



UNIVERSIDAD COMPLUTENSE  
MADRID

# Máster en Ingeniería de Sistemas y Control

## PROYECTO FIN DE MÁSTER

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL BORROSO PARA UN  
PROCESO DE FERMENTACIÓN ALCOHÓLICA CON REGLAS  
SINTONIZADAS MEDIANTE ALGORITMOS GENÉTICOS**

### **ESTUDIANTE**

Rafael Rendón Gómez

### **DIRECTORA**

Matilde Santos Peñas

Curso Académico 2013-2014  
Convocatoria de Junio



# **Máster en Ingeniería de Sistemas y Control**

## **PROYECTO FIN DE MÁSTER**

### **DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL BORROSO PARA UN PROCESO DE FERMENTACIÓN ALCOHÓLICA CON REGLAS SINTONIZADAS MEDIANTE ALGORITMOS GENÉTICOS**

#### **ESTUDIANTE**

Rafael Rendón Gómez

#### **DIRECTORA**

Matilde Santos Peñas

#### **PROYECTO TIPO B**

Propuesto por el alumno



## Autorización

Autorizo 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:



Rafael Rendón Gómez

**Resumen**

El presente trabajo describe el diseño de un sistema de control basado en lógica difusa para el proceso de fermentación alcohólica de mosto de uva en la elaboración de vino. En primer lugar se ha obtenido un modelo del proceso. A continuación se ha diseñado el controlador borroso para mantener la temperatura adecuada del mosto en fermentación en función de la etapa del proceso, siendo valorado por la concentración del mismo. La matriz de reglas del controlador borroso se ha optimizado aplicando algoritmos genéticos. Se han comparado las respuestas del sistema al aplicar un regulador PID clásico y los dos diseños del sistema borroso. El diseño de control borroso con reglas sintonizadas mediante algoritmos genéticos se ha implementado en la planta real y se han obtenido buenos resultados en términos de mejora en la respuesta y ahorro económico.

**Palabras Clave**

Modelado, control borroso, lógica difusa, algoritmos genéticos, control inteligente, PID, sintonía, fermentación alcohólica, mosto, vino.

**Abstract**

The current work describes the design of a control system based on the implementation of an incremental fuzzy controller for an alcoholic fermentation process of grape must in wine making. First of all, a math process model has been developed. Then a fuzzy controller has been designed to maintain the suitable temperature in the fermenting must according to the stage of the process, besides measuring the must concentration. The rule matrix of this fuzzy controller has been tuned by genetic algorithms. The system behavior has been compared using a classical PID and both fuzzy controllers. The fuzzy controller tuned by genetic algorithms has been tested in a real pilot plant, achieving good results in terms of response improvements and economical savings.

**Key Words**

Modelling, Fuzzy control, fuzzy logic, genetic algorithms, intelligent control, artificial intelligence, PID, tuning, alcoholic fermentation, must, wine.

## ÍNDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	9
1.1. Preámbulo	9
1.2. Motivación	11
1.3. Objetivos	12
1.4. Dificultades	13
1.5. Metodología de desarrollo del proyecto	14
<b>2. PROCESO DE FERMENTACIÓN ALCOHÓLICA</b>	15
2.1. Proceso de vinificación	15
2.2. Proceso de fermentación alcohólica	22
2.3. Dificultades y aspectos clave del proceso de fermentación	24
2.3.1. Azúcar residual	25
2.3.2. Defectos organolépticos	26
2.3.3. Bajo ratio de transformación azúcar-alcohol	27
<b>3. ESTADO DEL ARTE EN CONTROL DE PROCESOS FERMENTATIVOS</b>	
3.1. Consideraciones generales en el control de procesos fermentativos	29
3.2. Control clásico en procesos de fermentación alcohólicos	31
3.2.1. Controladores PID en el proceso de fermentación	31
3.2.2. Dificultades del control PID en procesos fermentativos	34
3.3. Técnicas de IA en procesos de fermentación alcohólicos	35
3.4. Técnicas de control usadas en bio-procesos y reactores biológicos	38
<b>4. MODELADO DEL PROCESO DE FERMENTACIÓN</b>	41
4.1. Proceso de fermentación y control por refrigeración	41
4.2. Parametrización del proceso	44
4.3. Modelización del proceso	47

<b>5. DISEÑO DEL CONTROLADOR BORROSO</b>	<b>53</b>
5.1. Lógica difusa	53
5.2. Diseño del controlador borroso	55
5.3. Simulación del controlador borroso	60
<b>6. SINTONIZACIÓN DEL CONTROLADOR MEDIANTE ALGORITMOS GENÉTICOS</b>	
6.1. Algoritmos genéticos	69
6.2. Sintonización de las reglas del controlador borroso	70
6.3. Simulación del controlador borroso sintonizado	76
6.4. Simulación de proceso mediante PID tradicional	79
6.5. Comparación de resultados	83
6.5.1. Respuesta a la entrada en escalón	83
6.5.2. Respuesta a la entrada variable	84
<b>7. DISEÑO Y APLICACIÓN EN UNA PLANTA PILOTO</b>	<b>85</b>
7.1. Diseño del controlador para una planta piloto	85
7.2. Descripción de la planta piloto	90
7.3. Protocolo de prueba	98
7.4. Análisis de los resultados	99
<b>8. CONCLUSIONES Y LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS</b>	<b>103</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS</b>	<b>107</b>
<b>LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS</b>	<b>109</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>111</b>

# Capítulo 1

## INTRODUCCIÓN

### 1.1. Preámbulo

Los sistemas clásicos de control han proporcionado una gran variedad de soluciones prácticas en diversos sectores de la industria, transporte, navegación, aeronáutico o el doméstico, entre otros. A través de las distintas metodologías que ofrece la ingeniería de control, ya sea mediante controladores sencillos o bien con técnicas avanzadas de control pueden abordarse con éxito muchas aplicaciones reales (Ogata, 2003)

La figura 1 muestra el esquema básico de un sistema de control realimentado donde pueden identificarse los principales componentes de dicho sistema. La  $E$  representa la señal de entrada o referencia del sistema, la  $S$  la señal de salida o controlada, la  $G$  es la función de transferencia del lazo directo,  $H$  es la función de transferencia del lazo de realimentación o *feedback*, y  $e$  es el error que representa la diferencia entre el valor de la señal de referencia y la señal de salida (Morris, 1997).

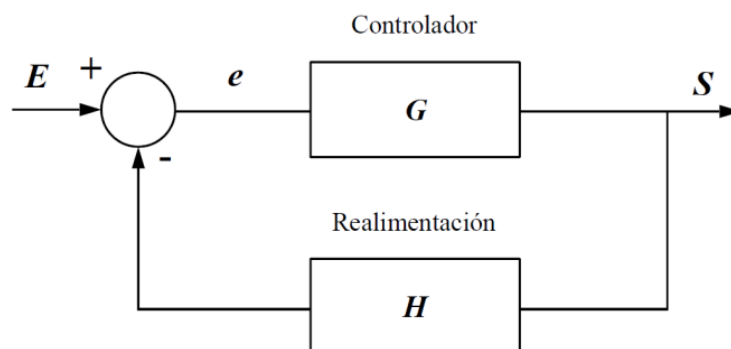


Figura 1. Esquema de un sistema clásico de control.

La función de transferencia del sistema en lazo cerrado  $M$  estaría definida por la siguiente ecuación (1):

$$M = \frac{S}{E} = \frac{G}{1 + GH} \quad (1)$$

A pesar del éxito de estos sistemas de control para abordar aplicaciones lineales, incluso con cierta complejidad, cuando es necesario resolver problemas no lineales, con mayor complejidad, de orden elevado, o con variables no parametrizables, el diseño y optimización de los mismos se dificulta significativamente. En la actualidad existen métodos sistemáticos y herramientas matemáticas que facilitan dichas tareas pero, sin embargo, no siempre se consiguen los resultados deseados.

Por otro lado, en sistemas no lineales pueden aparecer otras características como puntos de equilibrios múltiples, ciclos límite, bifurcaciones, corrimiento de frecuencias y caos (Sira-Ramírez, 2005). Debido a esto, las técnicas de control lineal sólo son válidas en un rango de operación de pequeña señal o alrededor de un punto de equilibrio específico.

Además el enfoque clásico de control está basado en modelos matemáticos, que implican la resolución de cálculos más o menos complejos para obtener una acción de control precisa, y puede no ser el método más apropiado para controlar sistemas no lineales, complejos o con potencial incertidumbre (Trillas, 1992).

Sin embargo una persona es capaz de tomar decisiones y controlar procesos de cierta complejidad sin necesidad de seguir un modelo matemático del mismo. Es decir, no necesita resolver ecuaciones ni realizar cálculos complejos en tiempo real. Actualmente no se conocen en detalle los procesos mentales como para determinar su funcionamiento, pero sí sus manifestaciones y evidencias principalmente a través del lenguaje.

Una de las alternativas para controlar este tipo de sistemas haciendo uso de los modelos mentales de conocimiento y razonamiento humanos a través del lenguaje, son los controladores inteligentes, en concreto los reguladores difusos o borrosos (*Fuzzy Controllers*). Su funcionamiento no depende del punto de operación, como en el caso de los controladores clásicos, sino de sencillas reglas lingüísticas que se pueden construir a partir de la experiencia de algún experto, y su diseño no requiere de un modelo matemático. Dicho modelo tan solo será necesario si se desean realizar simulaciones para seleccionar las reglas y funciones de pertenencia del sistema difuso, o para validarlo mediante simulación.

Haciendo uso de estas nuevas técnicas de control moderno basadas en la inteligencia artificial (control inteligente), en este trabajo se describe el diseño y la implementación de un controlador borroso sintonizado mediante algoritmos genéticos, aplicado a un

proceso de fermentación alcohólica que responde claramente a un sistema no lineal de elevada complejidad.

## **1.2. Motivación**

Al igual que en el resto de los procesos fermentativos, durante la fermentación alcohólica se genera una reacción exotérmica con una elevada emisión de calor. Esto contribuye a elevar la temperatura del mosto en fermentación que puede llegar a parar la reacción enzimática en caso de alcanzar valores altos, dejando azúcares residuales en el mosto que obligan a costosos re-procesos, o aún más grave, a imposibilitar su uso esperado en la bodega. Por ello es necesario controlar la temperatura durante el proceso de fermentación mediante sistemas adecuados de refrigeración.

Los procesos de fermentación alcohólicos están ubicados dentro de la industria química y alimentaria, donde éstos han sido controlados tradicionalmente mediante sistemas de control clásicos (PID), cuyo objetivo ha sido el mantenimiento de la temperatura de fermentación del mosto en un valor fijo durante todo el proceso, para evitar una parada de las reacciones enzimáticas que se generan durante la fermentación y garantizar la finalización completa del proceso en condiciones óptimas de calidad del producto.

El control de dichos sistemas mediante controladores clásicos genera principalmente tres grandes inconvenientes:

1. Modelización compleja del sistema, sin tener en cuenta variables no controladas que tienen un impacto importante en el proceso (temperatura exterior, aislamiento, cinética de la reacción, concentración de azúcar, ...)
2. Elevada inercia térmica de la masa de mosto en fermentación que dificulta la parametrización del sistema PID de control.
3. No se tiene en cuenta la concentración de azúcar durante el proceso completo de fermentación pudiendo originar paradas al inicio o al final de la fermentación, dejando restos de azúcares residuales que necesitan ser reprocesados o incluso imposibilitando su uso posterior en la bodega.

El uso de un controlador difuso para este proceso simplificaría el proceso de diseño y optimización del sistema y sería capaz de considerar el impacto de las variables no controladas, así como tener en cuenta el nivel de concentración de azúcar de una manera sencilla sin complicados cálculos ni ecuaciones complejas.

Finalmente, la sintonización de la matriz de reglas del controlador difuso mediante algoritmos genéticos permitiría hallar unas reglas óptimas que evitarían ajustes durante el proceso de puesta en marcha y funcionamiento del sistema, lo que debido al corto periodo de tiempo durante el cual se desarrolla (de 15 a 20 días al año), reduciría los defectos de calidad o resultados no adecuados debido a la falta de ajuste del controlador.

### **1.3. Objetivos**

El objetivo principal del presente trabajo consiste en diseñar un controlador basado en lógica fuzzy para el control de la fermentación alcohólica dentro del proceso de elaboración de vinos, en concreto para vinos de Jerez, así como la sintonización de las reglas del mismo mediante el uso de algoritmos genéticos.

Por otro lado también se propone la instalación de una planta piloto con equipos e instalaciones reales para comprobar los resultados teóricos sobre un lote pequeño de referencia, que sirva para verificar el diseño del controlador.

Al mismo tiempo este trabajo procura abordar una primera aplicación de control mediante el uso de técnicas de inteligencia artificial a un campo como la fermentación vínica, hasta el momento muy tradicional, y con escaso desarrollo tecnológico en el uso de técnicas modernas de control. Debería ser entendido como una primera aproximación del control inteligente en el proceso de elaboración de vinos o bebidas espirituosas, pero que podrían abrir el camino a nuevos campos de investigación en este sector, como por ejemplo:

- Sistemas inteligentes de análisis organoléptico.
- Control de la merma en envejecimiento.
- Fiabilidad de los procesos de blending.
- Control de capacidad en los procesos de llenado.
- Reducción de los procesos de lavado en cambios de líquido.
- Visión artificial para detectar defectos en el líquido o materia seca.

También se aborda como novedad en el presente trabajo la modelización matemática del proceso de fermentación alcohólica, entendiéndolo como un proceso bioquímico no lineal con grandes dificultades de parametrizarlo en la práctica. Esta modelización servirá para simular el proceso y hallar las reglas adecuadas del controlador mediante

algoritmos genéticos, además de poder ser utilizado en futuras investigaciones para el control u otros aspectos a considerar dentro del proceso de fermentación.

#### **1.4. Dificultades**

Una de las principales dificultades de este trabajo radica en desarrollar el modelo matemático del proceso de fermentación alcohólica ya que no existe literatura científica y específica al respecto. Para poder abordar la modelización del proceso se partirá de datos reales de una planta de fermentación de una bodega de Jerez, donde se dispone de los valores de la concentración de azúcar del líquido en fermentación en función del tiempo. Esta información sí es conocida y existen diversos ensayos, estudios y datos reales de plantas de fermentación que permiten obtener una función empírica de la concentración de azúcar y el tiempo de fermentación de la masa de vino.

Otra de las dificultades se encuentra en la determinación de la respuesta más adecuada del sistema de control. Por un lado, el propio proceso posee una elevada inercia temporal y además es sensible a variables externas no controladas, tales como la presión atmosférica, cepas de levaduras presentes de forma mayoritarias en la fermentación, presencia de sustancias orgánicas e inorgánicas en el vino que alteren el proceso, etc. Será necesario establecer, con la ayuda de varios expertos en el proceso (químicos y enólogos con experiencia), las condiciones ideales o aceptables del mismo para poder diseñar el proceso de control. Hay que tener en cuenta que actualmente el control del proceso de fermentación, aunque con el uso de técnicas de refrigeración automatizadas, se realiza mediante continuos análisis físico-químicos y organolépticos para determinar en cada vendimia y en ocasiones en cada depósito, las condiciones idóneas.

Finalmente otra dificultad del presente trabajo radica, por un lado, en la temporalidad del proceso, ya que únicamente se puede probar y ensayar durante los 15 a 20 días al año en los que tiene lugar la vendimia, normalmente entre finales de agosto y principios de septiembre. Esto ralentiza el proceso de diseño, desarrollo y puesta en marcha de modelos reales con una adecuada fiabilidad.

Además, la mayoría de bodegas posee una cantidad elevada de depósitos de gran capacidad (de 30.000 a 50.000 litros) en amplias instalaciones, lo que también dificulta la aplicación práctica si no se justifican de forma adecuada los retornos económicos de la inversión del capital. En este caso, sería necesario justificar el coste de la inversión con los ahorros que podrían obtenerse por los re-procesos o tratamientos que necesiten los mostos con restos residuales de azúcar o defectos organolépticos y el ahorro en alcohol al mejorar el ratio de transformación alcohólica.

## **1.5. Metodología de desarrollo del proyecto**

Además de los capítulos que describen el proceso en estudio, el estado del arte en el control de procesos fermentativos, así como los capítulos complementarios referidos a conclusiones, referencias, etc., el desarrollo seguido para abordar el problema y determinar las posibles soluciones está basado en las siguientes etapas secuenciales:

- 1° Desarrollo del modelo matemático del proceso de fermentación alcohólica partiendo de datos experimentales que relacionan la concentración de azúcar y el tiempo de fermentación. Este modelo servirá posteriormente para simular el proceso, una vez diseñado el controlador con lógica fuzzy, y sintonizar sus reglas mediante la aplicación de algoritmos genéticos.
- 2° Diseño del controlador borroso definiendo las funciones de pertenencia y la matriz de reglas en función de los datos aportados por expertos, así como una simulación de la respuesta de dicho controlador con reglas iniciales obtenidas de forma heurística.
- 3° Aplicación de algoritmos genéticos para sintonizar la matriz de reglas del controlador borroso que mejor se adapten a las condiciones óptimas esperadas en el proceso de fermentación y definidas por los expertos. Además de la simulación propia del resultado final se comprobará la respuesta comparando los resultados con un controlador PID tradicional.
- 4° Diseño y puesta en marcha de una planta piloto para evaluar los resultados obtenidos del controlador borroso sintonizado con algoritmos genéticos, analizando la respuesta del proceso a nivel experimental y comparándolo con los datos teóricos.

Un artículo que aborda los aspectos claves expuestos en este estudio fue seleccionado y presentado en la XV Multiconferencia CAEPIA (Conferencia de la Asociación Española para la Inteligencia Artificial) 2013, celebrada en Madrid del 17 al 20 de Septiembre de 2013. Esta Multiconferencia se celebró dentro del Congreso Español de Informática (CEDI 2013). El artículo fue redactado por el autor y la directora de este Proyecto Fin de Máster para presentar las líneas básicas de investigación de la actual memoria de este proyecto (Santos y Rendón, 2013).

## **Capítulo 2**

# **PROCESO DE FERMENTACIÓN ALCOHÓLICA**

### **2.1. Proceso de vinificación**

La vinificación es un proceso mediante el cual se realiza la transformación industrial de la uva en vino. Es un proceso que engloba la elaboración de diferentes tipos de vino a nivel mundial y que, dependiendo del tipo específico del producto final, puede presentar algunas diferencias o peculiaridades. En general los procesos de vinificación se pueden clasificar en los siguientes cuatro grandes grupos:

#### **I. Vinificación en blanco**

Consiste en el proceso de fermentación de mosto procedente de uva blanca para la obtención de vinos blancos de mesa. Se caracteriza principalmente por delicados procesos de separación de sólidos y fermentaciones muy lentas, para mantener los aromas y características de la varietal de la uva cultivada en la viña. Normalmente son fermentaciones que agotan completamente el contenido en azúcar, generando vinos secos, delicados y aromáticos. Existen procesos especiales de fermentación en blanco, como los usados en vinos con doble fermentación en botella, tales como el Cava y el Champagne, o bien vinos procedentes de uva congelada o con podredumbre a los que les aplican también otras condiciones específicas. La mayoría de estos vinos no tienen un proceso de envejecimiento en madera posterior y son embotellados tras el proceso de vinificación.

## II. Vinificación en tinto

Se aplica al proceso de elaboración de vinos tintos que se caracteriza por favorecer durante el todo el proceso de molturación y fermentación el contacto entre el mosto y las partes sólidas de la uva, principalmente para la extracción de polifenoles como los taninos y la antocianina existentes en el hollejo que aportan el color rojizo característico de este tipo de vinos. Son procesos que agotan el contenido en azúcar, obteniendo vinos tintos de mesa secos con cierto ‘cuerpo’ que proviene del proceso de extracción. Se pueden elaborar vinos jóvenes que se embotellan justo después del proceso de vinificación que, aunque presentan cierta acidez, mantienen aromas de la varietal de la uva, o bien vinos que serán sometidos a un posterior periodo de envejecimiento en barriles, barricas o botas de madera, cuyo resultado final es un vino con menores aromas de la varietal, pero sin embargo más cuerpo, color y más trazas de madera, vainillina, etc.

## III. Vinificación de vinos generosos con fermentación parcial

Es el proceso de vinificación más sencillo ya que los mostos sólo fermentan de forma parcial, y a los que se adiciona alcohol para inhibir el proceso de fermentación y conservar gran parte del contenido en azúcar. Por lo tanto son vinos dulces que obtienen gran parte de su graduación alcohólica a través de la adición de alcohol. Ejemplos de este tipo de vino son los Pedro Ximénez y las Mistelas.

## IV. Vinificación de vinos generosos con fermentación completa

Es el proceso de vinificación más complejo ya que requiere primero un proceso de fermentación completo del mosto de uva para obtener vinos entre 10° y 12°, y posteriormente un proceso de alcoholización o encabezado para subir la graduación hasta 15° y 20°, dependiendo del tipo de producto a elaborar. Los vinos más característicos de este tipo son el Sherry (Vinos de Jerez), que requieren una vinificación en blanco y los Oportos, que para la mayoría de sus productos requieren una vinificación en tinto. Ambos productos están destinados a un posterior envejecimiento en madera, por lo que el producto obtenido se utiliza para las colas de reposición del sistema de soleras o las añadas. Debido a la mayor delicadeza y cuidado que requiere la vinificación en blanco, además de su posterior proceso de deslío, alcoholización y envejecimiento en madera, el proceso de elaboración del Sherry es uno de los más complejos existentes en la actualidad.

Puesto que el presente trabajo se va a aplicar concretamente al proceso de fermentación del Sherry, se describe a continuación de forma básica su proceso de elaboración. En el diagrama de flujo de la figura 2 se muestran las etapas del proceso completo de elaboración y envasado del Sherry, dentro del cual se identifica el proceso de vinificación:

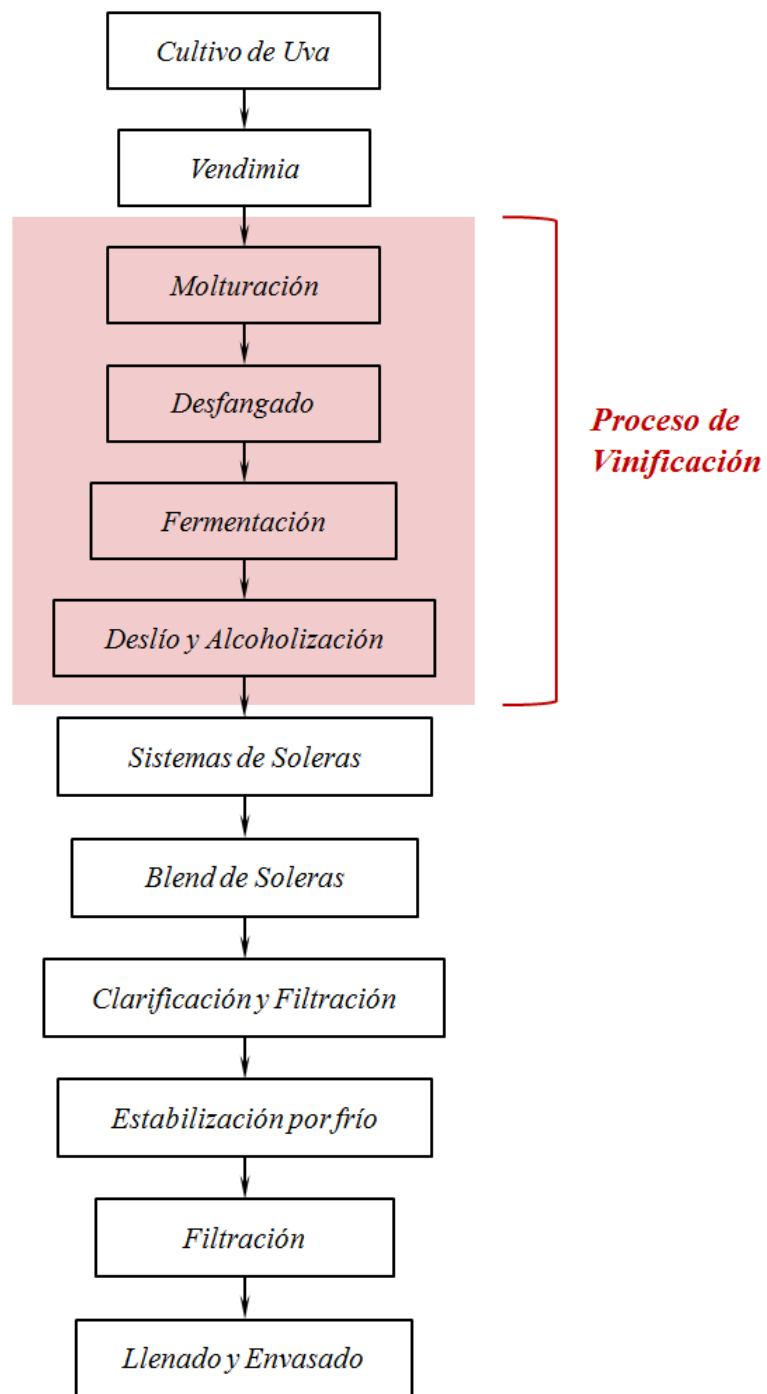


Figura 2. Diagrama de flujo de las etapas de elaboración y envasado del Sherry.

El diagrama de flujo anterior sirve para ubicar el proceso de vinificación dentro del proceso completo. Pero puesto que el objetivo del presente trabajo no es aplicar las técnicas de inteligencia artificial al proceso completo de elaboración y envasado del Sherry, tan sólo se hará una breve descripción de las etapas del proceso de vinificación para posteriormente describir más en detalle del proceso de fermentación.

Las etapas del proceso de vinificación son las siguientes:

### **1º Molturación**

El proceso de vinificación comienza cuando la uva procedente de la viña, de la variedad palomino, es enviada a la planta de molturación donde es estrujada mediante prensas horizontales o neumáticas (figura 3), obteniendo el mosto de uva. El mosto se extrae selectivamente del desvinado de la masa de uva molturada en función de la presión ejercida por las prensas y por el tiempo de maceración que tiene el mosto con la pulpa, hollejo y otros sólidos naturales que lo acompañan.

El primer mosto extraído se denomina de 1ª yema; ha sido obtenido con menor presión y menor tiempo de maceración con sólidos de la masa de uva, siendo destinado posteriormente para la elaboración de vinos finos. El segundo mosto extraído se denomina de 2ª yema, y ha sido sometido a mayor presión y ha permanecido más tiempo en el interior de las prensas. Este vino de mayor cuerpo y color es destinado posteriormente para la elaboración de vinos olorosos.

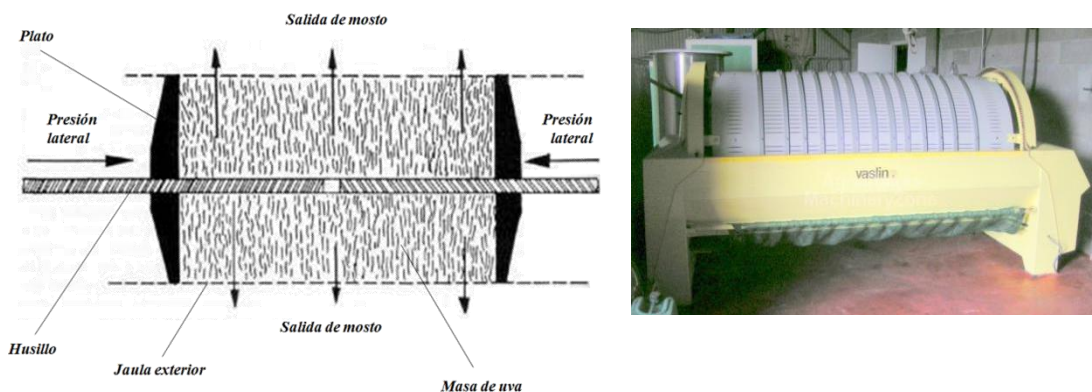


Figura 3. Esquema de funcionamiento de una prensa horizontal de platos para molturación de uva.

## 2º Desfangado

Los mostos de 1ª y 2ª yema obtenidos en la planta de molturación son enviados a la planta de fermentación donde son sometidos previamente a un proceso de desfangado. Éste consiste en dejar en reposo al mosto entre 12 y 24 horas para forzar la sedimentación de los sólidos arrastrados por el mosto durante el proceso de estrujado y que no serían adecuados para estar presentes en los líquidos en fermentación (figura 4). Este proceso se puede hacer de forma natural, o bien, añadiendo enzimas naturales que faciliten la precipitación de los elementos sólidos, incluso el uso de sistemas de refrigeración también puede ayudar a forzar una mayor sedimentación.

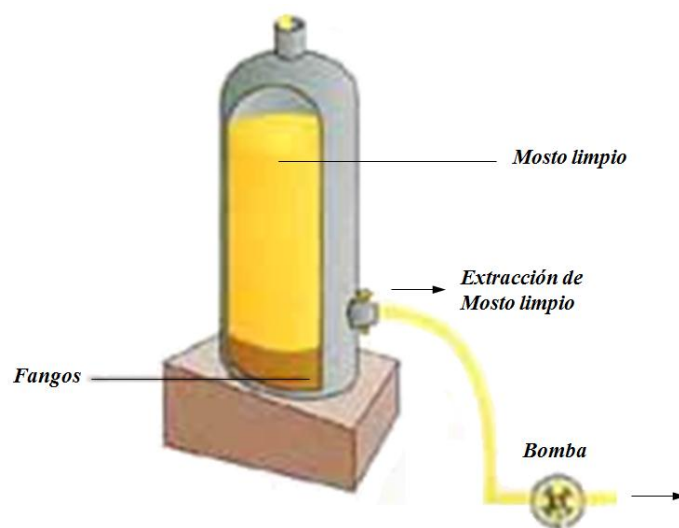


Figura 4. Esquema de una operación de desfangado de mostos antes de fermentar.

En esta parte del proceso es necesario ajustar la concentración de  $\text{SO}_2$  para asegurar la asepsia del mosto durante el tiempo que dure el desfangado, evitando una fermentación precipitada con elementos sólidos presentes en el mosto. También es ajustado el pH con ácido tartárico para permitir un adecuado proceso de fermentación. Una vez transcurrido el tiempo de sedimentación, se separan la fase limpia que se envía a los depósitos de fermentación y los sedimentos, que se envían a tratar o filtrar por diferentes métodos (centrifugación, filtración por vacío, filtros prensa, etc.)

## 3º Fermentación

Los mostos una vez desfangados (limpios de fangos y sólidos) son almacenados en depósitos o fermentadores donde se realiza su fermentación. El proceso de fermentación vínica es básicamente la transformación del azúcar contenido en el mosto de uva en alcohol. Dicho proceso es una

reacción exotérmica que de forma continuada hace aumentar la temperatura de la masa de mosto en fermentación. Esta subida de temperatura puede ocasionar la parada del proceso de fermentación, o bien provocar defectos organolépticos en los vinos obtenidos posteriormente. Para ello normalmente se utilizan sistemas de refrigeración que aseguren una adecuada temperatura del mosto durante todo el proceso de fermentación (figura 5). Es un proceso muy delicado que en caso de no realizarse de forma adecuada puede generar vinos de mala calidad, generando pérdidas elevadas para las empresas. Al ser esta parte del proceso el objetivo de aplicación del presente trabajo, será descrito más en detalle en los apartados 2.2 y 2.3.

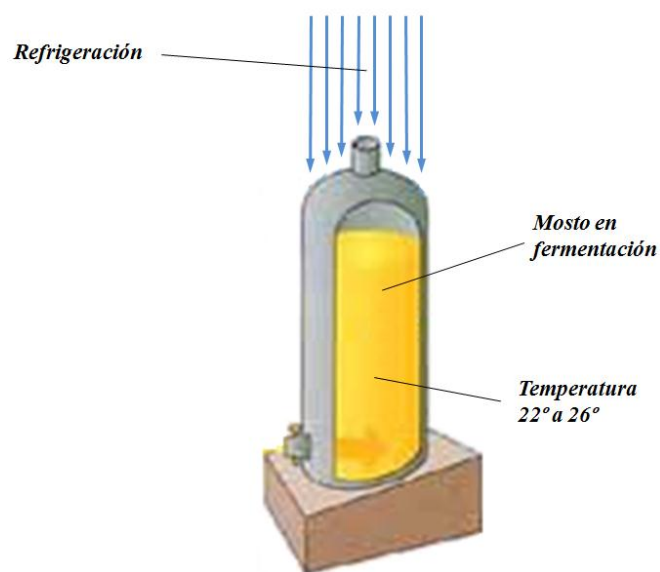


Figura 5. Esquema de un depósito de mosto en fermentación.

#### **4° Deslío y alcoholización**

Una vez finalizada la fermentación del mosto todo su contenido de azúcar se ha transformado en alcohol, obteniendo un vino de una graduación alcohólica comprendida entre 10,5° y 12,0°. Después del proceso de fermentación, el vino contiene diversas impurezas sólidas procedentes de los restos de levaduras fermentativas y fangos no eliminados en el desfogado, por lo que es necesario dejarlo en reposo durante al menos 45 días para que éstas precipiten en el fondo de los depósitos. Aunque esta operación suele realizarse de forma estática y sin realizar ninguna acción sobre los vinos fermentados, algunas bodegas refrigeran los vinos ya fermentados o adicionan enzimas para acelerar el proceso de sedimentación.

Cuando los restos sólidos precipitan en el fondo de los depósitos, se extrae de los mismos la fase limpia separándola de las burbas o fangos. El vino limpio extraído posee una graduación alcohólica de 10,5° a 12,0°, como se ha dicho. Pero puesto que los Vinos de Jerez envejecen en barricas o botas de madera a una graduación de 15,5° los finos bajo velo de flor y a 18,0° los olorosos con crianza oxidativa, es necesario alcoholizarlos añadiendo alcohol destilado hasta alcanzar dichas graduaciones (figura 6). El destino de los vinos se decide previamente a la alcoholización, basándose en los datos analíticos de cada lote fermentado y sus características organolépticas. Normalmente las primeras yemas se destinan a finos y las segundas a olorosos.

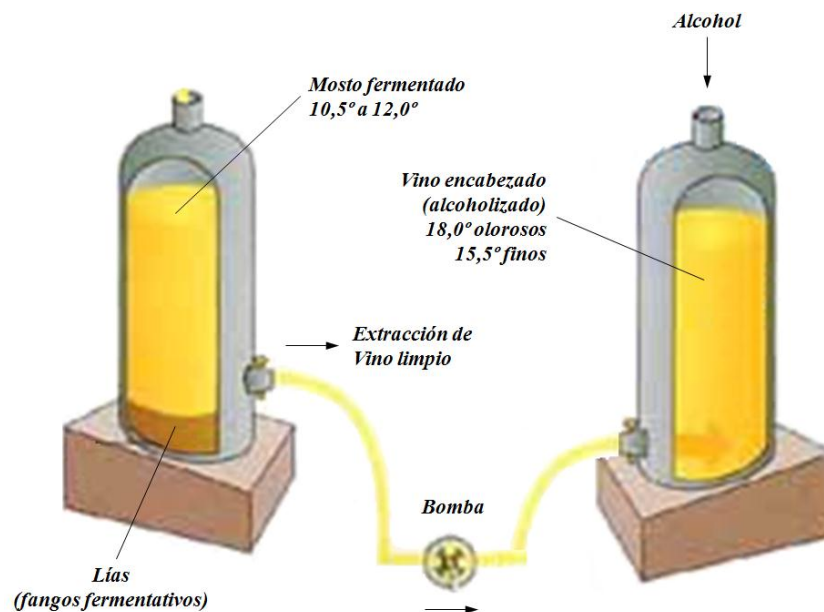


Figura 6. Esquema del proceso de deslío y alcoholización.

Este proceso se denomina en Jerez encabezado y una vez finalizado, los vinos son enviados a las bodegas de envejecimiento donde se introducirán en barricas o botas de madera para reponer las escalas más jóvenes dentro del sistema tradicional de soleras y criaderas de Jerez (figura7).

