control pueda obtenerse como un voltaje, o un porcentaje de apertura de la válvula, o un caudal, nos va a permitir definir distintos tipos de controladores, según su salida.

En este trabajo se considera la dinámica del 'actuador-válvula' en su conjunto y se identifica la función de transferencia a partir de datos experimentales de la planta real, mediante la aplicación de voltaje directo a la válvula y registro de la evolución del caudal, en lazo abierto, ante un cambio de tipo escalón en el voltaje aplicado.

En la Figura 14, se muestra el registro obtenido al aplicar al actuador un escalón de 0 a 5,5 v. Inicialmente la válvula está cerrada, y al cabo de 50 segundos se le aplica un voltaje de 5,5 v, con lo que la válvula se abre hasta permitir el paso del agua con un caudal de unos 85  $Lh^{-1}$ .

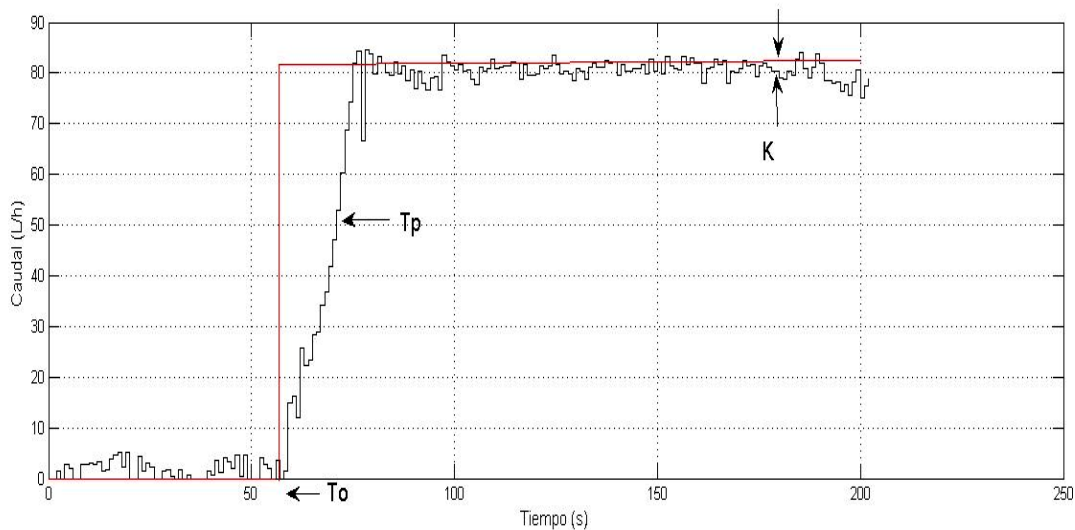


Figura 14. Respuesta del conjunto 'actuador-válvula' ante una consigna escalón de 5,5v.

La función de transferencia de un sistema de primer orden viene definida de forma general por:

$$G(S) = K \cdot e^{-\tau_0 S} / (\tau_p S + 1)$$

Para determinar la ganancia  $K$ , el tiempo de retardo  $\tau_0$  y la constante de tiempo  $\tau_p$  del modelo de primer orden se analiza la respuesta de la Figura 14.

En ella se observa que el sistema empieza a responder a unos 2 segundos de la aplicación del escalón; que la constante de tiempo  $\tau_p$ , la cual se estima considerando el tiempo transcurrido entre el instante en que se produce dicho cambio hasta el momento en que se alcanza el 63.2% del valor estacionario de salida, alcanza un valor de unos 18 segundos; y que la ganancia  $K$  normalizada, calculada como el cociente entre el cambio observado una vez alcanzado el estado estacionario en el nivel superior ( $82 \text{ Lh}^{-1}$ ) y la amplitud del escalón aplicado ( $85 \text{ Lh}^{-1}$ ), toma el valor de 0.965. Con lo que la función de transferencia de 1er orden viene dada por:

$$G(S) = e^{-2s} * 0.965 / (18s + 1)$$

Para comprobar el modelo se simula su comportamiento ante dos escalones de voltaje aplicados, comparándolos con la salida real. En la Figura 15 se muestra los resultados gráficos obtenidos aplicando las consignas de 5,5v y de 6v.

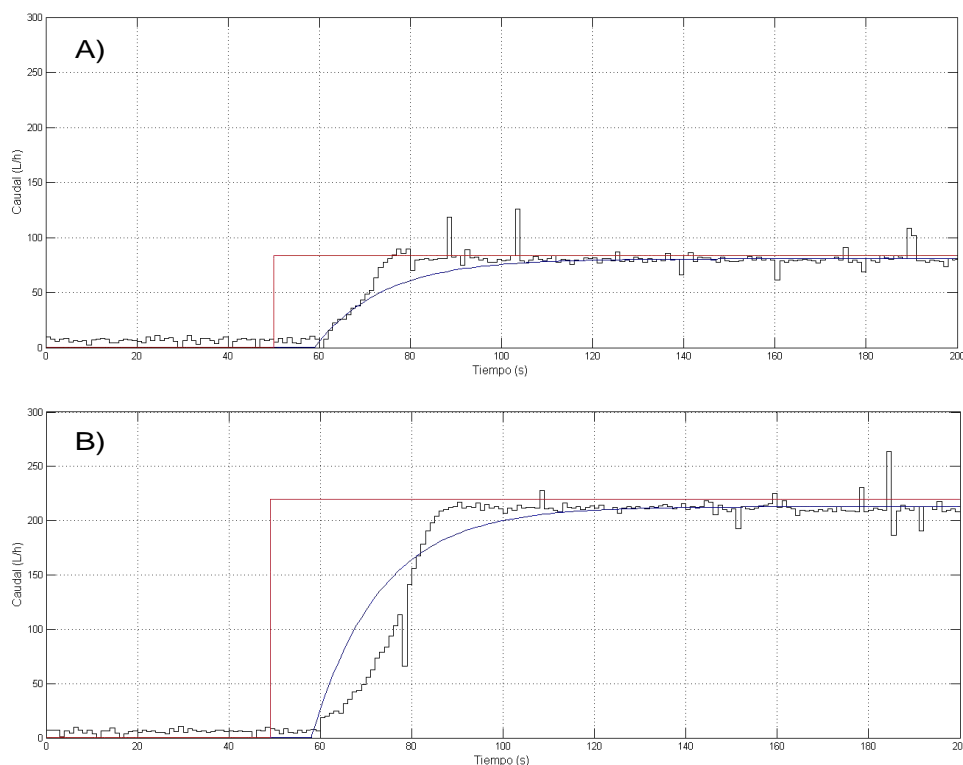


Figura 15. Respuesta del modelo de primer orden (azul), ante un cambio de consigna (rojo) de 0 a 5,5v A) y de 6v B). Caudal (negro) obtenido de la señal del caudalímetro IFC010.

En ambos gráficos se puede observar que aunque el modelo representa satisfactoriamente la dinámica de forma global, pero se requiere un mejor ajuste del modelo. El perfil del caudal parece indicar que un ajuste con una función de transferencia de segundo orden sería más aconsejable. Se define, pues, un modelo de segundo orden que se ha identificado con el objetivo de mejorar el modelo de la válvula. La expresión de ésta es ahora del tipo:

$$G(S) = e^{-\tau_0 S} * Kw^2 / (s^2 + 2\xi\omega s + \omega^2)$$

donde :

- K= ganancia
- $\omega$  = frecuencia de oscilación
- $\xi$  = coeficiente de amortiguamiento
- $\tau_0$  = tiempo de retardo

Se han obtenido, analizando la gráfica de la respuesta, los valores de  $K = 0.965$ ,  $\omega = 0.118$ , y  $\xi = 0.697$ . Para validar el modelo y obtener una mayor información sobre el sistema se repite el experimento en otro momento simulado la función de transferencia de segundo orden obtenida y capturando la respuesta del sistema (Figura 16), observándose que si bien el caudalímetro, al ser un equipo real, no reproduce exactamente la misma curva que en las figuras 15A y 15B, si permite verificar que la función de 2º orden se ajusta mejor.

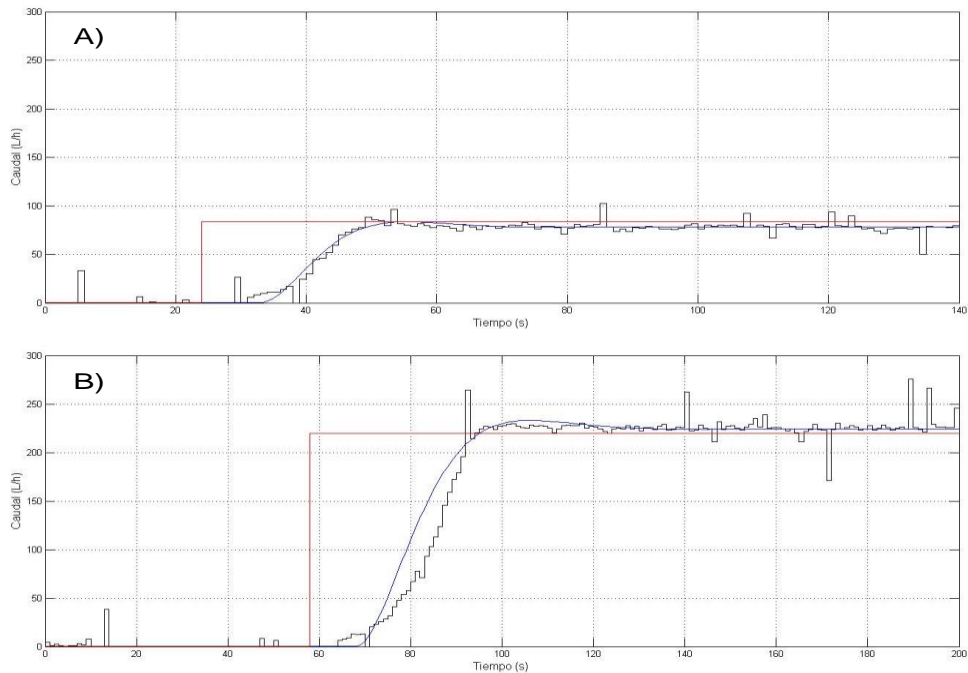


Figura 16. Respuesta del modelo de segundo orden (azul), ante un cambio de consigna (rojo) de 0 a 5,5v A) y 6v B). Caudal (negro) obtenido de la señal del caudalímetro IFC010.

Como se puede observar, el comportamiento de la función de transferencia se adecua mejor a la dinámica real de la planta.

Por tanto, el conjunto ‘actuador-válvula’, para su uso en simulaciones, queda definido por el sistema de bloques representado en la Figura 17.

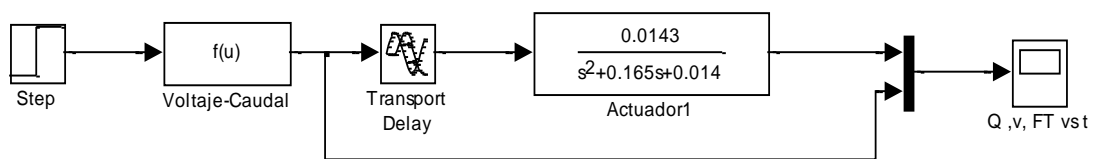


Figura 17. Montaje para la simulación en Simulink del conjunto ‘actuador-válvula’ empleado.

### 3.2. Diseño del controlador.

Para el diseño del sistema de control fuzzy se ha seguido los pasos habituales en este tipo de controlador:

- Analizar las variables de entrada y salida y sus dominios.
- Definir las variables lingüísticas y los conjuntos difusos con sus

correspondientes etiquetas lingüísticas.

- Diseñar la base de reglas difusas que relacionan las variables de entrada (antecedentes) con las acciones de control (consecuentes).
- Definir el método de 'defuzzificación' y el método de inferencia que se va a utilizar.

Es conocido que, para la configuración del controlador borroso, existen numerosas posibilidades tanto para la definición de los conjuntos difusos y sus funciones de pertenencia, que pueden tener formas triangulares, trapezoidales, gaussianas, etc., como para la declaración de las reglas y los otros parámetros de ajuste del regulador.

Para este proyecto se ha elegido, por ser uno de los métodos más empleados en control por su sencillez, un sistema tipo 'Mamdani', donde la salida es un conjunto borroso dado por la agregación de las reglas que se hayan activado. La salida, dada en términos lingüísticos, debe ser convertida a un valor numérico para que los elementos posteriores puedan procesarla. En este trabajo se ha usado el método del centro de gravedad para calcular esta salida analógica. Como método de inferencia se ha aplicado el propuesto por Zadeh, max-min, aunque también se ha probado el de Larsen, max-prod.

Como esquema básico se ha usado un controlador tipo PID-fuzzy, con entradas error ( $e$ ), cambio o derivada del error ( $ce$ ), y la suma/integral del error ( $se$ ). Como variable de salida se puede trabajar la acción de control en forma incremental  $\Delta u$  o la acción de control  $u$  absoluta.

En todos los casos, la señal de error viene definida como,

$$e(t) = \text{Consigna} - \text{Salida real}$$

Además se pueden definir ganancias o parámetros de sintonía que multiplican a las variables de entrada y salida (Dormido et al., 1993). Por ejemplo, la Figura 18 muestra la estructura de un PD o PI incremental.

