

Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería Electrónica, Robótica y
Mecatrónica

Control de un Sistema de Refrigeración Mediante
Lógica Difusa

Autor: Alejandro Trinidad Fernández

Tutor: Manuel Garrido Satué

Dpto. Ingeniería de Sistemas y Automática
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2024



Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería Electrónica, Robótica y Mecatrónica

Control de un Sistema de Refrigeración Mediante Lógica Difusa

Autor:

Alejandro Trinidad Fernández

Tutor:

Manuel Garrido Satué

Dpto. de Ingeniería de Sistemas y Automática

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2024

Trabajo Fin de Grado: Control de un Sistema de Refrigeración Mediante Lógica Difusa

Autor: Alejandro Trinidad Fernández

Tutor: Manuel Garrido Satué

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2024

El Secretario del Tribunal

Agradecimientos

Le quiero agradecer a mi familia que siempre me ha apoyado a lo largo de esta travesía, siempre dándome ánimos y confianza sobre todo cuando las cosas no salen como uno espera.

A todos los compañeros que he conocido durante estos años que han sido geniales y me han ayudado siempre que lo necesitaba tanto a nivel personal como académico. Quiero hacerle una mención especial a Fede que desde el primer día que nos conocimos conectamos muy bien y ha sido con el que más tiempo he compartido durante la carrera.

Por último, quiero agradecer a todos los profesores que he tenido durante la carrera por enseñarnos todos estos conocimientos, especialmente a mi tutor, que es gran profesional y me ha ayudado a realizar este trabajo teniendo paciencia y aportándome nuevas ideas cuando estaba bloqueado en algún asunto.

Alejandro Trinidad Fernández

Sevilla, 2024

Resumen

El objetivo de este trabajo es controlar un sistema de refrigeración mediante lógica borrosa. Para realizar esta tarea se parte de un modelo en Simulink que fue realizado por Luis Fernando Acedo, en ayuda a Manuel Garrido Satué para su artículo “Modelado, control y optimización de una planta de producción de frío con almacenamiento de energía” [1]. Dicho modelo cuenta con un sistema de almacenamiento del frío, tres máquinas enfriadoras de distinta potencia nominal y un edificio que demanda una potencia calorífica que, en este caso, se trata de un hospital. Además, se tienen 5 bombas de agua para impulsar el agua a lo largo de la planta, siendo tres de ellas las encargadas de impulsar el caudal de agua que ha enfriado cada enfriadora, una para impulsar esa agua a través del hospital y una última para el sistema de almacenamiento del frío.

Para realizar el control se tendrá en cuenta la potencia frigorífica demandada por el hospital a lo largo de un día completo. Las variables de control serán los caudales máxicos que fluyen por las bombas que impulsan el agua.

Además, se pretende optimizar el sistema de distintas formas para hacerlo lo más eficiente y económico posible. La primera forma será emplear las máquinas que menos consuman para satisfacer la potencia demandada, ya que se tienen tres máquinas enfriadoras de distintas potencias nominales. Otra forma sería almacenar más frío en el TES en las horas en las cuales la energía es más barata o en momentos del día donde no hay energía suficiente almacenada para la demandada esperada en las próximas horas donde el precio de la energía es mayor.

Se pretende comparar los resultados del control que se hace del sistema mediante la lógica difusa con un controlador convencional para comprobar la efectividad de éste y analizar qué parámetros son mejores, cuáles son peores y sus ventajas y desventajas.

Abstract

The objective of this work is to control a refrigeration system using fuzzy logic. To carry out this task, we start from a model made in Simulink that has been created by Luis Fernando Acedo, in support of Manuel Garrido Satué for his article “Modeling, control and optimization of a cold production plant with energy storage” [1]. This model has a cold storage system, three chillers of different nominal power and a building that demands a heating power, which in this case is a hospital. In addition, there are 5 water pumps to push the water throughout the plant, three of which are responsible for pushing the flow of water that each chiller has cooled, one to push that water through the hospital and a last one for the cold storage system.

To carry out the control, the cooling power demanded by the hospital throughout a full day will be taken into account. The control variables will be the mass flow rates that flow through the pumps that push the water.

In addition, the system is intended to be optimized in different ways to make it as efficient and economical as possible. The first way will be to use the machines that consume the least to satisfy the power demanded, since there are three cooling machines of different nominal powers. Another way would be to store more cold in the TES during the hours when energy is cheaper or at times of the day when there is not enough energy stored for the expected demand in the next hours when the price of energy is higher.

The aim is to compare the results of the control of the system using fuzzy logic with a conventional controller to check its effectiveness and analyze which parameters are better and which are worse.