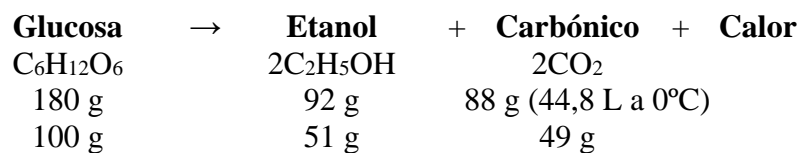


Figura 7. Aplicación del vino joven fermentado en el sistema de soleras y criaderas.

## 2.2. Proceso de fermentación alcohólica

La fermentación alcohólica es un proceso bioquímico anaerobio que transforma el azúcar en alcohol, utilizado desde hace seis o siete mil años para producir cerveza y vino en Mesopotamia y en Egipto, conociéndola como hecho científico desde el siglo XIX. En 1817 Gay-Lussac establece las bases de la ecuación de transformación del azúcar en alcohol. En 1866, Pasteur demuestra el papel esencial de las levaduras. En 1897, Buchner evidencia el carácter enzimático de la transformación azúcar-alcohol (Peynaud y Blouin, 2006).

Prácticamente la fermentación alcohólica se puede presentar como una transformación química anaerobia por medio de enzimas en el interior de microorganismos, principalmente levaduras y algunas bacterias. Por lo tanto, realmente es un proceso complejo que engloba las disciplinas científicas de química, enzimología y microbiología, siendo su ecuación básica según Gay-Lussac:



Esta ecuación, muy esquemática, indica que 100 g de azúcares producen alrededor de 50 g de alcohol y 50 g de gas carbónico. La fermentación de 180 g de azúcares, alrededor de un litro de mosto, que es probable que alcance 11°, libera alrededor de 50 litros de CO<sub>2</sub> a 20°C. Sin embargo esta formulación es incompleta ya que además de éstos, durante la reacción se forman otros compuestos secundarios de menor concentración pero de gran importancia enológica, como enzimas, glicerina, ácido láctico, acetoína, ácido succínico, ácido acético, ácido fórmico y ésteres (figura 8).

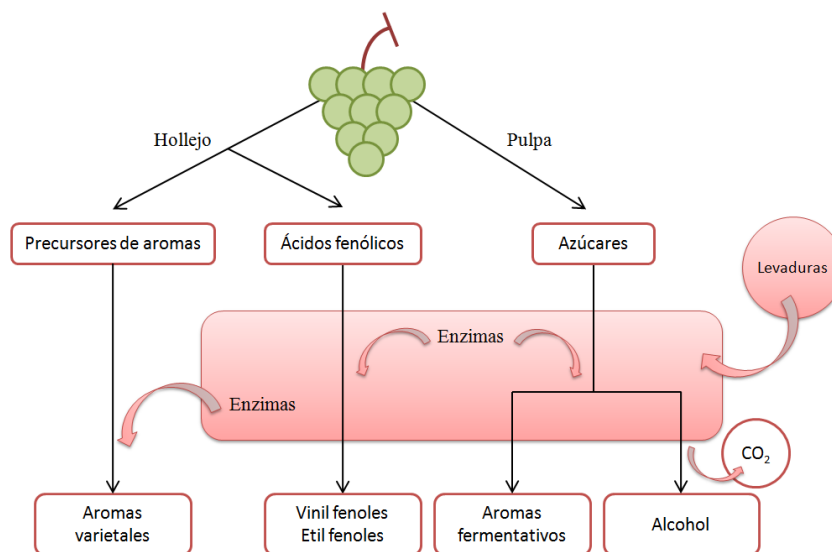


Figura 8. Esquema de las principales transformaciones presentes en la fermentación.

Se puede favorecer o frenar estas formaciones dominando todos los efectos secundarios, por ejemplo, una fermentación rápida formará menos productos secundarios, con menos aromas fermentativos pero también menos compuestos carbonílicos y menos ácido acético (Peynaud et al., 2006). Este es el caso del Sherry, cuyo proceso de vinificación debe obtener un vino poco aromático, limpio, y bajo de ácido acético para que las características organolépticas del producto sean adquiridas exclusivamente en su proceso de envejecimiento en barricas o botas de madera.

Durante el proceso de fermentación existen dos parámetros que evolucionan de forma inversa: la concentración de azúcar y el grado alcohólico. Al inicio de la fermentación el mosto posee todo su contenido en azúcar y no posee ningún grado de alcohol, pero mientras la fermentación se va desarrollando ambos parámetros se van invirtiendo, es decir, va disminuyendo la concentración de azúcar y aumentando el grado alcohólico, de tal forma que al final de la fermentación, si ésta se ha completado con éxito, apenas existirá una pequeña cantidad residual de azúcar en el mosto, inferior a 2 g/L, y la graduación alcohólica será máxima. El ratio de conversión de la concentración de azúcar del mosto a la graduación alcohólica final del vino se denomina tasa de transformación alcohólica. Esta tasa depende de diversos factores, siendo los más importantes la temperatura de fermentación, el tipo y la concentración de levaduras y el pH del mosto. Para el Sherry esta tasa tiene un elevado impacto en el negocio, ya que todo el alcohol que no se haya podido generar en la fermentación tendrá que ser añadido hasta alcanzar los 15,5° para finos y 18,0° para los olorosos, lo que puede suponer un significativo coste económico. En la figura 9 se puede apreciar la evolución de la concentración de azúcar de 4 muestras de mostos de 100 mL tomadas de diferentes cepas realizado a nivel de laboratorio (Rodríguez, 2007):

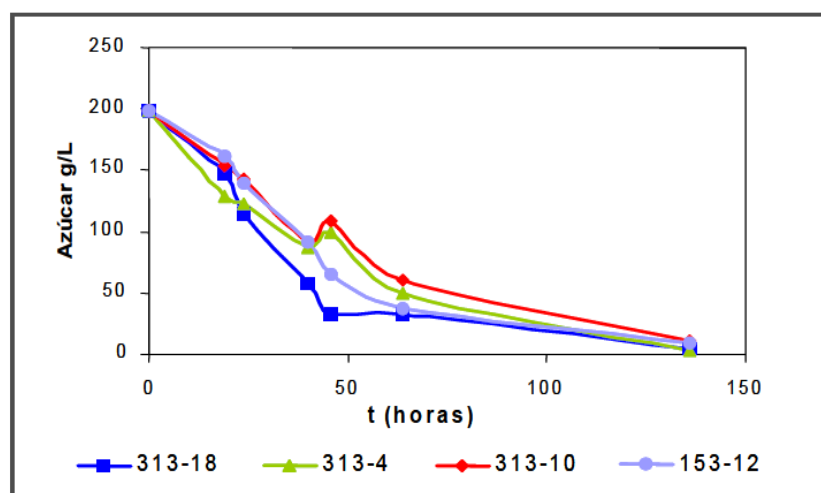


Figura 9. Gráfico con la evolución de la concentración de azúcar en g/L de diferentes cepas (ensayo de laboratorio).

La actividad enzimática causante del proceso de fermentación genera una reacción exotérmica que desprende grandes cantidades de calor. Estudios antiguos indicaban un desprendimiento de 24-40 kcal/mol de azúcar (1 mol=180g), con un valor medio para la mayoría de los procesos de 33 kcal/mol. Sin embargo, estudios recientes sitúan dicho desprendimiento de calor en un rango de 25 a 28 kcal/mol, debido a la respiración de las levaduras en su desarrollo. Esta cifra significa que la temperatura de un litro de mosto que contiene 180 g de azúcar se elevaría de 27°C a 28°C en ausencia de pérdidas térmicas, y si las levaduras resistieran dicho aumento (Troost, 1985).

En síntesis se puede decir que la fermentación es un proceso anaeróbico y catabólico que transforma el azúcar en alcohol, llevado a cabo principalmente por levaduras gracias a la acción catalizadora de las enzimas presentes en el mosto que genera gran desprendimiento de calor. Es un proceso común en la elaboración de cualquier tipo de vino obtenido por fermentación, pero que tiene unas características específicas según se trate de blanco, tinto o generoso (Sherry u Oporto). En el caso concreto de la fermentación alcohólica del Sherry, objeto del presente trabajo, la primera etapa del proceso de fermentación suele durar unos 6 días y está dividido en tres fases diferentes:

- a) **Fase de inducción.** Tiene lugar durante el primer día de encubado y coincide con la fase latente de levaduras.
- b) **Fase tumultuosa.** Se caracteriza por el hervor del mosto debido al desprendimiento masivo de dióxido de carbono y al rápido aumento de la temperatura. Es la fase donde se produce la mayor transformación de azúcares en alcohol y mayor desprendimiento de calor. Suele durar unos 2 días.
- c) **Fase lenta.** Aún se produce algún “burbujeo” más suave y comienza a descender la temperatura. Es la fase menos previsible en cuanto a duración, aunque suele durar unos 3 días. Posteriormente, el mosto sigue fermentando de 30 a 40 días en una fase estacionaria hasta agotar los azúcares por debajo de 2 g/L.

### **2.3. Dificultades y aspectos clave del proceso de fermentación**

Como ya se ha indicado previamente, la fermentación es una actividad muy delicada dentro del proceso de elaboración de vinos, cuyo resultado puede tener un importante impacto económico en el negocio de una bodega. Aunque existen muchos factores que pueden impactar en la calidad del vino obtenido tras una fermentación, a continuación se detallarán únicamente aquellos resultados que dependen principalmente de una inadecuada refrigeración del mosto durante la fermentación, cuyo sistema de control es objeto del presente trabajo.

### **2.3.1. Azúcar residual**

Cuando se elaboran vinos secos con una concentración de azúcares por debajo de 2 g/L, es primordial finalizar completamente el proceso de fermentación ya que, en otro caso, quedarían restos de azúcar en el vino que harían imposible procesar y comercializar dichas partidas. Es uno de los parámetros a vigilar más exhaustivamente en un proceso de fermentación ya que, en otro caso, si éste no finalizara y quedase azúcar residual, sería necesario intentar forzar la fermentación de dicho azúcar mediante la adición de levaduras y catalizadores, además de la oxigenación del mosto. Si con este método no se consigue completar el proceso de fermentación, entonces el lote afectado no puede ser destinado al producto inicialmente previsto. Puesto que el azúcar no puede ser eliminado de una manera enológica aceptable, si la bodega posee productos dulces o semidulces, podría destinar parte o la totalidad de la partida afectada a éstos. En caso contrario, tendría que venderlo a otra bodega como vino destinado para productos dulces o semidulces, o bien, en última instancia desclasificar el vino dentro de la denominación de origen y destilar para la obtención de alcohol destilado. En cualquier caso la pérdida económica es muy significativa ya que el valor del producto afectado puede llegar a perder hasta un 40% su valor inicial.

La causa principal que puede provocar esta no terminación de la fermentación suele ser casi exclusivamente una inadecuada refrigeración y control de la temperatura durante el proceso. En caso de una deficiente refrigeración, la temperatura del mosto en fermentación aumentaría por encima de los 28,0°C pudiendo ocasionar la muerte de las levaduras que, por consiguiente, no consumirían todos los azúcares presentes en el mosto. Si por el contrario se produce un exceso de refrigeración el mosto podría bajar de 22,0°C, ocasionando una inhibición de las enzimas que intervienen en la fermentación. Aunque esta última situación se usa en la elaboración de vinos blancos aromáticos, donde se inoculan levaduras y enzimas resistentes en los mostos, cuando esta circunstancia aparece en mostos destinados a Sherry puede ocasionar la circunstancia ya comentada de la presencia de restos de azúcares, o bien vinos muy aromatizados cuyas características no son adecuadas para la elaboración de Sherry.

Otra causa que también puede ocasionar este defecto es una elevada concentración inicial de azúcares en el mosto. En años de sequía o con bajo rendimiento en la viña normalmente los granos de uva suelen ser pequeños con poca cantidad de líquido y una elevada concentración de azúcar. Aunque en estas circunstancias, siempre que no se presenten enfermedades en la viña, la calidad del mosto obtenido es muy buena, generando vinos fermentados que pueden llegar alcanzar los 14,0° de

alcohol. Sin embargo esto puede también provocar que a partir de 12,5°C aparezca cierta inhibición de las enzimas fermentativas e incluso la muerte de levaduras si el grado alcohólico sigue aumentando, ya que ambas no son resistentes al alcohol, lo que genera un importante riesgo de no completar la fermentación con el correspondiente consumo total de azúcares.

Los sistemas tradicionales de control de tipo PID usados actualmente en estos procesos no resuelven este problema, ya que se limitan a mantener la temperatura del mosto en fermentación en la consigna programada durante todo el proceso, normalmente fijada entre 22°C y 24°C. Sin embargo, una alternativa para minimizar este defecto es permitir un aumento de temperatura en esta fase de la fermentación que contrarreste, al menos de forma parcial, el efecto del aumento de grado alcohólico. Para ello el sistema de control de la refrigeración tendría que permitir tener una consigna de temperatura mayor al llegar a valores de concentración de azúcar determinado; por ejemplo, por debajo de 20 g/L la consigna sería de 26,0°C, lo que permitiría completar la fase lenta de la fermentación. En este caso, además de medir y controlar la temperatura del mosto en fermentación, el sistema de control tendría que medir en continuo como referencia del proceso la concentración de azúcar en el mosto y no el grado alcohólico obtenido.

### **2.3.2. Defectos organolépticos**

Otros de los defectos que pueden aparecer en los mostos fermentados son las anomalías organolépticas que ocasionan olores y sabores malos, extraños o no deseados. Normalmente, estos defectos aparecen durante la fermentación por la presencia de ciertos componentes, presencia mayoritaria de levaduras o enzimas no habituales, ausencia de asepsia en los depósitos y tuberías, o bien, una inadecuada refrigeración. Esto provoca un exceso o defecto de compuestos aromáticos (en el caso del Sherry, el defecto sería un exceso), elevada acidez acética, fermentación maloláctica, etc...

Cuando aparecen estos defectos en los vinos habitualmente se pueden resolver mediante un reprocesado consistente en una simple oxigenación, o bien, una clarificación y/o filtración. En el peor de los casos, podría ser diluido en un bajo porcentaje en vinos de menor calidad o aquellos que su posterior envejecimiento en madera pueda suponer una eliminación o reducción del defecto. En cualquier caso, siempre supondrá un coste económico para la empresa, cuyo impacto dependerá del tipo de defecto.

En la mayoría de los casos, una inadecuada refrigeración no es capaz de provocar directamente por sí misma un defecto en el mosto fermentado, a no ser que sea muy significativa, sino más bien puede incrementar los efectos negativos organolépticos provocados por la presencia de otros factores, tales como levaduras o enzimas no adecuadas, o bien falta de asepsia en las instalaciones. Por lo tanto el sistema de control debe garantizar una adecuada refrigeración para minimizar los posibles defectos ocasionados por otros factores.

### 2.3.3. Bajo ratio de transformación azúcar-alcohol

Probablemente uno de los parámetros que tienen mayor impacto económico en el proceso de vinificación del Sherry es la tasa de transformación alcohólica que mide la producción de alcohol a partir de una determinada concentración de azúcar presente en el mosto. Como ya se ha comentado previamente, el vino de Jerez es alcoholizado (encabezado) desde su graduación de fermentación, de 10,5° a 12,0°, hasta 15,5° para los finos y 18,0° para los olorosos. Esta alcoholización se realiza mediante la adición de alcohol destilado que la bodega debe adquirir de una destilería con su correspondiente coste. Dicho coste varía de forma significativa, pero en los últimos años se encuentra entre valores de 2 a 4 €/L. Esto quiere decir que todo el alcohol que no ha sido obtenido de forma natural en la fase de fermentación debe ser añadido posteriormente con un coste importante para la empresa. Por lo tanto, sería necesario maximizar la conversión de azúcar en alcohol para reducir en lo posible los costes de adquisición de alcohol destilado para encabezar los mostos en el proceso de deslío y encabezado.

De forma experimental se ha determinado que la tasa de conversión alcohólica es inversamente proporcional a la temperatura media del mosto en fermentación (Caro, 1989). En la siguiente tabla se presentan las tasas de mostos con una concentración de azúcar de 172 g/L fermentados a diferente temperatura:

T (°C)	20,0	20,5	21,0	21,5	22,0	22,5	23,0	23,5	24,0	24,5	25,0	25,5	26,0	26,5	27,0	27,5	28,0
Et (g/L)	94,9	94,6	93,9	93,2	92,6	92,2	91,8	91,0	90,3	90,3	89,2	89,4	88,2	87,6	87,2	86,7	86,3

Donde  $T$  representa la temperatura de fermentación en °C y  $Et$  es la producción de alcohol (etanol) en gramos por litro. En la figura 10 se pueden observar los resultados obtenidos, así como la recta de regresión calculada a partir de los valores experimentales:

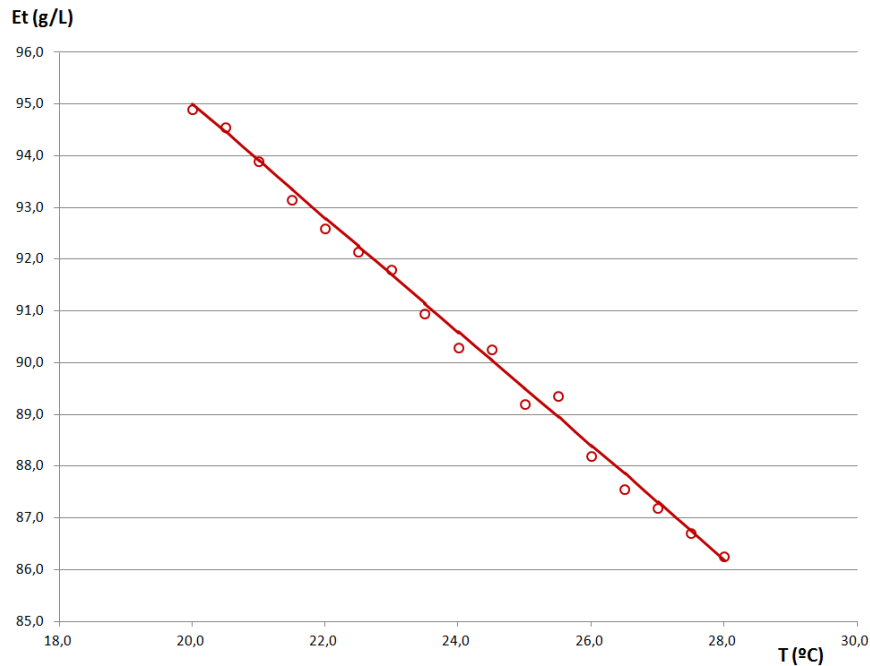


Figura 10. Ratio de transformación experimental azúcar- alcohol.

La ecuación correspondiente a la recta de regresión obtenida de los resultados experimentales es la siguiente:

$$Et = 117 - 1,1 \cdot T \quad (2)$$

Estos valores son aceptables para una temperatura de fermentación que se encuentre entre 20°C y 28°C, partiendo de una concentración media inicial de 172 g/L.

Por lo tanto el sistema de refrigeración debería garantizar la temperatura mínima posible para conseguir una mayor tasa de transformación. Sin embargo, según ya se comentó en apartados anteriores, por debajo de 22°C se pone en riesgo la inhibición del proceso de fermentación o un exceso de afrutado en el vino. Es decir, el sistema de refrigeración debe mantener la mínima temperatura posible en cada fase de la fermentación para alcanzar un ratio máximo de conversión alcohólica, siempre y cuando no suponga un riesgo para el adecuado desarrollo del proceso de fermentación. Para ello sería necesario definir y programar una temperatura diferente en cada una de las tres diferentes fases del proceso de fermentación que permitan maximizar la tasa de transformación alcohólica y minimizar los posibles defectos.

## Capítulo 3

# ESTADO DEL ARTE EN CONTROL DE PROCESOS FERMENTATIVOS

### 3.1. Consideraciones generales en el control de procesos fermentativos

Dentro del campo de la ingeniería de control se ha admitido que los bio-procesos poseen unas dificultades inherentes y una dinámica compleja que los hacían prácticamente inabordables. Sin embargo, en los últimos años son numerosas las investigaciones científicas que han desarrollado estudios para aplicar bio-sensores o técnicas de inteligencia artificial en bio-procesos con un comportamiento no lineal. La fermentación ha sido uno de los procesos donde se han realizado diversos estudios y aplicaciones, principalmente enfocados al desarrollo de reactores bioquímicos centrados en la producción de levaduras y otros microorganismos relacionados con la industria farmacéutica.

La primera consideración a tener en cuenta en el control de un proceso fermentativo es evaluar la naturaleza del propio proceso que puede ser (Montague, 1988):

➤ Lote (*batch*).

Producciones aisladas de producto que normalmente son contenidas en un mismo recipiente donde realizan el proceso de fermentación sin ningún tipo de alimentación externa. Tan sólo se realiza el control sobre las condiciones óptimas de fermentación (pH, temperatura, concentración de biomasa, etc.)

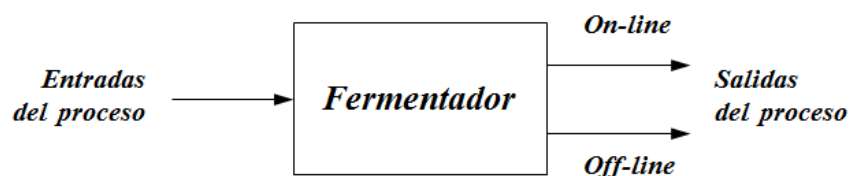
➤ Lote alimentado (*fed-batch*)

Se trata del mismo proceso anterior pero, además, el lote es alimentado desde el exterior con algún tipo de material que ayuda o hace posible la fermentación, tales como nutrientes, levaduras, enzimas, catalizadores, etc. En estos procesos, además de controlar los parámetros ópticos de fermentación, también es necesario controlar la adición de estos materiales y en algunos casos medir su concentración o efecto sobre el proceso.

➤ Continuo (*continuous*)

En este caso el proceso productivo se realiza de forma continua en el interior de un fermentador donde el flujo de entrada y salida de producto a fermentar es continuo, sin acumulación y ni reacción química estática, y donde se contempla un proceso dinámico de flujo de producto, flujo de material fermentativo, variables externas y parámetros internos de fermentación. Son los procesos más complejos de regular y controlar de forma automática, dada la elevada existencia de variables y perturbaciones externas.

Por otro lado, también es necesario establecer las entradas del proceso, así como las salidas on-line, medibles en tiempo real, y off-line, medibles mediante analíticas de laboratorio o expertos humanos. Estas consideraciones confieren al proceso de fermentación la siguiente estructura (figura 11):



On-line

*pH*  
*Temperatura*  
*Oxígeno disuelto*  
*Etc...*

Off-line

*Concentración de biomasa*  
*Concentración de sustrato*  
*Concentración de activadores*  
*Etc...*

Figura 11. Esquema básico de un proceso de fermentación industrial.

La complejidad del control de los procesos fermentativos radica básicamente en la regulación de los materiales de alimentación (adición de levaduras, catalizadores, etc.),

la consideración de los parámetros externos que pueden influir en el proceso (presión/temperatura ambiente, concentración de nutrientes, etc.), ser capaz de medir mediante biosensores los parámetros clave del proceso y, finalmente, controlar las variables que regulan de forma adecuada el proceso de fermentación (pH, temperatura, etc.). El éxito de un sistema de control de un proceso de fermentación dependerá de la capacidad que tenga éste para poder contemplar y manejar las condiciones expuestas anteriormente.

### **3.2. Control clásico en procesos de fermentación alcohólicos**

Dada la alta no linealidad de los procesos de fermentación alcohólica, además de la dificultad de disponer de biosensores *on line* fiables, hasta hace pocas décadas (años 80's), el único control posible para estos procesos era realizado *off line* a través de laboratorios o especialistas, que daban instrucciones a los operarios de la planta para tomar muestras y actuar en el propio proceso mediante apertura o cierre del sistema de refrigeración, adición de nutrientes, mezclas de productos, etc.

Sin embargo, a raíz de la aplicación generalizada de los controladores PID en la industria, así como del avance en la instrumentación industrial, este tipo de controladores, denominados actualmente como control clásico frente al control moderno y el control inteligente, se comenzaron a implantar en procesos de fermentación alcohólicos (vino, cerveza, cereales, etc.). De hecho actualmente es el sistema de control más usado en las industrias de fermentación alcohólica que poseen un elevado nivel de automatización. Sin embargo, en pequeñas y medianas industrias, que cuentan con un menor nivel de tecnificación, aún se sigue utilizando también de forma extendida el control *off line*.

#### **3.2.1. Controladores PID en el proceso de fermentación**

La estructura de un controlador PID es simple, lo que permite aplicarlo de forma satisfactoria en una amplia gama de procesos. Sin embargo está limitado el rango de plantas donde se puede aplicar este control de forma eficiente, principalmente a procesos lineales (Mazzone, 2002).

Consideremos inicialmente un lazo de control de una entrada y una salida, según se muestra en la figura 12:

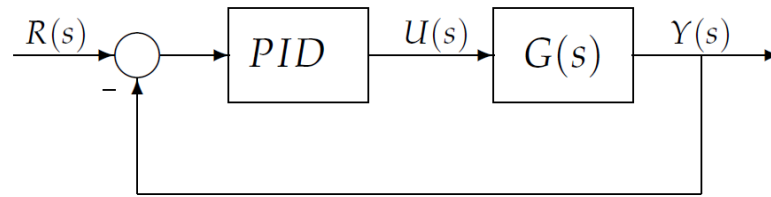


Figura 12. Diagrama de bloques de un lazo de control PID.

Los controladores PID incluyen tres acciones: proporcional (P), integral (I) y derivativa (D), siendo denominados P, PI, PD o PID en función de la acción de control que realicen (Morilla y Dormido, 2000).

**P. Acción de control proporcional.** Genera una salida del controlador que es proporcional al error,  $u(t) = KP.e(t)$ , cuya función transferencia sería:

$$C_p(s) = K_p \quad (3)$$

donde  $K_p$  es una ganancia proporcional ajustable. Un controlador proporcional puede controlar cualquier planta estable, pero no elimina el error en régimen permanente (*off-set*).

**I. Acción de control integral.** Genera una salida del controlador que es proporcional al error acumulado, lo que implica que es un modo de controlar lento.

$$u(t) = K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad C_i = \frac{K_i}{s} \quad (4)$$

La señal de control  $u(t)$  tiene un valor diferente de cero cuando la señal de error  $e(t)$  es cero. Por lo que, dada una referencia constante o perturbaciones, el error en régimen permanente es cero.

**PI. Acción de control proporcional-integral.** Se define mediante las siguientes ecuaciones, donde  $T_i$  es el tiempo integral, parámetro que ajusta la acción integral.

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau \quad C_{PI}(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (5)$$

Con un control proporcional es necesario que exista error para tener una acción de control distinta de cero. Con acción integral, un error pequeño positivo siempre generaría una acción de control creciente, y si fuera negativo la señal de control

sería decreciente. Esto muestra que el error en régimen permanente será siempre cero. Muchos controladores industriales tienen sólo acción PI.

**PD. Acción de control proporcional-derivativa.** Se define mediante las siguientes ecuaciones, donde  $T_d$  es una constante denominada tiempo derivativo. Esta acción tiene carácter de previsión, lo que hace más rápida la acción de control, aunque tiene la desventaja importante que amplifica las señales de ruido y puede provocar saturación en el actuador. La acción de control derivativa nunca se utiliza por sí sola, debido a que sólo es eficaz durante períodos transitorios.

$$u(t) = K_p e(t) + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad C_{PD}(s) = K_p + sK_p T_d \quad (6)$$

Cuando una acción de control derivativa se agrega a un controlador proporcional, permite obtener un controlador de alta sensibilidad, es decir, que responde a la velocidad del cambio del error y produce una corrección significativa antes de que la magnitud del error se vuelva demasiado grande. Aunque el control derivativo no afecta en forma directa al error de estado estacionario, añade amortiguamiento al sistema y, por lo tanto, permite un valor más grande que la ganancia  $K$ , lo cual provoca una mejora en la precisión en estado estable.

**PID. Acción de control proporcional-integral-derivativa.** Esta acción combinada reúne las ventajas de cada una de las tres acciones de control individuales. La ecuación de un controlador con esta acción combinada es la siguiente:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} ; C_{PID}(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (7)$$

Para ajustar las ganancias de un controlador PID se utilizan principalmente dos métodos: el *Método de Oscilación* o *Método de Respuesta en Frecuencia*, y el *Método Basado en la Curva Reacción* o *Método de Respuesta al Escalón* (Åström, y Hägglund, 2006). El primero se basa en un lazo de control sólo con ganancia proporcional y de acuerdo a la ganancia utilizada para que el sistema empiece a oscilar y al período de esas oscilaciones, se pueden establecer las ganancias del controlador PID. El otro método consiste en ensayar al sistema en lazo abierto con un escalón unitario, se calculan algunos parámetros como la máxima pendiente de la curva y el retardo, y con ellos se establecen las ganancias del controlador PID.

Por otro lado, en los sistemas de control con entrada escalón, debido a la presencia del término derivativo la variable manipulada  $u(t)$  contendrá una función impulso

(una delta). Para implementar esta acción en un controlador PID real, en lugar del término derivativo  $T_D s$  se empleará:

$$\frac{T_d s}{\tau_D s + 1} \quad (8)$$

donde  $\tau_D$ , se denomina constante de tiempo derivativa y normalmente es elegida tal que  $0.1 \leq \tau_D \leq 0.2$ . Cuanto más pequeña es  $\tau_D$ , mejor es la aproximación entre el término *derivativo filtrado* de la expresión anterior y el *derivativo*  $T_d s$ , es decir, son iguales en el límite:

$$\lim_{\tau_D \rightarrow 0} u_{PID}(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (9)$$

Con la inclusión de un polo se evita utilizar acciones de control grandes en respuesta a errores de control de alta frecuencia, tales como errores inducidos por cambios de *setpoint* o mediciones de ruido. El argumento clásico por el cual se elige  $\tau_D \neq 0$  es para atenuar ruido de alta frecuencia. Casi todos los controladores industriales PID definen a  $\tau_D$  como una fracción fija de  $T_d$ , en lugar de tomarlo como un parámetro independiente de diseño.

### 3.2.2. Dificultades del control PID en procesos fermentativos

El control de los procesos fermentativos mediante controladores PID presenta diversos inconvenientes que afectan al ajuste y funcionamiento del sistema. Como la mayoría de los bioprocesos, la fermentación alcohólica es un proceso con un elevado componente no lineal que dificulta la sintonización del controlador y reduce la estabilidad del sistema. Además posee otras circunstancias particulares que aún añaden mayores dificultades de control.

Los principales inconvenientes que presentan los controladores PID en los procesos fermentativos son:

- 1° Además de ser la fermentación alcohólica un proceso no lineal, su modelización matemática es muy compleja y no tiene en cuenta variables no controladas que tienen un impacto importante en el proceso, tales como la temperatura exterior, aislamiento térmico, cinética de la propia reacción de fermentación, concentración de azúcar, enzimas, etc. Esto hace prácticamente imposible sintonizar con cierto nivel de éxito el controlador

de forma teórica, así como su simulación mediante aplicaciones informáticas antes de su puesta en funcionamiento. Esta circunstancia obliga a ajustar el controlador de forma experimental lo que genera el siguiente inconveniente.

- 2° La sintonización manual del controlador PID en un proceso de fermentación alcohólica se dificulta por el hecho de que dicho proceso tiene lugar durante tan solo de 15 a 20 días al año, y cada lote tarda unos 6 días en completar el ciclo. Es decir, un prototipo o sistema de control particular sólo puede probarse 2 veces en una misma campaña. Por otro lado las variables externas que pueden llegar a actuar en el proceso pueden no darse todas en una sola campaña, por lo que no pueden ajustarse o probarse los ajustes para tener en cuenta dichos cambios. Finalmente, la elevada inercia térmica de la masa de mosto en fermentación dificulta la interpretación de la respuesta del sistema y su parametrización.
- 3° Los actuales sistemas de control no tienen en cuenta la concentración de azúcar durante el proceso completo de fermentación y, por lo general, sólo se monitoriza y se controla *on line* la temperatura de la masa de mosto, estableciendo un único *setpoint* de temperatura en el PID para todo el proceso. Esto puede originar paradas al inicio o al final de la fermentación, dejando restos de azúcares residuales que necesitan un posterior reprocesado con elevados costes económicos para la empresa o bien, en el peor de los casos imposibilitando su uso adecuado en la bodega, siendo necesario destinar el lote defectuoso como subproducto con la correspondiente pérdida económica.

En definitiva, el proceso de ajuste del controlador PID en un proceso de fermentación alcohólica es complejo y no se puede garantizar el encontrar los parámetros adecuados para mantener en todo momento el sistema estable y con una buena respuesta. En la práctica esto obliga a seguir manteniendo costosos controles *off line* de laboratorio durante todo el proceso que eviten defectos irreversibles que puedan generar un elevado impacto económico.

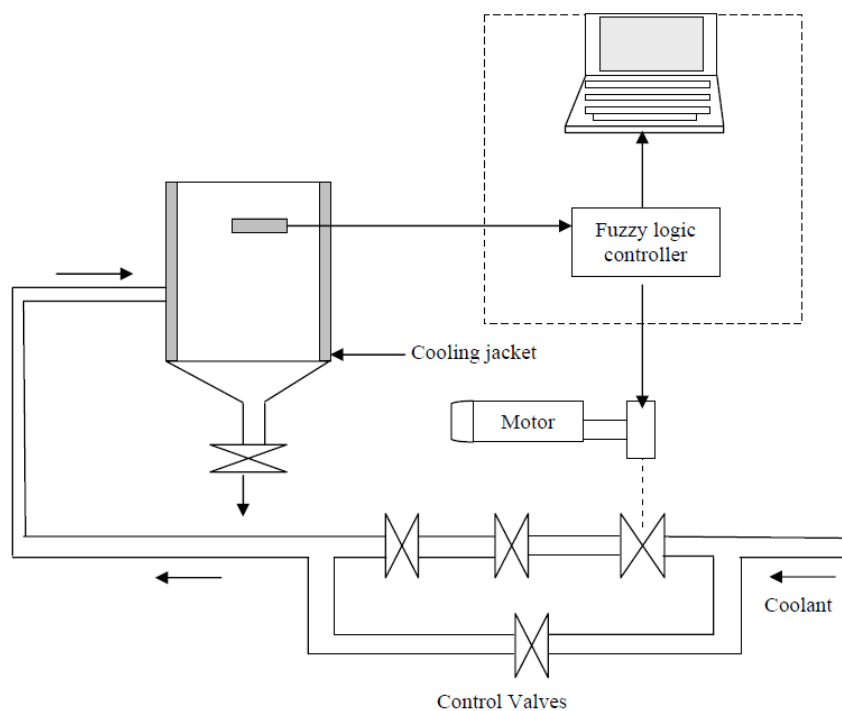
### **3.3. Técnicas de Inteligencia Artificial en procesos de fermentación alcohólicos**

No existen muchas aplicaciones ni literatura científica donde se aborden aplicaciones de la inteligencia artificial (IA) en procesos de fermentación alcohólica. Los más relevantes

son una aplicación para optimizar el proceso de fermentación alcohólica en la elaboración de cerveza mediante lógica fuzzy (Osofisan, 2007) y el desarrollo de un sistema de control de fermentación alcohólica basado en biosensores gestionados por redes neuronales (Souza, 2001).

En el primer caso se realiza un trabajo teórico de investigación para optimizar el proceso de fermentación de cerveza mediante la aplicación de un controlador basado en lógica *fuzzy*. En este caso, aplicado específicamente en una planta de Guinness Plc, el controlador se ha diseñado para mantener la temperatura de fermentación en 16°C, siendo simulado con la herramienta de lógica fuzzy de *Matlab*.

En esta aplicación el controlador borroso acciona la válvula de refrigerante del sistema de control de temperatura de fermentación. La apertura y cierre de dicha válvula es directamente controlada por un servomotor acoplado a una válvula servo-controlada según se puede observar en la figura 14 donde se describe el diagrama del proceso.