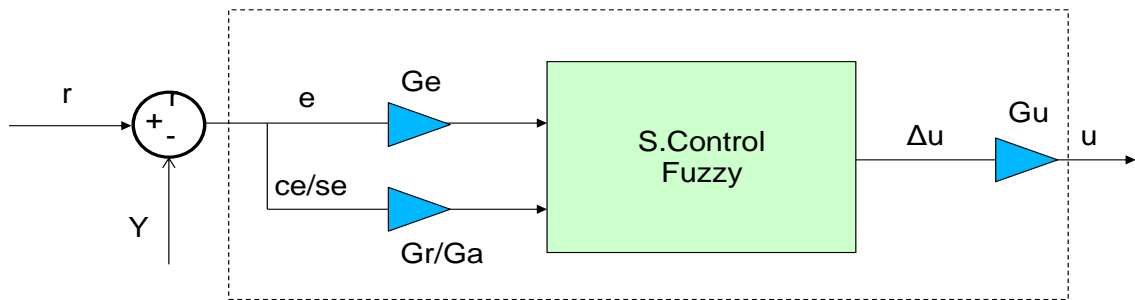


Figura 18. Esquema genérico de un controlador fuzzy-PID.  $G_e$ , ganancia del error;  $G_r$ , ganancia del cambio de error;  $G_a$ , ganancia de la aceleración (segunda derivada).  $G_u$ , ganancia de la acción de control.

El objetivo final del proyecto es obtener un controlador borroso capaz de regular el caudal de agua de adición al DCH mediante el control de la apertura de una válvula motorizada de desplazamiento proporcional, de acuerdo a la consigna de humedad establecida, y en base a la humedad cambiante del fruto y al caudal de inyección de la masa batida que entra al DCH (Figura 19).

### C) Propuesta Fuzzy

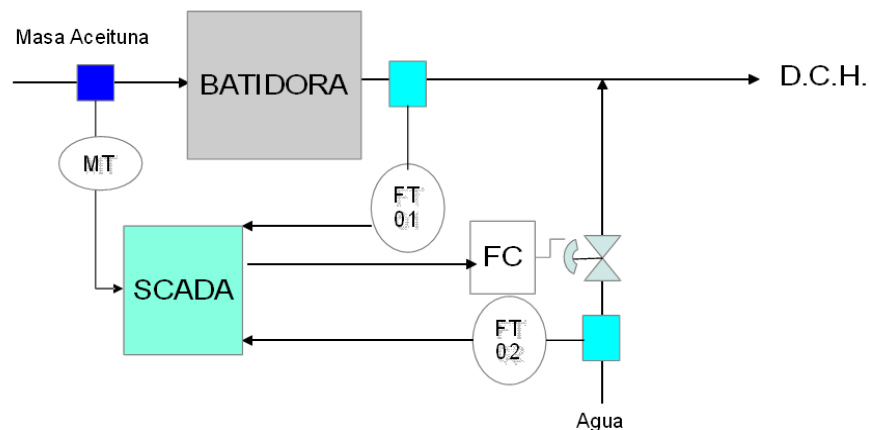


Figura 19.- Control de adición de agua automatizada y con consigna de agua controlada por la humedad de la masa de aceituna a la entrada de la batidora.

Se han propuesto tres controladores borrosos y se ha analizado su comportamiento. Difieren en las variables de salida que utilizan, como ya se comentó (voltaje, caudal, apertura de la válvula), así como en algunos parámetros de configuración del regulador. Se resumen en la Tabla 3.

Salida Fuzzy	Etiquetas									
	Total	Medio		Medio	Total					
Apertura Válvula (Controlador nº 1)	Cierre	Cierre	No Actua	Apertura	Apertura					
Voltaje a válvula (Controlador nº 2)	Disminuir	Disminuir	No Actuar	Aumentar	Aumentar					
Caudal (L h <sup>-1</sup> ) (Controlador nº 3)	Q0	Q25	Q50	Q75	Q100	Q125	Q150	Q175	Q200	Q225

Tabla 3. Controladores borrosos propuestos.

### 3.2.1 Controlador 1: Apertura de la válvula

Este modelo viene a representar la forma en que un operador de planta maneja la válvula del agua de manualmente con información visual del caudal a través de un rotámetro u otro indicador de caudal.

Como se muestra la Figura 20, es un sistema SISO. La entrada es la consigna de caudal de agua al separador centrífugo DCH,  $Q_{CDCH}$ , y la salida, es el caudal de agua medido por el caudalímetro,  $Q_{RDCH}$ . Los rangos de ambas variables están entre 0 y 250 Lh<sup>-1</sup>.

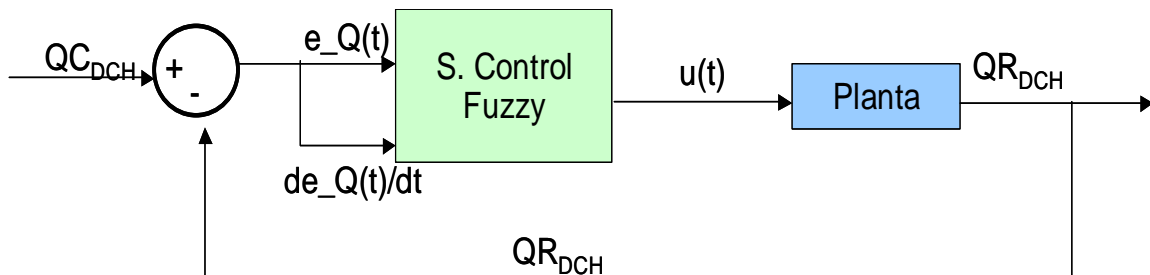


Figura 20. Configuración del sistema en lazo cerrado con el sistema fuzzy para el control del caudal.

Al no trabajar con valores incrementales, el controlador fuzzy es del tipo PD. Las dos variables de entradas son: el error, definido como la diferencia entre la consigna de caudal y el caudal real,  $e_Q(t)$ , y la variación o derivada del error,  $de_Q(t)/dt$ , con rangos entre  $[-250, 250]$  Lh<sup>-1</sup> y  $[-40, 40]$  Lh<sup>-1</sup>, respectivamente.

La variable de entrada error se ha definido mediante cinco conjuntos

borrosos: Muy Positivo (MP), Positivo (P), Cero (Z), Negativo (N), Muy Negativo (MN), según sea la diferencia entre  $Q_{CDCH}(t)$  y  $Q_{RDCH}(t)$  en cada instante de tiempo. De igual manera la variable derivada del error tiene asociados los mismos conjuntos difusos.

Las funciones de pertenencia asociadas a ambas variables de entrada, triangulares y distribuidas uniformemente, se muestran en la figura 21.

La variable de salida en este controlador es “apertura de la válvula”, que admite tres tipos de acciones:

- Cerrar válvula, para salidas negativas.
- Abrir válvula, para salidas positivas.
- No actuar sobre válvula, manteniendo la posición actual, cuando la salida está próxima al 0.

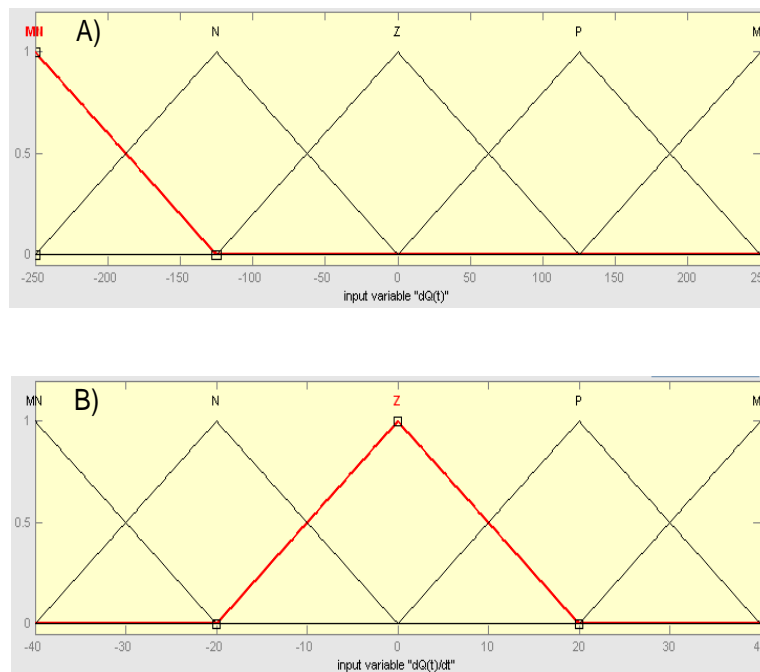


Figura 21. Funciones de pertenencia de las variables de entrada. A) Variable error. B) Variable derivada del error.

El rango normalizado de apertura de la válvula es el intervalo  $[-1, 1]$ , donde se han definido cinco conjuntos borrosos, también triangulares y trapezoidales, pero esta vez asimétricos (Figura 22). Se ha tenido en cuenta el

comportamiento ‘isoporcentual’ de la válvula en la que a niveles de caudales bajos, entre 0 -150 Lh<sup>-1</sup> aproximadamente, grandes porcentajes de apertura de la válvula se traducen en pequeños cambios de caudal, mientras que a niveles más altos, pequeñas variaciones en la apertura conducen a grandes cambios en el caudal.

Las etiquetas asociadas a esas funciones de pertenencia son: cierre total (TC), cierre a medias (MC), no actuación (N), apertura media (MA), y apertura total (AT).

Una vez convertidos los valores de entrada,  $e_Q(t)$  y  $de_Q(t)/dt$  en los correspondientes valores borrosos, se establecen las reglas que permiten obtener los valores de salida del sistema fuzzy. Para su diseño se ha utilizado la denominada ‘Matriz de Asociación fuzzy’ o FAM, la cual se ha construido en base a la experiencia de un operario de control, analizando el comportamiento del conjunto ‘actuador-válvula’ y ayudado del análisis de (Altas & Sharaf, 2007).

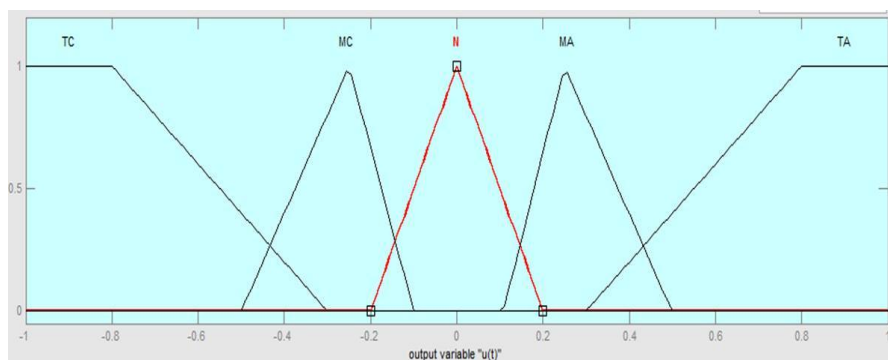


Figura 22. Funciones de pertenencia de la variable de salida “apertura de la válvula”

Esta es una matriz en la que las columnas representan los posibles valores borrosos de la variación del error, y las filas representan los valores fuzzy del error. El valor de cada celda de la matriz representa la actuación que debe hacerse sobre la válvula.

El motor de inferencia, empleando los operadores lógicos and y or, aplica las reglas de tipo ‘if ... then’, que relacionan los antecedentes con los consecuentes según la Tabla 4.

Error Consigna [e_Q(t)]	Derivada del error [de_Q(t)/dt]				
	MN	N	Z	P	MP
MN	TC	TC	TC	TC	TC
N	MC	MC	MC	MC	MC
Z	TC	MC	N	MA	TA
P	MA	MA	MA	MA	MA
MP	TA	TA	TA	TA	TA

Tabla 4. Matriz de asociación fuzzy con las reglas del controlador 1

El análisis cualitativo que ha permitido establecer el conjunto de reglas del controlador, que es el núcleo del sistema, es el siguiente.

Si el valor de consigna es superior al valor real del caudal, habría que actuar abriendo la válvula al máximo para conseguir rápidamente igualar los valores de ambos y hacer el error cero. Cuando el error es cercano al cero, dependiendo de la pendiente del error se deberá actuar con más o menos intensidad sobre la válvula; así, cuando la pendiente es muy negativa (derivada del error MN) y el sistema viene de compensar un error muy positivo (error MP), con un aumento de caudal, cabe esperar una fuerte inercia del sistema, por lo que se debería tomar la decisión de cerrar la válvula lo más posible a fin de minimizar dicha tendencia. Al contrario, si la pendiente del error es muy positiva (MP), el sistema viene de tener la válvula cerrada, por lo que la inercia puede llegar a hacer que el caudal baje por debajo de la consigna; en éste caso, al llegar el error a cero, sería conveniente una apertura de la válvula. Solamente en el caso de que ambas variables de entrada sean cero, no se actuaría sobre la válvula.

El resto de las acciones se corresponderían con actuaciones a nivel medio. Por ejemplo, si el error es MP y la derivada MN, la acción de control debe ser agresiva, MP. A medida que el sistema va aumentando el caudal, el error va disminuyendo por lo que la apertura de la válvula deberá irse cerrando (apertura media).

En la Figura 23 se muestra la superficie de control, donde queda también reflejado el comportamiento del controlador.

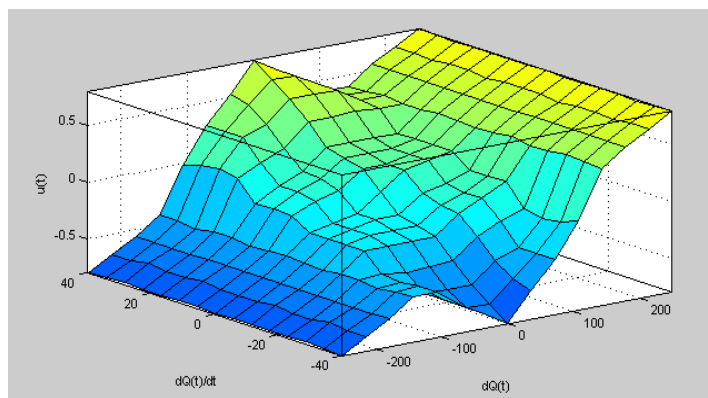


Figura 23. Superficie de control del sistema borroso.