Índice

Agradecimientos	vii
Resumen	ix
Abstract	xi
Índice	xii
Índice de Tablas	xv
Índice de Figuras	xvii
Notación	xxi
1 Introducción	1
2 Sistema de Almacenamiento del Frío	4
2.1 <i>Estado del arte</i>	4
2.2 <i>Tipos de TES</i>	4
2.2.1 Método de almacenamiento	4
2.2.2 Lugar de almacenamiento de los SHS	5
2.3 <i>Sistema de almacenamiento del frío (CTES)</i>	6
3 Lógica Difusa o Borrosa	10
3.1 <i>Estado del arte</i>	10
3.2 <i>Marco teórico</i>	11
3.2.1 Conjuntos difusos	11
3.2.2 Variables lingüísticas	11
3.2.3 Funciones de membresía	12
3.2.4 Reglas difusas (IF-THEN)	12
3.3 <i>Controlador difuso (FLC)</i>	14
3.3.1 Fuzzificación	15
3.3.2 Base de reglas	15
3.3.3 Evaluación de las reglas e implicación (mecanismo de inferencia)	15
3.3.4 Defuzzificación	16
3.4 <i>Controlador de lógica difusa en MATLAB</i>	18
3.4.1 Creación del archivo *.fis	18
3.4.2 Variables y funciones de membresía	19
3.4.3 Reglas de inferencia	20
3.4.4 Visualizador de reglas	21
3.4.5 Implementación en Simulink	22
4 Modelo de Partida del Sistema en Simulink	25

4.1	<i>Análisis del modelo de partida en Simulink</i>	26
4.1.1	Enfriadoras o chillers	26
4.1.2	Hospital	30
4.1.3	TES	30
4.2	<i>Resultados del modelo actual</i>	31
5	Desarrollo del trabajo	36
5.1	<i>Diseño del controlador del caudal másico que circula por el hospital</i>	36
5.1.1	Diseño del controlador PI en tiempo continuo	36
5.1.2	Análisis del controlador PI convencional en tiempo continuo	39
5.1.3	Diseño controlador difuso	41
5.1.4	Análisis del FLC de estilo PI	44
5.1.5	Comparación de resultados entre FLC y PI convencional	46
5.2	<i>Diseño del controlador del caudal másico de las tres enfriadoras y TES</i>	47
5.2.1	Diseño del FLC de las enfriadoras	48
5.2.2	Análisis del FLC de las enfriadoras en Simulink	51
5.2.3	Diseño del FLC para las enfriadoras y el TES	53
5.2.4	Implementación del FLC de las enfriadoras y el TES	56
5.3	<i>Diseño del controlador del TES teniendo en cuenta la temperatura del agua almacenada</i>	59
5.4	<i>Prueba de simulación con el perfil de potencia de refrigeración inicial</i>	68
6	Conclusión	72
	Referencias	74

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 5-1. Reglas del FLC del estilo PI.	43
Tabla 5-2. Reglas FLC enfriadoras.	50
Tabla 5-3. Datos de la enfriadora de 400 tons (1404.3 kW).	50
Tabla 5-4. Datos de la enfriadora de 300 tons (1060.1 kW).	51
Tabla 5-5. Datos de la enfriadora de 250 tons (834 kW).	51
Tabla 5-6. Reglas del FLC del TES y las enfriadoras.	56
Tabla 5-7. Reglas del controlador difuso del TES teniendo en cuenta la temperatura del agua	64

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Precio de la electricidad en España para el día 2 de julio de 2024 [2].	1
Figura 2-1. Almacenamiento de energía térmica en un tanque de agua estratificada [4].	6
Figura 2-2. Métodos de carga del CTES: (a) carga total, (b) carga parcial con nivelación de carga y (c) carga parcial con limitación de la demanda [10].	7
Figura 3-1. Ejemplo de funciones de membresía para el ejemplo del chándal.	12
Figura 3-2. Operadores lógicos aplicados a los conjuntos difusos [23].	14
Figura 3-3. Esquema de un controlador difuso [24].	14
Figura 3-4. Ejemplo de la evaluación de unas reglas difusas [23].	16
Figura 3-5. Varios métodos de defuzzificación [18].	17
Figura 3-6. Método de defuzzificación del centroide [22].	17
Figura 3-7. Ejemplo de la propina mediante lógica difusa [26].	18
Figura 3-8. Diseñador de lógica difusa en MATLAB.	19
Figura 3-9. Diseñador de funciones de membresía.	20
Figura 3-10. Editor de reglas de inferencia.	21
Figura 3-11. Visualizador de reglas.	21
Figura 3-12. Bloque para insertar el controlador difuso en Simulink.	22
Figura 4-1. Esquema del sistema objeto de estudio [1].	25
Figura 4-2. Modelo completo del sistema de refrigeración del hospital en Simulink.	26
Figura 4-3. Subsistema de las enfriadoras para el cálculo de la temperatura y caudal másico total.	27
Figura 4-4. Subsistema de una máquina enfriadora.	28
Figura 4-5. Subsistema de la salida de agua del evaporador de las enfriadoras.	29
Figura 4-6. Diagrama de bloques del sistema con numeración de los nodos que intervienen en el proceso de carga/descarga del TES [1].	31
Figura 4-7. Potencias frigoríficas resultantes de la simulación.	32
Figura 4-8. Flujos másicos de las dos entradas de las válvulas de tres vías.	33
Figura 4-9. Flujos másicos obtenidos de la simulación del sistema.	33
Figura 4-10. Temperaturas del ambiente en el hospital y la del agua a la entrada/salida del TES, hospital y evaporador.	34