*Figura 13. Diagrama del control de temperatura del proceso de fermentación de cerveza.*

En esta aplicación la sintonización de la matriz de reglas del controlador borroso es obtenida simulando la respuesta. Sin embargo no hay referencias a datos reales sobre procesos industriales, o bien a ensayos o prototipos desarrollados al menos de forma experimental.

En el segundo artículo se aborda el desarrollo de un sistema de control de fermentación alcohólica basado en biosensores gestionados por redes neuronales. Parte del uso de biosensores como instrumentos para medir *on line* concentraciones y valores analíticos presentes en un bioreactor, lo que conlleva ciertas dificultades debido a la respuesta no lineal a diferentes concentraciones de sustrato.

Por otro lado, la frecuencia de muestreo usada, basada en la tecnología de análisis de inyección de flujo (FIA), provee señales discretas sin tener en cuenta los picos existentes en diferentes momentos puntuales del proceso (figura 15). El objetivo de este segundo estudio es anticipar y sugerir soluciones a las dificultades que se producen en el uso de biosensores en la monitorización y control de procesos de fermentación.

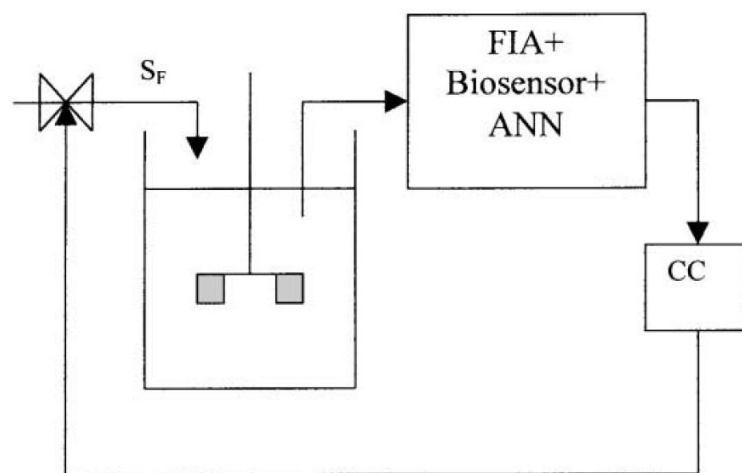


Figura 14. Esquema usado en la simulación de la fermentación de un lote.

Para ello, se realizan dos aproximaciones. En primer lugar se analiza la capacidad de las redes artificiales neuronales para interpretar las señales de los biosensores, donde se utilizan datos de biosensores de sacarosa y glucosa. Y, por otro lado, se simula el uso de biosensores en el control de la fermentación alcohólica mediante un controlador PI.

Se concluye en este estudio que las redes neuronales son una herramienta adecuada para correlacionar las señales de biosensores en la medición de las concentraciones de azúcar, como alternativa a los controladores convencionales realimentados. En este estudio, el uso de la técnica de inteligencia artificial se basa en el uso de redes neuronales para interpretar o predecir las señales de los biosensores, pero no propiamente en el sistema de control, donde utiliza un tradicional controlador PI.

### 3.4. Técnicas de control usadas en bio-procesos y reactores biológicos

En las últimas décadas sí se han aplicado de forma más extendida técnicas de inteligencia artificial en el campo de la biotecnología, fundamentalmente en la industria farmacéutica para la elaboración de medicamentos y en la industria alimenticia para la elaboración de levaduras como base de otros alimentos. Anterior al uso de las técnicas de inteligencia artificial en estos sectores, se usaba como método científico de ajuste y control de los procesos el *Diseño de Experimentos*. Este método, basado en las relaciones matemáticas y estadísticas de las principales variables que intervienen en un determinado proceso industrial, permite hallar de forma experimental un modelo básico del proceso que posteriormente posibilita optimizar los parámetros del mismo y mejorar su estabilidad, rendimiento y fiabilidad. Sin embargo este método requiere de controles *off line* y no tiene en cuenta variables externas al proceso que pueden intervenir en el mismo de forma puntual, desequilibrando ocasionalmente el sistema de control (Alford, 2006).

Principalmente las técnicas de IA en biotecnología se aplican para el control de bioreactores en los cuales se desea hallar y mantener unas condiciones óptimas para el crecimiento y multiplicación de microorganismos que producen un determinado efecto o producto. En este caso, las dificultades para el sistema de control, como ocurre de forma generalizada en el control de bio-procesos, se encuentran en la variabilidad de los procesos, la complejidad de los sistemas biológicos, la operación bajo ambientes estériles y a veces peligrosos, y la necesidad de disponer de biosensores que realicen mediciones *on line* fiables. La mayoría de estos procesos presentan una tipología productiva *fed-batch*, en la cual se fabrican lotes de producto de forma aislada pero con alimentación externa de material que soporte o permita la reacción bioquímica (Hoiruichi, 2002).

Para estos procesos la técnica de IA más usada es la lógica difusa, normalmente con la determinación de las matrices de reglas de forma experimental por expertos en los diferentes procesos que posteriormente se aplican al controlador del sistema. También existen diversas aplicaciones que utilizan las redes neuronales cuya función principal, como ya se comentó en una de las aplicaciones del apartado anterior, es la interpretación de diferentes biosensores para predecir el comportamiento de determinadas variables de salida del proceso. Aunque con menor uso, también existen algunos estudios y aplicaciones de control adaptativo para reducir las oscilaciones observadas en los controladores difusos convencionales.

Una de las aplicaciones específicas de IA en la industria biotecnológica se encuentra en la producción de levaduras de panificación bajo sistemas *fed-batch*, donde se usa un

controlador difuso para el control del proceso de fermentación y redes neuronales para la interpretación de los biosensores del proceso (Karakuzu, 2005). En la figura 15 se describe el diagrama de bloques del proceso de elaboración de levaduras de panificación objeto de la anterior aplicación.

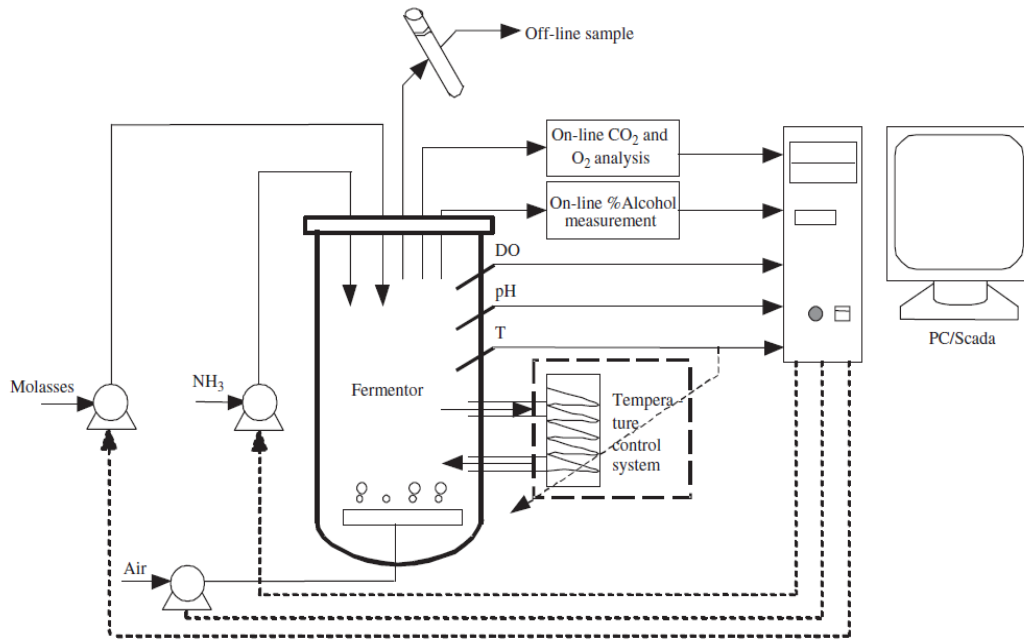


Figura 15. Estructura básica del proceso de fabricación de levaduras de panificación.

En la figura 16 se puede observar el esquema del controlador *fuzzy* y la estructura de la red neuronal usada para los biosensores:

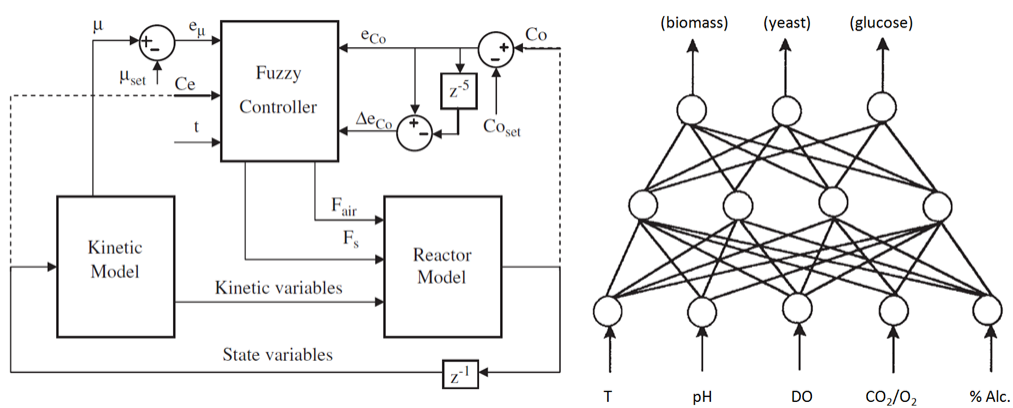


Figura 16. Esquema del controlador difuso y la red neuronal de biosensores.

Otra aplicación interesante es el uso de controladores difusos de tipo 2 (T2FLCs) para el control de un bioreactor de tipo *fed-batch* para la producción de penicilina, en cuyo estudio se comparan también los resultados obtenidos frente a controladores de tipo 1,

demostrando la mayor robustez del tipo 2 a variables no lineales, parámetros inciertos o ruido del sistema (Galluzzo, 2010). Aplicaciones similares se han llevado a cabo para la producción y cultivo de levaduras *Saccharomyces cerevisiae*, donde además se usan redes neuronales (Shimizu, 1996), y la producción de penicilina mediante fermentación usando también la técnica de control adaptativo para el control de la alimentación de sustrato (Bastin y Van Impe, 1995).

## **Capítulo 4**

# **MODELADO DEL PROCESO DE FERMENTACIÓN**

### **4.1. Proceso de fermentación y control por refrigeración**

Durante la fermentación alcohólica se genera una reacción exotérmica con un ratio medio de emisión de calor de 14,1 kCal por cada 100 g de azúcar reductor fermentado (Peynaud, 2006). Esta reacción que se produce durante todo el proceso debido a la transformación del azúcar en alcohol, contribuye a elevar de forma significativa la temperatura del mosto en fermentación. Si la temperatura alcanza valores elevados se puede parar la reacción enzimática que interviene en el proceso de fermentación, lo que ocasionaría dejar azúcares residuales en el mosto. Estos azúcares residuales necesitan posteriormente costosos re-procesos, o aún más grave, hacer imposible el uso del mosto esperado en la bodega. Por ello es necesario controlar la temperatura durante el proceso de fermentación mediante sistemas adecuados de refrigeración.

Es importante vigilar la temperatura de fermentación no sólo en valores altos, sino también en valores bajos. Valores excesivamente bajos, principalmente en el inicio y final de la fermentación, pueden provocar una inhibición del proceso evitando el inicio del mismo o la parada antes de completar el consumo de azúcar, lo que volvería a generar el problema comentado anteriormente.

En la actualidad, los mostos fermentan en depósitos de acero inoxidable provistos de algún sistema de intercambio propio para poder circular un líquido refrigerante (agua o glicol) a través de dicho depósito y enfriar así la masa de mosto. Existen básicamente los siguientes modelos de depósitos de fermentación en el mercado:

- a) Ducha exterior.
- b) Camisa exterior.
- c) Serpentín o intercambiador interior.
- d) Mixto con ducha o camisa exterior e intercambiador interior.

Es conveniente iniciar el proceso de refrigeración desde el comienzo de la fermentación, ya que debido a su gran inercia térmica, es muy difícil y costoso enfriar la masa de mosto una vez se encuentre en la fase tumultuosa (Troost, 1985). En la figura 17 se puede observar un esquema simple de refrigeración de un depósito de fermentación de mosto usando un sistema de intercambiador interno:

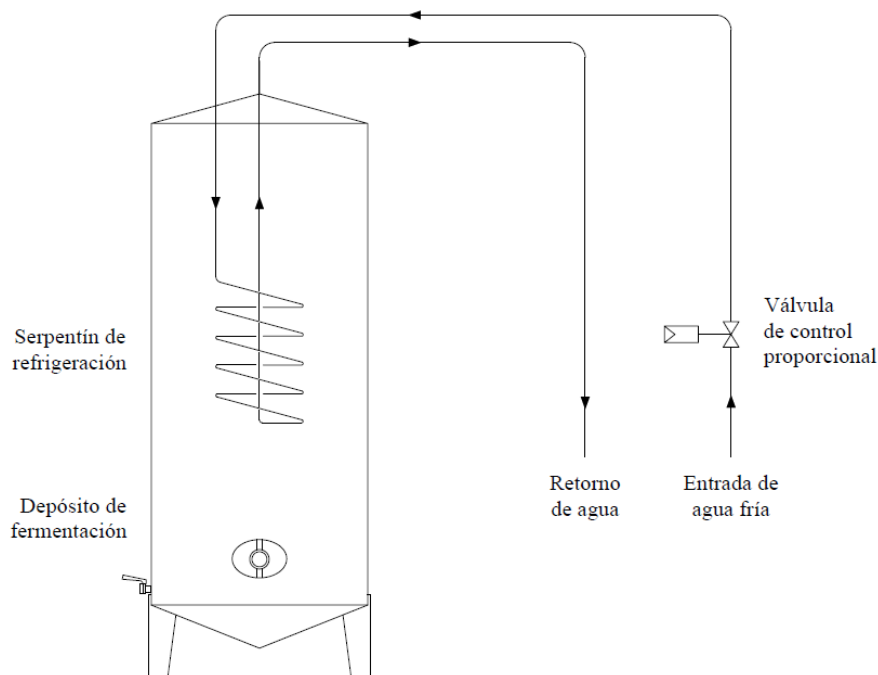


Figura 17. Refrigeración de un depósito de fermentación mediante intercambiador interior.

Realmente las necesidades de frío son diferentes en cada fase del proceso y las condiciones de control de temperatura tendrían que tenerlo en cuenta. La emisión de calor es distinta durante la fermentación, ya que la tasa de transformación alcohólica varía durante el proceso.

Por otro lado, la temperatura óptima de control también depende de la fase fermentativa, es decir, se requiere un valor medio de  $24^{\circ}\text{C}$  en la fase de inducción para permitir el inicio de la fermentación, pero con un valor no demasiado alto que permita bajarlo rápidamente en la siguiente etapa. En la fase tumultuosa, donde la reacción exotérmica es más vigorosa, el valor idóneo pasa a  $22^{\circ}\text{C}$ , no debiendo bajar de  $20^{\circ}\text{C}$  que podrían inhibir el metabolismo de las enzimas que hacen posible la fermentación. Finalmente, durante la fase final o lenta, se requiere un valor de  $26^{\circ}\text{C}$  que asegure una completa fermentación del mosto para evitar dejar restos residuales de azúcar.

Como ya se ha expuesto ampliamente en el capítulo 3, tradicionalmente los procesos de fermentación han sido controlados por reguladores PID clásicos programados con un *setpoint* fijo de temperatura. Estos sistemas tan solo requieren de un termopar o sensor de temperatura de salida analógica instalado en el depósito de fermentación y conectado eléctricamente al controlador PID. Los inconvenientes de dichos sistemas de control son que únicamente permiten un valor de control o *setpoint* para todo el proceso y, además, no tiene en cuenta la fase en la que se encuentra la fermentación.

Para mejorar este sistema es necesario que el controlador conozca en todo momento la fase del proceso de fermentación, lo que podría ser proporcionado a través de la medida directa del grado alcohólico o la concentración de azúcar. Sin embargo, no existen apenas en el mercado biosensores que puedan suministrar directamente de forma continua algunas de las medidas anteriores. Los más adecuados son instrumentos que determinan en tiempo real la densidad de un líquido o incluso la concentración de azúcar, pudiendo configurar las unidades de medida según requiera el usuario ( $\text{g/cm}^3$ ,  $\text{kg/m}^3$ , Brix, Baumé,...), suministrando normalmente una salida analógica de 0-10V ó 4-20mA al sistema de control. Estos equipos están provistos de fábrica con sensores internos de temperatura para realizar compensación de temperatura.

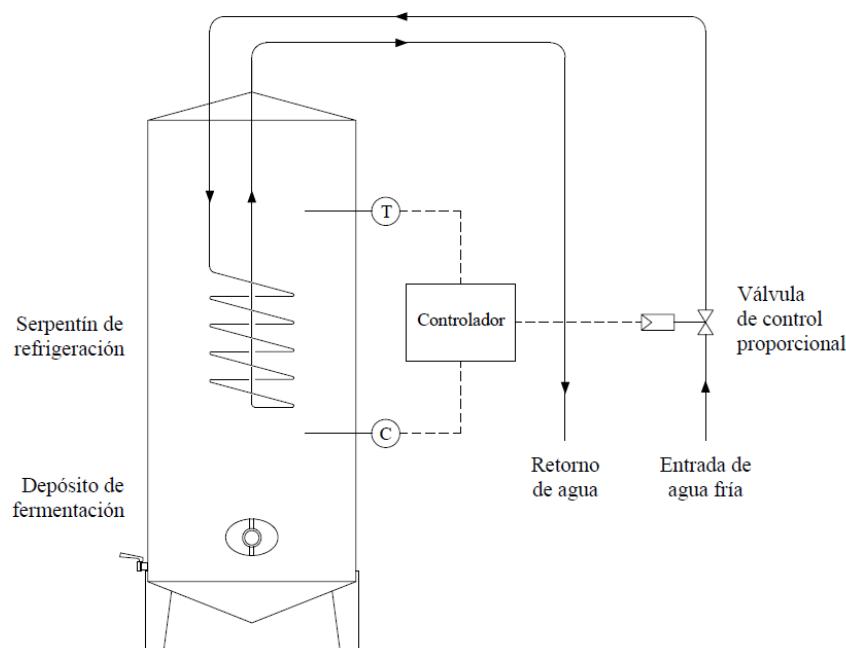


Figura 18. Sistema de control dual propuesto monitorizando temperatura y concentración.

En la figura 18 se puede observar un sistema dual de control de temperatura de fermentación, donde el controlador del proceso tiene en cuenta tanto la temperatura  $T$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) como la concentración  $C$  expresada en gramos/litro.

La modelización del sistema de control teniendo en cuenta todas sus variables y haciendo uso de un sistema de control clásico es muy compleja y, en muchos casos, incapaz de adaptarse a las variables o parámetros variables, además de la dificultad de operar en tiempo real. Por ello este proceso de fermentación es potencialmente un candidato para aplicarle un sistema de control inteligente.

## 4.2. Parametrización del proceso

El proceso de fermentación previamente descrito se encuentra parametrizado empíricamente a través de datos experimentales ya que, debido a la gran cantidad de variables que pueden influir en el sistema, resulta verdaderamente complejo establecer un modelo matemático preciso del mismo. Actualmente no se encuentran disponibles modelos matemáticos que describan analíticamente el proceso de fermentación de forma completa, aunque sin embargo sí existen numerosos estudios experimentales que detallan su comportamiento y que nos van a permitir generar un modelo al menos de alguno de los procesos que tienen lugar durante la fermentación.

En la figura 19 se muestra una curva experimental que refleja la evolución media de la concentración de azúcar,  $C_a$ , medida en g/L, en función del tiempo (Caro, 1989). Esta gráfica representa por sí misma las distintas fases del proceso fermentativo y como variable del sistema será de vital importancia para el sistema de control.

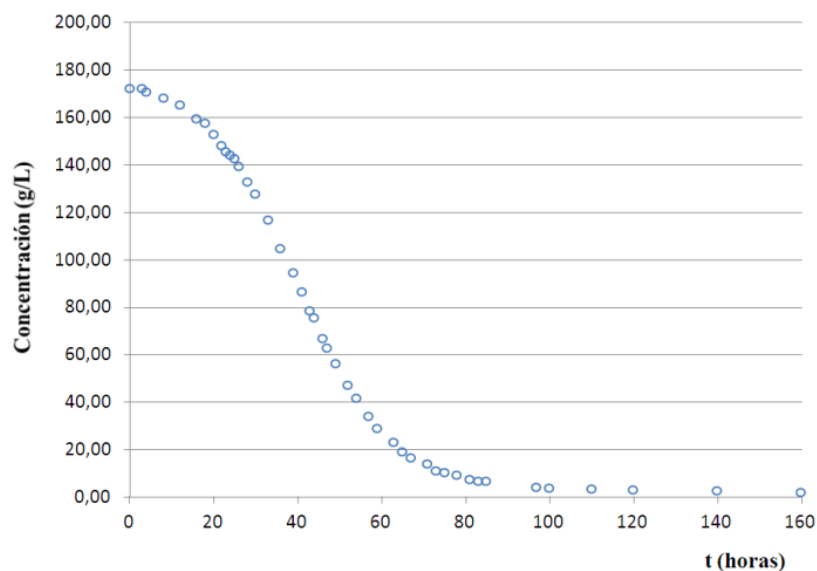


Figura 19. Evolución de la concentración de azúcar durante el proceso de fermentación.

En la figura 20 puede observarse, sobre la curva anterior, las distintas fases que componen el proceso de fermentación y que serán identificadas posteriormente en el algoritmo de control, así como la función obtenida por regresión logística de los datos experimentales.

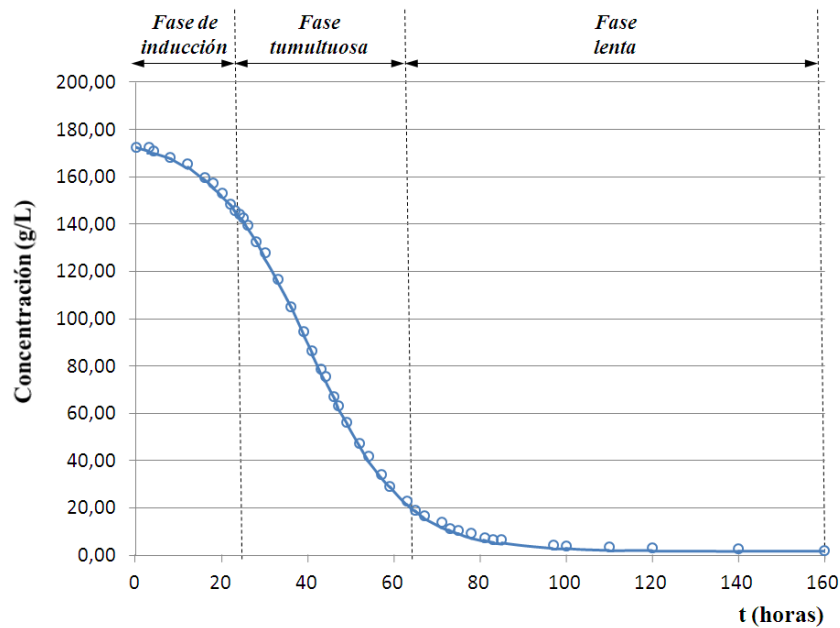


Figura 20. Fases del proceso de fermentación.

Dicha función se corresponde con la siguiente expresión, siendo  $C_a$  la concentración de azúcar en g/L:

$$C_a = 175 \cdot \frac{e^{(2,9-0,09t)}}{0,5 + e^{(2,9-0,09t)}} + 2 \quad (10)$$

Por otro lado también podemos observar en la figura 21 la cantidad de calor emitida por la reacción exotérmica,  $Q_f$ , en kCal/h por litro.

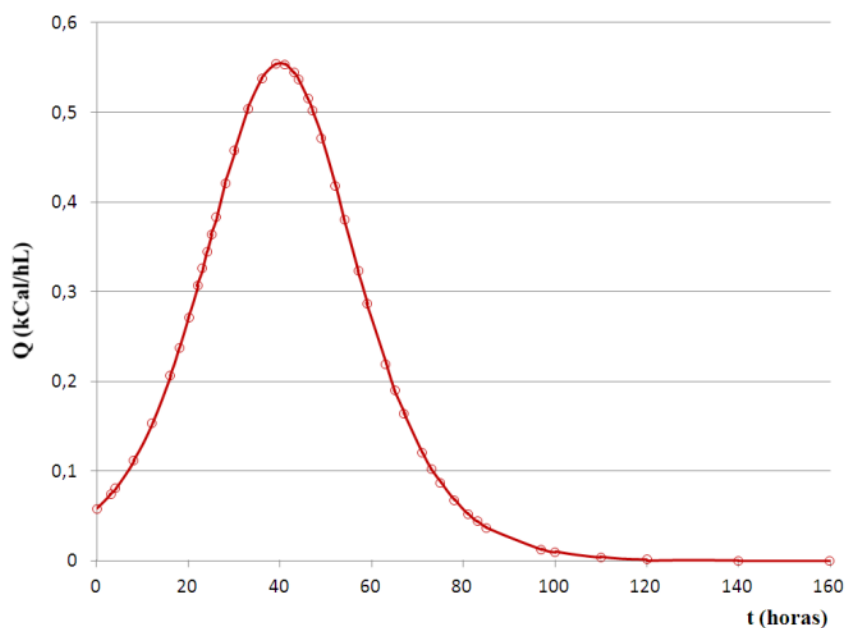


Figura 21. Calor emitido durante el proceso de fermentación en función del tiempo por unidad de volumen.

Esta función que representa la variación de calor emitido durante el proceso de fermentación por unidad de volumen,  $Q_f$ , puede obtenerse derivando la expresión de la concentración  $C_a$  en función del tiempo, sabiendo que se generan 14,1kCal por cada 100 gramos de azúcar fermentado, siendo  $V$  el volumen total de mosto en litros:

$$\frac{dQ_f}{dt} = -0,141 V \frac{dC_a}{dt} = \frac{1,1104 V e^{(2,9-0,09t)}}{(0,5 + e^{(2,9-0,09t)})^2} \quad (11)$$

O bien se puede expresar en función de la concentración de azúcar, más útil para posteriormente optimizar los parámetros de ajuste del sistema de control. Para ello se sustituye la variable  $x$  en la expresión de la concentración  $C_a$  y la variación de calor  $Q_f$ :

$$x = e^{(2,9-0,09t)} \quad (12)$$

$$C_a = 175 \cdot \frac{x}{0,5 + x} + 2 \quad (13)$$

$$x = \frac{0,5C_a - 1}{177 - C_a} \quad (14)$$

$$\frac{dQ_f}{dt} = \frac{1,1104 V x}{(0,5 + x)^2} = \frac{1,1104 V \frac{0,5C_a - 1}{177 - C_a}}{\left(0,5 + \frac{0,5C_a - 1}{177 - C_a}\right)^2} \quad (15)$$

Despejando esta última ecuación se obtiene la expresión de la variación de calor de fermentación en función de la concentración de azúcar:

$$\frac{dQ_f}{dt} = (-7,22 \cdot 10^{-5} C_a^2 + 1,293 \cdot 10^{-2} C_a - 2,558 \cdot 10^{-2}) V \quad (16)$$

La figura 22 muestra gráficamente dicha relación, considerando que las unidades de las variables corresponden con las indicadas en la gráfica.

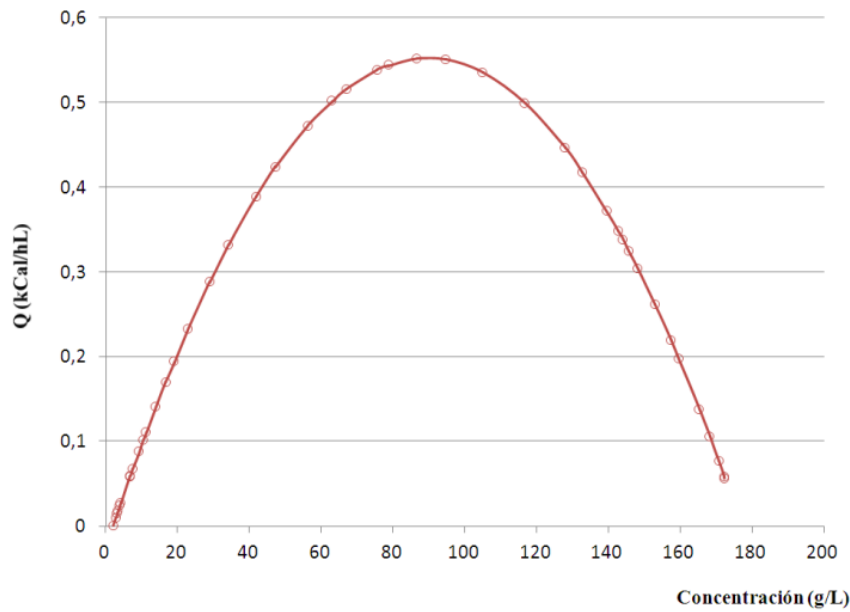


Figura 22. Calor emitido durante la fermentación en función de la concentración de azúcar por unidad de volumen.

### 4.3. Modelización del proceso

Para simular y optimizar posteriormente el sistema de control es necesario desarrollar un modelo matemático del proceso que exprese la temperatura interna del mosto,  $T$ , en función del caudal de refrigeración  $q_r$ , es decir:

$$T = T(q_r) \quad (17)$$

Partiendo de la ecuación del balance macroscópico de energía del proceso de fermentación, en la que  $Q_m$  es el calor acumulado en el mosto,  $Q_f$  es el calor producido por la fermentación, y  $Q_r$  es calor disipado por el sistema de refrigeración, despreciando en la ecuación el calor disipado por las paredes del depósito al exterior, se tiene que (Caro, 1989):

$$Q_m = Q_f - Q_r \quad (18)$$

Tomando la expresión diferencial de la ecuación 18 se determina la variación de calor por unidad de tiempo:

$$\frac{dQ_m}{dt} = \frac{dQ_f}{dt} - \frac{dQ_r}{dt} \quad (19)$$

Por otro lado, la variación del calor acumulado  $Q_m$  en el interior del mosto se expresa mediante la ecuación fundamental de intercambio de calor:

$$\frac{dQ_m}{dt} = m_m c_m \frac{dT}{dt} \quad (20)$$

donde,

- $m_m$  Masa de mosto (kg)
- $c_m$  Calor específico del mosto (kCal/kg°C)
- $T$  Temperatura del mosto (°C)

La expresión de la variación del calor producido por la fermentación  $Q_f$  en función de la concentración de azúcar  $C_a$  se determinó en el apartado anterior por la ecuación 16:

$$\frac{dQ_f}{dt} = Q_f(C_a) \quad (21)$$

La variación del calor disipado por el sistema de refrigeración  $Q_r$  puede ser expresado en función de la superficie de contacto, o bien, por el caudal del líquido refrigerante:

$$\frac{dQ_r}{dt} = U A \Delta T_r = K \rho_r q_r c_r \Delta T_r \quad (22)$$

donde,

- $U$  Coeficiente de transmisión (kCal/°C h m<sup>2</sup>)
- $A$  Área de intercambio (m<sup>2</sup>)
- $\Delta T_r$  Gradiente de temperatura del refrigerante (°C)
- $K$  Coeficiente de intercambio (adimensional)
- $\rho_r$  Densidad del líquido refrigerante (kg/m<sup>3</sup>)
- $q_r$  Caudal del líquido refrigerante (m<sup>3</sup>/h)
- $c_r$  Calor específico del refrigerante (kCal/kg °C)

Puesto que el sistema de control regula el caudal de refrigeración mediante la válvula proporcional, se utilizará la segunda expresión en función de  $q_r$ .

$$\frac{dQ_r}{dt} = K \rho_r q_r c_r \Delta T_r = K \rho_r q_r c_r (T_{2r} - T_{1r}) \quad (23)$$

donde,

- $T_{1r}$  Temperatura de entrada del refrigerante (°C)
- $T_{2r}$  Temperatura de salida del refrigerante (°C)

Suponiendo que el serpentín o intercambiador están lo suficientemente bien dimensionados para permitir una eficiente transmisión de calor entre el mosto y el líquido refrigerante, se puede considerar que la temperatura de salida del mismo,  $T_{2r}$  coincide con la temperatura del mosto,  $T$ . Por otro lado, para simplificar la notación, también se considerará la temperatura de entrada del refrigerante,  $T_{1r}$  como la temperatura de refrigeración,  $T_r$ .

$$T = T_{2r} \quad (24)$$

$$T_r = T_{1r} \quad (25)$$

Por lo tanto, la ecuación que representa el modelo matemático del proceso de fermentación tendría la siguiente expresión:

$$m_m c_m \frac{dT}{dt} = Q_f(C_a) - K \rho_r q_r c_r (T - T_r) \quad (26)$$

En la ecuación 26,  $T$  representa la variable de estado a controlar, y  $q_r$  la variable de control. Esta expresión es claramente una función no lineal, ya que contiene un término en el cual aparecen multiplicándose el vector de la variable de estado y la variable de control.

Las funciones no lineales tienen una resolución compleja y no pueden ser expresadas directamente en el dominio de *Laplace*, lo que dificulta la simulación de su comportamiento dinámico, necesario en las fases de diseño y optimización del controlador del proceso.

En forma general, una función no lineal se puede aproximar a una lineal en torno a un punto,  $x_0$  mediante una expansión en series de *Taylor*. Esta técnica de *linealización* se puede expresar de forma general como (Ogata, 2003):

$$f(x) = f(x_0) + \left( \frac{\partial f(x)}{\partial x} \right)_{x_0} (x - x_0) + \frac{1}{2!} \left( \frac{\partial^2 f(x)}{\partial x^2} \right)_{x_0} (x - x_0)^2 + \dots \quad (27)$$

y despreciando los términos superiores a uno, se obtiene una simplificación lineal de la función no lineal dada por:

$$f(x) = f(x_0) + \left( \frac{\partial f(x)}{\partial x} \right)_{x_0} (x - x_0) + \dots \quad (28)$$

Para funciones no lineales con dos o más variables, como el caso del presente estudio, se puede generalizar la serie de *Taylor*:

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = f(x_{01}, x_{02}, \dots, x_{0n}) + \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial f(x_1, x_2, \dots, x_n)}{\partial x_i} \right)_{x_{0i}} (x_i - x_{0i}) \quad (29)$$

Por lo tanto la función no lineal del proceso de fermentación alcohólica se puede *linealizar* alrededor de un punto de equilibrio.

Para determinar el punto de equilibrio del proceso,  $(q_0, T_0)$ , se establece inicialmente como temperatura de equilibrio la de consiga durante la fase tumultuosa, es decir,  $T_0 = T_a = 22^\circ\text{C}$ . Por otro lado, el caudal en el punto de equilibrio  $q_0$ , se determinará para las condiciones del sistema dinámico en equilibrio:

$$\frac{dT}{dt} = 0 \quad (30)$$

$$0 = Q_f(C_a) - K \rho_r q_r c_r (T_0 - T_r) \quad (31)$$

$$q_0 = \frac{Q_f(C_a)}{K \rho_r c_r (T_0 - T_r)} \quad (32)$$

Desarrollando la serie de *Taylor* en el punto de equilibrio  $x_0 \equiv (q_0, T_0)$ , se obtiene la linealización de la función en dicho punto:

$$m_m c_m \frac{dT}{dt} = f(q_r, T) = f(q_0, T_0) + \left( \frac{\partial f(q_r, T)}{\partial q_r} \right)_{x_0} (q_r - q_0) + \left( \frac{\partial f(q_r, T)}{\partial T} \right)_{x_0} (T - T_0)$$

$$m_m c_m \frac{dT}{dt} = Q_f(C_a) - K \rho_r q_0 c_r (T_0 - T_r) - K \rho_r c_r (T_0 - T_r) (q_r - q_0) - K \rho_r q_0 c_r T_0 (T - T_0)$$

$$m_m c_m \frac{dT}{dt} = Q_f(C_a) + K \rho_r c_r q_r (T_r - T_0) - K \rho_r q_0 c_r T \quad (33)$$

Siendo esta última ecuación la que representa el modelo del sistema físico del proceso de fermentación, con  $T$  la variable de estado,  $q_r$  la variable de control y  $Q_f$  la perturbación del proceso.