Este controlador ha sido simulado para evaluarlo, como se muestra en el Capítulo 4.

### 3.2.2 Controlador 2: Voltaje a válvula

Este modelo mantiene las mismas dos variables de entrada que el modelo anterior, es decir, es un fuzzy-PD del error, pero la salida queda ligada al voltaje a aplicar directamente sobre la válvula. Las funciones de pertenencia y conjuntos borrosos de la variable de salida, reflejadas en la figura 24, establecen tres posibles tipos de acciones:

- Aumentar voltaje, ligeramente (AL) o mucho (AM), para abrir la válvula.
- Disminuir voltaje, ligeramente (DL) o mucho (DM), para cerrar la válvula,
- No actuar sobre válvula (NA), manteniendo el voltaje aplicado en ese momento.

Esto ha dado lugar a la definición de los cinco conjuntos borrosos que se muestran en la Figura 24 para la variable de salida voltaje.

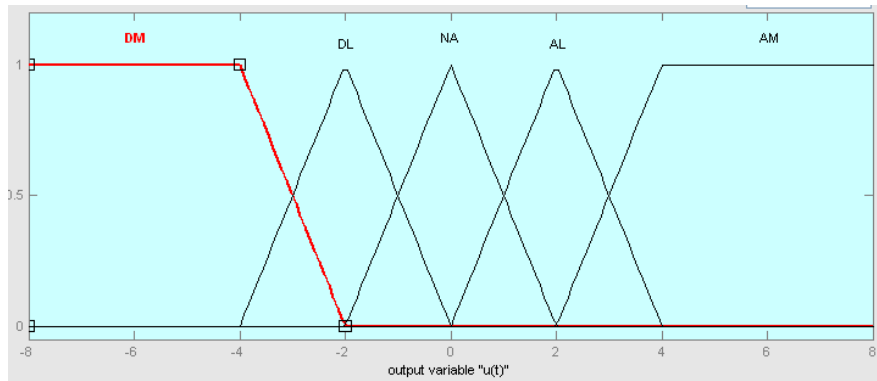


Figura 24. Funciones de pertenencia de la variable de salida "voltaje"

El rango de la variable de salida con el que se ha trabajado es el intervalo  $[-8, 8]$  por simplicidad, y seguidamente es traducida a voltaje en el rango del sistema real  $0 - 8$  V, no considerándose el rango hasta los 10 V una vez que se ha observado que un aumento de voltaje desde los 8 a los 10 V no supone un aumento de caudal.

La matriz de reglas empleada es similar, en cuanto a criterios de actuación, a la diseñada para el controlador presentado en el anterior apartado.

### 3.2.3 Controlador 3: Caudal.

En este controlador se incorpora al sistema fuzzy una tercera entrada consistente en la propia consigna de referencia de caudal, al objeto de que el sistema pueda tener un mejor seguimiento de dicha variable, contribuyendo, así a una mejor adaptabilidad del sistema de control. Este esquema de control se ha mostrado eficiente en otras aplicaciones, como la de Castro-Montoya et al., 2004.

En el esquema de la Figura 25 se puede observar la arquitectura de este modelo, en el que se aprecia como el sistema de control fuzzy queda definido para que la entrada al controlador esté constituida por la consigna de caudal ' $QC_{DCH}$ ', el error ' $e_Q(t)$ ' y la tendencia de variación de éste error ' $de_Q(t)/dt$ ', mientras que la salida  $u(t)$  queda definida por el caudal que hay que añadir en cada momento.

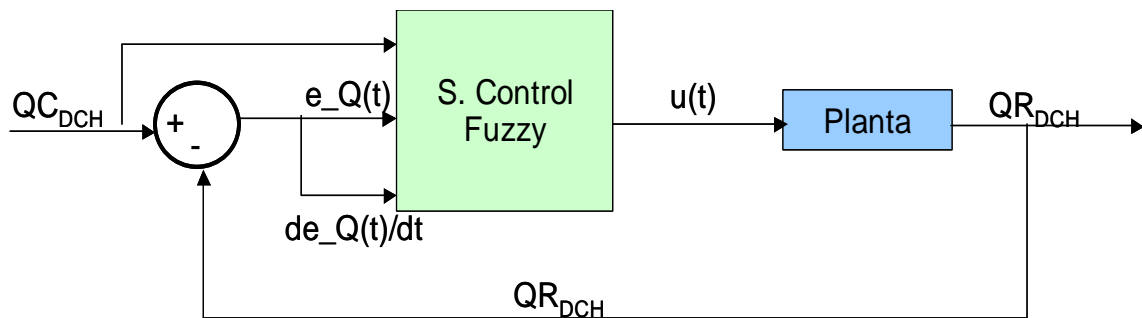


Figura 25. Configuración del controlador 3, en lazo cerrado.

El intervalo de valores de la salida del fuzzy está en el rango 0-250 Lh<sup>-1</sup> de caudal.

Las funciones de pertenencia asociadas a las variables de entrada y salida se muestran en la Figura 26. Como se puede observar, las entradas del error y derivada del error están ahora definidas por tres conjuntos borrosos (Positivo, Cero, Negativo), mientras que el caudal tiene 10 funciones de pertenencia.

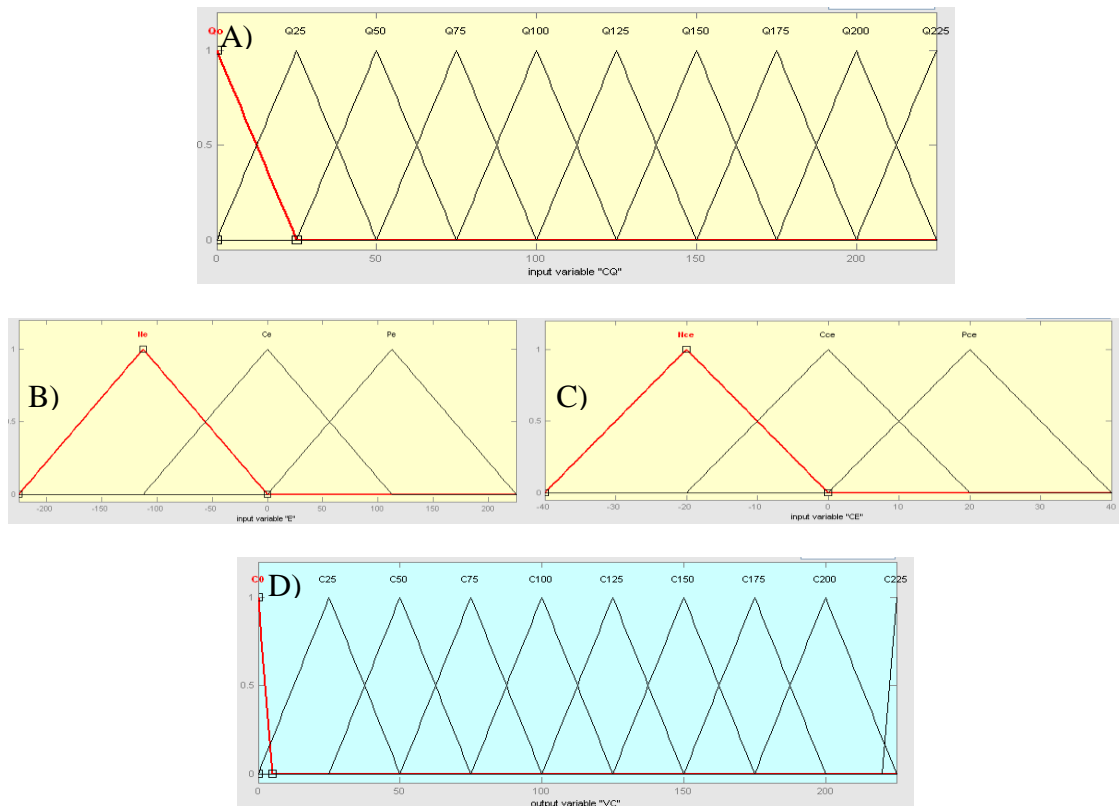


Figura 26. Funciones de pertenencia de las variables: A)  $QC_{DCH}$  ; B)  $e_Q(t)$ , C)  $de_Q(t)/dt$ ; D)  $QR_{DCH}$ .

Al introducir una variable más y un mayor número de conjuntos borrosos, el número de reglas se incrementa. No obstante, éstas pueden quedar reducidas a tres grupos de once, veinte y veintidós reglas cada uno. Un primer grupo constituido por sentencias como:

- Si *error* es  $C_e$  y *derivada\_error* es  $C_{ce}$  y  $Q_{cdch}$  es  $Q_0$  Entonces  $Q_{RDCH}$  es  $C_0$

en las que no se modifica el caudal actual si la diferencia entre la consigna y el caudal real, y la derivada de éste error, es cero.

Un segundo grupo, que gobierna las actuaciones cuando el caudal real está por debajo de la consigna establecida y que utiliza sentencias como:

- Si *error* es  $P_e$  y *derivada\_error* es  $P_{ce}$  y  $Q_{cdch}$  es  $Q_{25}$  Entonces  $Q_{RDCH}$  es  $C_{25}$
- Si *error* es  $P_e$  y *derivada\_error* es  $N_{ce}$  y  $Q_{cdch}$  es  $Q_{25}$  Entonces  $Q_{RDCH}$  es  $C_0$

en las que se mantiene el caudal si la derivada del error es positiva, mientras que si ésta es negativa se hace disminuir el caudal a la opción anterior.

Un tercer grupo, que controla las acciones cuando el caudal real está por encima de la consigna, empleando sentencias como:

- Si *error* es  $N_e$  y *derivada\_error* es  $N_{ce}$  y  $Q_{cdch}$  es  $Q_{25}$  Entonces  $Q_{RDCH}$  es  $C_0$
- Si *error* es  $N_e$  y *derivada\_error* es  $P_{ce}$  y  $Q_{cdch}$  es  $Q_{25}$  Entonces  $Q_{RDCH}$  es  $C_{25}$

en las que se mantiene el caudal si la derivada es positiva y se disminuye al anterior caudal si ésta es negativa.

Este análisis queda reflejado en la Figura 27.

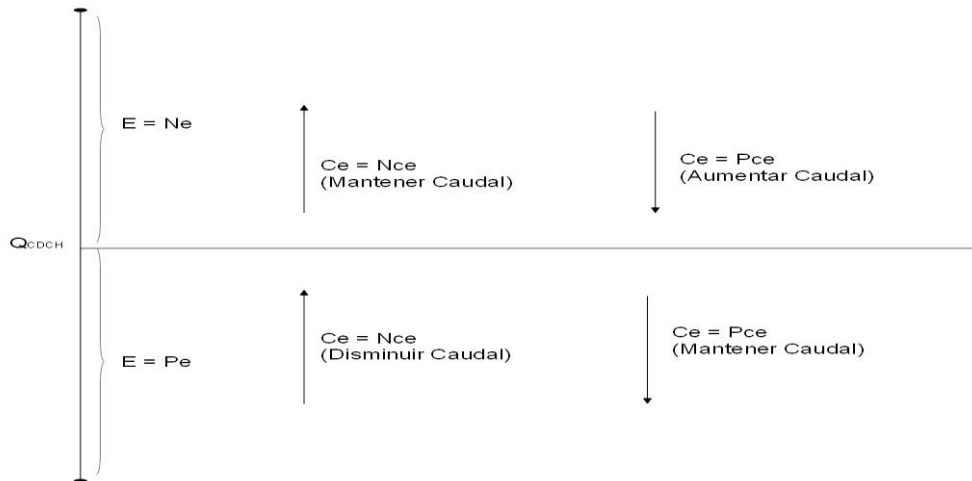


Figura 27. Análisis de las posibles acciones del controlador en función de las entradas

Se van a simular estos controladores y comparar su funcionamiento, de forma que el que consiga el mejor control será implementado en la planta real.

# Capítulo 4

## Análisis y Discusión de Resultados

### 4.1 Simulación de los controladores

Para validar los tres controladores fuzzy diseñados se han simulado en primer lugar, comparando su comportamiento con el de un controlador clásico tipo PID, el cual ha sido sintonizado lo más parecido posible al comportamiento que presenta éste en el sistema real, donde está funcionando, para un circuito de adición de agua de este proceso.

Para la simulación se ha usado el modelo de la planta obtenido en el Capítulo 3 de esta memoria. El objetivo es implementar en el sistema real el que mejor comportamiento presente de los tres propuestos.

Para llevar a cabo esta simulación se ha construido un esquema de control en lazo cerrado con 'Simulink', esquematizado en la Figura 28. El primer bloque permite establecer la consigna de caudal a partir de la humedad deseada, la humedad real y el caudal de masa; el segundo bloque es el del controlador fuzzy; y un tercer bloque de salida del controlador fuzzy constituido por un convertidor de esta salida a una señal a la válvula.

Dependiendo controlador fuzzy empleado, que podía tener distintas salidas, se usará una función  $f(u)$  u otra.