Finalmente, para poder simular posteriormente la respuesta del modelo en el dominio de *Laplace*, será necesario determinar las funciones de transferencia que responden a un sistema de primer orden con doble entrada:

$$\tau \frac{dy}{dt} + y = k_1 u + k_2 v \quad (34)$$

Donde  $y$  representa la variable de estado,  $u$  la variable de control,  $v$  la perturbación del proceso,  $k_1$  se denomina la ganancia del proceso,  $k_2$  la ganancia de la perturbación y  $\tau$  es la constante de tiempo del sistema. Las funciones de transferencia de este modelo corresponderían a  $G_1(s)$  para la temperatura y a  $G_2(s)$  para la perturbación.

$$G_1(s) = \frac{k_1}{\tau s + 1} \quad (35)$$

$$G_2(s) = \frac{k_2}{\tau s + 1} \quad (36)$$

Ordenando la expresión 33 que representa el proceso de fermentación, se obtiene:

$$\frac{m_m c_m}{K \rho_r q_0 c_r} \frac{dT}{dt} + T = \frac{(T_r - T_0)}{q_0} q_r + \frac{1}{K \rho_r q_0 c_r} Q_f(C_a) \quad (37)$$

$$\tau \frac{dT}{dt} + T = k_1 q_r + k_2 Q_f(C_a) \quad (38)$$

donde,

$$\tau = \frac{m_m c_m}{K \rho_r q_0 c_r} \quad (39)$$

$$k_1 = \frac{(T_r - T_0)}{q_0} \quad (40)$$

$$k_2 = \frac{1}{K \rho_r q_0 c_r} \quad (41)$$

# Capítulo 5

## DISEÑO DEL CONTROLADOR BORROSO

### 5.1. Lógica difusa

La lógica difusa es una disciplina que proviene de la matemática y de la inteligencia artificial, y que ha sido muy utilizada en el ámbito de la ingeniería de control. A diferencia de la lógica clásica, donde se estudian los principios y los patrones del razonamiento deductivo con estrictas reglas y teoremas, la lógica difusa establece un modelo heurístico que permite obtener patrones de inferencia con afirmaciones lingüísticas (Zadeh, 1994).

La lógica difusa usa razonamientos con incertidumbre, expresiones heurísticas, vaguedad e imprecisión; es una lógica multivalente, cercana al lenguaje natural utilizado por el ser humano. Esta lógica es útil en procesos complejos, con dificultad para estimar de forma precisa los parámetros o para obtener medidas precisas de los sensores, falta de fiabilidad o en ambientes ruidosos, etc. (Santos, 2011).

El uso de la heurística dentro en la lógica difusa en forma de reglas puede complementar y mejorar el comportamiento de un algoritmo de control. Las reglas que involucran los esquemas de razonamiento de un operador de control experto, la heurística, no puede ser transferida o implementada, al menos de manera directa, en forma de reglas según la lógica bivalente y la teoría clásica de conjuntos. En este caso, la experiencia de un experto puede ser recogida en un conjunto de reglas cualitativas, denominadas matrices de reglas, que formarán parte de la base de conocimientos del sistema borroso (Dormido, Santos y Morilla, 1993).

Teniendo en cuenta los principios de la lógica difusa se puede diseñar un controlador borroso para un determinado proceso aplicando dichos principios y reglas heurísticas. En la figura 23 se muestra la configuración básica de un controlador borroso donde pueden distinguirse los cuatro componentes fundamentales (Reyero y Nicolás, 1995).

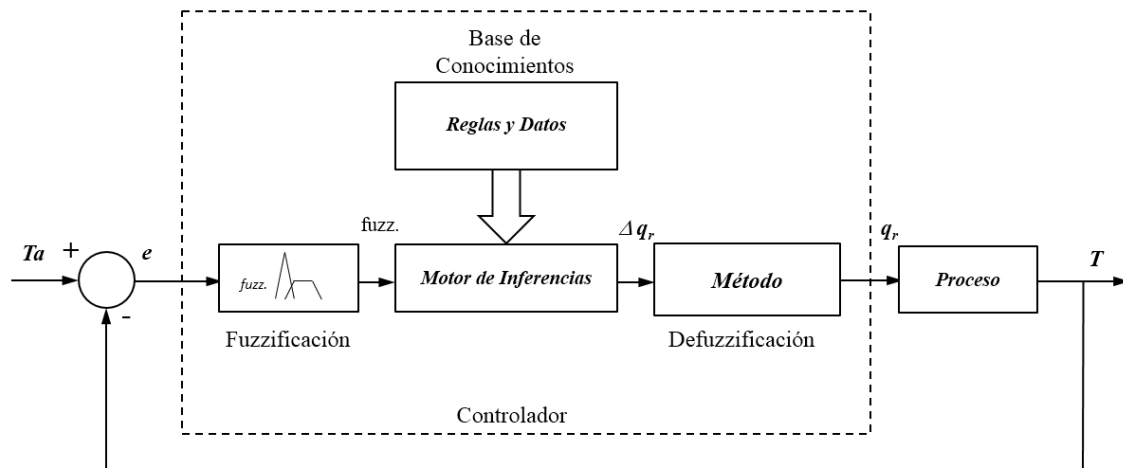


Figura 23. Diagrama del controlador borroso del proceso.

A continuación se describen los cuatro módulos principales que constituyen un controlador borroso (Reyero et al., 1995).

**1. Fuzzificación.** Realiza un escalado de los valores de entrada para adecuarlos al universo de discurso del controlador borroso (generalmente una normalización), y posteriormente una *fuzzificación* por la que convierte los datos de entrada (valores analíticos, *crisp*) en valores lingüísticos adecuados para su manipulación por el motor de inferencia difuso. Este bloque asigna a cada valor de cada variable de entrada un grado de pertenencia a cada uno de los conjuntos difusos, previamente definidos mediante funciones características denominadas funciones de pertenencia y una etiqueta asociada.

**2. Base de conocimientos.** Está formada por la “base de datos”, que recoge la definición de los conjuntos borrosos asociados a las variables, es decir, las funciones de pertenencia y sus correspondientes etiquetas. Además incluye la “base de reglas”, que caracteriza y resume la política y objetivos del control de un experto por medio de un conjunto de reglas lingüísticas del tipo “*if...then...*”. Estas reglas relacionan los antecedentes con una salida que será la acción de control. El conjunto de reglas debe ser definido por la experiencia u observación de un experto del proceso.

**3. Motor de Inferencias.** Obtendrá las acciones de control difuso empleando la implicación difusa. La etapa de inferencia relaciona los conjuntos difusos de entrada y salida de acuerdo a las reglas que rigen el sistema y deduce una conclusión.

**4. Defuzzificación.** Convertirá la acción difusa de control inferida en una acción concreta susceptible de aplicación sobre el proceso, y realizará un escalado para adecuarla a los rangos de salida para los que se ha definido el controlador. Esta *defuzzificación* se realiza a través de métodos matemáticos que permiten obtener un valor concreto de la salida. Algunos de los métodos más utilizados son:

- Método de máxima pertenencia: Es el valor que alcance un mayor grado de pertenencia en el conjunto borroso de salida.
- Método del centro de gravedad o centro del área: Se calcula como el centro de gravedad del conjunto borroso de salida. Es el más utilizado porque promedia y produce una acción suave.
- Otros métodos como el promedio de los máximos, el bisector, etc.

## 5.2. Diseño del controlador borroso

El objetivo del controlador borroso para este proceso concreto es mantener la temperatura óptima del mosto en fermentación en cada fase del mismo, evitando la *sobreoscilación* y haciendo además que la temperatura de equilibrio del mosto sea igual a la salida del líquido de refrigeración.

La temperatura adecuada durante la fermentación del mosto depende de cada fase del proceso, según se muestra en la tabla 1:

Fase	Temperatura
Fase de inducción	24°C
Fase tumultuosa	22°C
Fase lenta	26°C

Tabla 1. Temperatura idónea de fermentación.

Puesto que el parámetro que define las diferentes fases del proceso es la concentración de azúcar, la función que determina la temperatura óptima de fermentación puede ser representada por el gráfico mostrado en la figura 24.

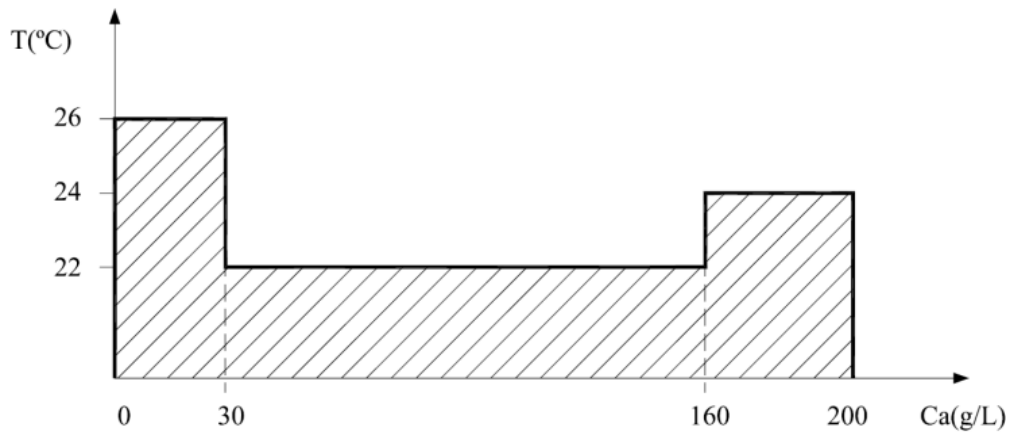


Figura 24. Temperatura óptima de fermentación en función de la concentración de azúcar  $C_a$  (g/L).

Esta función puede expresarse en lenguaje lógico, determinando la temperatura adecuada de fermentación,  $T_a$ , en función de la fase según sea la concentración de azúcar,  $C_a$ , como sigue:

```

IF Ca<30 THEN Ta=26; Lenta
IF Ca≥30 AND Ca<160 THEN Ta =22; Tumulstuosa
IF Ca≥160 THEN Ta =24; Inducción
    
```

Por lo tanto la entrada al controlador borroso será el error de temperatura en cada fase. Es decir,

$$e = T_a - T \quad (42)$$

Siendo  $T_a$  la temperatura adecuada en función de la fase definida por la función descrita en el apartado anterior, y  $T$  la temperatura real del mosto en fermentación.

Como el error  $e$  en cada fase puede estar comprendido entre  $-1^\circ\text{C}$  y  $1^\circ\text{C}$ , las funciones de pertenencia deben cubrir todo este rango. Se han asignado 5 funciones de tipo trapezoidal y triangular, siendo definidas como *Negativo Grande* (NG), *Negativo* (N), *Cero* (Z), *Positivo* (P) y *Positivo Grande* (PG) (figura 25).

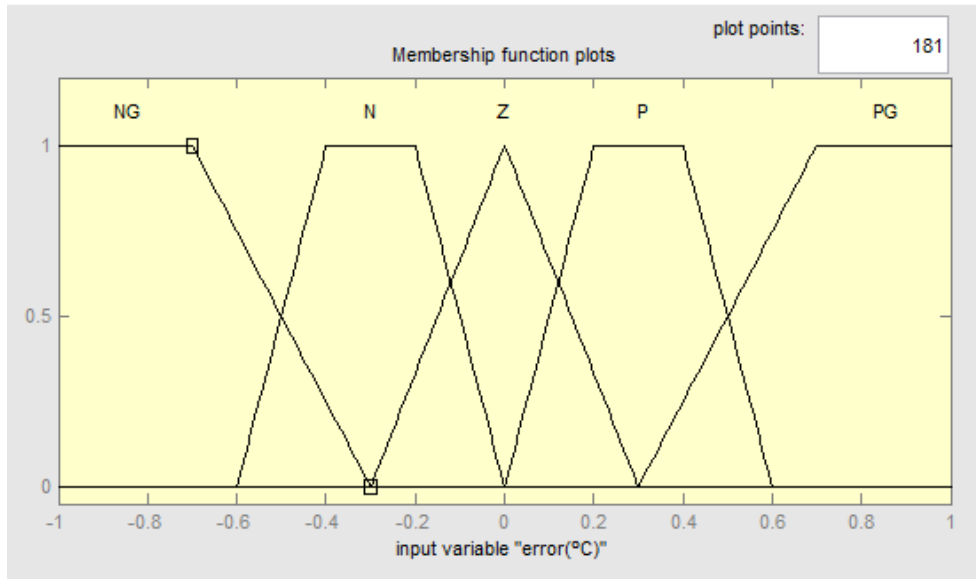


Figura 25. Funciones de pertenencia para el error  $e$  en  $^{\circ}\text{C}$ .

La estructura del controlador va a ser la de un PD incremental, es decir, las variables de entrada van a ser el error de la temperatura y su derivada. La salida será el incremento de caudal de refrigeración a añadir para mantener esa temperatura al valor adecuado. Por lo tanto, con esta definición de las variables de entrada y salida conseguiremos una acción de control correspondiente a un PI, que permitirá controlar el sistema sin error estacionario.

Para la variable de entrada derivada del error de temperatura  $de/dt$  ( $\Delta e$ ) se han definido tres funciones de pertenencia de tipo trapezoidal y triangular, comprendidas en un universo de discursos que va de -0,5 y 0,5 ( $^{\circ}\text{C/h}$ ), siendo sus etiquetas *Negativo* (N), *Cero* (Z) y *Positivo* (P) (Figura 26).

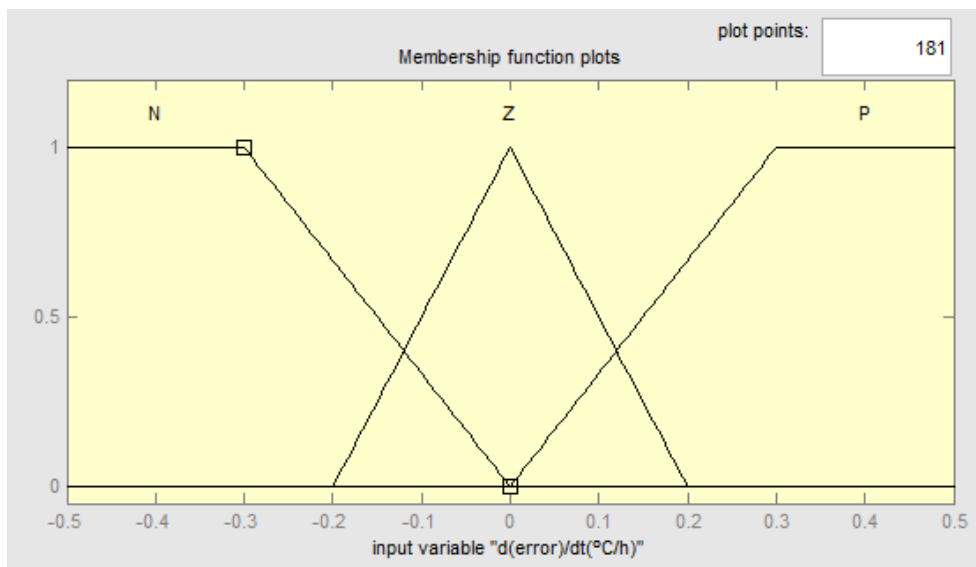


Figura 26. Funciones de pertenencia para el cambio en el error  $\Delta e$  en  $^{\circ}\text{C/h}$ .

Estas funciones de pertenencia se han asignado siguiendo el diseño general de un controlador PD, incorporando el conocimiento del experto en el proceso para determinar los intervalos de discurso.

Para cada combinación de las dos señales de entrada, el controlador difuso debe generar un valor de incremento de caudal,  $\Delta q_r$ , que será la variable de salida del controlador. Dicho valor se implementará físicamente como una señal eléctrica de 0-10V ó 4-20mA, conectada a la válvula que acciona el caudal de refrigeración,  $q_r$ .

Por lo tanto la variable de salida del controlador es el incremento de caudal, que puede ser positivo o negativo en un rango entre  $[-0,2$  y  $0,2]$   $m^3/h$ . Para esta salida se han definido 7 conjuntos borrosos de forma triangular, como se muestra en la figura 27.

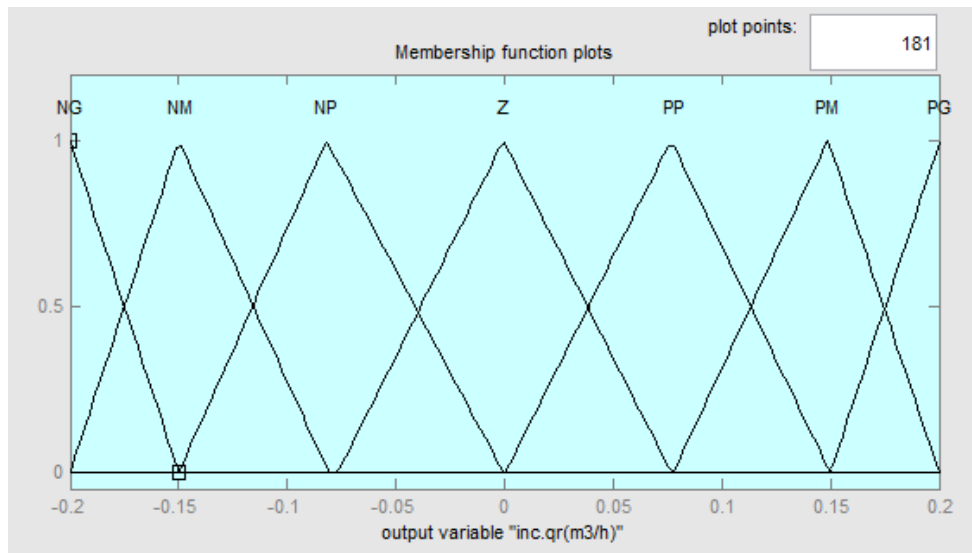


Figura 27. Función de pertenencia de la variable de salida en incrementos de caudal  $\Delta q_r$  ( $m^3/h$ ).

Estos conjuntos borrosos se corresponden con etiquetas que van desde *Negativo Grande* (NG), *Negativo Medio* (NM), *Negativo Pequeño* (NP), *Cero* (Z), *Positivo Pequeño* (PP), *Positivo Medio* (PM) y *Positivo Grande* (PG).

Para definir las reglas del controlador se tiene en cuenta el significado físico de las variables. Es decir, la señal de error suministra al sistema borroso información sobre la diferencia que existe entre la señal deseada,  $T_a$ , y la salida real,  $T$ . Por lo tanto, cuando  $e < 0$  el proceso se encuentra por debajo de la referencia, mientras que para  $e > 0$  sucede lo contrario. La derivada del error ( $\Delta e$ ) indica la razón de cambio del proceso, es decir, si la diferencia indicada por el error  $e$  aumenta o disminuye. A partir de los valores de estas dos señales de entrada, el controlador difuso decide el valor apropiado del incremento del caudal ( $\Delta q_r$ ) como variable de salida del sistema.

Si, por ejemplo,  $e$  es negativo grande (NG) y  $\Delta e$  negativo (N), significa que la temperatura del proceso  $T$  está por encima de la referencia  $T_a$ , alejándose de ésta, por lo que el controlador debe generar un incremento positivo del caudal de refrigeración  $q_r$  para bajar la temperatura  $T$  de la masa de mosto en fermentación.

Si, por el contrario,  $e$  y  $\Delta e$  son positivos (P), la temperatura del proceso  $T$  está por debajo de la referencia  $T_a$  y alejándose de la misma. En este caso el controlador debe generar un incremento negativo de la variable de control para cerrar de forma incremental la válvula de refrigeración y disminuir  $q_r$ , el caudal de refrigeración, haciendo aumentar la temperatura  $T$ .

En el caso de que  $e$  y  $\Delta e$  presenten signos contrarios, normalmente los incrementos de salida  $\Delta q_r$  del controlador serán para acercar  $T$  a  $T_a$ , pero en este caso con valores menores que en los casos anteriores ya que la temperatura del proceso se estará acercando a la referencia.

La lógica anteriormente expuesta debe ser recogida en una tabla, denominada *matriz de reglas*, y forma parte de la base de conocimientos del sistema de control difuso. Para este proceso se muestra en la tabla 2, donde se resumen las 15 reglas correspondientes a todas las combinaciones posibles de las 3 funciones de pertenencia de  $\Delta e$  y las 5 funciones de pertenencia de  $e$ . Para las funciones de pertenencia de la variable de control se han establecido 7 estados  $\Delta q_i$  que corresponden a valores incrementales de la salida del controlador, mostrados en la figura 27, y que actúan sobre la válvula de refrigeración del proceso.

		$e$				
		<b>NG</b>	<b>N</b>	<b>Z</b>	<b>P</b>	<b>PG</b>
$\Delta e$	<b>N</b>	<i>PG</i>	<i>PM</i>	<i>PP</i>	<i>Z</i>	<i>NP</i>
	<b>Z</b>	<i>PM</i>	<i>PP</i>	<i>Z</i>	<i>NP</i>	<i>NM</i>
	<b>P</b>	<i>PP</i>	<i>Z</i>	<i>NP</i>	<i>NM</i>	<i>NG</i>

Tabla 2. Matriz de reglas de controlador borroso.

Estas reglas se enuncian como reglas de producción, es decir:

Si  $e$  es NG y  $\Delta e$  es N entonces  $\Delta q_r$  es PG

El controlador se va a simular con esta definición de variables y reglas, que corresponden a un regulador PD-Fuzzy estándar. En el siguiente capítulo se sintonizará mediante algoritmos genéticos para mejorar su funcionamiento.

El motor de inferencia del controlador se encargará de asociar el estado del proceso a través de las funciones de pertenencia y de realizar un barrido de la matriz de reglas para asignar una salida final del sistema difuso dada por un  $\Delta q_i$ .

Para la *defuzzificación* se ha utilizado el método del centro de gravedad, dado por la expresión:

$$\Delta q = \frac{\sum_{i=1}^N w_i \Delta q_i}{\sum_{i=1}^N w_i} \quad (43)$$

donde  $w_i$  es el grado de pertenencia del consecuente de cada regla al conjunto borroso de salida  $i$ , e  $\Delta q_i$  es el valor que define a cada conjunto borroso.

Por ejemplo, suponiendo un estado del proceso con valores:

$$T_a = 22^{\circ}C \quad T = 22,55^{\circ}C$$

Tendríamos que  $e = -0,55^{\circ}C$ , lo que supondría un grado de pertenencia del error  $e$  de 0,6 a la función NG y 0,3 a la función N. En este caso el incremento del error  $\Delta e = -0,15^{\circ}C/h$ , así que tiene un grado de pertenencia 0,5 a la función N y 0,25 a la función Z. Teniendo en cuenta las funciones de pertenencia de la variable de salida mostradas en la figura 27, aplicando la matriz de reglas y el método de *defuzzificación* descrito, el valor de salida de la variable de control  $\Delta q_r$  sería:

$$\Delta q_r = 0,118 \text{ m}^3/h$$

### **5.3. Simulación del controlador borroso**

En este apartado se ha realizado la simulación del controlador borroso mediante la herramienta Matlab/*Simulink*. Para ello se ha usado el modelo matemático del proceso de fermentación obtenido en el capítulo 4. En la figura 28 se muestra el diagrama de bloques del proceso.

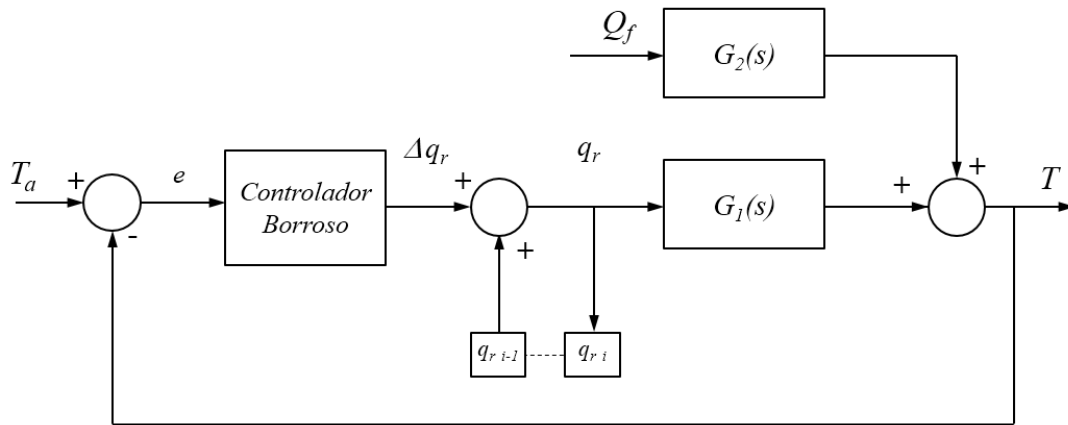


Figura 28. Diagrama de bloques del proceso.

En este diagrama  $q_{ri-1}$  y  $q_{ri}$  representan los valores de la variable de salida, el caudal de refrigeración, para los tiempos  $t-1$  y  $t$ , que se almacenan para luego sumarle los incrementos  $\Delta q_r$  generados por el controlador borroso. Por otro lado, el bloque  $G_1$  corresponde con el proceso de refrigeración y  $G_2$  a la perturbación externa generada por la reacción exotérmica de fermentación.

Para simular el proceso se consideran los siguientes valores de una planta real de fermentación, facilitados por la compañía *Beam Suntory* en Jerez:

$$\begin{array}{ll}
 V = 30 \text{ m}^3 & \rho_r = 1.000 \text{ kg/m}^3 \\
 \rho_m = 1.100 \text{ kg/m}^3 & c_r = 1,0 \text{ kCal/kg}^\circ\text{C} \\
 m_m = 33.000 \text{ kg} & q_0 = 8 \text{ m}^3/\text{h} \\
 c_m = 1,01 \text{ kCal/kg}^\circ\text{C} & T_0 = 22^\circ\text{C} \\
 K = 0,75 \text{ (adimensional)} & T_r = 18^\circ\text{C}
 \end{array}$$

donde,

- $V$  Volumen de mosto
- $\rho_m$  Densidad del mosto
- $m_m$  Masa de mosto
- $c_m$  Calor específico del mosto
- $K$  Coeficiente de intercambio
- $\rho_r$  Densidad del refrigerante (agua)
- $c_r$  Calor específico del refrigerante (agua)
- $q_0$  Caudal del refrigerante en el punto de equilibrio
- $T_0$  Temperatura del mosto en el punto de equilibrio
- $T$  Temperatura del mosto

Con estos datos se obtienen los siguientes valores concretos del modelo:

$$\tau = \frac{m_m c_m}{K \rho_r q_0 c_r} = \frac{33.000 \cdot 1,01}{0,75 \cdot 1.000 \cdot 8 \cdot 1} = 5,56 \text{ h}$$

$$k_1 = \frac{(T_r - T_0)}{q_0} = \frac{(18 - 22)}{8} = -0,5 \frac{^\circ\text{C h}}{\text{m}^3}$$

$$k_2 = \frac{1}{K \rho_r q_0 c_r} = \frac{1}{0,75 \cdot 1.000 \cdot 8 \cdot 1} = 0,00017 \frac{^\circ\text{C h}}{\text{kCal}}$$

$$5,56 \frac{dT}{dt} + T = -0,5q_r + 0,00017Q_f$$

Donde,

$T$	Temperatura del mosto ( $^\circ\text{C}$ )
$t$	Tiempo de fermentación ( $h$ )
$q_r$	Caudal de refrigeración ( $\text{m}^3/h$ )
$Q_f$	Calor emitido por la fermentación ( $\text{kCal}/h$ )

Finalmente se obtienen las siguientes funciones de transferencia, siendo  $G_1(s)$  el proceso a controlar y  $G_2(s)$  la perturbación del sistema que representa el calor emitido durante la fermentación.

$$G_1(s) = \frac{-0,5}{5,56s + 1}$$

$$G_2(s) = \frac{0,00017}{5,56s + 1}$$

En la figura 29 se muestra el diagrama de bloques diseñado en *Simulink* para la simulación del controlador borroso bajo las condiciones descritas:

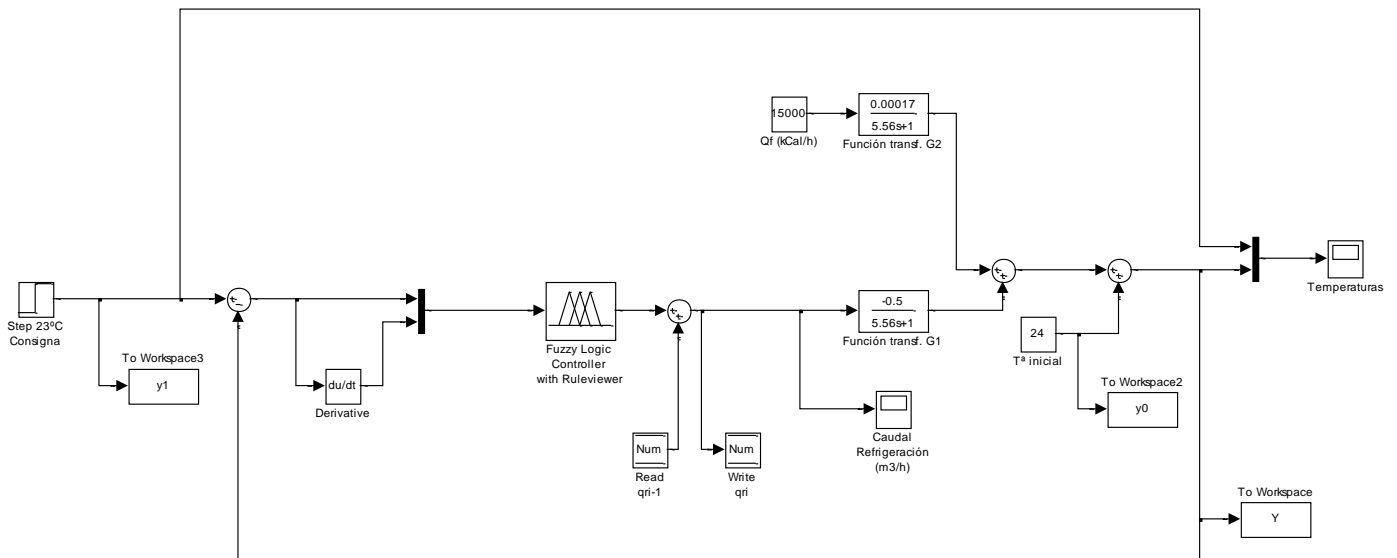


Figura 29. Diagrama de bloques del controlador difuso para simular el proceso.

El controlador borroso recibe 2 entradas: el error de la temperatura  $e$  y la variación del error  $\Delta e$ . Con estos datos se obtiene la señal de salida del controlador aplicando las reglas de la tabla 2.

Puesto que se trata de un controlador incremental, las salidas del mismo corresponden a incrementos en la variable de control del proceso  $\Delta q_r$  (caudal de refrigeración), regulada por una válvula analógica de paso proporcional. Estos incrementos se almacenan cada paso de simulación para actualizar el valor del caudal de salida  $q_r$ .

En el diagrama de bloques se muestran las dos funciones de transferencia que describen el proceso de refrigeración y la perturbación generada por el incremento de temperatura debido a la reacción exotérmica que tiene lugar en la fermentación. Para alimentar esta última se ha introducido una entrada constante de 15.000 kCal/h, que corresponde al calor generado debido a la fermentación en un momento puntual, durante la fase tumultuosa, y al 90% del valor máximo de calor emitido en todo el proceso (figura 22). Estos valores son datos reales representativos.

En la figura 30 se muestra el momento de la fermentación elegido para realizar la simulación cuando la concentración de azúcar  $C_a$  tiene un valor de 118 g/L y han transcurrido unas 35 horas desde el inicio de la fermentación, en plena fase tumultuosa (figura 20, capítulo 4).

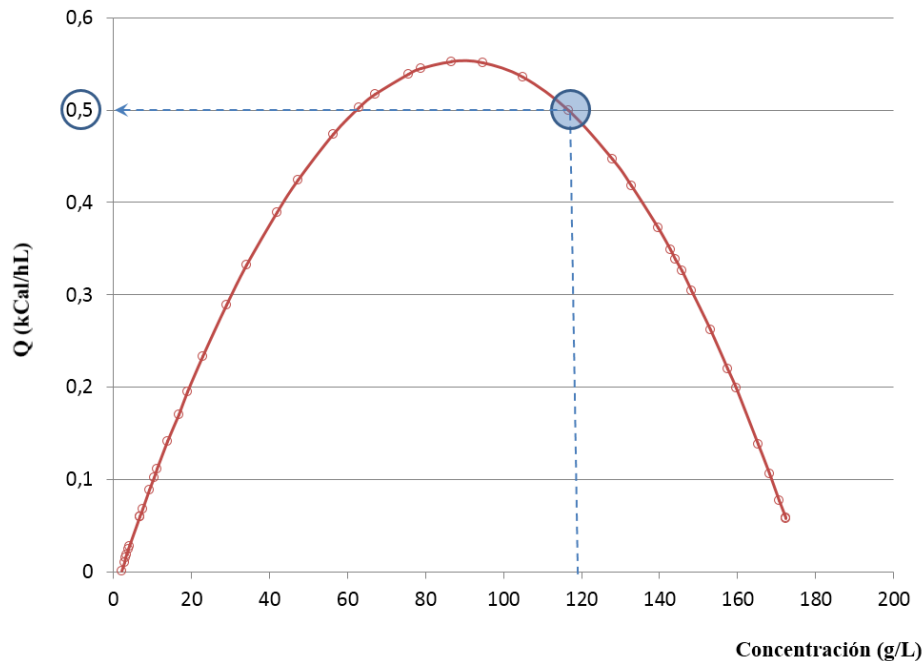


Figura 30. Momento del proceso elegido para realizar la simulación.

En este instante se genera un calor por unidad de volumen de 0,5 kCal/hL. Puesto que el modelo de la planta real se ha desarrollado para un volumen de 30.000 litros de mosto en fermentación, el calor generado por dicho volumen sería:

$$Q_f = 30.000 \text{ L} \cdot 0,5 \frac{\text{kCal}}{\text{hL}} = 15.000 \frac{\text{kCal}}{\text{h}}$$

Finalmente, la temperatura inicial del proceso, 'T<sup>a</sup> inicial', puede obtenerse del termopar o sonda de temperatura del depósito de fermentación al inicial el proceso.

Se han realizado dos simulaciones para comprobar la respuesta del controlador borroso. La primera sometiendo a la temperatura a un salto negativo de un grado, de 24°C a 23°C. Para evaluar la respuesta temporal de esta entrada en escalón se usarán los siguientes parámetros:

- Tiempo de establecimiento ( $t_s$ ). Tiempo que tarda la respuesta en situarse de forma estable al 95% de la referencia.
- Sobreoscilación ( $M_p$ ). Diferencia entre el máximo valor de pico y el valor en régimen permanente (%).
- Error en régimen permanente ( $ess$ ). Error de la señal en régimen estacionario con respecto a la referencia.