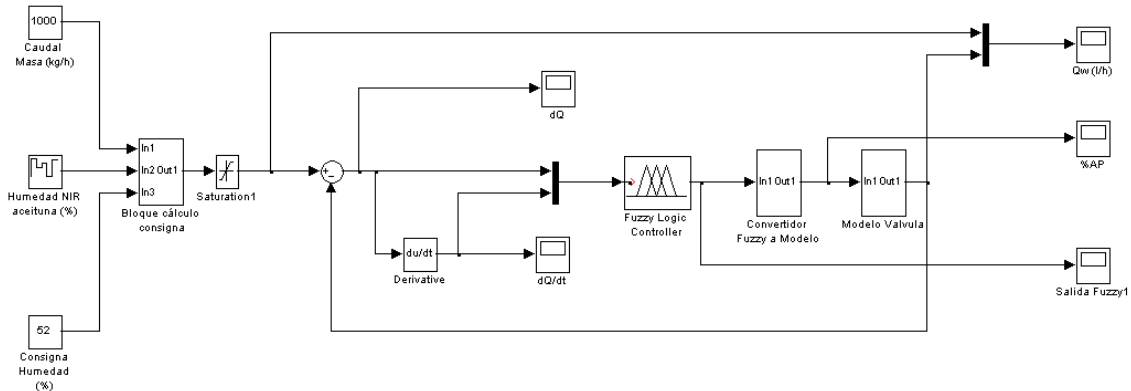


Figura 28. Esquema Simulink para control difuso en lazo cerrado del conjunto 'actuador-válvula' del proceso AOVE.

### Controlador tipo 1:

Como la salida es la apertura de válvula normalizada, el convertidor lleva a cabo una acción de forma que la función  $f(u)$  convierte la apertura de la válvula en caudal a través de la ecuación:

$$Q(L/h) = 1.3159 * \exp(0.0543 * AV)$$

obtenida a partir de los datos experimentales realizados de medida de flujo (Figura 29).

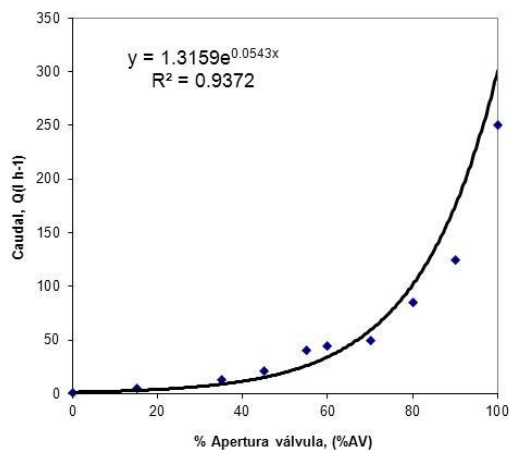


Figura 29. Gráfica de correlación entre el % Apertura de válvula (%AV) y el caudal de paso (Q).

### **Controlador tipo 2:**

Para el controlador fuzzy tipo 2, el convertidor de la salida de un valor de voltaje a caudal  $f(u)$  es la ecuación polinómica que relaciona el voltaje aplicado a la válvula con el caudal, definida en la Figura 13.

### **Controlador tipo 3:**

Finalmente, para el controlador tipo 3, y dado que en éste la salida es el caudal, va directamente a la función de transferencia de la válvula.

Bajo estas consideraciones se analiza el comportamiento de los tres controladores borrosos sobre la válvula, ante consignas de caudal de tipo salto, simulando niveles diferentes de humedad de la masa de aceituna ( $H_{RDCH}$ ).

Por ejemplo, para una consigna de humedad deseada de la masa a la entrada del DCH de  $H_C = 52\%$ , y un caudal de alimentación, también fijo, de  $Q_o = 1000 \text{ kg h}^{-1}$ ; sometiénolo a una secuencia de escalones positivos y negativos de distinta intensidad, se ha correspondido con niveles de humedad entrantes de:  $H_{RDCH} = 55\%, 43\%, 48\%, 40.5\%$  y  $51\%$ .

Los resultados de estas simulaciones se muestran en las diversas gráficas de la Figura 30. En ellas se puede observar que el controlador que mejor responde a los cambios de consigna de caudal es el tipo 3, de salida directa a caudal. El controlador con salida a apertura de válvula presenta fuertes oscilaciones a caudales por encima de los  $100 \text{ L h}^{-1}$ ; mientras que el regulador con salida a voltaje sigue presentando oscilaciones, aunque ligeramente menores que en el caso del controlador anterior.

Con objeto de intentar mejorar el comportamiento de estos controladores se han probado otras configuraciones y formas de las funciones de pertenencia de la variable salida.

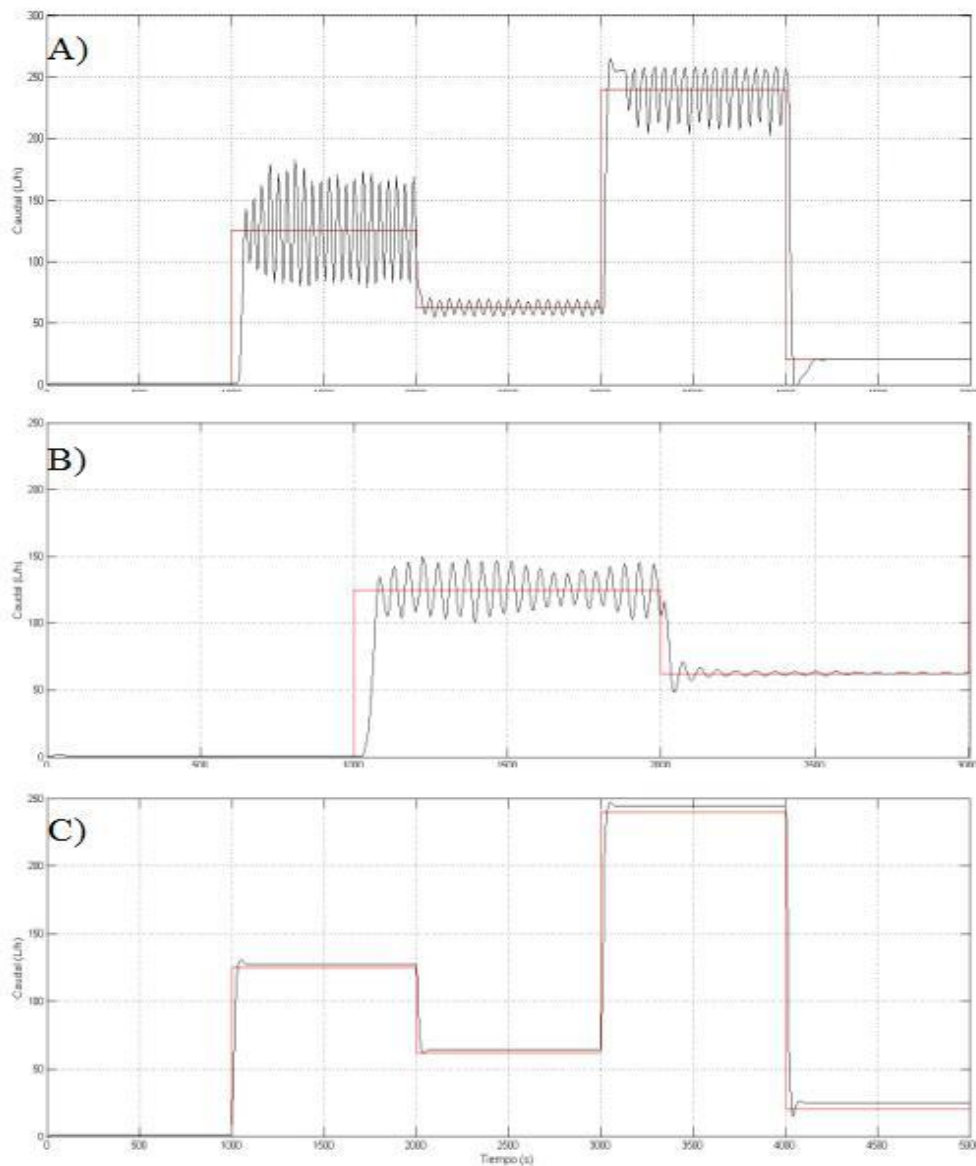


Figura 30. Simulación de los tres controladores fuzzy: a) salida apertura de válvula; b) salida a voltaje aplicado al actuador de la válvula; c) con salida directa a caudal.

Para el controlador tipo 1 se aumentó el número de conjuntos borrosos para los niveles medio-bajos, lo que produce un incremento del ruido en las zonas medio-altas de caudal (Figura 31A); mientras que una disminución del número de etiquetas acompañada de un aumento del rango en el que empieza a intervenir la apertura/cierre total permite obtener unas gráficas más ajustadas con el comportamiento deseado (Figura 31B), presentando, no obstante, un cierto error estacionario cuando se satura la señal de control.

Un ajuste más fino de la ecuación exponencial de la Figura 29 puede

ayudar a ajustar mejor la respuesta en esta zona. También se observa un rizado en los cambios de más a menos caudal que es tanto mayor cuanto más amplia es la diferencia de caudales.

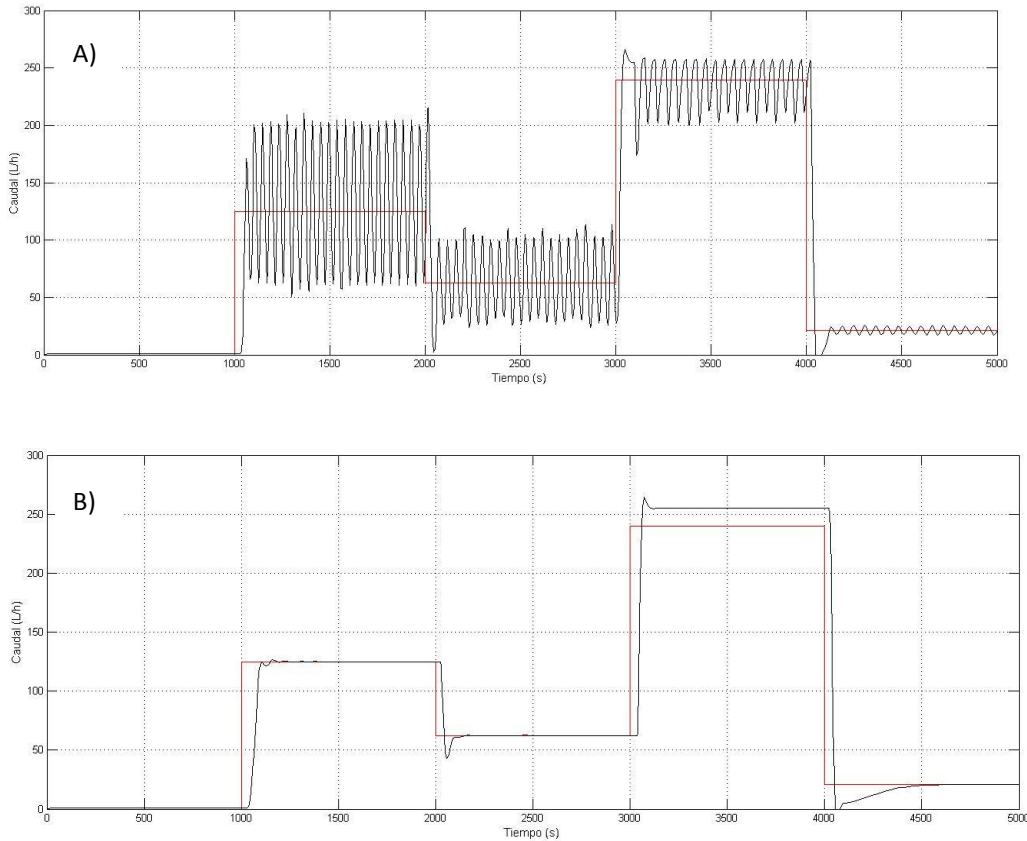


Figura 31. Respuesta del sistema cuando el controlador tipo 1 se sintoniza ensanchando o estrechando las funciones de pertenencia.

Para el controlador fuzzy tipo 2, con el voltaje como salida, el mejor resultado se ha encontrado cuando se ha introducido un bloque de ganancia a la salida. Esta ganancia equivale a cambiar los rangos (no las formas) de las funciones de pertenencia; así, para una ganancia de 0.140 (Figura 32A), presenta el mismo efecto que si las funciones de pertenencia se ensancharan un 12%. En estas condiciones se observa que el ajuste es mejor cuando el cambio se produce desde un caudal ya circulante; cuando parte de caudal cero aparece un cierto retraso hasta alcanzar la referencia, pero no se produce sobre-elongación. Con una sintonía cualitativa de las funciones de pertenencia se consigue la respuesta de la Figura 32B.

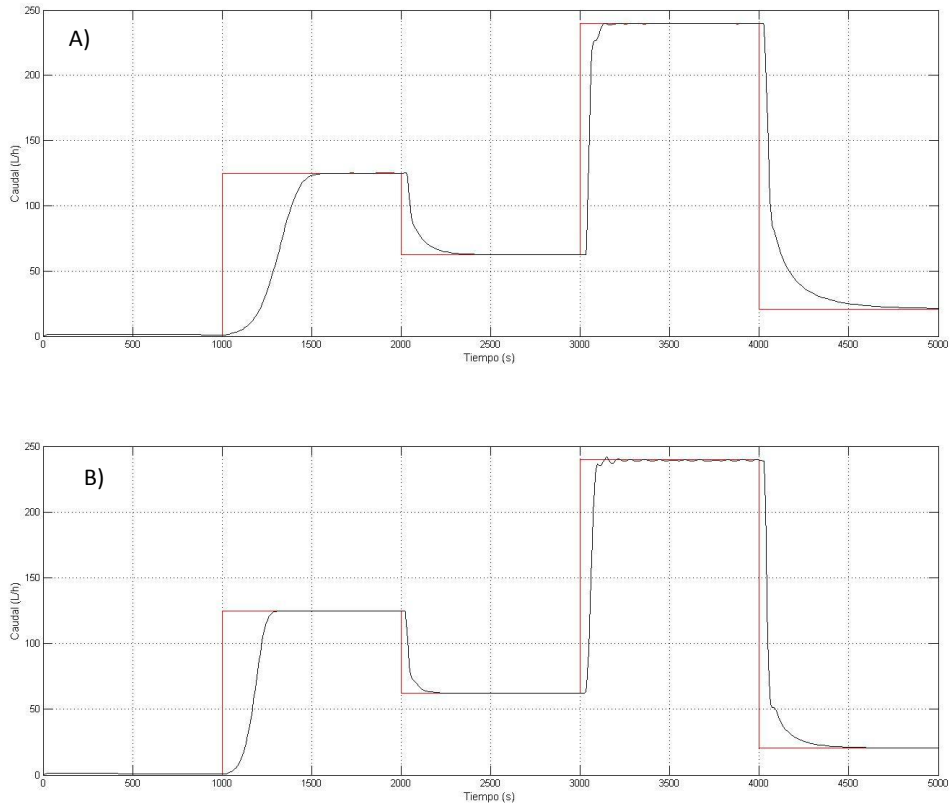


Figura 32. Respuesta del sistema con el controlador fuzzy tipo 2 cuando se sintoniza la ganancia de la salida.