El resultado de la respuesta temporal del controlador a la entrada en escalón se presenta en la figura 31:

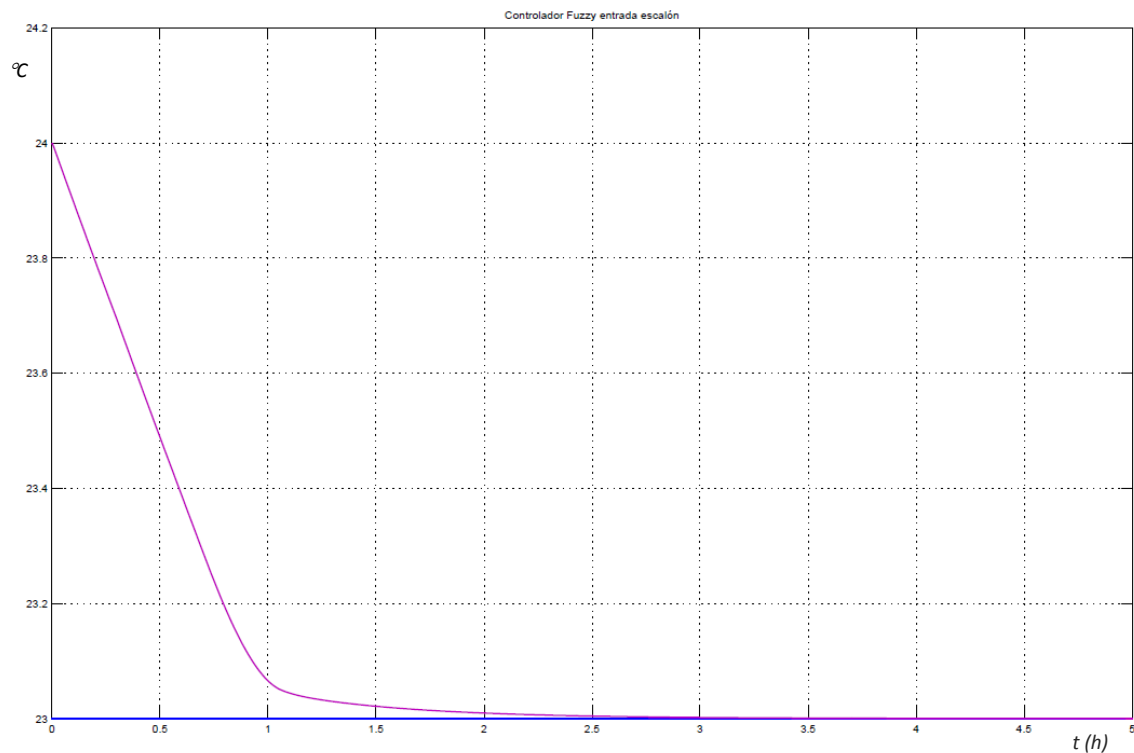


Figura 31. Respuesta del controlador borroso a una entrada en escalón de 24 °C a 23 °C.

De la respuesta anterior a la entrada en escalón se obtienen los siguientes parámetros:

$$t_s = 1,05 \text{ h} \quad M_p = 0\% \quad ess = 0,0375\%$$

Dada la gran inercia del sistema, el tiempo de respuesta se considera muy bueno, aunque el sistema no llegue a alcanzar la referencia sin error en cinco horas, debido en parte a que el controlador borroso no se ha sintonizado de forma fina. Este resultado es mejor que el que se obtiene en la planta actual, como se mostrará en el capítulo de resultados.

Para esta entrada en escalón la variable de control presenta el resultado mostrado en la figura 32, donde puede observarse un rápido incremento inicial de caudal en la válvula para bajar la temperatura del mosto. Sin embargo este pico de demanda inicial se suaviza en la parte más alta permitiendo un adecuado funcionamiento de la válvula. Excepto en este punto máximo de caudal, la estabilidad de la señal es muy buena, lo que reducirá las exigencias electromecánicas de la válvula y su correspondiente desgaste y consumo energético. El comportamiento observado en esta simulación coincide con los reales y se confirmará en el capítulo 7.

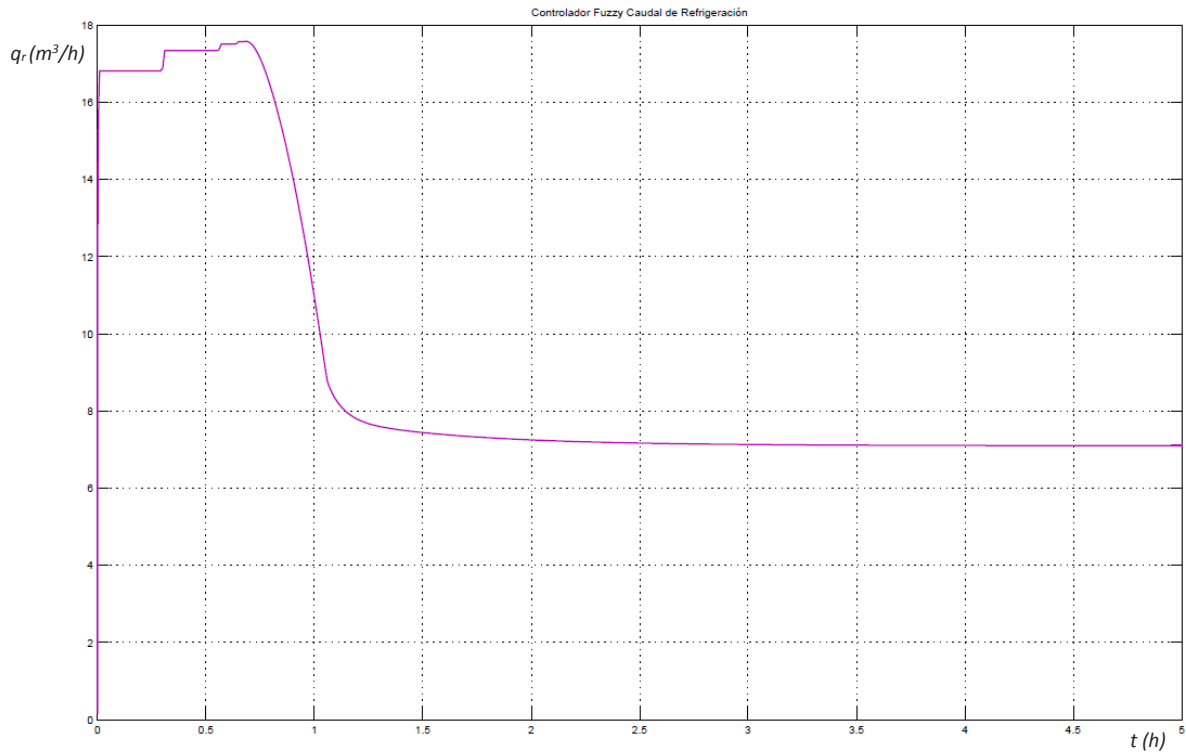


Figura 32. Caudal de refrigeración con controlador borroso frente a una entrada en escalón.

También se ha simulado una entrada variable que consiste en saltos de magnitud aleatoria entre 20 y 24°C (Figura 33), con objeto de comprobar que puede ser aplicado para las distintas fases del proceso de fermentación y que los cambios en la referencia los sigue de forma adecuada.

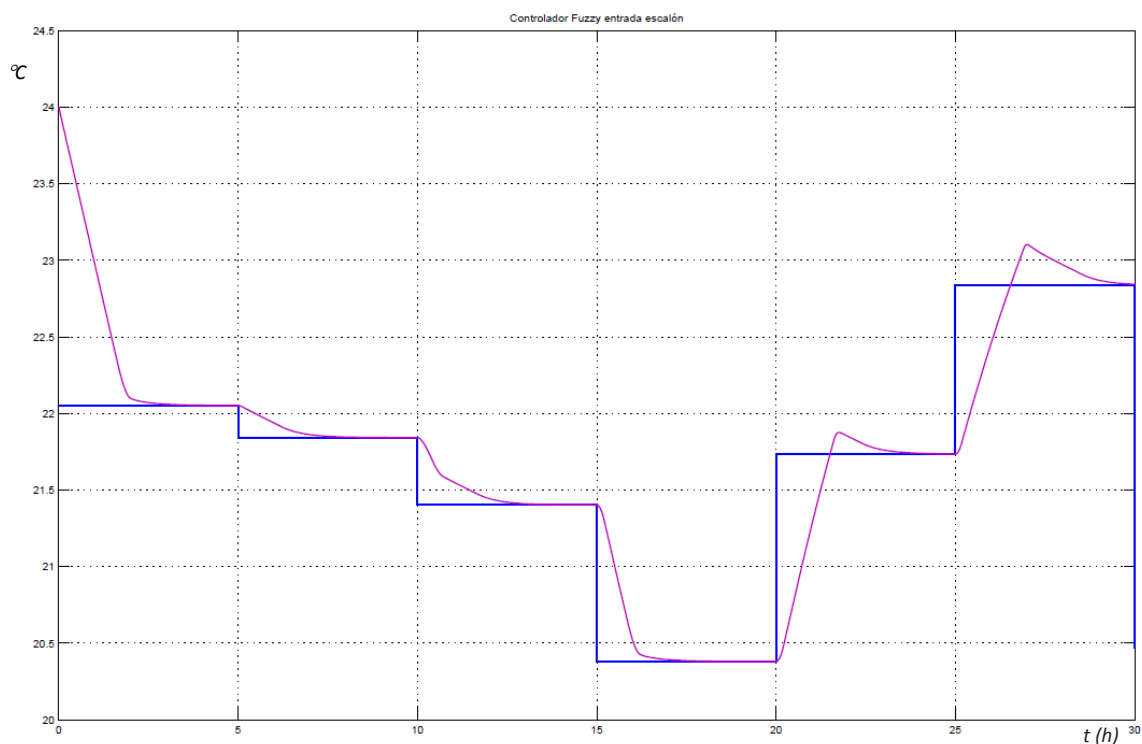


Figura 33. Respuesta del sistema con el controlador borroso a una entrada variable entre 20 y 24°C.

Para esta entrada la variable de control se presenta en la figura 34:

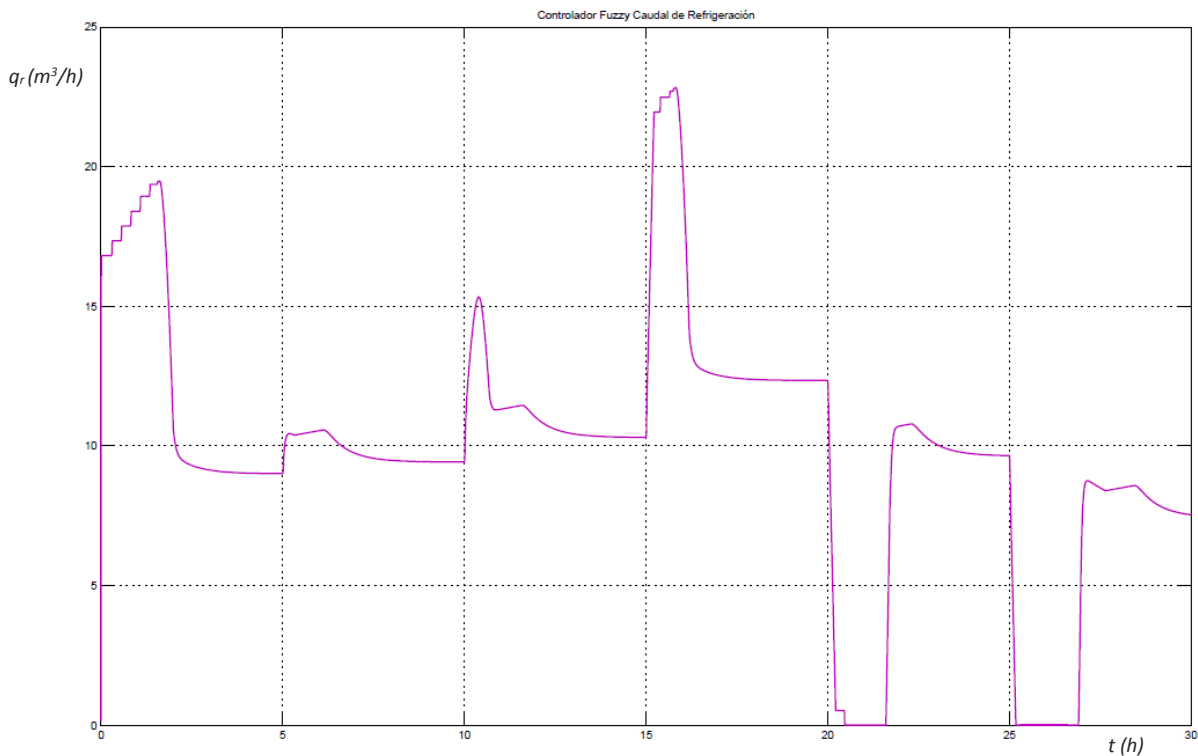


Figura 34. Caudal de refrigeración con controlador borroso frente a una entrada aleatoria entre 20 °C y 24 °C.

La respuesta de la variable de control presente algunas particularidades destacables. La primera de ellas, como es de esperar, aparece un importante aumento de caudal en cada cambio negativo de temperatura, como ya se observó en la entrada en escalón. Al igual que ese caso, los extremos de los picos se encuentran recortados, lo que permite un adecuado funcionamiento de la válvula proporcional. Y, por otro lado, aparecen rápidas bajadas en los cambios positivos de temperatura, incluso llegando a cerrar completamente la válvula de refrigeración para evitar la entrada de agua frío en el depósito. Este comportamiento de caudal frente a cambios continuos también se observa en la realidad y se confirmará en el capítulo 7.

En cualquier caso, a pesar de las fluctuaciones y picos en la variable de control para responder a los diferentes saltos en la entrada, el caudal de refrigeración demandado en la válvula es adecuado ya que en todo momento es inferior a 25 m<sup>3</sup>/h, límite máximo superior considerado para dicha válvula.

Una vez comprobado en simulación el diseño del controlador borroso para este proceso se va a pasar a su mejora mediante otra técnica de la inteligencia artificial, los algoritmos genéticos.

# Capítulo 6

## SINTONIZACIÓN DEL CONTROLADOR MEDIANTE ALGORITMOS GENÉTICOS

### 6.1. Algoritmos genéticos

Los algoritmos genéticos son una disciplina de la inteligencia artificial dentro del área de computación evolutiva. Dicho área se ocupa de la optimización y clasificación basándose en mecanismos de la genética y la selección natural. En concreto los algoritmos genéticos representan una aproximación para la solución de problemas de optimización donde la búsqueda se realiza sobre un espacio de soluciones posibles y, de manera evolutiva, se retienen las soluciones más adecuadas, en un proceso análogo a la evolución biológica mediante la reproducción, la selección natural, el cruce y la mutación (Goldberg y Holland, 1988)

Los algoritmos genéticos trabajan con una población inicial de individuos formados por *cromosomas*, generados de forma aleatoria, cada uno de los cuales representan una posible solución al problema. A través de la *función de ajuste* o *fitness* se evalúa la idoneidad de cada uno de dichos individuos para resolver el problema, y se ordenan de forma que los mejores individuos pueden ser preservados para la siguiente generación, denominándose *padres*. Posteriormente estos progenitores se *crucan* para generar nuevos individuos, denominados hijos, que también pueden modificarse por *mutación* alterando aleatoriamente parte de su material genético. Finalmente, los individuos o cromosomas generados se evalúan de nuevo mediante la función de ajuste, repitiendo el proceso  $n$  veces (generaciones) o estableciendo otra condición de parada para este algoritmo iterativo. La figura 35 muestra el diagrama de bloques de un algoritmo genético básico (Belarbi y Titel, 2002).

Los algoritmos genéticos se diferencian de los algoritmos de optimización clásicos en que trabajan con un conjunto de soluciones en cada iteración, seleccionando el conjunto de la siguiente iteración a través de cálculos heurísticos aleatorios, en lugar de funciones deterministas. Esta característica hace de los algoritmos genéticos una técnica muy apropiada para la búsqueda de datos u optimización de sistemas.

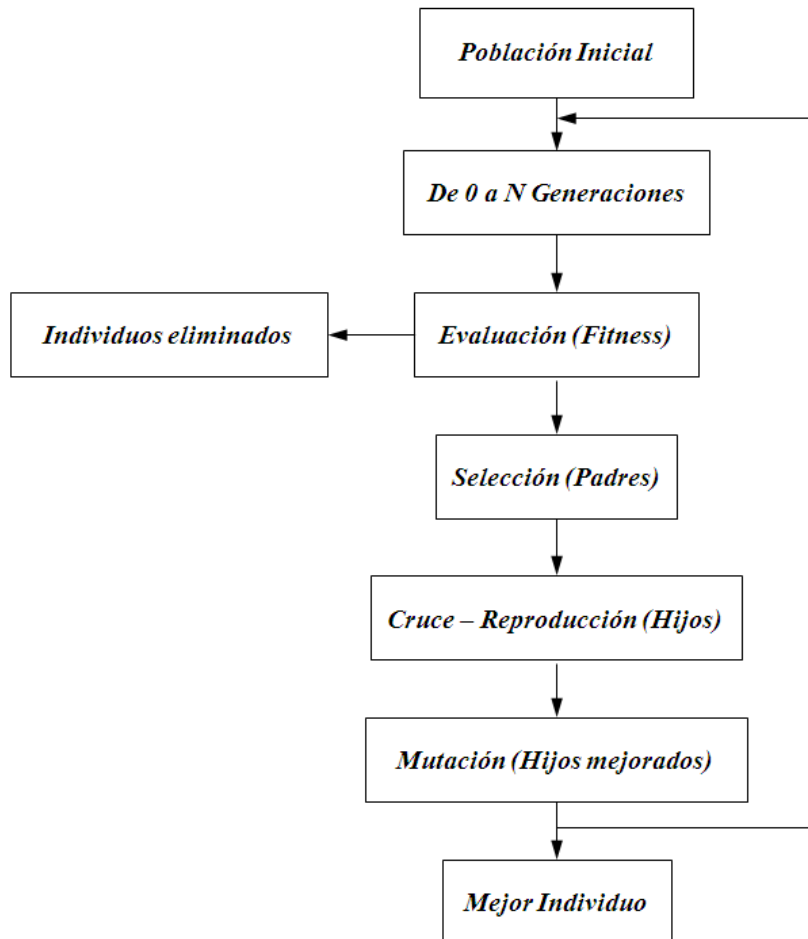


Figura 35. Diagrama de bloques de un algoritmo genético básico.

En este capítulo se han usado algoritmos genéticos para sintonizar la matriz de reglas del controlador borroso diseñado en el capítulo anterior, hallando los valores de dicha matriz que mejor resultado generen en el proceso.

## **6.2. Sintonización de las reglas del controlador borroso**

El objetivo de la sintonización del controlador borroso mediante algoritmos genéticos es hallar un conjunto óptimo de valores de su matriz de reglas. Esta matriz de reglas está definida en la tabla 2 del capítulo 5, donde cada celda se corresponde a un incremento de la variable caudal de refrigeración  $q_r$ , es decir  $\Delta q_r$ .

Este proceso de sintonización determinará los valores de la matriz que mejor comportamiento generen en el sistema. Dicho comportamiento será valorado a través de la siguiente función de ajuste,  $f_a$ , que evaluará a cada individuo de la población en función de las especificaciones de la respuesta en el dominio temporal.

$$f_a = 0,10 t_s + 0,25 M_p + 0,65 ess \quad (44)$$

Esta función define la respuesta del sistema frente a una entrada en escalón en el dominio del tiempo, siendo los parámetros usados:

- $t_s$  tiempo de establecimiento (h)
- $M_p$  sobreoscilación (%)
- $ess$  error en régimen estacionario (%)

Los pesos dados a cada especificación temporal han sido determinados por los expertos en el proceso, priorizando los requerimientos que se han considerado más importantes para esta aplicación. Por lo tanto, el proceso de sintonización se resume en encontrar los valores de la matriz de reglas del controlador borroso que minimizan la función de ajuste  $f_a$ .

Para sintonizar la matriz de reglas del controlador se ha usado *Matlab* y *Simulink*. En la figura 36 se muestra el diagrama de bloques de la aplicación.

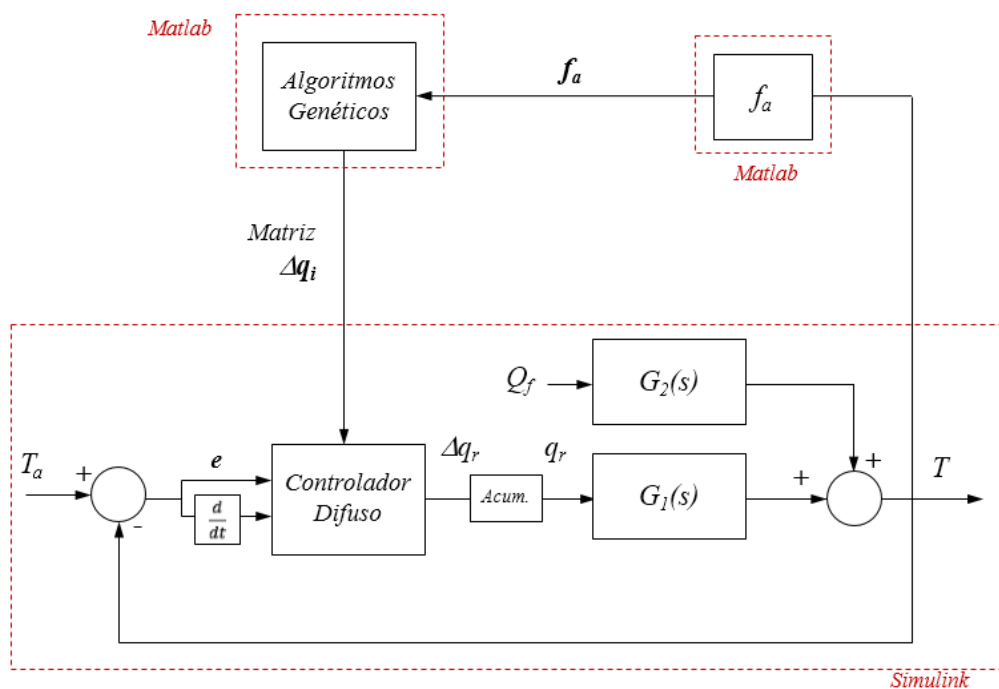


Figura 36. Diagrama de bloques para sintonizar las reglas del controlador.

A continuación se describen los bloques y funciones principales de la aplicación para sintonizar la matriz de reglas del controlador borroso:

### 1. Algoritmo Genético

Es el bloque que ejecuta el algoritmo genético en *Matlab*, usando el código fuente *Genetic Algorithm Optimization Toolbox* (GAOT) desarrollado por Christophe Houck (Houck, 1997). Este código recibe como entrada el resultado de la función de ajuste  $f_a$  y genera nuevos individuos que suministra como salidas  $\Delta q_i$  (Foran, 2002).

### 2. Matriz $\Delta q_i$

Los valores  $\Delta q_i$  de la matriz de reglas de cada individuo se archivan en un fichero para ser usado posteriormente por el controlador borroso desde el entorno *Simulink* (Ruge y Alvis, 2012).

### 3. Controlador borroso y simulación del proceso

El controlador borroso y el proceso se simulan en el entorno *Simulink* tomando los valores  $\Delta q_i$  de la matriz de reglas obtenidos por el algoritmo genético. Para la simulación se usa el diagrama de bloques mostrado en la figura 29 del capítulo anterior.

### 4. Función de ajuste

La función de ajuste  $f_a$ , que depende de  $t_s$ ,  $M_p$  y  $ess$ , convierte la respuesta temporal del sistema en un valor numérico que es enviado al algoritmo genético para evaluar la idoneidad de cada individuo. Para realizar esta función se ha desarrollado un código propio (anexo 1) que ejecuta dicho cálculo y alimenta la entrada al algoritmo genético. El criterio de selección del algoritmo genético es encontrar el individuo que genere un valor de la función de ajuste más pequeño.

El flujo completo del proceso de sintonización se describe en el siguiente diagrama de bloques (Herrera, 1995):

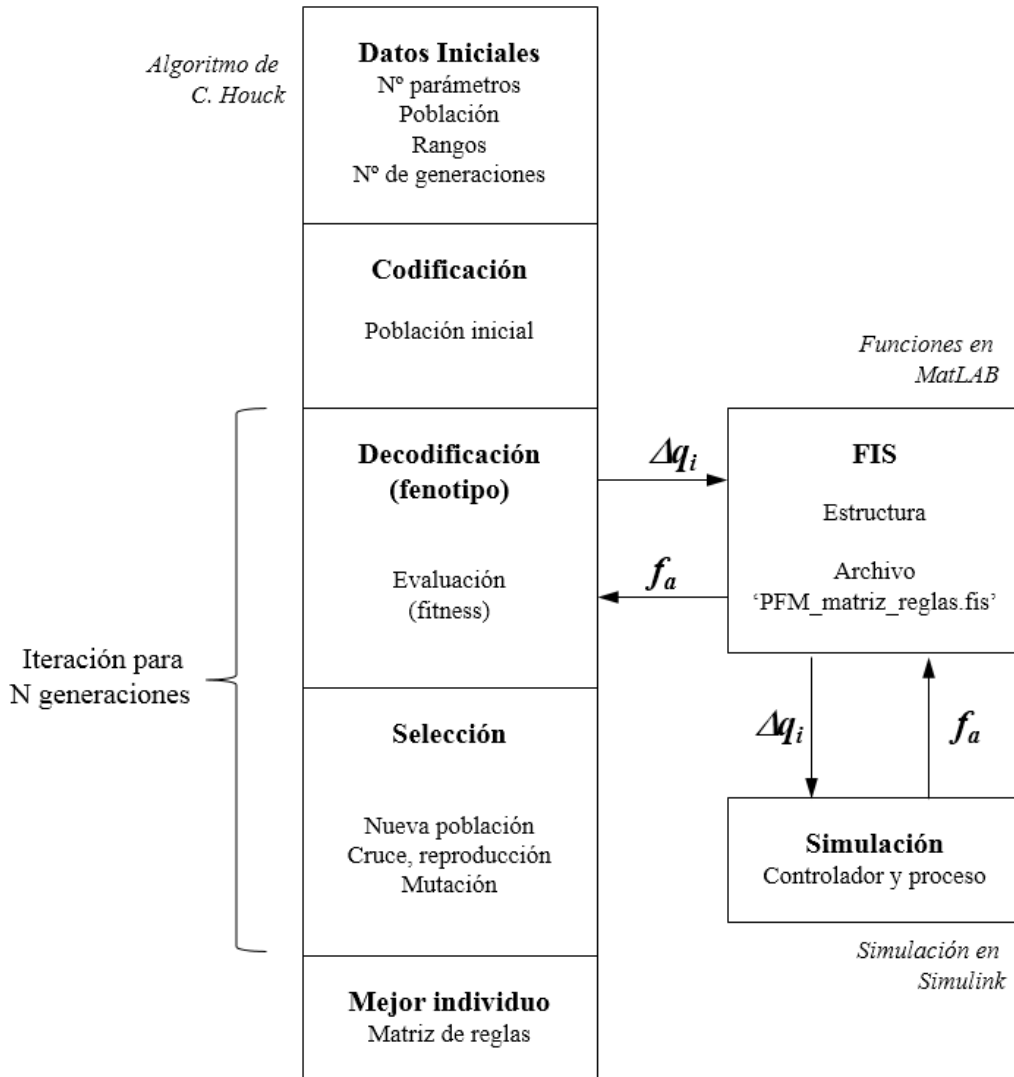


Figura 37. Diagrama de flujo de la sintonización con Algoritmos Genéticos.

En la simulación realizada cada individuo de la población representa el conjunto de valores posibles del incremento de caudal,  $\Delta q_i$  (NG, NM, NP, Z, PP, PM, PG), que constituyen la matriz de reglas definidas en la tabla 2, siendo éstos números aleatorios comprendidos entre -0,20 y 0,20 (m<sup>3</sup>/h). Para cada individuo se genera una matriz de 3x5 con estos 7 valores que se archivan en un fichero. Se simula la dinámica del sistema en lazo cerrado aplicando una función de entrada en escalón (figura 29). Para cada individuo se obtiene el tiempo de establecimiento  $t_s$ , la sobreoscilación  $M_p$ , y el error en régimen permanente  $ess$ , calculando con estos valores la función de ajuste  $f_a$  del sistema.

A continuación se describe la configuración del algoritmo genético:

**Población inicial:** 25 individuos con 7 cromosomas cada uno

**Generaciones:** 1000 generaciones.

**Función de ajuste o *fitness*:** Ecuación 44

**Selección de padres:** Se seleccionan los 6 individuos con el mejor desempeño (menor valor) de la función de ajuste.

**Cruce:** 12 hijos son generados mediante el cruce aleatorio de 2 padres, cuyo resultado se obtiene de promediar componente a componente ambos individuos (crossover aritmético). La probabilidad de cruce es  $P_c = 1.0$

**Mutación:** Los 12 hijos mutados son el resultado de sumar un número aleatorio entre -0,001 y 0,001 a cada elemento de cada hijo. La probabilidad de mutación es  $P_m = 1.0$

**Sustitución de generaciones:** La nueva generación estará formada por la siguiente población de 25 individuos:

- 1 individuo con el mejor desempeño de la función de ajuste de la generación anterior.
- 12 hijos (sin mutar).
- 12 hijos mutados.

Hay que tener en cuenta que cada individuo está formado por 7 cromosomas cada uno, que corresponden a los 7 valores de la función de pertenencia de la variable de salida. Aunque la matriz de reglas es de 3x5, está configurada con sólo 7 posibles valores repetidos en cada una de las 15 celdas (tabla 2, capítulo 5).

Una vez aplicado el algoritmo genético, el individuo encontrado con el menor valor de su función de ajuste se indica en la tabla 3.

		<i>e</i>				
		<b>NG</b>	<b>N</b>	<b>Z</b>	<b>P</b>	<b>PG</b>
<i>Δe</i>	<b>N</b>	0,1523	0,1039	0,0396	0,0001	-0,0412
	<b>Z</b>	0,1039	0,0396	0,0001	-0,0412	-0,0988
	<b>P</b>	0,0396	0,0001	-0,0412	-0,0988	-0,1476

Tabla 3. Matriz de reglas sintonizadas mediante algoritmos genéticos.

Durante todas las generaciones se constató que al menos se igualaba el resultado de la generación previa, al conservar siempre en la nueva generación el individuo de mejor valor. En la figura 38 se muestra la evolución del valor de la función de ajuste del mejor individuo en cada generación.

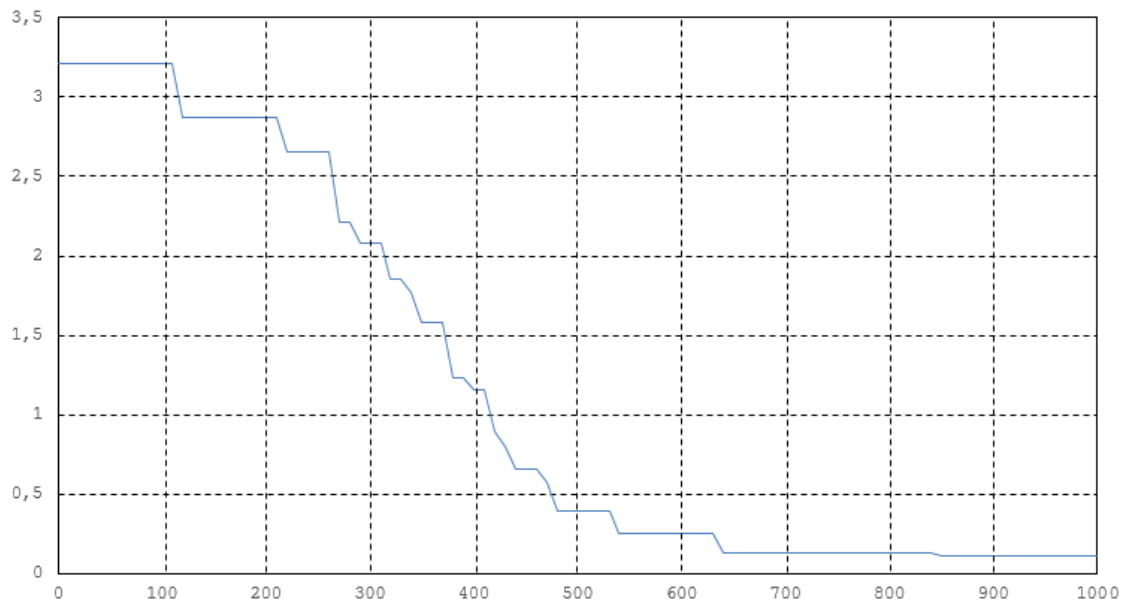


Figura 38. Evolución de los mejores individuos en cada generación a través del valor de la función de ajuste  $f_a$ .

En la figura 39 se muestran las funciones de pertenencia de la variable de salida del controlador borroso con los valores de la matriz de reglas obtenidos mediante la sintonización con algoritmos genéticos.

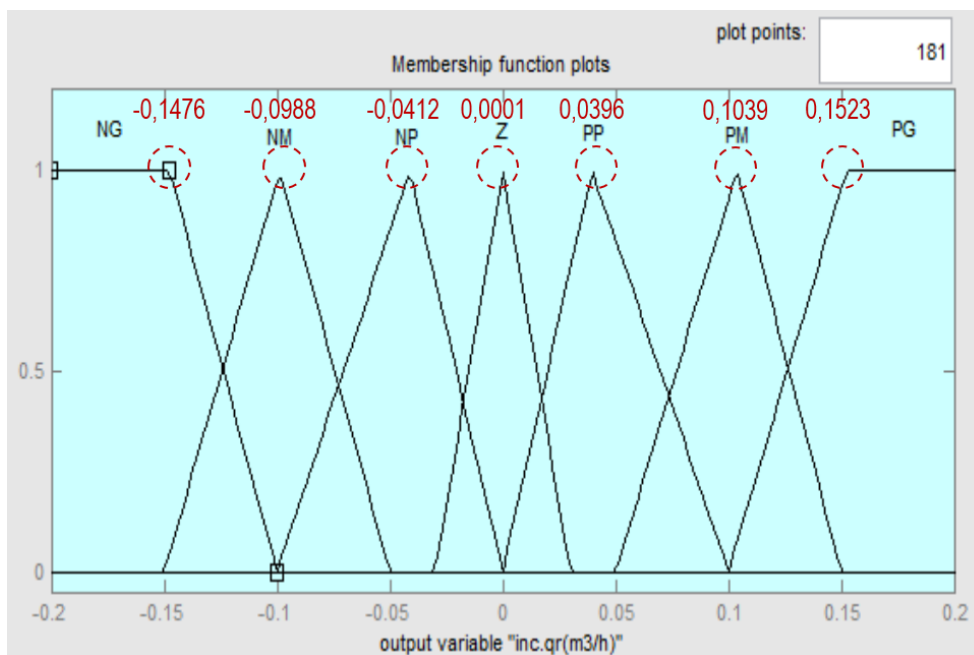


Figura 39. Función de pertenencia de la variable de salida con la matriz de reglas sintonizada.

### 6.3. Simulación del controlador borroso sintonizado con algoritmos genéticos

A continuación se simula el controlador borroso con la matriz de reglas sintonizadas mediante algoritmos genéticos. El sistema ha sido sometido a salto de  $-1^{\circ}\text{C}$  en la entrada, de  $24$  a  $23^{\circ}\text{C}$  (Figura 40), y también a una entrada variable en saltos de magnitud aleatoria entre  $20^{\circ}\text{C}$  y  $24^{\circ}\text{C}$  (Figura 42).

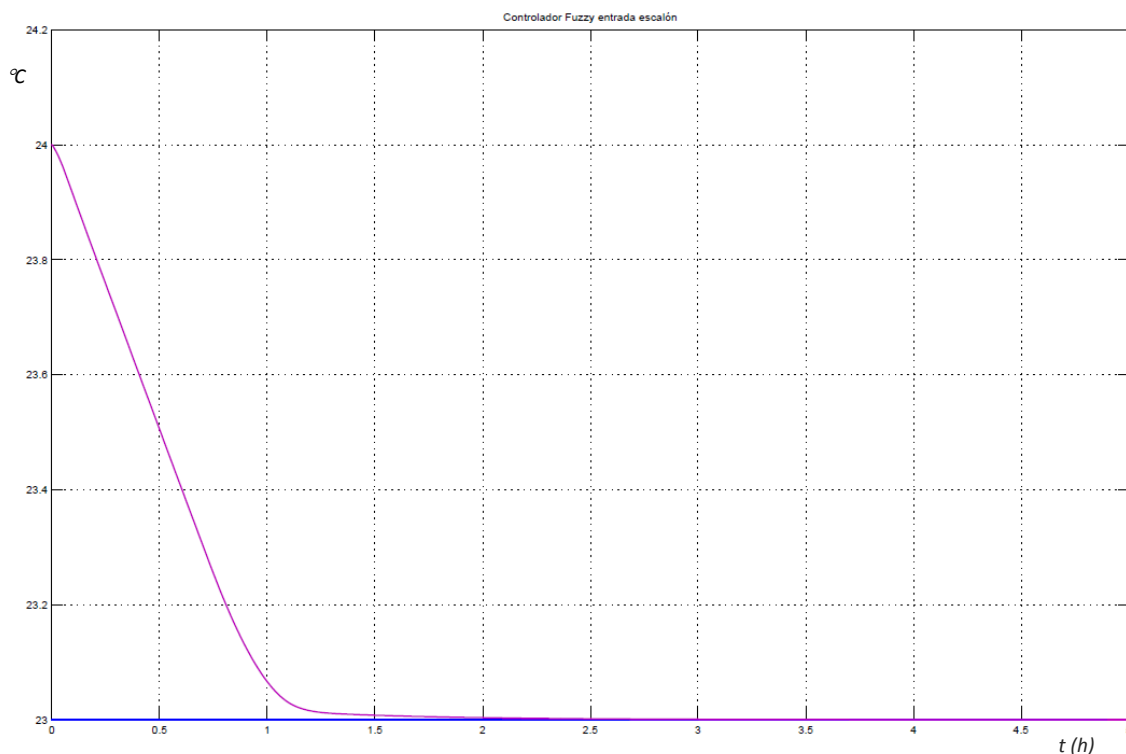


Figura 40. Respuesta del controlador borroso sintonizado a una entrada en escalón de  $24^{\circ}\text{C}$  a  $23^{\circ}\text{C}$ .

Las especificaciones temporales del sistema (tiempo de establecimiento,  $t_s$ , sobreoscilación  $M_p$ , y error en el estacionario,  $ess$ ) son ahora:

$$\begin{aligned} t_s &= 1,0300 \text{ h} \\ M_p &= 0\% \\ ess &= 0,0052\% \end{aligned}$$

Que se han obtenido para un valor de la función de ajuste de:

$$f_a = 0,10 t_s + 0,25 M_p + 0,65 ess = 0,1064$$

Con respecto al controlador sin sintonizar, esta respuesta mejora el tiempo de establecimiento de 1,05 h a 1,03 h y, lo más significativo, mejora el error en régimen permanente de 0,0375% a 0,0052%, lo que supone una reducción del error a cero en la práctica.

Para esta entrada en escalón la señal de control,  $q_r$ , presenta el resultado mostrado en la figura 41:

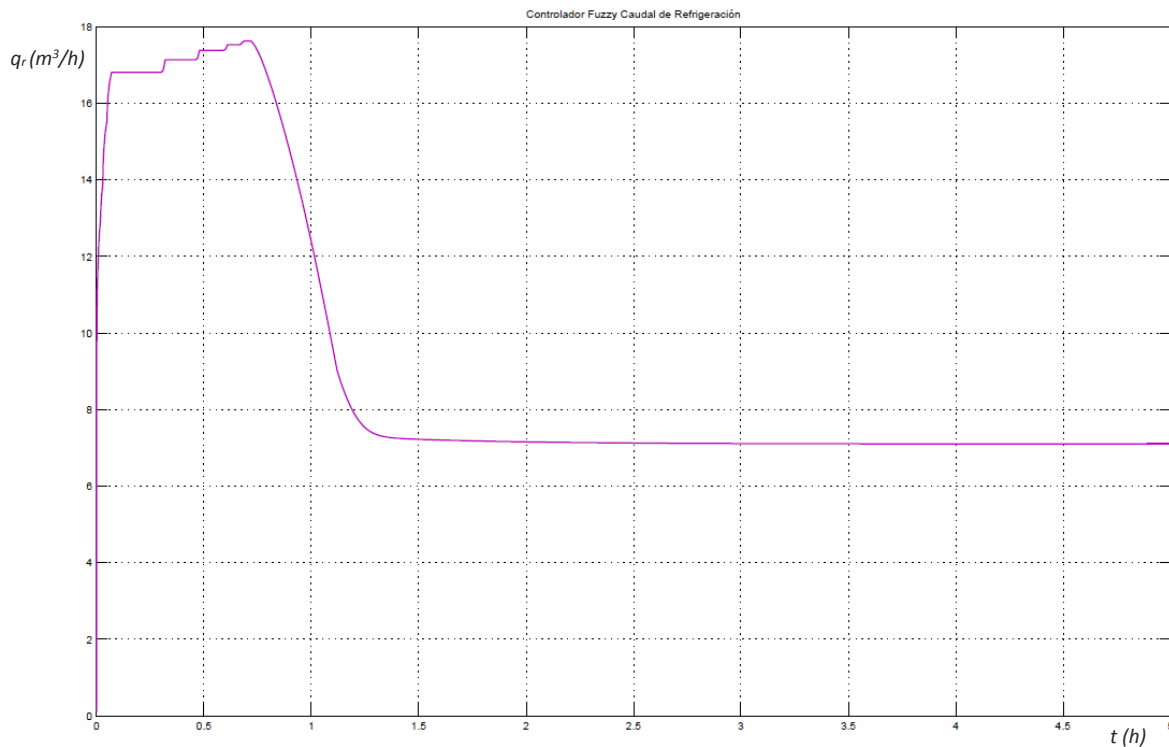


Figura 41. Caudal de refrigeración con controlador borroso sintonizado frente a una entrada en escalón.

La respuesta de la variable de control es similar en los dos controladores borrosos. Ambos tienen un perfil de respuesta idéntico, aunque el controlador sintonizado presenta un leve mejor suavizado en el pico máximo de caudal que mejoraría el funcionamiento y rendimiento de la válvula de refrigeración.

La respuesta del controlador a la entrada variable con saltos de magnitud aleatoria entre se muestra en la figura 42 y la señal de control correspondiente en la figura 43. Como se puede observar, el desempeño de este controlador sintonizado y el no sintonizado es similar, manteniendo ambos una buena respuesta sin amortiguación, en tiempo de establecimiento y bajo error en régimen permanente ante el escalón negativo de temperatura. Sin embargo, también ambos presentan una sobreoscilación a la entrada en escalón positiva. Con respecto al caudal, las respuestas también son similares, aunque el controlador sintonizado suaviza mejor de forma leve los dos picos máximos.

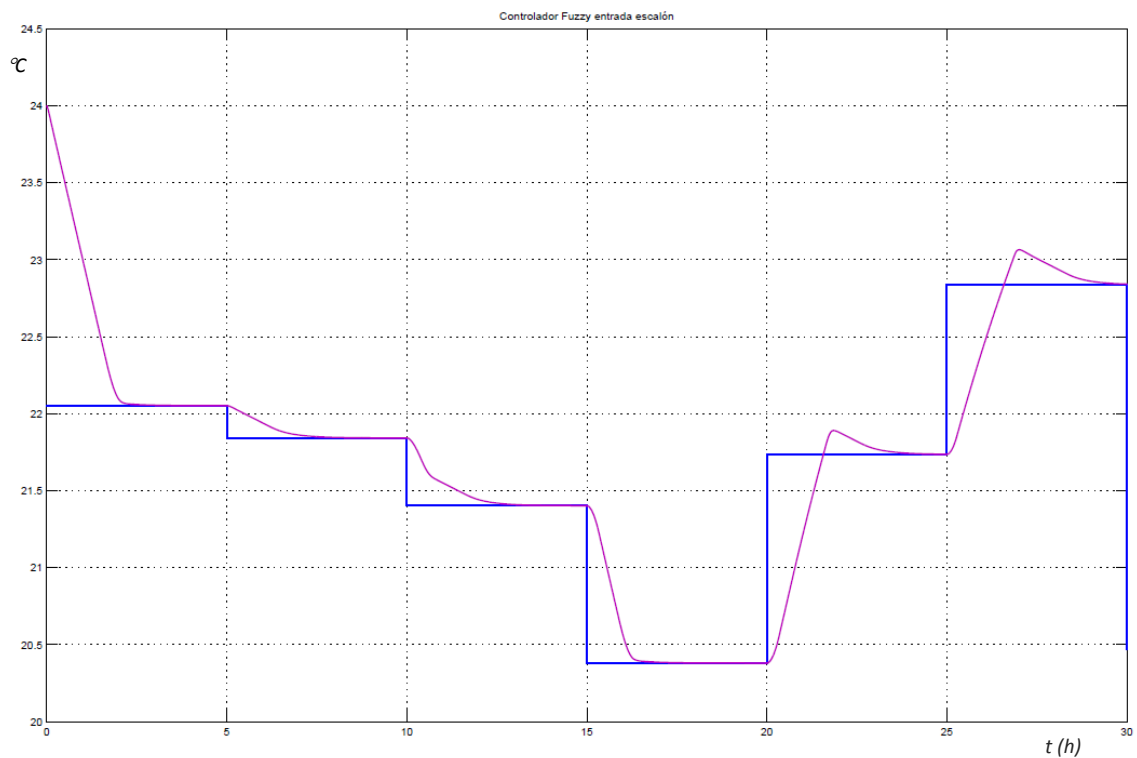


Figura 42. Respuesta del sistema con el controlador borroso sintonizado a una entrada variable entre 20 y 24 °C.

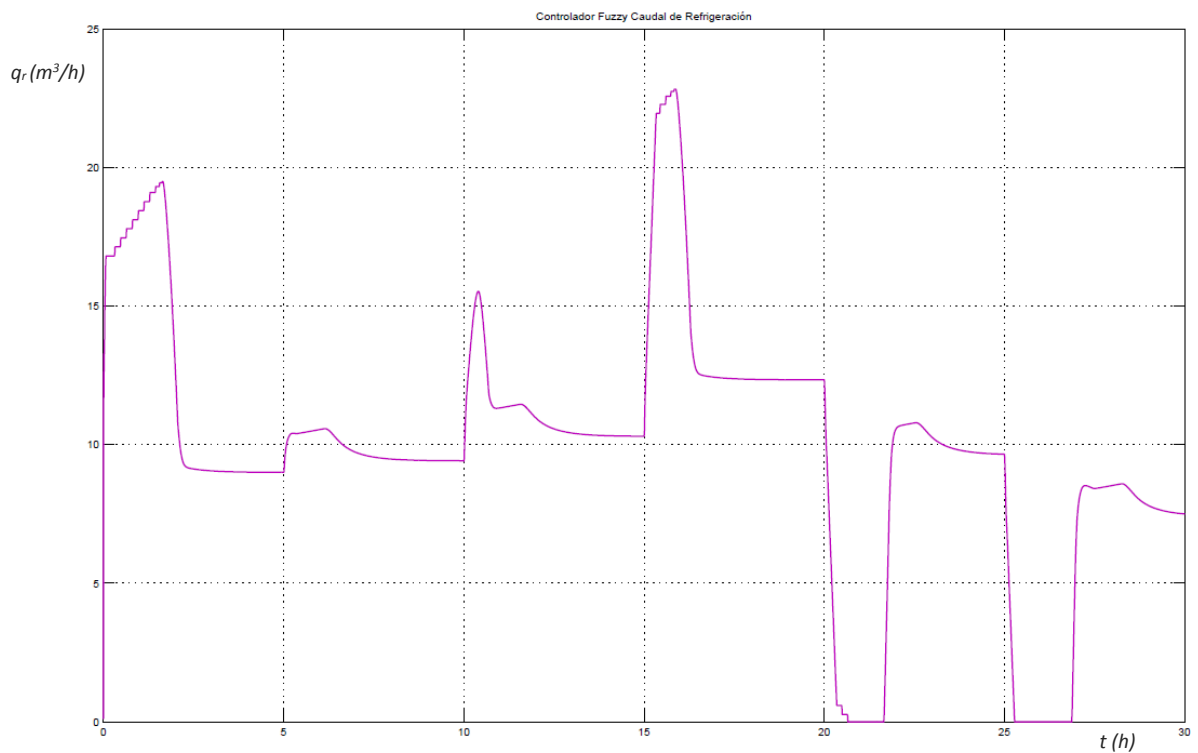


Figura 43. Caudal de refrigeración con controlador borroso sintonizado frente a una entrada variable de 20 a 24 °C.

#### 6.4. Simulación del proceso mediante PID tradicional

Para poder comparar el comportamiento del controlador borroso con los sistemas de control PID, usados actualmente en los procesos de fermentación alcohólica, se ha aplicado un PID clásico con ganancias:

$$K_p = 1.00$$

$$K_i = 0.01$$

$$K_d = 0.10$$

Estos valores de la ganancia están determinados experimentalmente y son los que usan en la planta real.

En la figura 44 se muestra la respuesta del sistema con el controlador PID a la entrada en escalón de 24 a 23°C:

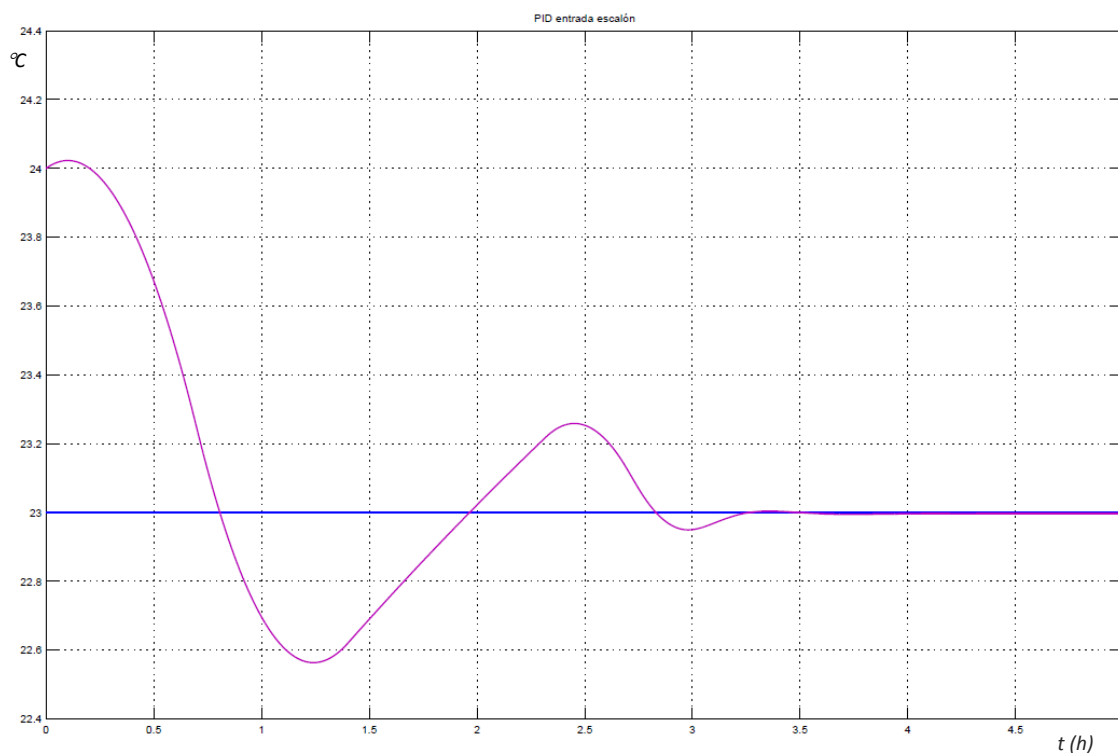


Figura 44. Respuesta del PID a una entrada en escalón de 24 °C a 23 °C.

Se aprecia que la respuesta del sistema presenta cierta sobreoscilación, que se ajusta a la realidad observada en el proceso actual. El ajuste de este PID es difícil debido, por un lado, a la inexistencia hasta el momento de un modelo que permita su ajuste mediante simulación y, por otro lado, a la poca frecuencia y tiempo de funcionamiento del proceso, lo que limita el ajuste de forma experimental.

Sin embargo, gracias al modelo matemático desarrollado en el presente estudio, se puede sintonizar el PID mediante simulación para mejorar la respuesta del controlador. A continuación se describen los parámetros sintonizados usando el modelo obtenido en el capítulo 4:

$$K_p = 0,25$$

$$K_i = 0.0001$$

$$K_d = 0.10$$

La respuesta a la entrada escalón del sistema con el PID sintonizado de esta manera se muestra en la figura 45:

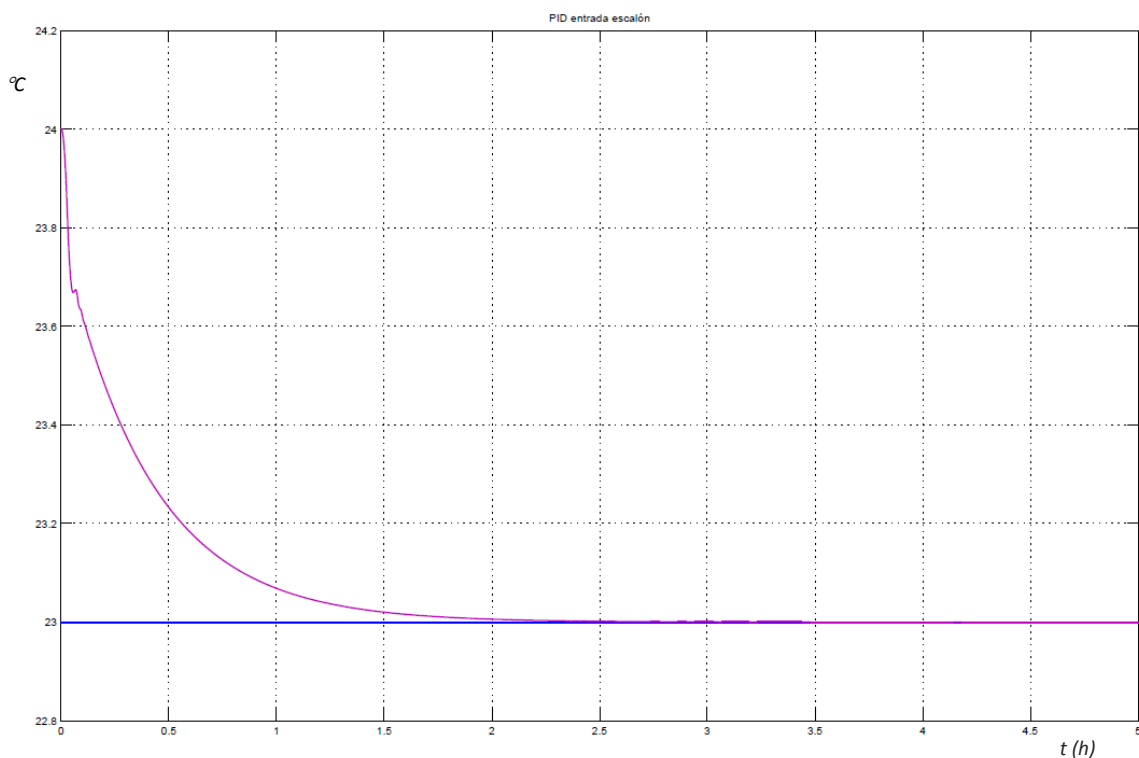


Figura 45. Respuesta del PID sintonizado a una entrada en escalón de 24 °C a 23 °C.

Se observa un mejor comportamiento del sistema, obteniendo los siguientes valores de su respuesta en el tiempo a la entrada en escalón:

$$t_s = 1,2270 \text{ h}$$

$$M_p = 0,0270 \%$$

$$ess = 0,0268 \%$$

Siendo el valor de su potencial función de ajuste para poder compararla con el controlador borroso:

$$f_a = 0,10 t_s + 0,25 M_p + 0,65 e_{ss} = 0,1469$$

La respuesta del controlador con esta nueva sintonización presenta una significativa mejoría, reduciendo casi a cero la sobreoscilación y mejorando el tiempo establecimiento y el error en régimen permanente.

En la figura 46 se muestra el valor de la variable de control  $q_r$  para esta entrada, observando que aunque presenta un pico elevado, no supera los 25 m<sup>3</sup>/h fijado como máximo valor del caudal de salida de la válvula de refrigeración.

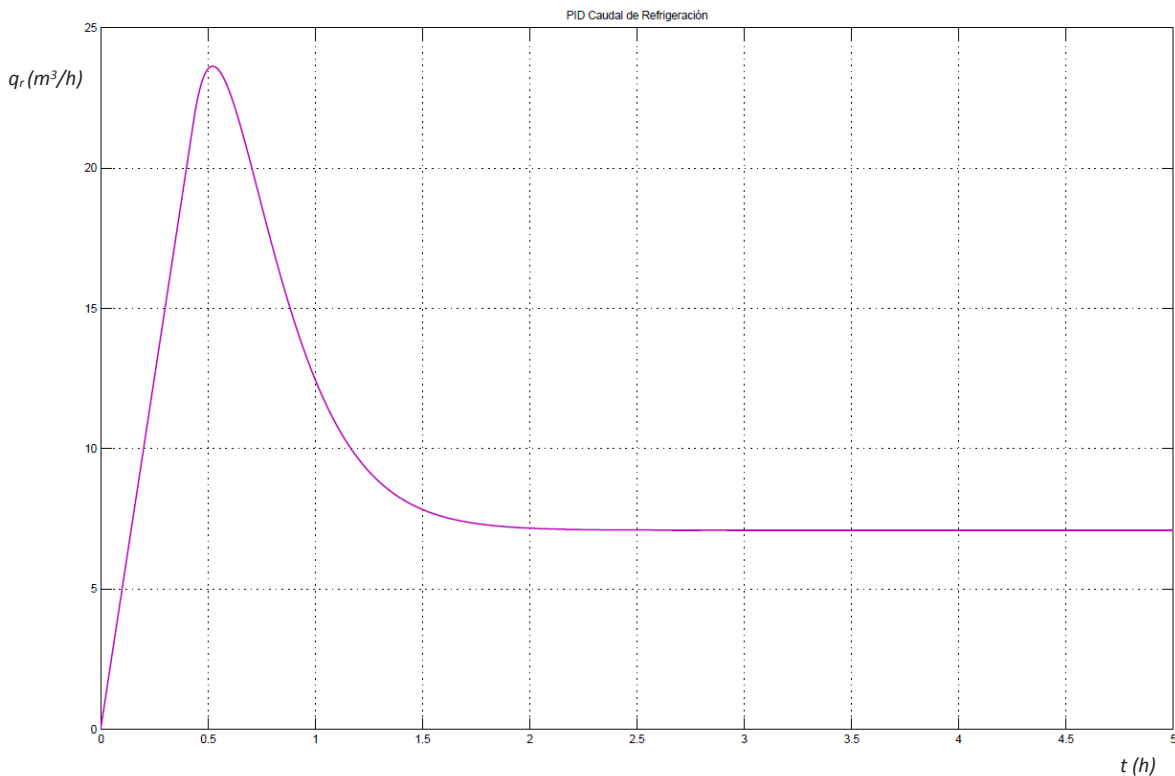


Figura 46. Caudal de refrigeración del controlador PID sintonizado frente a una entrada en escalón de 24 a 23 °C.

La respuesta del sistema a la entrada variable entre 20°C a 24°C con controlador PID se muestra en la figura 47 y la señal de control asociada en la figura 48.

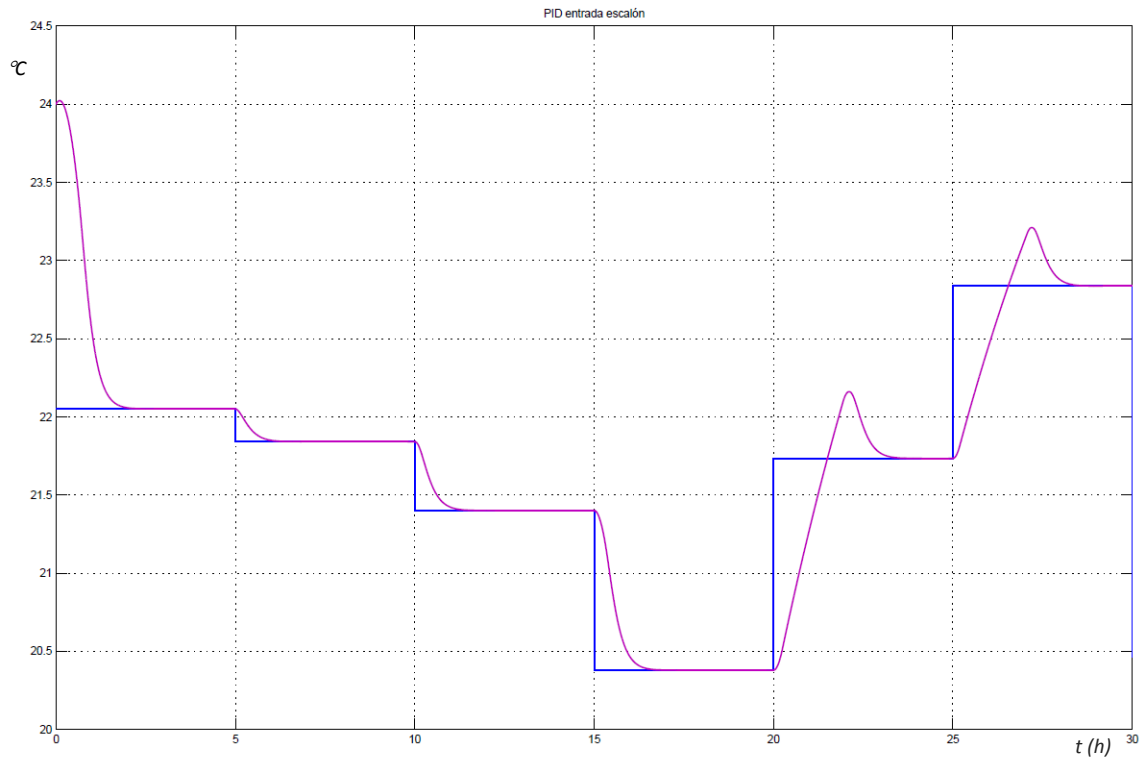


Figura 47. Respuesta del controlador PID sintonizado a una entrada variable entre 20 y 24 °C.

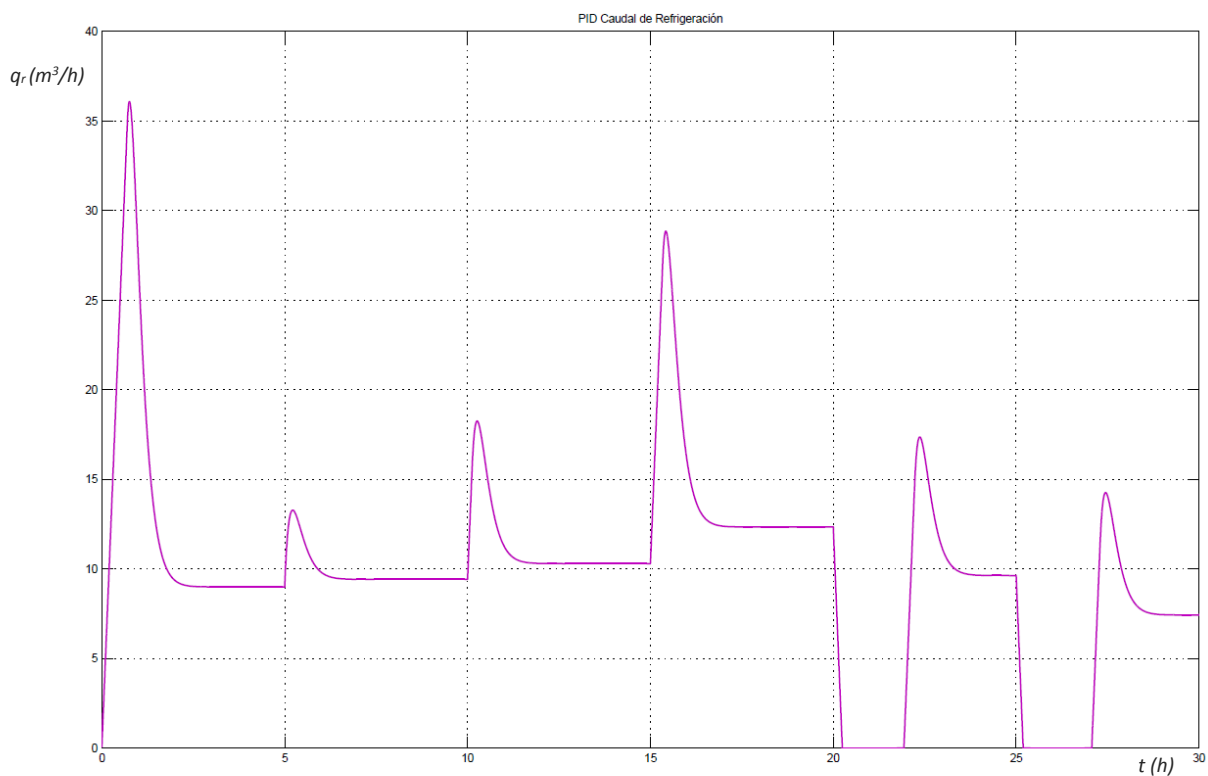


Figura 48. Caudal de refrigeración del controlador PID sintonizado para la entrada salto de 20 a 24 °C.

En este caso, las exigencias de caudal de la válvula de refrigeración son superiores a 25  $m^3/h$ , lo que puede limitar la respuesta del controlador en una planta real.

## 6.5. Comparación de resultados

En este apartado se analizarán los resultados del controlador borroso sintonizado con algoritmos genéticos frente al propio controlador borroso sin sintonizar y el controlador PID tradicional sintonizado mediante el modelo. El comportamiento del sistema se evaluará atendiendo a su comportamiento frente a una entrada escalón de menos un grado y a una entrada variable. Aunque estas simulaciones han sido ya desarrolladas en los apartados anteriores, se presenta una síntesis y valoración de los resultados comparativos obtenidos.

### 6.5.1. Respuesta a la entrada en escalón

La respuesta a la entrada escalón de los tres controladores analizados se ha mostrado previamente en las figuras 31, 40 y 45. En la tabla 4 se especifican los valores que se ha obtenido con cada controlador de respuesta en el dominio del tiempo, así como el valor de la función de ajuste  $f_a$ :

TIPO DE CONTROLADOR	Controlador borroso no sintonizado	Controlador borroso sintonizado con AGs	Controlador PID
$t_s$	1,0500 h	1,0300 h	1,2270 h
$M_p$	0%	0%	0,0270%
$ess$	0,0375%	0,0052%	0,0268%
$f_a$	0,1294	0,1064	0,1469

Tabla 4. Valores de la respuesta en el tiempo de los tres controladores.

El controlador borroso sintonizado con algoritmos genéticos presenta el mejor funcionamiento: mejor tiempo de establecimiento 1,03h frente a 1,05h y 1,227h; menor error estacionario, 0.0052% frente a 0,0375% y 0,027%; mejor función de ajuste (menor valor), 0,1064 frente a 0,1294 y 0,1469.

Por otro lado, la respuesta de la variable de control  $q_r$  a la entrada en escalón se ha mostrado anteriormente en las figuras 32, 41 y 46. En los tres controladores el caudal máximo exigido a la válvula de refrigeración no supera los 25 m<sup>3</sup>/h. En el caso de los dos controladores borrosos el máximo valor alcanzado está cerca de 18 m<sup>3</sup>/h, mientras que el controlador PID llegó a 24 m<sup>3</sup>/h. Este resultado hace más adecuados los controladores borrosos al demandar menor caudal para alcanzar la referencia de temperatura y ser una función más suave

### **6.5.2. Respuesta a la entrada variable**

La respuesta a la entrada aleatoria escalonada de 20 a 24°C se ha mostrado previamente en las figuras 33, 42 y 47. El funcionamiento con los tres controladores a esta entrada ha sido muy similar, siendo el hecho más relevante la sobreoscilación que presentan a la entrada en escalón positiva. Este fenómeno se debe a la dificultad que tiene el controlador y el sistema en responder a un cambio brusco de temperatura positivo.

Es también interesante el comportamiento de la válvula de control  $q_r$  a esta entrada mostrado en las figuras 34, 43 y 48. Con los tres controladores se observan picos importantes de caudal cuando aparecen los cambios de temperatura. En el caso de los dos controladores borrosos se llega a demandar un caudal máximo de 24 m<sup>3</sup>/h, cercano al límite de la válvula, mientras que el controlador PID presenta dos picos de 36 m<sup>3</sup>/h y 28 m<sup>3</sup>/h, fuera del rango de funcionamiento de la válvula real.

En definitiva, se ha podido comprobar que el comportamiento de los dos controladores borrosos es mejor que el del controlador PID tradicional. Además, el controlador borroso sintonizado con algoritmos genéticos presenta mejoras en su funcionamiento frente al controlador borroso no optimizado.

# Capítulo 7

## DISEÑO Y APLICACIÓN EN UNA PLANTA PILOTO

### 7.1. Diseño del controlador para una planta piloto

En este capítulo se va a describir la aplicación del controlador borroso diseñado a una planta piloto real, para poder comprobar en la práctica el comportamiento de dicho controlador. No se trata, por lo tanto, del desarrollo de una instalación industrial extensiva usando el controlador diseñado, sino más bien la implantación de una planta piloto de forma experimental que permita evaluar el desempeño del controlador y pueda confirmar las conclusiones halladas en el presente estudio.

En primer lugar, para completar el diseño del controlador y poder ser utilizado en la planta piloto, es necesario modificar y ampliar el modelo del sistema de control desarrollado en *Simulink* en capítulos anteriores, de tal manera que permita una simulación completa del proceso y la integración de los parámetros físicos principales del mismo.

Estos parámetros físicos y condiciones que deben incluirse en el modelo completo del sistema de control son:

1. La concentración de azúcar  $C_a$  (g/L) cuyo valor define la temperatura de consigna en función de la fase del proceso de fermentación.
2. El valor de la señal analógica de control de la válvula de refrigeración de 4-20mA en función del caudal de refrigeración definido en el modelo actual.
3. Generación de valores de  $Q_f$  (kCal/h) como perturbación en función de la concentración de azúcar según se ha descrito en la modelización del proceso.

En la figura 49 se muestra el nuevo modelo desarrollado de la planta, teniendo en cuenta las condiciones descritas anteriormente, y que puede ser utilizado para simular el funcionamiento y parametrizar el proceso completo de la planta piloto:

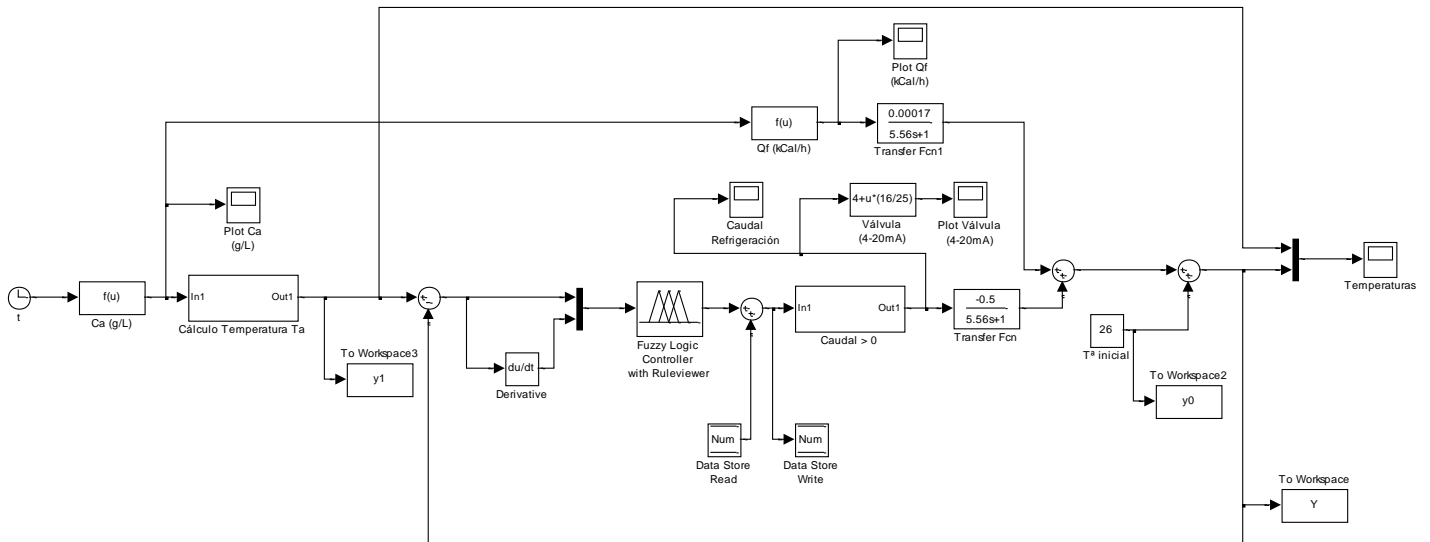


Figura 49. Diagrama de bloques diseñado en Simulink para simular el proceso completo.