De igual forma, para el controlador borroso tipo 3, con salida a caudal, también se ha aplicado un ajuste fino con la incorporación de un bloque de ganancia a la salida, el cual permite reducir la pequeña sobre-oscilación al inicio del cambio de referencia y una mejor respuesta (Figura 33A vs 33B).

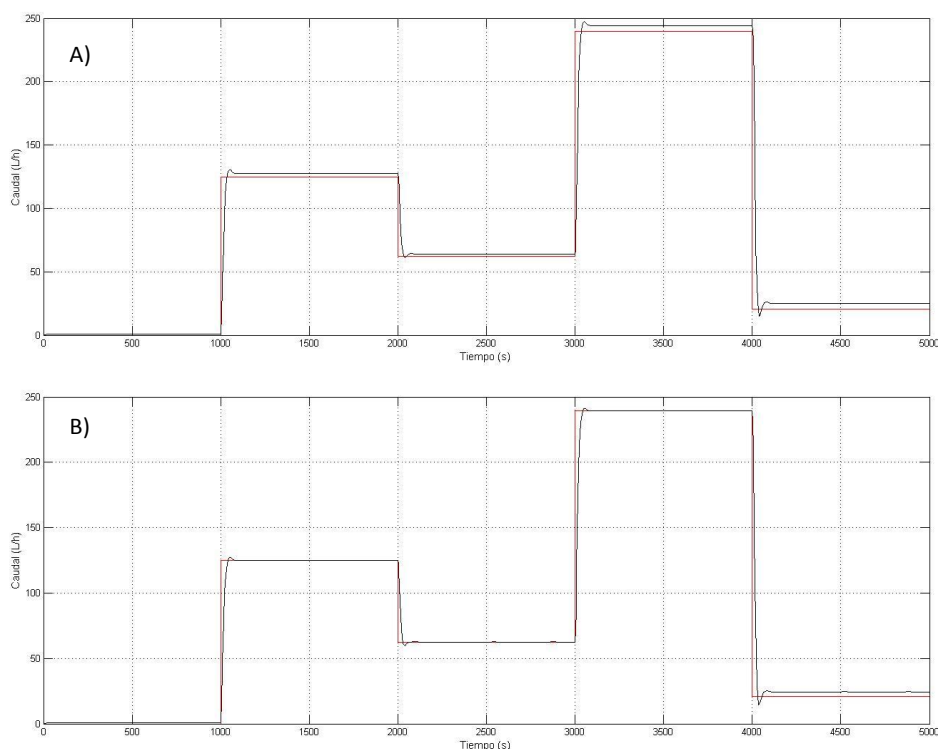


Figura 33. Respuesta del sistema con el controlador borroso tipo 3 sintonizando sus parámetros.

El comportamiento de estos controladores inteligentes es comparado con el de un controlador PID. Los parámetros de sintonía estimados del PID son:  $K_P = 1$ ,  $K_I = 0.05$  y  $K_D = 1$ .

Se ha sometido al sistema una serie de escalones positivos y negativos correspondientes a una secuencia de cambios de consigna de caudal de  $0 \text{ Lh}^{-1}$ ,  $120 \text{ Lh}^{-1}$ ,  $65 \text{ Lh}^{-1}$ ,  $235 \text{ Lh}^{-1}$  y  $20 \text{ Lh}^{-1}$ , cada 1000 segundos, manteniendo el resto de las variables constantes como en otros ensayos anteriores. Los resultados se pueden observar en los diferentes gráficos de la Figura 34.

De nuevo el controlador borroso tipo 3 es el que presenta mejor respuesta, mejorando la del PID ya que alcanza la consigna en algo menos de tiempo. Los otros dos controladores fuzzy no presentan buen comportamiento para todos los cambios de referencia, en algún caso con retardos significativos.

Estos resultados, aunque a nivel de simulación, muestran una acción de los controladores fuzzy muy satisfactoria, ya que en general mejoran la rapidez y estabilidad de la respuesta respecto a controladores tipo PID.

No obstante, la robustez del comportamiento de estos sistemas de control fuzzy sólo puede validarse en situaciones reales, incorporándolos al circuito de control del agua de adición al DCH de la línea de proceso de la fábrica, y viendo cómo se comportan antes las entradas reales de los sensores y a los ruidos que se generan.

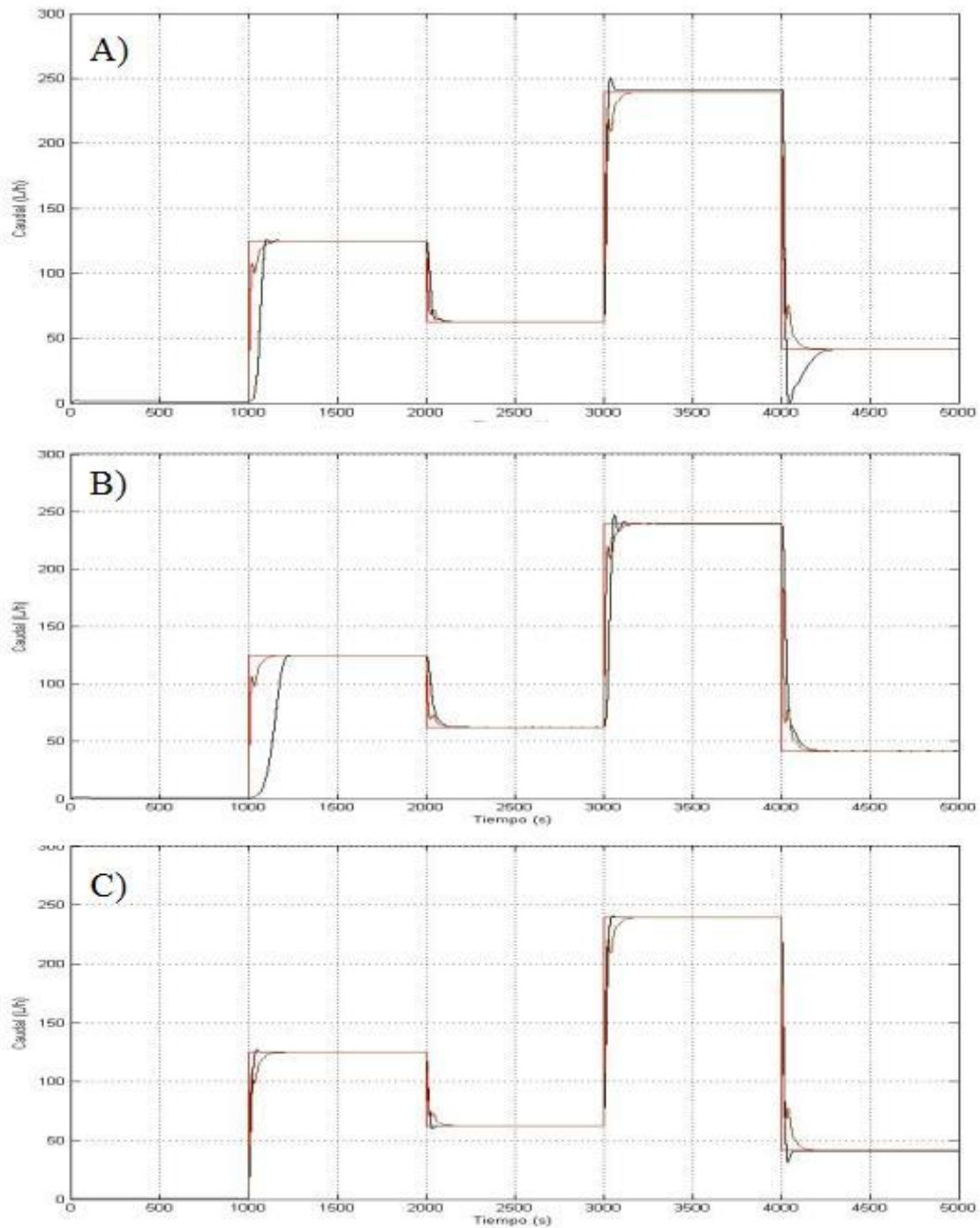


Figura 34. Gráficas comparativas de la respuesta del sistema con el controlador fuzzy (negro) vs PID (marrón) para: A) controlador tipo 1; B) controlador tipo 2; C) controlador tipo 3.

## 4.2. Aplicación del controlador fuzzy a la planta real

En el proceso real se utiliza una válvula de desplazamiento proporcional dotada de un actuador eléctrico de la marca 'Samson', modelo 5824-10, cuyo comportamiento se ha analizado para extraer la función de transferencia; y un caudalímetro de la marca 'Krohne', modelo IFC10.

El actuador de la válvula permite ser manejado mediante aplicación de un voltaje externo dentro del rango 0 – 10 v; mientras que el caudalímetro-sensor permite dar la información de caudal a través de una salida del tipo 0- 4 mA. Las características técnicas de ambos elementos se aportan en los Anexos I y II, respectivamente.

El controlador fuzzy tipo 3 ha sido seleccionado para ser utilizado en la planta, ya que es el que mejor resultados ha dado en simulación. Se ha probado en el circuito real de la Figura 35. Para ello se hace uso de un dispositivo de adquisición de datos analógico, el DAQ NI USB-6211 de 'National Instruments', que dispone de varias entradas y salidas analógicas de  $\pm 10\text{v}$ , conectándose al ordenador mediante USB (Anexo III).

Se compara el comportamiento del controlador fuzzy y del controlador PID del sistema de automatización instalado en la planta, ante un mismo salto de consigna.



Figura 35. Circuito de adición de agua a la masa de aceituna a salida de la termobatidora

donde se aplica el controlador borroso

El diseño del sistema completo en Simulink se muestra en la Figura 36, donde se utilizan los bloques de lectura-escritura de datos que incorpora para el equipo la placa NiDAQ6021. Este equipo se une físicamente mediante cableado al sensor de caudal y a la válvula empleando la entrada analógica 'Analog Input-Caudalímetro' de  $\pm 10\text{v}$  y la salida analógica 'Analog Output-Valvula' de  $\pm 10\text{v}$ , respectivamente.

La salida del controlador fuzzy es en caudal, por lo que hay que incorporar un convertidor de Caudal a Voltaje 'Convertidor Q a V,' para transformar la salida en el voltaje a aplicar directamente sobre el actuador de la válvula. Igualmente, el caudalímetro genera una señal analógica en voltios, por lo que se precisa introducir otro convertidor, en éste caso de voltaje a caudal, 'Convertidor V a Q', para generar el dato en tiempo real del caudal de agua que pasa por la válvula. Ambas ecuaciones de conversión se obtienen a partir de los datos experimentales obtenidos en los ensayos anteriores.

La velocidad de muestreo de la señal se optimizó finalmente en 1 scan/segundo, a fin de obtener una señal con el menor ruido posible en la lectura del caudalímetro.

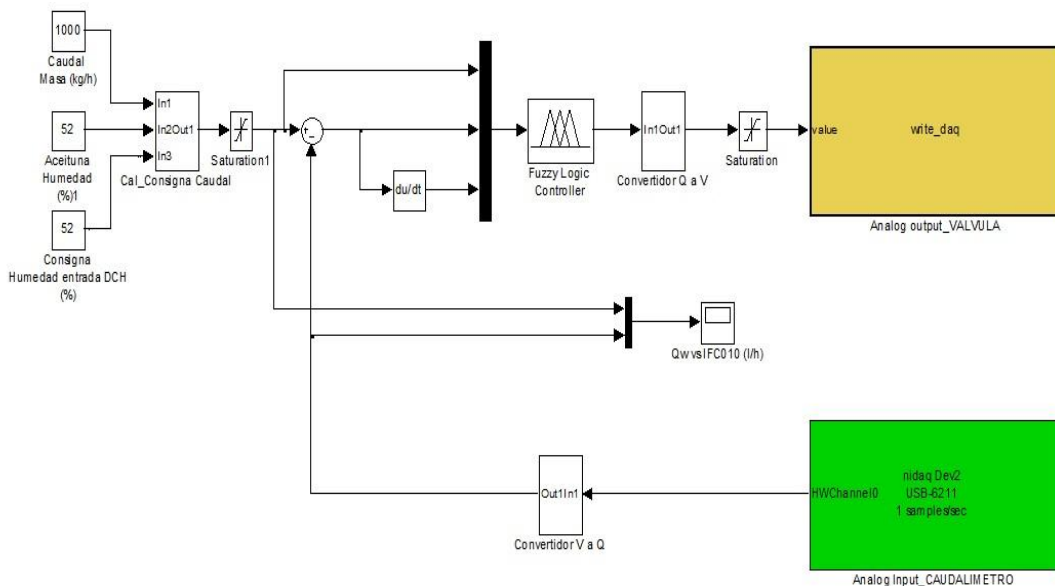


Figura 36. Diagrama Simulink para el control en tiempo real del circuito de adición de agua, empleando el controlador borroso y el sistema de adquisición de datos.