La figura 50 corresponde al subsistema que determina la temperatura de consigna en función de la concentración de azúcar  $C_a$  en g/L:

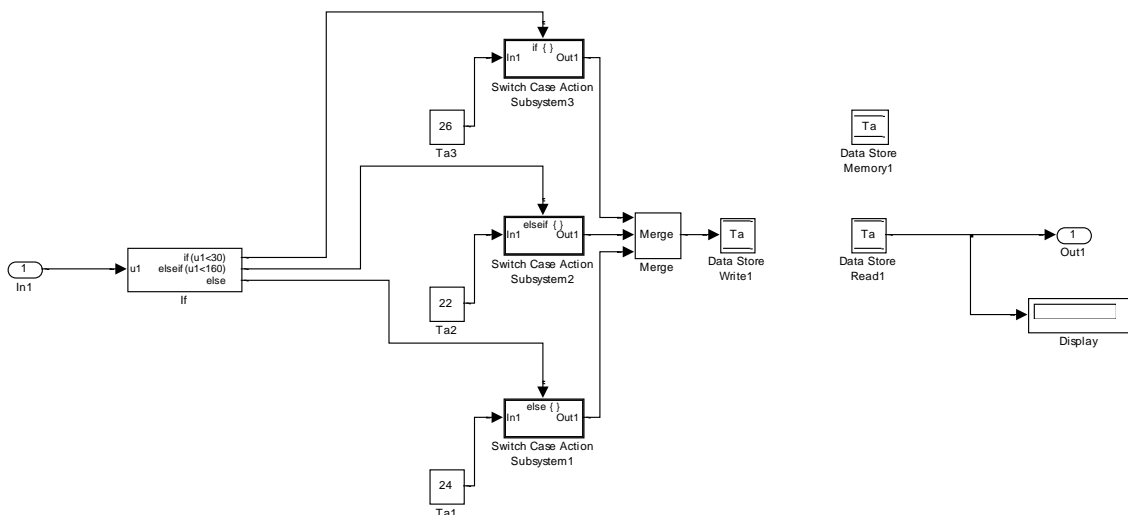


Figura 50. Subsistema para calcular la temperatura de consigna  $T_a$  en función de  $C_a$ .

Este diagrama de bloques incluye todo el modelo matemático desarrollado en el capítulo 4 y permite simular el proceso completo en unas condiciones muy similares a las de una planta real. Es evidente que existen perturbaciones no consideradas en el modelo, como la temperatura ambiente, concentración de levaduras, etc., que pueden influir en el sistema. Sin embargo el controlador borroso es más robusto que un controlador PID para responder de forma eficiente a estas perturbaciones. El proceso completo de fermentación se ha simulado en *Simulink* durante 160 horas, que corresponden a un tiempo medio de duración, partiendo de una temperatura inicial del mosto de 26°C.

La función  $C_a$  que se encuentra a la entrada del lazo genera la señal de la concentración de azúcar en función del tiempo mediante la ecuación hallada en el modelado del proceso de fermentación, y cuya evolución se muestra en la figura 51. En la planta real esta señal analógica de 4-20mA es suministrada por un sensor que mide la concentración de azúcar o densidad del mosto en fermentación.

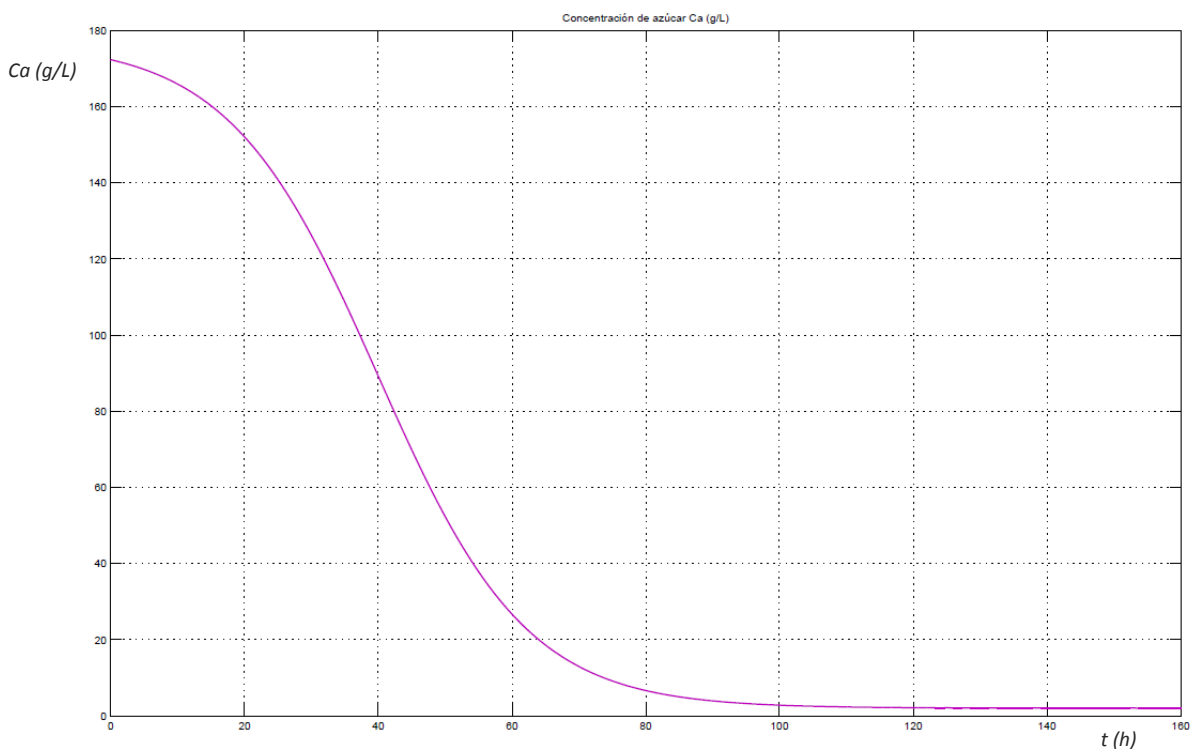


Figura 51. Generación de la señal de concentración de azúcar en función del tiempo.

Por otro lado, la perturbación correspondiente al calor generado por la reacción exotérmica de fermentación también se ha alimentado con la ecuación del calor  $Q_f$ , igualmente hallada en el modelado del proceso del capítulo 4 y mostrada en la figura 52:

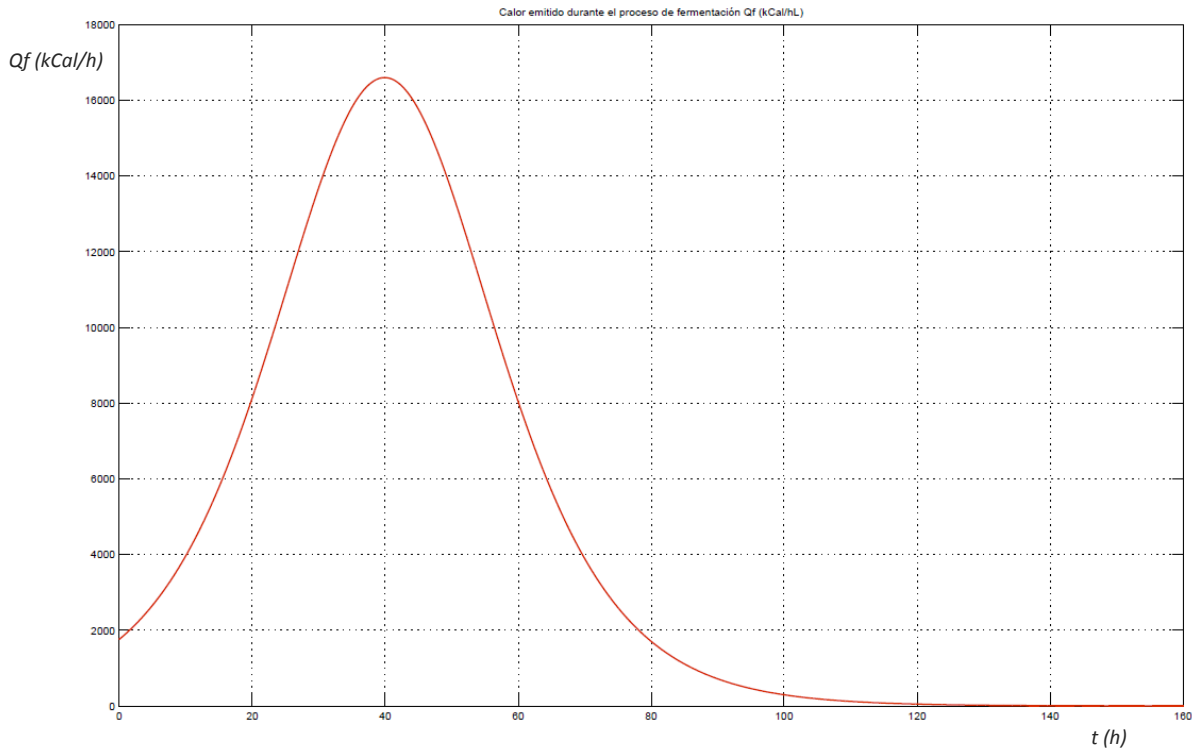


Figura 52. Cantidad de calor generado durante el proceso de fermentación.

En la figura 53 se muestra la temperatura del mosto durante todo el proceso de fermentación (línea magenta) y la referencia de temperatura en cada fase de dicho proceso (línea azul), en la simulación del proceso completo de fermentación.

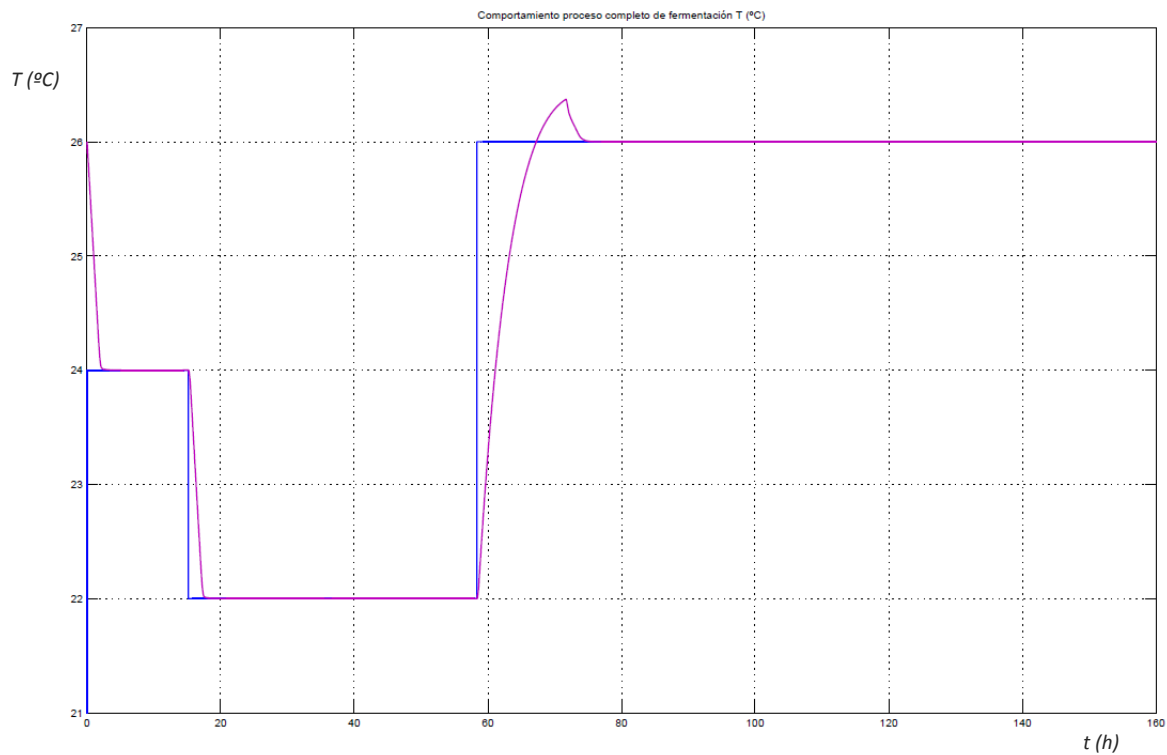


Figura 53. Temperatura del mosto durante el proceso completo de fermentación.

De la anterior figura se pueden extraer las siguientes conclusiones:

1. La temperatura del mosto durante toda la fermentación responde al perfil esperado con las tres diferentes referencias en cada fase del proceso.
2. La estabilidad de la señal y el margen de error de la salida son buenos y prácticamente no se puede distinguir en régimen estacionario entre la referencia y la temperatura de salida.
3. El tiempo de establecimiento es el esperado en cada cambio de fase, sin embargo aparece una sobreoscilación en el último cambio de fase, ya observada en la simulación de la entrada aleatoria escalonada.

El caudal requerido en  $\text{m}^3/\text{h}$  para la válvula de refrigeración durante todo el proceso se describe en la figura 54. Como puede observarse en la gráfica, el caudal no supera en ningún momento el valor de  $25 \text{ m}^3/\text{h}$ , siendo el valor máximo  $21 \text{ m}^3/\text{h}$ .

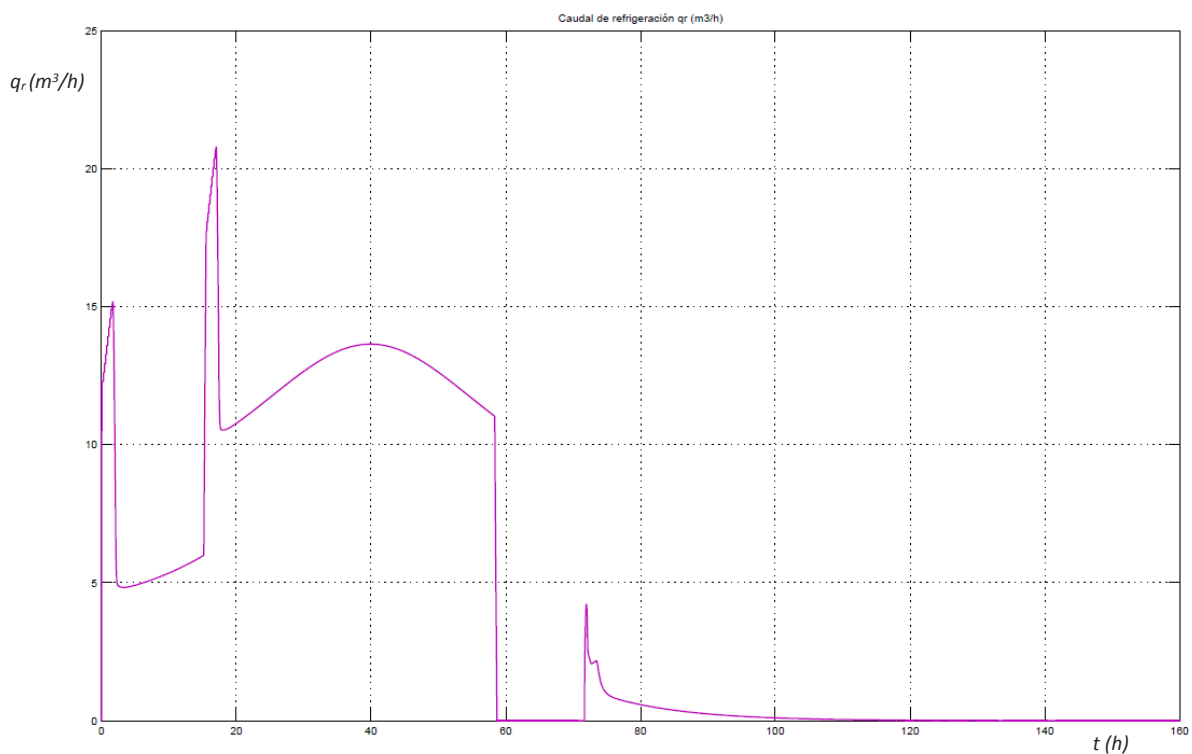


Figura 54. Caudal de refrigeración durante todo el proceso de fermentación en  $\text{m}^3/\text{h}$ .

Teniendo en cuenta un rango de caudal de 0 a 25 m<sup>3</sup>/h en la válvula del caudal, la señal de la salida analógica de 4-20mA que debe generar el controlador para obtener dicho caudal sería la indicada en la figura 55:

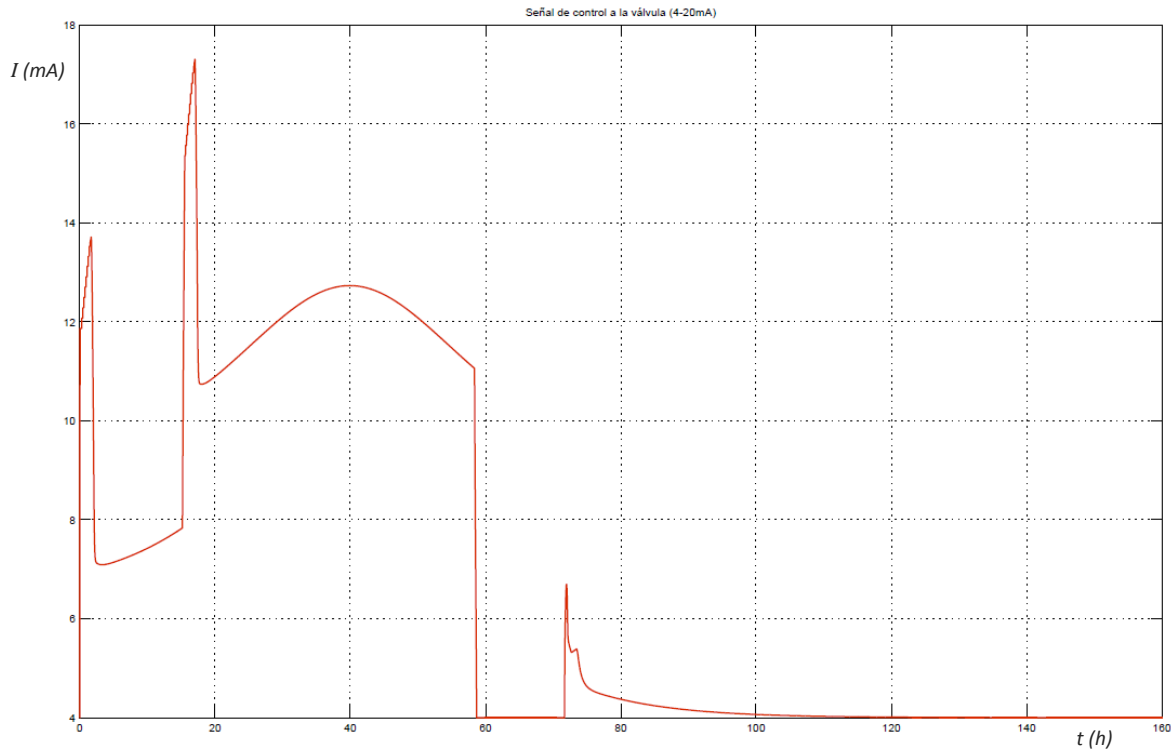


Figura 55. Señal analógica de 4-20mA de salida del controlador para manejar la válvula de refrigeración.

## 7.2. Descripción de la planta piloto

El controlador borroso diseñado se ha probado experimentalmente en una planta de fermentación en las instalaciones de *Beam Suntory Jerez*, en un depósito de 30.000 litros, de iguales características a los datos indicados en el apartado 5.3. Dicho depósito está provisto de un sistema de refrigeración mixto compuesto por una ducha exterior y por placas intercambiadoras internas. La válvula de control actúa en paralelo sobre los dos circuitos de refrigeración del depósito, suministrando a ambos el caudal de refrigeración al mismo tiempo.

El líquido refrigerante es agua enfriada mediante un compresor industrial de frío entre 10°C y 12°C en función de la demanda del proceso, aunque debido al exceso de carga y a las pérdidas en la instalación, la temperatura media del refrigerante es de 18°C. En las figuras 56, 57 y 58 se muestran las dimensiones, formas y detalles del depósito sobre el que se ha realizado la prueba:

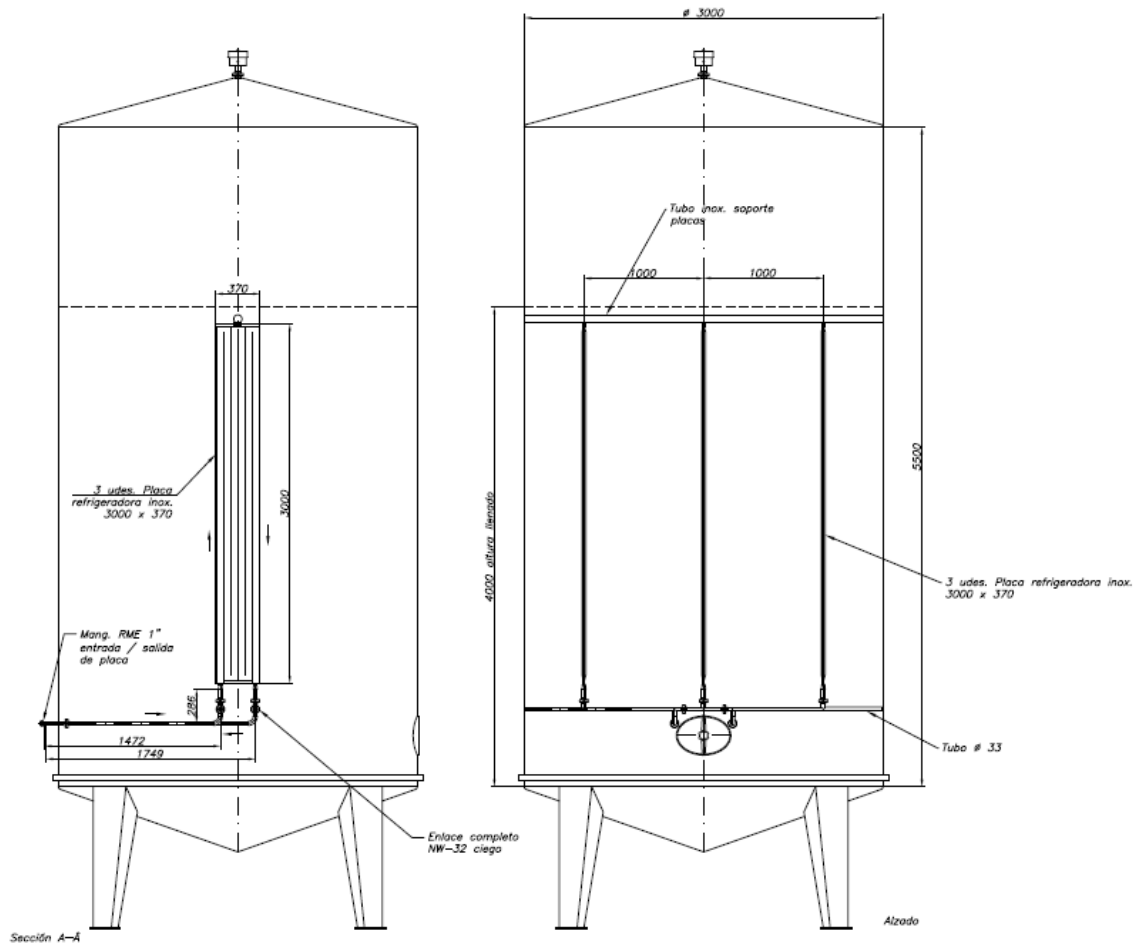


Figura 56. Dimensiones del depósito de fermentación con refrigeración mixta.

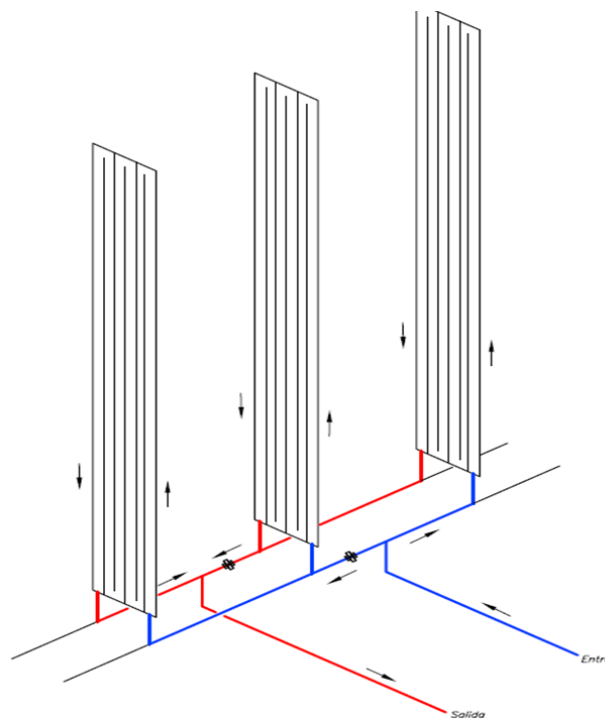


Figura 57. Detalle de las placas de intercambio internas del depósito.



Figura 58. Depósito de la planta de fermentación de Beam Suntory en Jerez.

Dentro de la planta de fermentación, el depósito seleccionado para la prueba es el nº83 (figura 59). Todos los depósitos de la planta tienen las mismas características.

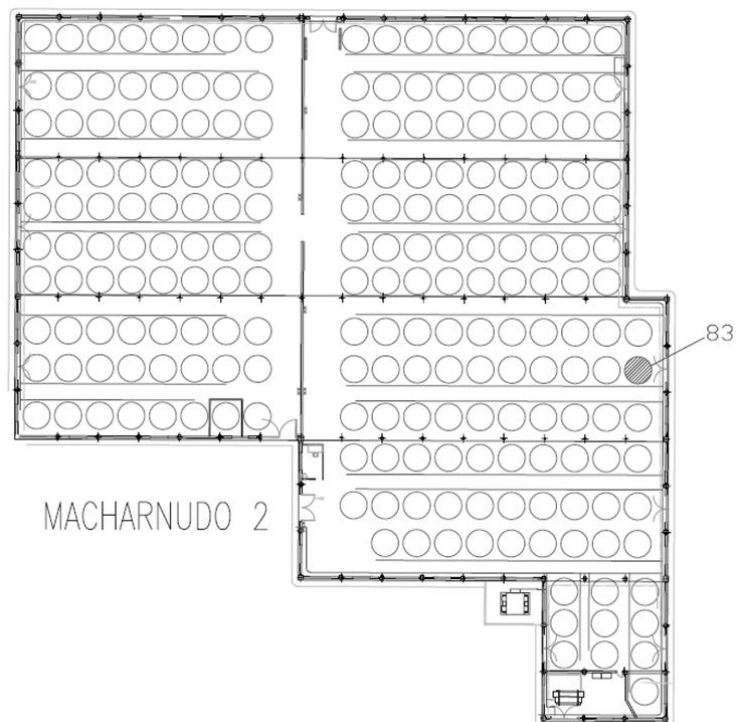
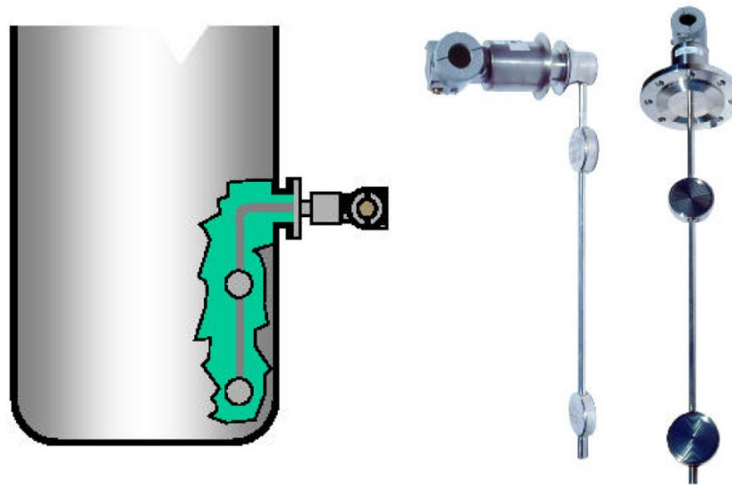


Figura 59. Ubicación del depósito nº 83 dentro de la planta de fermentación.

Para realizar esta prueba experimental en el depósito nº 83 se instalaron los siguientes elementos de control:

➤ Sensor de concentración de azúcar

Este sensor instalado en el depósito se encarga de medir la concentración de azúcar del mosto en fermentación. El sensor instalado es un DT301 de SMAR que suministra una señal analógica de 4-20mA en función de varios parámetros configurables, tales como, concentración en g/cm<sup>3</sup>, Baumé, Brix, etc... El sensor se instala en el lateral del depósito a una altura del 25% de su volumen y la señal de salida se cablea hasta el controlador del sistema (figura 60).



*Figura 60. Sensor de concentración de azúcar y montaje en el depósito.*

➤ Sensor de temperatura

Se instala un sensor de temperatura en un lateral del depósito mediante una vaina roscada (figura 61). El sensor es de tipo PT-100 con un rango de medición de -50°C a 500°C dotado con transmisor electrónico modelo EL2271 de Spirax-Sarco con una señal de salida de 4-20mA que se conecta al controlador.



*Figura 61. Sensor de temperatura TAD081 de IFM instalado en el depósito.*

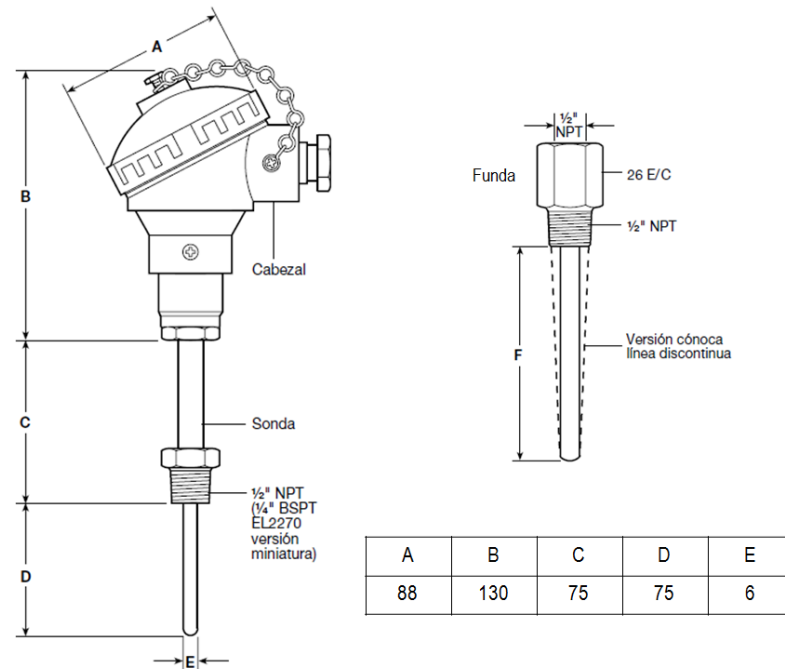


Figura 62. Dimensiones de sensor y transmisor de temperatura.

➤ Válvula de control

Para controlar el caudal de refrigeración en el depósito de fermentación se instala una válvula de control proporcional provista de accionamiento eléctrico (figura 63). El modelo de la válvula de control eléctrica es el 3214-DN40 con actuador 3374-21, ambos del fabricante Samson. Dicha válvula se alimenta con 24 VAC y permite ser controlada mediante una señal de control de 4-20mA proporcionada por el controlador del sistema.



Figura 63. Válvula de control proporcional Samson 3214-DN40 con actuador 3374-21.

## ➤ Controlador del proceso

Se utiliza como controlador del sistema un autómata SIMATIC S7-200 de Siemens (figura 64). Este autómata se corresponde con la serie de micro-PLCs modulares de Siemens constituidos por una CPU reducida y compacta que permite añadir hasta 4 módulos de extensión para entradas, salidas, comunicaciones, etc... Para esta aplicación se ha usado un módulo de extensión EM231 con 4 entradas analógicas de 4-20 mA de 12 bits de resolución y otro módulo de extensión EM232 con 2 salidas analógicas de 4-20mA de 11 bits de resolución.



Figura 64. Controlador SIMATIC S7-200 y módulos de extensión EM231 y EM232.

Para realizar la programación del algoritmo del controlador borroso se ha utilizado la herramienta Fuzzy Control++ V5 de Siemens. Este software se puede ejecutar bajo PLCs de la gama SIMATIC S7, el sistema de control de proceso SIMATIC PCS7, y el sistema SCADA SIMATIC WinCC, y ofrece bloques de función especiales y bloques de imagen. SIMATIC WinCC vincula los sistemas borrosos configurados como objetos inteligentes con ayuda de un OLL. Los sistemas borrosos se configuran y generan a través de una herramienta de configuración. El software *runtime* procesa los sistemas durante el funcionamiento normal del PLC. Es decir, partiendo de un mismo controlador o PLC que puede ejecutar operaciones en diagrama de contactos, ladders o scadas, además puede realizar tareas en paralelo aplicando lógica difusa mediante la configuración de las funciones de pertenencia y matriz de reglas en el software Fuzzy Control++.

En las figuras 65, 66, 67 y 68 se muestran distintas imágenes con la configuración y definición de las funciones de pertenencia programadas para esta aplicación con el software Fuzzy Control ++.

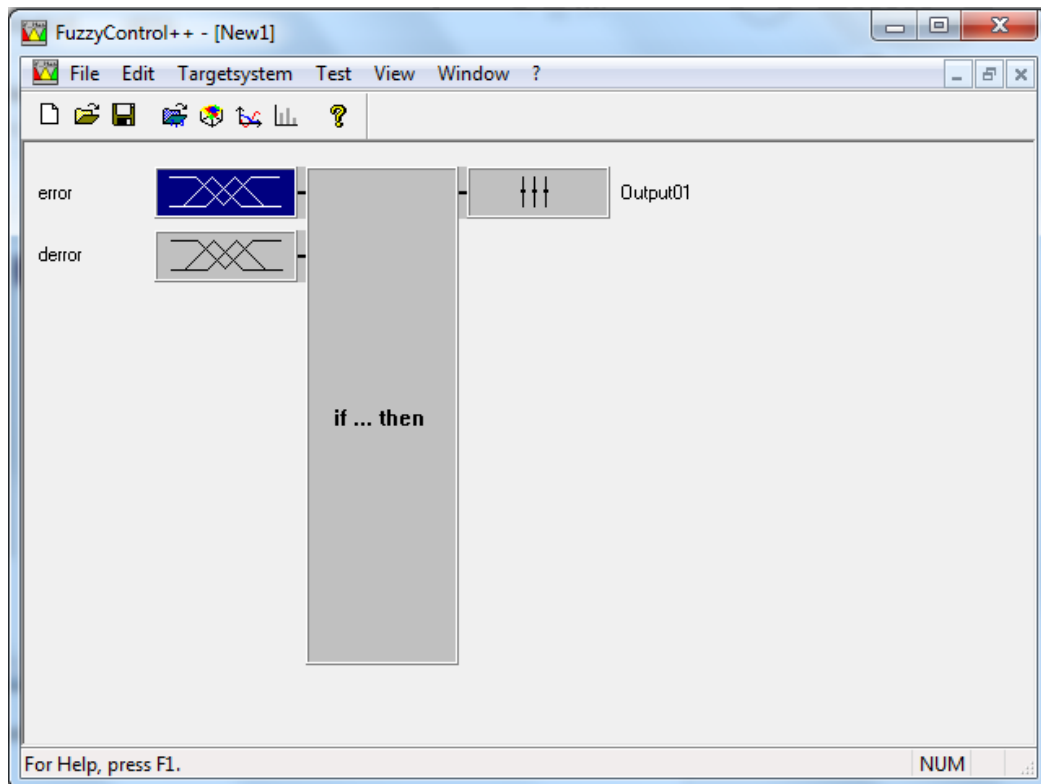


Figura 65. Configuración de la pantalla principal de software Fuzzy Control++ de Siemens.