Bajo estas condiciones, se analiza el comportamiento del sistema de control borroso para varios saltos correspondientes a cambios de caudal del agua de adición desde 0 Lh<sup>-1</sup> a 75 y 125 Lh<sup>-1</sup>. Estos cambios corresponderían a un cambio hipotético de la 'Humedad de la Aceituna' de entrada desde 52% al 48.5 y 46.0 %, respectivamente, y para unas condiciones de proceso de 1000 kgh<sup>-1</sup> de caudal de masa de aceituna, y una consigna de humedad de entrada al DCH del 52.0%.

En la Figura 37 se muestra la gráfica de la respuesta del sistema al aplicar un escalón correspondiente a 75 Lh<sup>-1</sup> durante un tiempo total de 5 minutos. Se aprecia como el controlador borroso consigue alcanzar la consigna en poco menos de 50 segundos, manteniendo, a lo largo del tiempo en que transcurre el ensayo, una estabilidad del caudal en torno a la consigna de  $\pm 5$  Lh<sup>-1</sup>. Inicialmente, como se observa, hay una ligera sobre-oscilación que se amortigua rápidamente, no pasando de un incremento de +10 Lh<sup>-1</sup> respecto de la consigna, lo que es asumible teniendo en cuenta que el caudalímetro presenta un error del 5% de la lectura.

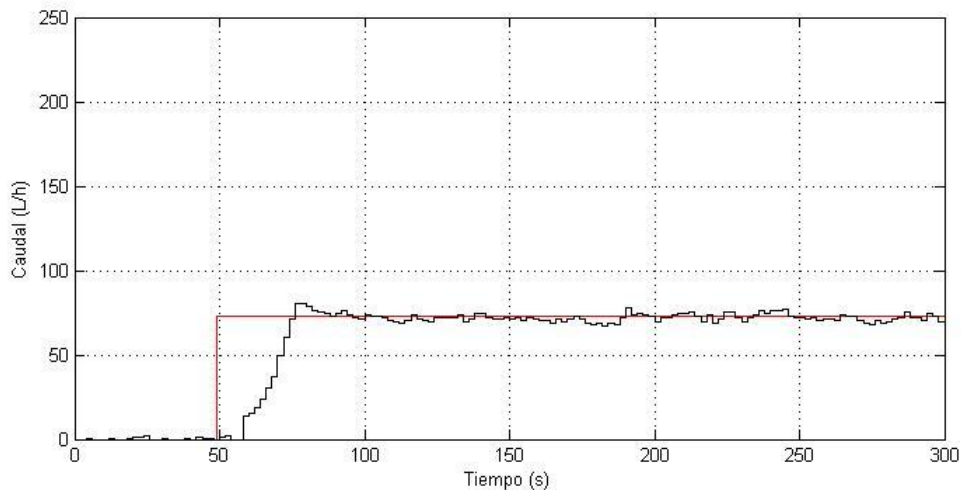


Figura 37. Respuesta del sistema con el controlador fuzzy ante un cambio de consigna de 0 a 75 Lh<sup>-1</sup>.

Con una secuencia de saltos de 0-75 Lh<sup>-1</sup>, se puede observar en la Figura 38 como el cierre de la válvula también se efectúa muy rápidamente, en menos de 50 segundos.

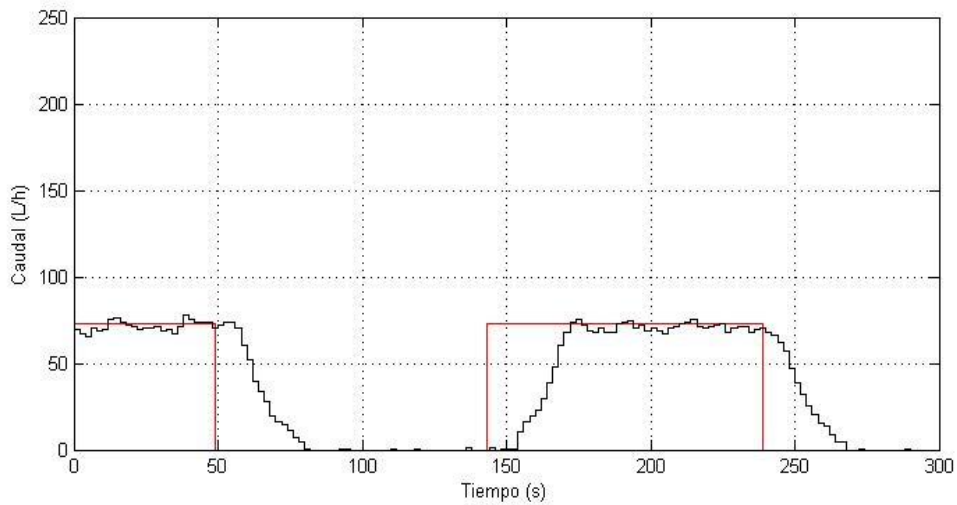


Figura 38. Respuesta del sistema con el controlador borros ante cambios de consigna de 0 a 75 Lh<sup>-1</sup>.

Para saltos entre 0 y 125 Lh<sup>-1</sup> respuesta del sistema con el controlador borroso queda reflejada en las Figuras 39a y 39b. Se aprecia nuevamente como el sistema alcanza la consigna rápidamente. Tras una sobre-oscilación inicial de 15 Lh<sup>-1</sup>, el sistema oscila ligeramente en torno a la referencia, con alguna pequeña perturbación. La observación 'in situ' de esta circunstancia ha permitido explicar éste comportamiento como un intento del controlador fuzzy de ajustar al caudal frente a una ligera inestabilidad en la presión del agua suministrada al circuito por el calderín del aljibe de la Almazara. En el ciclo de apertura-cierre (Figura 39b), se vuelve a observar un cerrado rápido de la válvula desde valores altos de caudal, menos de 50 segundos.

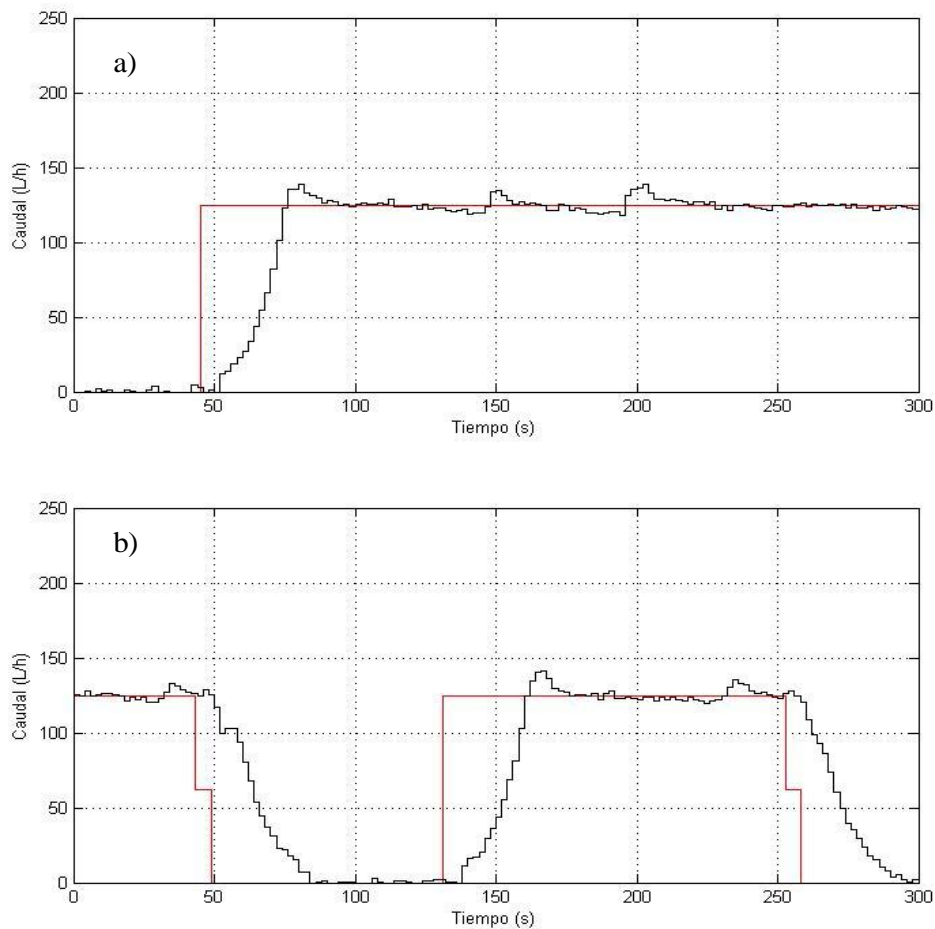


Figura 39. Respuesta del sistema con control fuzzy frente: a) un cambio de consigna de 0 a 125  $Lh^{-1}$ ; b) ciclos de cambio de consigna entre 0 y 125  $Lh^{-1}$ .

Para validar este comportamiento se compara con el proporcionado por el controlador clásico PID con el que trabaja el sistema SCADA instalado en la fábrica aplicado al mismo circuito de adición de agua. Dado que este sistema SCADA es cerrado, no nos ha permitido incorporar y superponer al PID la respuesta del controlador fuzzy, por lo que los ensayos con el SCADA se presentan en el formato original de éste, mientras que los obtenidos con el sistema fuzzy se presentan a partir del formato salvado con 'Simulink'.

En las Figuras 40 y 41 se presenta la comparación gráfica, llevadas a la misma escala, del controlador PID (arriba) y el del fuzzy (abajo), para cambios de consigna de 0 a 75  $Lh^{-1}$  (Figura 40) y de 0 a 125  $Lh^{-1}$  (Figura 41). En el PID, consigna en azul, caudal real en rojo, apertura válvula en negro. En el fuzzy, consigna en rojo y caudal real en negro.

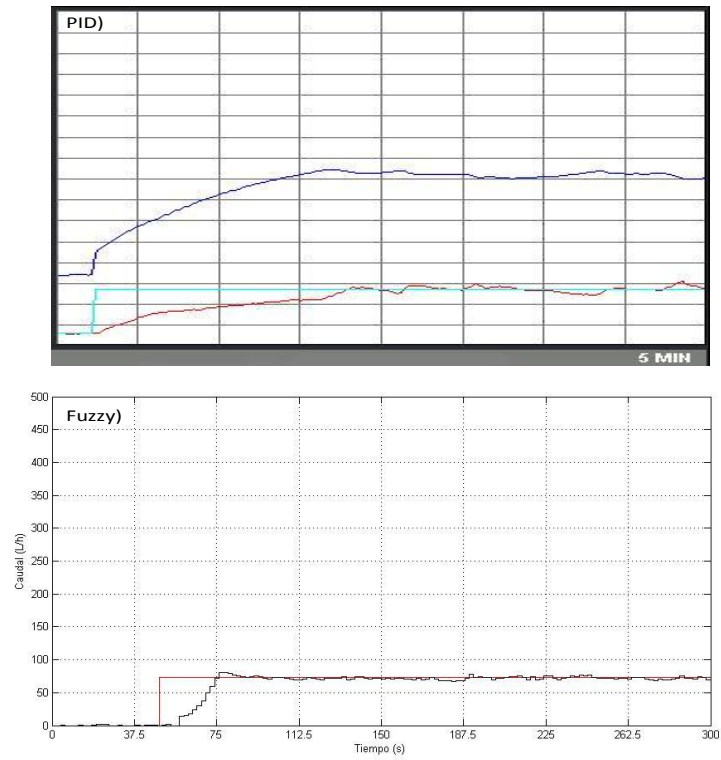


Figura 40. Comportamiento del sistema con el controlador PID y el control fuzzy para cambio de consigna de 0 a  $75 \text{ Lh}^{-1}$ .

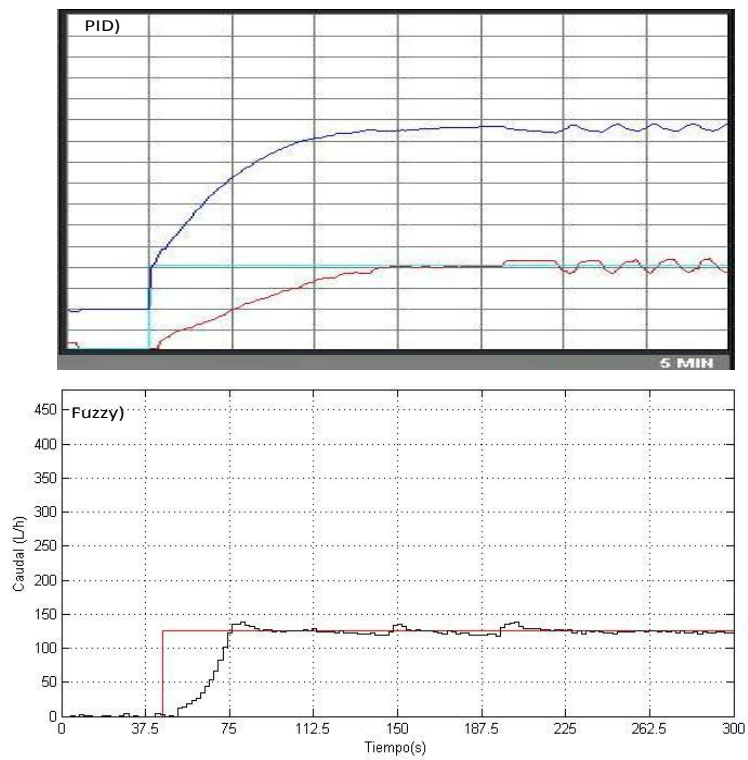


Figura 41. Comportamiento del sistema con el controlador PID y el control fuzzy para cambio de consigna de 0 a  $125 \text{ Lh}^{-1}$ .

Los ensayos se han llevado a cabo de forma secuencial, primero control SCADA, seguidamente control fuzzy, y empezando por el escalón de 75 Lh<sup>-1</sup>.

Tal y como se aprecia en las Figuras anteriores, en ambas situaciones, el controlador fuzzy permite alcanzar la consigna establecida en, aproximadamente, un minuto menos que el controlador PID del SCADA.

En el caso del salto de 75 Lh<sup>-1</sup> se observa como el fuzzy presenta un mejor ajuste a la consigna, mientras que en el PID se hacen perceptibles los esfuerzos del controlador por mantener la consigna.

Para el caso de los 125 Lh<sup>-1</sup>, se detecta una mejor capacidad del fuzzy para absorber las oscilaciones producidas por la inestabilidad de la presión de agua del circuito, inestabilidad que se traduce en el controlador PID en las oscilaciones periódicas que presenta la línea indicadora del caudal real.

En general, no solo hay una actuación más rápida, sino que además, los mecanismos del actuador de la válvula están más tiempo parados, lo que permitirá alargar la vida mecánica de estos.



# Capítulo 5

## Conclusiones y Trabajos Futuros

Los resultados obtenidos en este trabajo muestran que la lógica difusa es una técnica eficiente como alternativa a los tradicionales sistemas de control en la industria de la elaboración del aceite de oliva virgen.

El sistema de control borroso, tanto a nivel de simulación como en el sistema real, ha mostrado una capacidad de control muy satisfactoria, presentando una mejora en la estabilidad y rapidez de la respuesta respecto a controladores tipo PID para el proceso de adicción de agua al decanter.

La implantación en fábrica del controlador fuzzy ha sido inmediata, y no ha requerido de modificaciones para ajustar la respuesta real, lo que ha permitido evidenciar la robustez de éste al enfrentarse a los 'input' reales de los sensores, de los ruidos que se generan en las señales, y de otras incertidumbres que pueden aparecer durante el control.

Estos sistemas de control borroso pueden jugar, pues, un papel importante en el control de este tipo de procesos industriales,

Como trabajos futuros se plantea, por un lado, estudiar la viabilidad de la aplicación de este tipo de control inteligente en otras partes del proceso: control de masa, control de la temperatura del agua, control de la relación agua-aceite en las centrifugas verticales, control de purgado en aclaradores, etc.

También se podrían incorporar más entradas al sistema, para hacerlo multivariable. En concreto, se podría añadir la presión ya que se ha visto que afecta al comportamiento del sistema.

También se puede estudiar cómo optimizar algunos parámetros de configuración del proceso mediante el empleo de otras técnicas de la inteligencia artificial, como las Redes Neuronales o los algoritmos genéticos.

# Bibliografía

Acedo Sánchez, J. (2006). Instrumentación y Control Avanzado de Procesos. Cap. 13, Características de las válvula automáticas. Ed. Díaz de Santos. Madrid.

Adroer, M.; Alsina, A.; Aumantell, J.; Poch, M. (1999). Wastewater Neutralization Control Based on Fuzzy Logic: Experimental Results. Industrial & Engineering Chemistry Research 38(7), pp.2709-2719.

Alex, J.; Jumar, U.; Tschepetzki, R. (1994). A Fuzzy Controller for Activated Sludge Waste Water Plants. Annual Review in Automatic Programming 19, pp-61-66.

Altas, I.H.; Sharaf, A.M. (2007). A Generalized Direct Approach for Dessining Fuzzy Logic Controllers in Matlab/Simulink GUI Enviroment. International Journal Of Information Technology and Intelligent Computing. 4(1).

Avilés Cortez, J.C. El control difuso de temperatura de una incubadora. XXII Jornadas de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/9942/1/EL%20CONTROL%20DIFUSO%20DE%20TEMPERATURA%20DE%20UNA%20INCUBADORA.pdf>

Burgos-Artizzu, X.P.; Ribeiro, A.; de Santos, M. (2007). Controlador Borroso Multivariable para el Ajuste de Tratamientos en Agricultura de Precisión. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial 4(2), pp.64-71.

Carrillo, D.A.; Vázquez, J.L.; Beltrán, A.; Reyes, C.; González, M.E. (2008). Control del clima de un invernadero. Investigación Científica 4(2), tomo 2.

Castro-Montoya, A.J.; Vera-Monterrosas, F.; Quintana-Silva, J.A. (2004). Control Difuso de Flujo de Fluidos en una Estación de Laboratorio. Información tecnológica 15(3), pp.45-52.

Delgado Díaz, I.; Lobatón Orta, M.; Pulido Calvo, I. Modelo de Control Borroso para la Regulación de la Temperatura del Agua en Piscinas Climatizadas. Trabajo fin de carrera (2009). Escuela Técnica Superior de Ingeniería. Universidad de Huelva. España.

Dormido S.; Santos M.; de Madrid A.P.; Morilla F. Autosintonía de controladores borrosos utilizando técnicas clásicas basadas en reguladores PID. Proc. III FLAT, España, pp.217-225. 1993.

Estaben, M.; Polit, M.; Steyer, J.P. (1997). Fuzzy Control for an Anaerobic Digester. Control Engineering Practice 5(9), pp.1303-1310.

Fernández de Alba, J.M.; Garmendia, L. Sistema de Control de Flujo y Temperatura de un Grifo con varias Lógicas Borrosas. Jornadas Internacionales de Didáctica de las Matemáticas en Ingeniería. Universidad Politécnica de Madrid. 15-16 Junio 2009. Madrid.

Flavio Torres, V.; Carlos Muñoz, P.; Iván Velásquez, B.; Carolina Shene, V. (2003). Control Difuso para una Planta Piloto de Secado por Lecho Fluidificado. Revista Facultad de Ingeniería U.T.A. (Chile) 1, pp. 49-53.

Fuente, M.J.; Robles, C.; Casado, O.; Tadeo, F. Fuzzy Control of a Neutralization Process. Proceeding of the 2002 IEEE International Conference on Control Application. 2002 September 18-20. Glasgow, Scotland, U.K

Furferi, R.; Carfagni, M.; Daou, M. (2007). Artificial Neural Network for real-time estimation of olive oil qualitative parameters during continuous extraction. Computers and Electronics in Agriculture, 55, pp.115-131.

Guzmán, D.; Castaño, V.M. (2006). La Lógica Difusa en Ingeniería: Principios, Aplicaciones y Futuro. Ciencia y Tecnología 24(2), pp.87-107.

Hermoso, M.; González, J.; Uceda, M.; García-Ortiz, A.; Morales, J.; Frías, L.; Fernández, A. Virgin olive oil of quality. Elaboration by two-phases process., 61/98. Consejería de Agricultura y Pesca. Junta de Andalucía. Sevilla. España. 1998.

Jantzen, J. Design of Fuzzy Controllers.  
<http://faculty.petra.ac.id/resmana/private/fuzzy/desing.pdf>.

Jiménez, A.; Beltrán G.; Aguilera M.P.; Uceda M. (2008). Automatización y Control del proceso de elaboración del Aceite de Oliva Virgen (II). Mercacei 57. pp217-221.

Jiménez, A.; Beltrán, G.; Aguilera, M.P.; Uceda, M. (2008). A sensor-software based on artificial neural network for the optimization of the olive oil elaboration process. Sensor & Actuator B, 129, pp. 985-990.

Jiménez, A.; Aguilera MP.; Uceda M.; Beltrán G. (2009). Neural network as tool for virgin olive oil elaboration process optimization. Journal of Food Engineering, Vol. 95(1), pp. 135-141.

Jiménez, A.; Beltrán, G.; Aguilera, M.P.; (2013). Herramientas de 'Inteligencia Artificial' en la optimización del proceso de elaboración del aceite de oliva virgen en almazaras. Mercacei (en prensa).

Kemper Valverde, N.; Kemper Castro, H. Controlador Difuso para un Horno Eléctrico Resistivo. Congreso Nacional de Instrumentación SOMI XV. 16-20 Octubre 2000. Guadalajara, Jal. México.

Mata-García, M.G.; Garmendia, L.; González, F.; Tortajada, E. (2009). Sistema de Riego Inteligente con Control Borroso.

[http://eprints.ucm.es/9119/1/Sistema de Riego Inteligente Borroso.pdf](http://eprints.ucm.es/9119/1/Sistema_de_Riego_Inteligente_Borroso.pdf)

Ramírez Mendoza, M.; Aguilera Martínez, J.A.; González Valdez, M. (2011). Sistemas de Control Borroso para Tanques de Drenaje. Revista de Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones 32(3), pp.82-93.

Roger Jang, J.S.; Culley, N. (2000). Matlab. Fuzzy Logic Toolbox. User`s Guide, versión 2.

Santos, M. (2011). Aplicaciones Exitosas de Control Inteligente a Casos Reales. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial 4, pp.1-8.

Stenz, R. (1995). Automation of a Batch Distillation Column using Fuzzy and Conventional Control. IEEE Transaction on Control System Technology 3(2), pp.171-176.

Uceda, M.; Jiménez, A.; Beltrán, G. Olive oil extraction and quality. Grasas y Aceites 57(2006) 25-31.



## Listado de abreviaturas y siglas que aparecen en el texto.

Abreviatura/Sigla	Descripción
AOVE	Aceite de Oliva Virgen
SCADA	Sistema de Control y Adquisición de Datos
CV	Centrifuga Vertical
MTN	Micro Talco Natural
PID	Controlador Proporcional, Integral y Derivativo
FT	Transmisor de Flujo
FC	Controlador de Flujo
MT	Transmisor de Humedad
L	Litros
H	Hora
%	Tanto por ciento masa/masa
SISO	Simple Entrada, Simple Salida
U(t)	Salida del controlador
Kg	Kilogramo
$\Delta Q$	Incremento de Caudal
$\int$	Integración



## Listado de figuras

Figura		Página
1	Diagrama esquemático de las diferentes etapas que constituyen el proceso de elaboración del aceite de oliva virgen.	..... 6
2	Diagrama esquemático del proceso de elaboración del aceite de oliva virgen en '2-fases'.	..... 9
3	Dos circuitos reales de adición de agua al separador centrífugo horizontal	..... 10
4	Esquemas actuales de adición de agua al DCH. A) Manual; B) Automatizada con control PID y consigna de agua manual; y C) Automatizada con control PID y consigna de agua controlada por medidor de humedad a la entrada del DCH..	..... 13
5	Conjunto difuso.	..... 14
6	Esquema genérico de un sistema Fuzzy.	..... 15
7	Diferentes esquemas de configuración de trabajo de un sistema de control Fuzzy. a) Control directo; b) Control Feedforward; y c) Control adaptativo.	..... 17
8	Pantalla inicial de la toolbox 'fuzzy' del programa Matlab.	..... 18
9	Bloques constituyentes del sistema de control.	..... 22
10	Bloque de cálculo de la consigna de caudal: $ln1 = Q_0$ (kg h <sup>-1</sup> ), $ln2 = H_R$ (%), $ln3 = H_{CDCH}$ (%) y $Out1 = X$ (kg h <sup>-1</sup> ).	..... 24
11	Curvas características del comportamiento de válvulas de control.	..... 26
12	Correlación Voltaje aplicado a válvula vs Caudal real medido.	..... 27
13	Función de transferencia de la válvula de control.	..... 27
14	Respuesta del conjunto 'actuador-válvula' ante una consigna escalón de 5,5v.	..... 28
15	Respuesta del modelo de primer orden (azul), ante un cambio de consigna (rojo) de 0 a 5,5v A) y 6v B). Caudal (negro) obtenido de la señal del caudalímetro IFC010.	..... 29
16	Respuesta del modelo de segundo orden (azul), ante un cambio de consigna (rojo) de 0 a 5,5v A) y 6v B). Caudal (negro) obtenido de la señal del caudalímetro IFC010.	..... 31
17	Montaje para la simulación en Simulink del conjunto 'actuador-válvula' empleado.	..... 31
18	Esquema genérico de un controlador fuzzy-PID. $G_e$ , ganancia del error; $G_r$ , ganancia del cambio de error; $G_a$ , ganancia de la aceleración (segunda derivada). $G_u$ , ganancia de la acción de control.	..... 32

19	Control de adición de agua automatizada y con consigna de agua controlada por la humedad de la masa de aceituna a la entrada de la batidora.	33
20	Configuración del sistema en lazo cerrado con el sistema fuzzy para el control del caudal.	34
21	Funciones de pertenencia de las variables de entrada. A) Variable error. B) Variable derivada del error.	35
22	Funciones de pertenencia de la variable de salida "apertura de la válvula"	36
23	Superficie de control del sistema borroso.	38
24	Funciones de pertenencia de la variable de salida "voltaje"	39
25	Configuración del controlador 3, en lazo cerrado.	40
26	Funciones de membresía de los conjuntos A) $Q_{DCH}$ ; B) $e_Q(t)$ , C) $\frac{dQ(t)}{dt}$ ; D) $Q_{R_{DCH}}$ .	40
27	Análisis de las posibles acciones del controlador en función de las entradas	42
28	Esquema Simulink para control difuso en lazo cerrado del conjunto 'actuador-válvula', para modelos de dos entradas.	44
29	Gráfica de correlación entre el % Apertura de válvula (%AV) y el caudal de paso (Q).	44
30	Simulación de los tres controladores fuzzy: a) salida apertura de válvula; b) salida a voltaje aplicado al actuador de la válvula; c) con salida directa a caudal.	46
31	Respuesta del sistema cuando el controlador tipo 1 se sintoniza ensanchando o estrechando las funciones de pertenencia.	47
32	Respuesta del sistema con el controlador fuzzy tipo 2 cuando se sintoniza la ganancia de la salida.	48
33	Respuesta del sistema con el controlador borroso tipo 3 sintonizando sus parámetros.	49
34	Gráficas comparativas de la respuesta del sistema con el controlador fuzzy (negro) vs PID (marrón) para: A) controlador tipo 1; B) controlador tipo 2; C) controlador tipo 3.	50
35	Circuito de adición de agua a la masa de aceituna a salida de la termobatidora donde se aplica el controlador borroso	51
36	Diagrama Simulink para el control en tiempo real del circuito de adición de agua, empleando el controlador borroso y el sistema de adquisición de datos por USB 'NIDAQ USB 6211'.	52
37	Respuesta del sistema con el controlador fuzzy ante un cambio de consigna de 0 a $75 \text{ Lh}^{-1}$ .	53
38	Respuesta del sistema con el controlador borros ante cambios de consigna de 0 a $75 \text{ Lh}^{-1}$ .	54
39	Comportamiento del sistema de control Fuzzy frente: a) un cambio de consigna desde 0 a $125 \text{ Lh}^{-1}$ ; b) ciclos de cambio de consigna entre 0 y $125 \text{ Lh}^{-1}$ .	55

40	Comportamiento del sistema de control fuzzy frente al PID del SCADA para el cambio de consigna de $75 \text{ Lh}^{-1}$ . PID) consigna (azul), caudal real (rojo), apertura válvula (negro). Fuzzy) consigna (rojo), caudal real (negro).	.....	56
41	Comportamiento del sistema de control fuzzy frente al PID del SCADA para el cambio de consigna de $125 \text{ Lh}^{-1}$ . Código de colores igual que en Figura 41.	.....	56



## Listado de tablas

Tabla		Página
1	Principales variables que influyen en el control del proceso de elaboración del aceite de oliva virgen.	..... 7
2	Rangos y términos lingüísticos adoptados para el error y variación del error.	..... 25
3	Controladores borrosos propuestos.	..... 33
4	Matriz de asociación fuzzy con las reglas del controlador	..... 37



## Anexo I. Características Actuador de válvula.

### Settings of the digital positioner

The digital controller settings can be changed in the TROVIS-VIEW Configuration and Operator Interface.