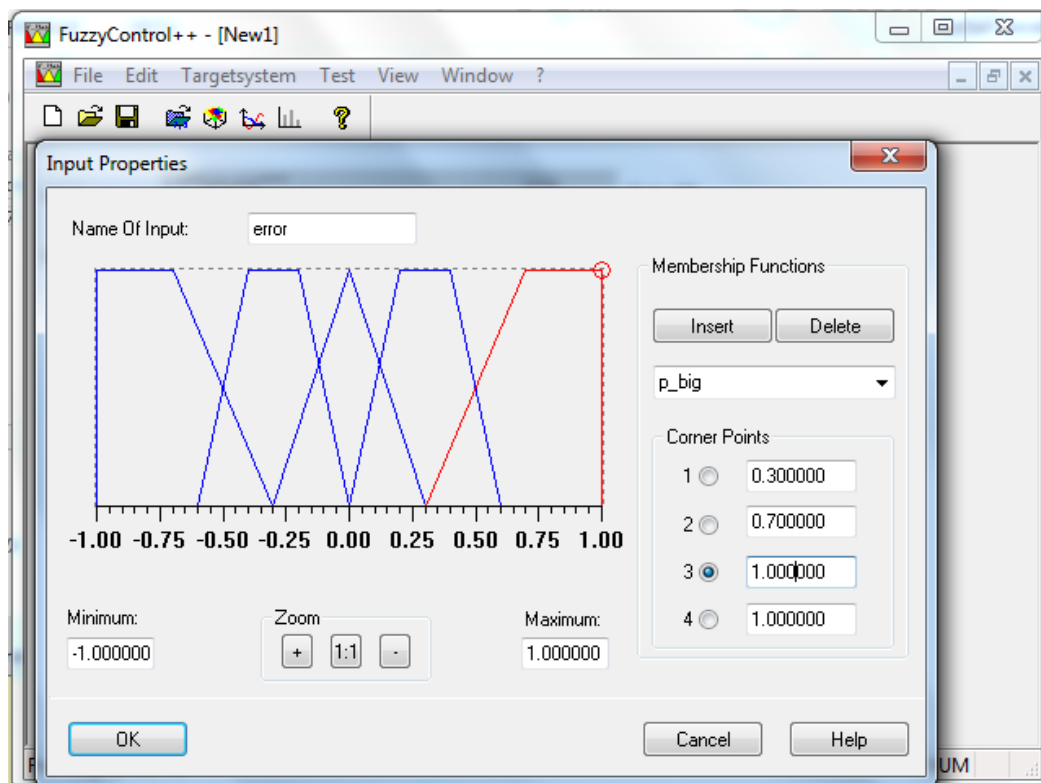


Figura 66. Función de pertenencia de la señal de entrada de error en Fuzzy Control++.

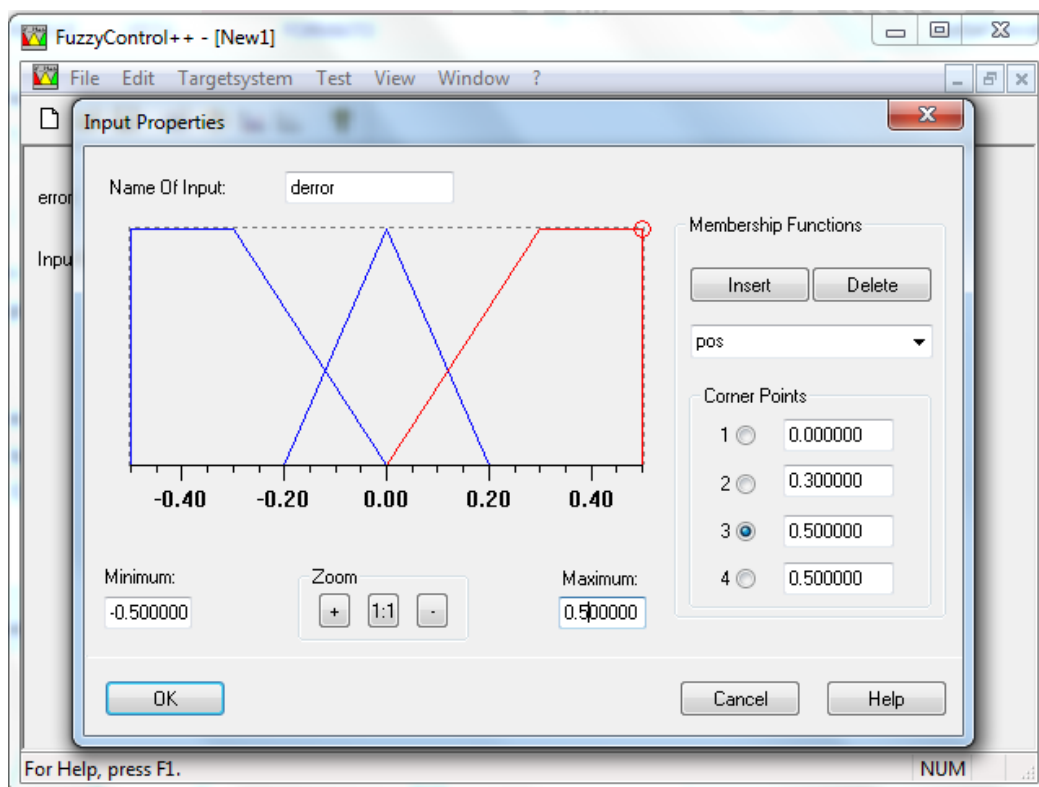


Figura 67. Función de pertenencia de la señal de entrada de la variación del error en Fuzzy Control++.

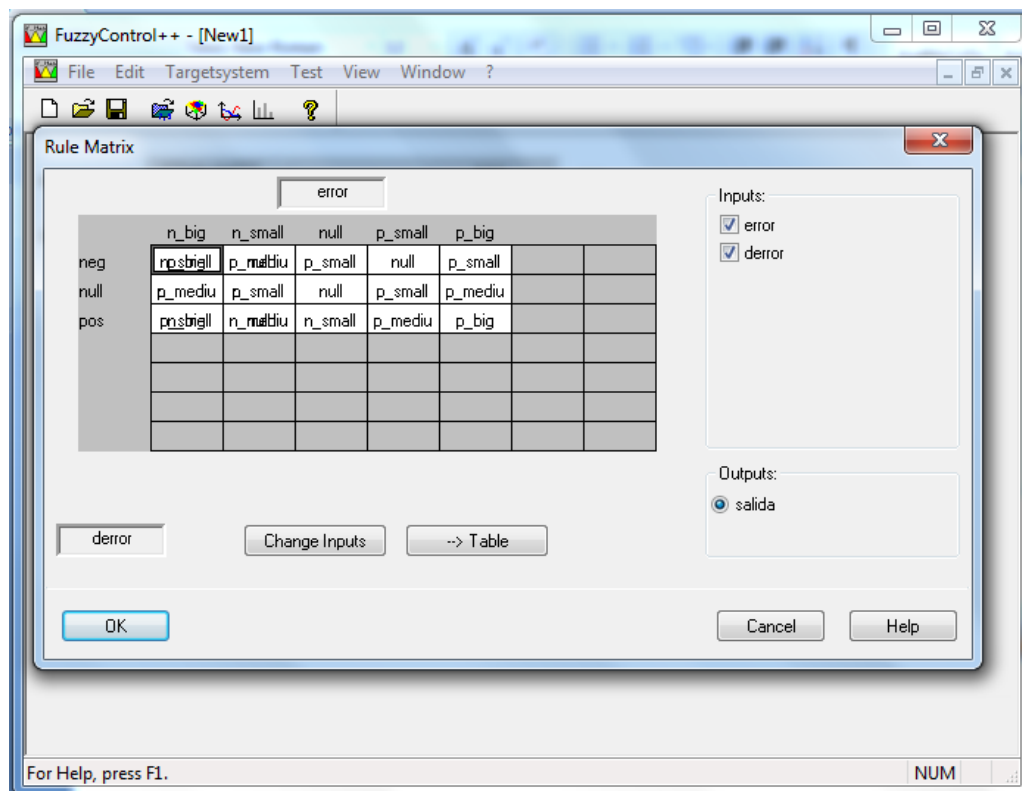


Figura 68. Matriz de reglas del controlador difuso en Fuzzy Control++.

### **7.3. Protocolo de prueba**

La prueba experimental en la planta piloto se realiza en un depósito de fermentación con un volumen de mosto de 30.000 litros en el que se instalan los elementos de control descritos en el apartado anterior. Al mismo tiempo, para comparar los resultados obtenidos con respecto a un proceso normal, se selecciona el depósito nº 64 situado a continuación del nº 83 donde se realiza la prueba. Este depósito de referencia se llena del mismo tipo de mosto y al mismo tiempo que el depósito de prueba.

El control de temperatura del depósito de prueba se realiza según los criterios definidos en esta memoria con el controlador borroso diseñado, constituido por dos señales de medida, la concentración de azúcar y la temperatura del mosto en fermentación, la válvula de control proporcional para regular el caudal del agua de refrigeración y el controlador basado en lógica difusa.

Sin embargo, el depósito de referencia será controlado *off line* mediante un técnico de laboratorio, ya que en esta planta de fermentación no se dispone de control automático de fermentación. Esta circunstancia no hará posible comparar en la práctica el controlador borroso, por ejemplo, frente a un control tradicional de tipo PID. En cualquier caso, la experiencia práctica del uso de controladores PID en otras plantas es muy similar a los resultados teóricos simulados en el capítulo 6, constatándose la sobreoscilación de la variable de control, así como de cierta inestabilidad puntual debido a perturbaciones externas.

Los registros de concentración de azúcar y temperatura se obtienen de forma automática en el caso del depósito de prueba, siendo éstos almacenados en la memoria del PLC con una frecuencia de muestreo de 1 minuto. Mientras que el depósito de referencia será muestreado manualmente cada 60 minutos.

La temperatura de consigna del depósito de prueba manejado por el controlador borroso será variable en función de la fase del proceso de fermentación según se definió en la tabla 1 del capítulo 4.

Para el depósito de referencia la temperatura de consigna es de 24°C de forma permanente desde el principio hasta el final del proceso de fermentación.

Finalmente, el control del caudal de refrigeración del depósito de prueba es controlado de forma automática por el controlador borroso actuando sobre la válvula eléctrica de control proporcional, mientras que la refrigeración del depósito de referencia es controlada manualmente por un operario abriendo o cerrando la válvula manual que

alimenta la refrigeración en dicho depósito cada hora al anotar la concentración de azúcar y la temperatura.

#### 7.4. Análisis de los resultados

El objetivo de realizar la prueba en una planta piloto es comprobar de forma experimental los resultados obtenidos de forma teórica al diseñar el controlador borroso. Para ello, el análisis de los resultados se basará en analizar las pruebas realizadas en los siguientes tres aspectos:

➤ Evolución del proceso

En primer lugar se muestra en la figura 69 la concentración de azúcar durante todo el proceso de fermentación del depósito de prueba (control borroso) (línea verde) y el depósito de referencia (manual) (línea roja):

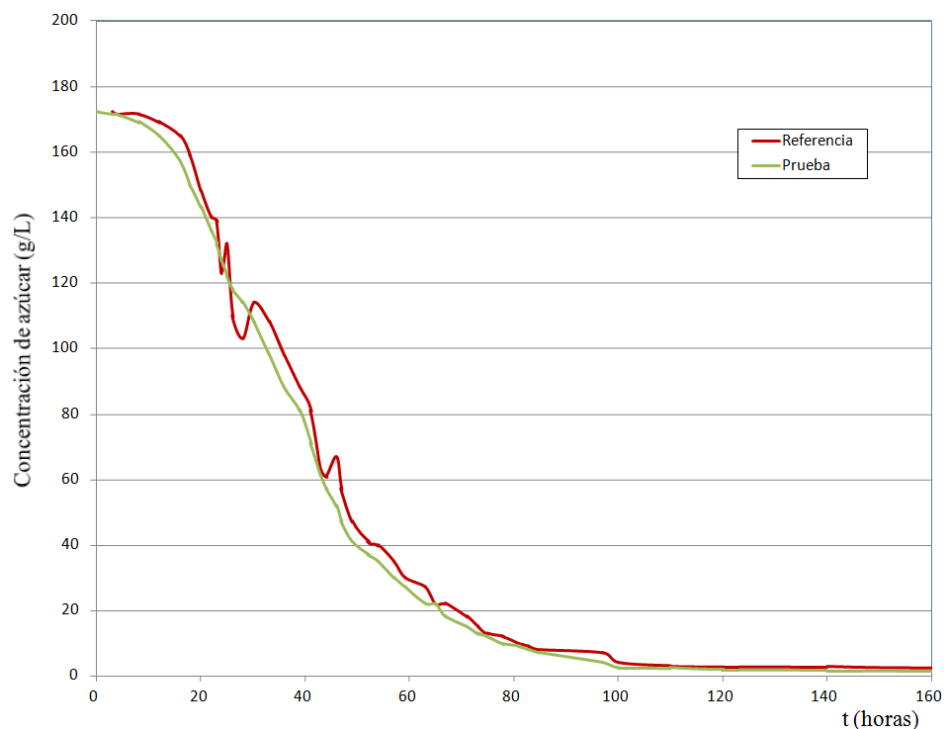


Figura 69. Evolución de la concentración de azúcar en g/L durante la prueba.

Los dos depósitos parten de la misma concentración de azúcar: 172,1 g/L. Puede observarse que el mosto de referencia (manual) presenta cierta inestabilidad durante la fase tumultuosa de la fermentación, precisamente donde la reacción exotérmica es más intensa y donde suelen aparecer más problemas en el control

de refrigeración. Sin embargo, el depósito de prueba (control borroso) muestra una buena estabilidad durante todo el proceso, incluso en la fase tumultuosa. Por otro lado, prácticamente durante todo el proceso, la concentración de azúcar en el depósito de prueba es menor que la referencia, lo que puede hacer suponer una mayor tasa de transformación alcohólica al final del mismo, aunque el dato final de concentración no es muy diferente: 1,5 g/L para el depósito de prueba y 1,9 g/L para la referencia. En ambos casos la concentración de azúcar está por debajo de 2,0 g/L.

En la figura 70 se muestra la evolución de la temperatura del mosto en fermentación para el depósito de prueba (línea verde) y el depósito de referencia (manual) (línea roja):

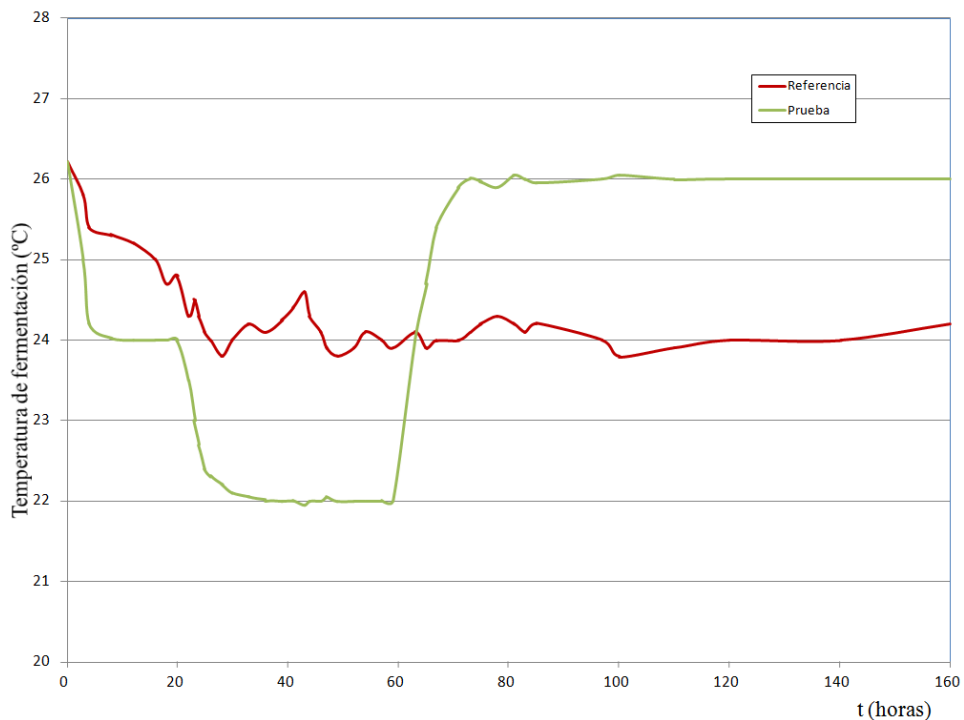


Figura 70. Evolución de la temperatura de fermentación en °C.

En el depósito de referencia, controlado de forma manual mediante el PID, se observa en primer lugar un tiempo de establecimiento muy alto y presenta oscilaciones en todo el proceso, posiblemente debido a hecho que este depósito haya sido controlado de forma manual en intervalos de 1 hora, lo que le permite menor capacidad de reacción frente a perturbaciones externas.

Por otro lado, el depósito controlado por el sistema borroso mantiene la temperatura de consigna en las tres fases de la fermentación de una manera estable, sin grandes oscilaciones, y de forma muy similar a la respuesta obtenida de forma teórica (figura 53). En este aspecto cabe reseñar que la principal diferencia con el modelo teórico es que el tiempo de establecimiento es algo mayor, principalmente entre la segunda y tercera fase. Esto puede deberse al efecto que haya podido tener la temperatura ambiente, variable no contemplada el modelo matemático, y que en caso de estar por debajo de la media, como así ocurrió durante la prueba, puede ralentizar el cambio de temperatura de 22°C a 26°C. A pesar de esta circunstancia, el controlador ha regulado el proceso de forma adecuada, observándose una significativa mejoría con respecto al control manual.

➤ **Datos analíticos finales**

Aunque los datos analíticos que se controlan en un proceso de vinificación son muy extensos, para valorar el resultado de la prueba sólo se van a tener en cuenta aquellos que pueden depender directa o indirectamente del proceso de fermentación, es decir, el grado alcohólico, la concentración de azúcar y la acidez volátil. A continuación se detallan los resultados obtenidos para estos tres parámetros al final del proceso de fermentación en los depósitos de prueba y referencia:

<b>DATOS ANALÍTICOS</b>	<b>Grado alcohólico</b>	<b>Concentración de azúcar</b>	<b>Acidez volátil</b>
<b>Prueba (propuesta)</b>	11,58°	1,50 g/L	0,19 g/L
<b>Referencia (manual)</b>	11,22°	1,90 g/L	0,24 g/L

Todos los valores del depósito de prueba son mejores que el depósito de referencia. En primer lugar, el más significativo es el grado alcohólico con un 3,2% de incremento. Este hecho supondría a gran escala un menor consumo de alcohol en la posterior fase de alcoholización con el correspondiente ahorro económico para el negocio. En cualquier caso, una sola prueba experimental no es suficiente para confirmar el porcentaje de mejora de la tasa de transformación alcohólica.

La concentración final de azúcar en los dos depósitos es inferior a 2,0 g/L, que es la máxima que se puede obtener en una vinificación en blanco. Sin embargo, el depósito de prueba obtiene un valor menor que el depósito de referencia, lo que supone mayor seguridad para no superar dicho nivel y también una potencial mayor tasa de transformación alcohólica como ya se ha comentado anteriormente.

La acidez volátil, medida con respecto a la cantidad de ácido acético presente en el vino, es un parámetro relevante ya que permite establecer analíticamente la sanidad y calidad del vino. Cuanto más bajo sea este valor, mejores características presentará el vino en su fase de maduración. En la prueba experimental, ambos depósitos presentan un nivel bajo adecuado, aunque el depósito de prueba también en este caso tiene un mejor dato que el depósito de referencia.

➤ Datos organolépticos finales

Las características organolépticas de los mostos fermentados son evaluadas por un panel de cata compuesto por cinco personas con experiencia en la cata de vinos. Ninguno de ellos encontró ningún defecto en los dos depósitos y tampoco apreciaron diferencias de calidad apreciables olfativamente entre ambos. Esta circunstancia es lógica ya que las diferencias analíticas halladas en la experiencia, siempre que no haya un defecto en el vino, son muy difíciles de detectar organolépticamente.

En definitiva, a pesar de tratarse de una sola prueba experimental, se ha demostrado que sus resultados coinciden mayoritariamente con el modelo y el comportamiento del controlador borroso simulado teóricamente, confirmando además el buen desempeño de este controlador con respecto al control PID o manual.

# Capítulo 8

## CONCLUSIONES Y LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS

### 8.1. Conclusiones

Mediante el presente estudio se ha desarrollado un modelo matemático de fermentación alcohólica, se ha diseñado un controlador borroso para controlar la refrigeración del proceso y se ha sintonizado la matriz de reglas de dicho controlador mediante algoritmos genéticos gracias a dicho modelo.

Por otro lado, también se ha demostrado en simulación el mejor comportamiento del controlador borroso sintonizado frente a un controlador borroso no sintonizado y a un controlador PID tradicional. Finalmente la experiencia en la planta piloto confirma el buen desempeño del controlador borroso y su conveniencia para controlar procesos de fermentación alcohólicos.

Las mejoras generadas con el uso del controlador borroso diseñado son, principalmente, la obtención de una mayor tasa de transformación alcohólica y un menor nivel de concentración de azúcar al final del proceso de fermentación, lo que garantiza reducir los potenciales costes de reprocesado de mosto con azúcar residual. Además permite reducir los efectos que otros defectos del mosto pueden provocar en el vino final fermentado, eliminando también altos costes de reprocesado.

Puesto que se ha comprobado en la prueba experimental que el control de la refrigeración con el controlador borroso mejora la tasa de transformación alcohólica, sería necesario repetir las pruebas experimentales usando más lotes para confirmar dicha hipótesis y determinar el porcentaje de mejora. Con ello, se podría estudiar un proyecto de inversión para la instalación de controladores difusos en la planta de

fermentación, siempre y cuando el *payback* no sea superior a los límites establecidos por la empresa (en este caso 3 años). En este estudio, aunque puede ser más difícil de calcular, se debe tener en cuenta los costes de reprocesado que se dejarán de tener debido a puntuales deficiencias en el control de la fermentación que podrían dar lugar a vinos con defectos y restos de azúcares.

## **8.2. Líneas de investigación futuras**

Tras este estudio se enumeran a continuación las posibles líneas de investigación que pueden derivarse de los resultados obtenidos o de los distintos ámbitos tratados en la memoria:

1. Realizar una planta piloto con mayor número de depósitos para poder obtener un tamaño de muestra suficientemente significativo para validar del diseño del controlador.
2. Diseñar un controlador borroso con dos entradas para regular directamente la temperatura y la concentración de azúcar en el mosto.
3. Afinar aún más las funciones de pertenencia y la matriz de reglas para mejorar la precisión del controlador y mejorar su respuesta en cuanto a reducir el tiempo de establecimiento y error en régimen permanente. Por ejemplo, usando 15 valores independientes en la matriz de reglas en lugar de los 7 usados en el presente estudio.
4. Encontrar una función de la temperatura de consigna de fermentación en función de la concentración de azúcar y no establecer tan solo tres consignas diferentes para cada fase del proceso de fermentación. De esta forma se podrían evitar cambios bruscos en la consigna y la temperatura de salida, así como las perturbaciones en el controlador y la válvula de control.
5. Realizar la sintonización del controlador borroso con un mayor número de reglas para poder mejorar la precisión y respuesta del controlador, incluso reformular la función objetivo introduciendo otros parámetros además de la respuesta en el tiempo a la entrada en escalón. Por ejemplo, la respuesta a una entrada en rampa, sensibilidad a las perturbaciones y ruidos, comportamiento de la señal de la válvula de control, etc.

6. Modelar la válvula de control de refrigeración a través de un PID o incluso un nuevo controlador borroso para mantener a la salida de dicha válvula el caudal demandado por el controlador del sistema, mediante la señal de salida analógica de 4-20mA ó 0-10V.
7. Una mejora del propio proceso consistiría en reducir la temperatura media  $T_r$  del refrigerante mediante la generación de más frigorías con un nuevo y más potente equipo de refrigeración, o bien, planificar la entrada del volumen de mosto en fermentación para reducir las necesidades puntuales de frío y, por lo tanto, poder disponer una temperatura del refrigerante menor. Esto cambiaría el modelado del proceso y permitiría reducir los caudales de refrigeración bajando las necesidades hidráulicas de las válvulas y tuberías de refrigeración.
8. Evaluar la posibilidad de sustituir la válvula proporcional analógica usada en la aplicación por una electroválvula digital todo/nada y realizar una regulación en frecuencia. Esto podría complicar el control y la estabilidad del sistema; sin embargo podría abaratar de forma significativa el coste de la instalación.
9. Revisar de nuevo el modelo matemático del proceso de fermentación teniendo en cuenta otros parámetros que intervienen en el mismo, tales como la temperatura ambiente, temperatura del refrigerante, concentración de levaduras, etc...
10. Aplicar técnicas de inteligencia artificial en otras áreas del proceso de elaboración de vinos o bebidas espirituosas, por ejemplo:
  - Sistemas inteligentes de análisis organoléptico (narices electrónicas)
  - Control de la merma en envejecimiento.
  - Fiabilidad de los procesos de blending.
  - Control de capacidad en los procesos de llenado.
  - Reducción de los procesos de lavado en cambios de líquido.
  - Visión artificial para detectar defectos en el líquido o materia seca.

11. Uso de redes neuronales para interpretar y predecir las señales de los biosensores de concentración de azúcar para mejorar la fiabilidad de los datos de medida, incluyendo también otros datos como temperatura, pH y concentración de levaduras.
  
12. Extender el modelo y el diseño del controlador usando lógica difusa y algoritmos genéticos a otros procesos de fermentación alcohólica, tales como la cebada, maíz, agave, cañas de azúcar, ... que están relacionados con los procesos de elaboración de la cerveza, whiskey, tequila, ron, etc.

# BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

- Alford, J. S. (2006). *Bioprocess control: Advances and challenges*. Computers & Chemical Engineering, 30(10), 1464-1475.
- Åström, K.J. & Hägglund, T. (2006). *Advanced PID control*. ISA-Instrumentation, Systems and Autation Society; Research Triangle Park, NC 27709.
- Bastin, G., & Van Impe, J. F. (1995). Nonlinear and adaptive control in biotechnology: a tutorial. *European Journal of Control*, 1(1), 37-53.
- Caro, I. (1989). *Tesis Doctoral Desarrollo de un modelo cinético aplicado a la fermentación alcohólica y estudio del efecto global de la temperatura*. Universidad de Cádiz, España.
- Dormido, S., Santos, M., de Madrid, A. P., & Morilla, F. (1993). Autosintonía de controladores borrosos utilizando técnicas clásicas basadas en reguladores PID. *Proc. of III FLAT, España*, 217-225.
- Foran, J. (2002). *Optimisation of a fuzzy logic controller using genetic algorithms*. Master in Engineering Report.
- Belarbi, K. & Titel. F. (2000). *Genetic algorithm for the design of a class of fuzzy controllers: An alternative approach*, *IEEE Transactions On Fuzzy Systems* 2000, Vol 8, Iss 4, pp 398-405
- Galluzzo, M., & Cosenza, B. (2010). *Type-2 fuzzy control of a fed-batch fermentation reactor*. *Computer Aided Chemical Engineering*, 28, 571-576.
- Herrera, F., Lozano, M., & Verdegay, J. L. (1995). Tuning fuzzy logic controllers by genetic algorithms. *International Journal of Approximate Reasoning*, 12(3), 299-315.
- Horiuchi, J. I. (2002). Fuzzy modeling and control of biological processes. *Journal of bioscience and bioengineering*, 94(6), 574-578.
- Goldberg, D. E., & Holland, J. H. (1988). *Genetic algorithms and machine learning*. *Machine learning*, 3(2), 95-99.
- Karakuzu, C., Türker, M., & Öztürk, S. (2005). *Modelling, on-line state estimation and fuzzy control of production scale fed-batch baker's yeast fermentation*. *Control Engineering Practice*, 14(8), 959-974.
- Mazzone, V. (2002). *Controladores PID*. *Automatización y Control Industrial* Universidad Nacional de Quilmes.
- Montague, G. A., Morris, A. J., & Bush, J. R. (1988). *Considerations in control scheme development for fermentation process control*. *Control Systems Magazine, IEEE*, 8(2), 44-48.

- Morilla, F. y Dormido, S. (2000). *Controladores PID: Fundamentos y Sintonía*. Monografía CEA-IFAC. Madrid, España.
- Morris, N. (1997). *Control Engineering*. Reino Unido. McGraw-Hill.
- Ogata, K. (2003). *Ingeniería de Control Moderna*. Madrid, España. Pearson Prentice Hall.
- Osofisan, P. B. (2007). *Optimization of the Fermentation Process in a Brewery with a Fuzzy Logic Controller*. Leonardo Journal of Sciences, 6(11), 79-92.
- Peynaud, E. y Blouin, J. (2006). *Enología práctica*. Francia. MP.
- Reyero, R. y Nicolás, C. (1995). *Sistemas de control basados en lógica borrosa: fuzzy control*. Madrid, España. IKERLAN y Omron Electronics S.A. España.
- Rodríguez, E. (2007). *Tesis Doctoral Análisis Genómico y Molecular de Levaduras Vínicas: Aplicación a la Mejora del Proceso de Fermentación de Vinos mediante Selección de Levaduras Autóctonas*. Universidad de Cádiz.
- Ruge, I. A., & Alvis, M. A. (2012). *Aplicación de los algoritmos genéticos para el diseño de un controlador PID adaptativo*. Revista Tecnura, 13(25), 81-87.
- Santos, M. (2011). Un enfoque aplicado del control inteligente. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI, 8(4), 283-296.
- Santos, M. & Rendón, R. (2013). Sistema de Control Difuso con Reglas Sintonizadas mediante Algoritmos Genéticos para un Proceso de Fermentación Alcohólica. XV Multiconferencia CAEPIA, Madrid, 1018-1027.
- Shimizu, K., & Nikawa, J. (1996). *Application of artificial neural network and fuzzy control for fed-batch cultivation of recombinant *Saccharomyces cerevisiae**. Journal of fermentation and bioengineering, 81(5), 412-421.
- Sira-Ramírez, H. (2005). *Control de sistemas no lineales*. Madrid, España. Pearson-Wiley.
- Souza Jr, M. B., & Folly, R. O. M. (2001). *Development of an alcohol fermentation control system based on biosensor measurements interpreted by neural networks*. Sensors and Actuators B: Chemical, 75(3), 166-171.
- Trillas, E. (1992). *Fundamentos e introducción a la ingeniería fuzzy*. Madrid, España. Omron Electronics S.A.
- Troost, G. (1985). *Tecnología del vino*. Alemania. Omega.
- Zadeh, L.A. (1994). *Fuzzy logic, neural networks and soft computing*. Communications of the ACM. Vol. 37, N°3, pp. 77-84, 1994.

# LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS

<i>AG</i>	Algoritmos genéticos
<i>m<sub>m</sub></i>	Masa de mosto
<i>c<sub>m</sub></i>	Calor específico del mosto
<i>T</i>	Temperatura del mosto
<i>K</i>	Coeficiente de intercambio
<i>ρ<sub>r</sub></i>	Densidad del líquido refrigerante
<i>q<sub>r</sub></i>	Caudal del líquido refrigerante
<i>c<sub>r</sub></i>	Calor específico del refrigerante
<i>T<sub>1r</sub></i>	Temperatura de entrada del refrigerante
<i>T<sub>2r</sub></i>	Temperatura de salida del refrigerante
<i>PID</i>	Proporcional Integral Derivativo
<i>SO<sub>2</sub></i>	Anhídrido sulfuroso
<i>CO<sub>2</sub></i>	Anhídrido carbónico
<i>pH</i>	Concentración de iones hidronio (acidez/alcalinidad)
<i>mol</i>	Cantidad de sustancia
<i>K<sub>p</sub></i>	Constante proporcional de un PID
<i>K<sub>i</sub></i>	Constante integral de un PID
<i>K<sub>d</sub></i>	Constante derivativa de un PID
<i>T<sub>d</sub></i>	Tiempo derivativo de un PID
<i>IA</i>	Inteligencia artificial
<i>Plc</i>	Public limited company
<i>PLC</i>	Programmable logic controller

<i>FIA</i>	Flow injection analysis
<i>C<sub>a</sub></i>	Concentración de azúcar (g/L)
<i>Q<sub>m</sub></i>	Calor acumulado en el mosto en fermentación (kCal/h)
<i>Q<sub>f</sub></i>	Calor generado en el proceso de fermentación (kCal/h)
<i>Q<sub>r</sub></i>	Calor absorbido por el sistema de refrigeración (kCal/h)
<i>V</i>	Volumen de mosto en fermentación
<i>T<sub>a</sub></i>	Temperatura de consigna
<i>T</i>	Temperatura del mosto en fermentación
<i>e</i>	Error o diferencia en la temperatura
<i>de/dt</i>	Variación del error a la entrada del controlador
<i>q<sub>r</sub></i>	Caudal en la válvula de refrigeración
<i>q<sub>i</sub></i>	Caudal puntual de la válvula de refrigeración
<i>t<sub>s</sub></i>	Tiempo de establecimiento
<i>M<sub>p</sub></i>	Sobre-oscilación
<i>ess</i>	Error en el régimen permanente
<i>f<sub>a</sub></i>	Función de ajuste del algoritmo genético
<i>GAOT</i>	Genetic Algorithm Optimization Toolbox
<i>FIS</i>	Fuzzy inference system
<i>V<sub>dc</sub></i>	Tensión de corriente continua
<i>V<sub>ac</sub></i>	Tensión de corriente alterna
<i>CPU</i>	Central Processing Unit
<i>Scada</i>	Supervisión, control y adquisición de datos

# ANEXO I

## Algoritmo de cálculo de la función de ajuste

```

% Algoritmo que calcula la respuesta en el tiempo de una entrada en escalón
% en el sistema de control y determina la función de ajuste para
% el algoritmo genético

% Obtiene los datos de Simulink
time = t.signals.values;
y = Y.signals.values;
y0 = y0.signals.values;
y1 = y1.signals.values;
y = y - y0;
yr = y1 - y0;

% Dibuja la gráfica con los datos
plot(time,y);
title('Step response');
xlabel('Time (min)');
ylabel('Output');

% Determina la sobreoscilación (Mp)
if yr(1,1)>0
    ymax = max(y);
    step_size = yr(1,1);
    peak_overshoot = ((ymax-step_size)/step_size)*100;
else
    ymax = abs(min(y));
    step_size = abs(yr(1,1));
    peak_overshoot = ((ymax-step_size)/step_size)*100;
end

% Determina el tiempo de sobreoscilación (tp)
if yr(1,1)>0
    index_peak = find(y == max(y));
else
    index_peak = find(y == min(y));
end
peak_time = time(index_peak);

% Determina el tiempo de establecimiento +/-5%
s = length(time);
while((abs(y(s))>=0.95*step_size) & (abs(y(s))<=1.05*step_size));
    s = s-1;
end;
settling_time = time(s);

% Determina el error en regimen estable (90% del tiempo de simulación)
s = length(time);
s0 = floor(0.9*s);
sum = 0;
for i=s0:s
    sum = abs(y(i)-yr(1,1)) + sum;
end
error=100*sum/(s-s0);

% Asigna las variables de la respuesta en el tiempo obtenida
if peak_overshoot>0
    Mp=peak_overshoot;

```

```
        tp=abs(peak_time);
    else
        Mp=0;
        tp=0;
    end
    ts=settling_time;
    ess=error;

    % Muestra los valores de ts, Mp y ess
    ts
    Mp
    ess

    % Calcula y muestra la función de ajuste
    fa=0.1*ts+0.25*Mp+0.65*ess
```