Configuration	Default setting	Setting range
<b>Input variable</b>		
Lower range value	0 V 0 mA	0 to 7.5 V 0 to 15 mA
Upper range value	10 V 20 mA	2.5 to 10 V 5 to 20 mA
Unit	V	V/mA
<b>Position feedback signal</b>		
Lower range value	0.0 V	0.0 to 10.0 V
Upper range value	10.0 V	0.0 to 10.0 V
<b>Reference variable</b>		
Detect input variable failure	No	Yes/No
Reference value upon input variable failure	Internal	Internal/Last travel value
Internal reference variable	0.0 %	0.0 to 100.0 %
Priority position	No	Yes/No
Priority position when stem	Extended	Extended/Retracted
Final position guiding: actuator stem extends	1.0 %	0.0 to 49.9 %
Final position guiding: actuator stem retracts	97.0 %	50.0 to 100.0 %
<b>Functions</b>		
Blocking protection of valve	No	Yes/No
<b>Valve travel</b>		
Travel	100.0 %	30.0 to 130.0 %
Travel adjustment	Absolute	Absolute/Relative
Speed of stem movement	Standard	Slow/Normal/Fast
Dead band (switching range)	2.0 %	0.5 to 5.0 %
Characteristic	Linear	Linear/Equal percentage/ Reverse equal percentage/ User defined

### Installation

Prior to mounting the actuator on the valve, retract the actuator stem. In order to retract the actuator stem of Type 5825 with fail-safe action "Actuator stem extends", remove the cover and turn the actuating shaft counterclockwise using a 4 mm Allen key to retract the actuator stem. Hold the actuator stem in this position, while tightening the coupling nut.

### Electrical connection

The diagram on page 6 of this data sheet shows the actuator's electrical connections.

### Ordering text

Electric Actuator Type 5824-.../5825-...

- Three-point stepping version  
Power supply:  
230 V, 50 Hz  
230 V, 60 Hz (special version)  
24 V, 50 Hz  
120 V, 60 Hz  
with/without limit contacts  
with/without resistance transmitter
- Version with digital positioner  
Power supply:  
24 V, 50/60 Hz and DC  
85 to 264 V, 50 and 60 Hz  
Limit contacts: with/without <sup>1)</sup>  
Priority circuit: with/without <sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Only with 24 V DC/AC power supply

<sup>2)</sup> Only with version with limit contacts



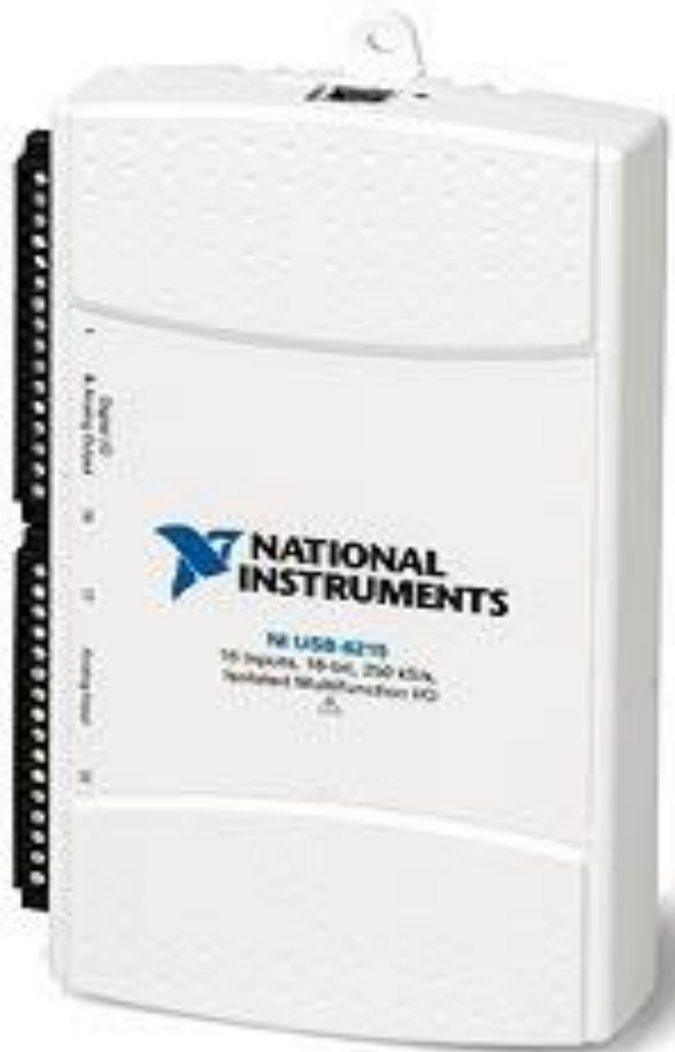
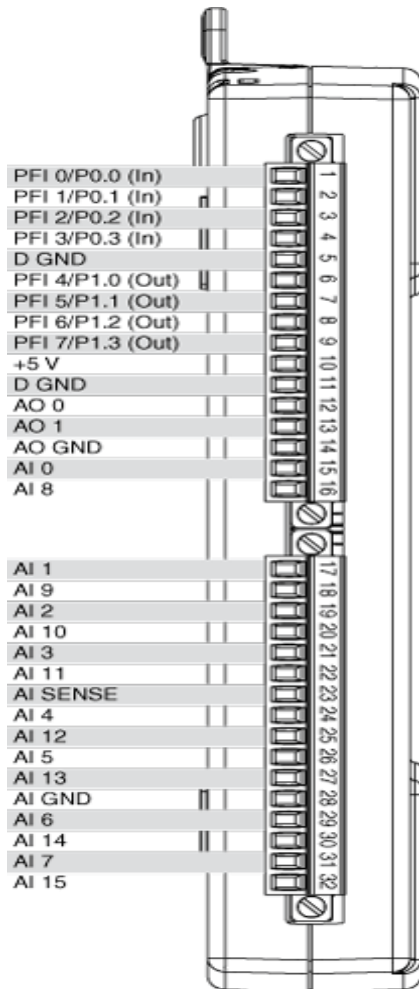
## Anexo II. Características Caudalímetro.

### IFC 300 / IFC 010

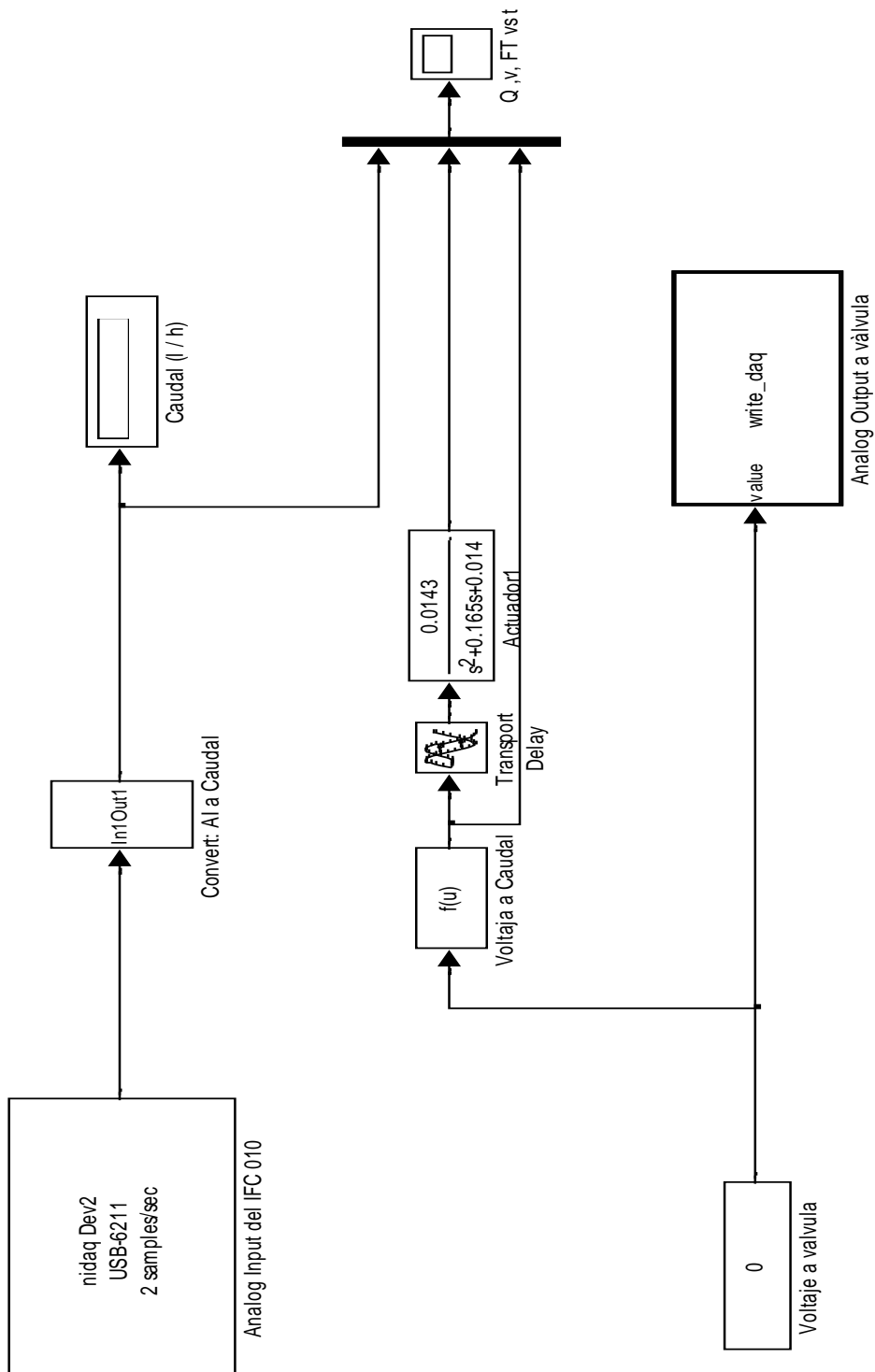
IFC 010		
Funcionalidad general		Medida continua del caudal instantáneo volumétrico actual Dirección del flujo (directa o inversa) Medida y estabilización del caudal bidireccional Dirección identificada a través de la salida de estados
Salida de corriente	Función	Configurables todos los datos de trabajo; aislada galvanicamente
	Selecciones	Q = 0 %      0 or 4 mA Q = 100 %    20 mA Q > 100 %    22 mA Identific. de error    0 / 3.6 / 22 mA
	Conexión	Activa      I = 22 mA / R <sub>L</sub> = 500 Ohmios Pasiva      I < 0...500 Ohmios / U < 15...20 VCC  I < 250...750 Ohmios / U < 20...32 VCC
Salida pulsos	Función	Configurable para todos los datos de trabajo; aislada galvanicamente
Salida estados	Selecciones	Q = 100 %    Estándar: 10 pulsos por segundo, escalable, 100 ó 1000 pulsos por segundo 10000 pulsos por segundo, escalable Anchura del impulso 50, 100, 200, 500 ó 1000 ms ó autom. ó sim. Estados      Activada: ó Desactivada
	Conexión	Activa      tensión interna: 15 VCC, de la salida de corriente carga: I <sub>max</sub> < 23 mA sin salida de corriente carga: I <sub>max</sub> < 3 mA con salida de corriente Pasiva      tensión externa: U <sub>ext</sub> = 30 VCC / = 24 VCA I <sub>max</sub> = 150 mA
Corte por caudal bajo	"activado"	1...10%
	"desactivado"	2...20%
Constante de tiempo		0.2...99.9 segundos (establecida en incrementos de 0.1)



### Anexo III. Dispositivo DAQ y características.



**Anexo IV. Montaje en Simulink, para visualizar caudal y aplicar voltajes al actuador de la válvula.**



## ANEXO V. Montaje empleado en la cabina de control.