Figura 5-1. Respuesta del sistema ante escalón.	37
Figura 5-2. Datos para obtener las constantes de tiempo de la función de transferencia.	38
Figura 5-3. Comparación entre la respuesta del sistema y la de la función de transferencia.	39
Figura 5-4. Implementación del controlador PI en Simulink.	40
Figura 5-5. Respuesta del sistema al controlador PI.	40
Figura 5-6. Descripción general del FLC.	41
Figura 5-7. Funciones de membresía para la entrada del error.	42
Figura 5-8. Funciones de membresía para el cambio del error.	42
Figura 5-9. Función de membresía para el cambio de la señal de control (caudal másico de del hospital).	43
Figura 5-10. Diagrama de bloques del controlador Fuzzy estilo PI.	44
Figura 5-11. Respuesta del sistema al FLC con ganancias normalizadas.	45
Figura 5-12. Respuesta del sistema al FLC con ganancias ajustadas.	46
Figura 5-13. Comparación del controlador PI convencional y el FLC.	47
Figura 5-14. Entradas y salidas FLC enfriadoras.	48
Figura 5-15. Funciones de pertenencia para la entrada del caudal másico del hospital.	49
Figura 5-16. Salida del caudal másico de la enfriadora de mayor potencia nominal.	49
Figura 5-17. (1) Potencia de refrigeración del hospital. (2) Comparación del caudal másico que indica el primer FLC con el caudal másico real que entra. (3) Caudales másicos de las enfriadoras y hospital.	52
Figura 5-18. Caudales másicos de cada enfriadora que indica el segundo FLC.	53
Figura 5-19. Funciones de pertenencia para el precio de la electricidad.	54
Figura 5-20. Funciones de pertenencia de la carga y descarga del TES.	55
Figura 5-21. Resultados de la simulación del FLC del TES. (1) Potencia de refrigeración del hospital. (2) Precio kW/h. (3) Caudales másicos. (4) Temperaturas del agua.	56
Figura 5-22. Resultados de la simulación con zoom en el cambio de referencia. (1) Potencia de refrigeración del hospital. (2) Comparación entre el caudal másico que entra en el hospital con la señal de control que proporciona el FLC del estilo PI.	57
Figura 5-23. Resultados de la simulación con zoom en un cambio de precio con referencia constante. (1) Potencia de refrigeración del hospital. (2) Precio kW/h. (3) Caudales másicos. (4) Temperaturas del agua.	58
Figura 5-24. Potencias frigoríficas de la simulación del FLC del TES.	59
Figura 5-25. Funciones de membresía de la variable lingüística de la temperatura del agua en el TES.	60
Figura 5-26. Nuevas funciones de pertenencia para el caudal másico del hospital.	61
Figura 5-27. Nuevas funciones de pertenencia para la enfriadora de 400 tons (1404.3 kW).	61
Figura 5-28. Nuevas funciones de pertenencia para la enfriadora de 300 tons (1060.1 kW).	62
Figura 5-29. Nuevas funciones de pertenencia para la enfriadora de 250 tons (834 kW).	62
Figura 5-30. Nuevas funciones de pertenencia para la carga y descarga del TES.	63
Figura 5-31. Resultados de la simulación del FLC del TES teniendo en cuenta la temperatura del agua almacenada. (1) Potencia de refrigeración del hospital. (2) Precio kW/h. (3) Caudales másicos. (4) Temperaturas del agua.	65
Figura 5-32. Potencias de refrigeración de la simulación del FLC del TES teniendo en cuenta la temperatura del agua almacenada.	66
Figura 5-33. Resultados de la simulación en el segundo punto de operación del FLC del TES teniendo en	

cuenta la temperatura del agua almacenada. (1) Potencia de refrigeración del hospital. (2) Precio kW/h. (3) Caudales másicos. (4) Temperaturas del agua. 67

Figura 5-34. Potencias de refrigeración de la simulación del segundo punto de operación del FLC del TES teniendo en cuenta la temperatura del agua almacenada. 68

Figura 5-35. Resultados de la simulación del FLC del TES teniendo en cuenta la temperatura con el perfil de potencia de refrigeración inicial. (1) Potencia de refrigeración del hospital. (2) Precio kW/h. (3) Caudales másicos. (4) Temperaturas del agua. 69

Figura 5-36. Potencias de refrigeración de la simulación del FLC del TES teniendo en cuenta la temperatura del agua almacenada con el perfil de potencias de refrigeración inicial. 70

Notación

TES	Sistema de almacenamiento de energía térmica (Thermal system storage)
SHS	Almacenamiento de calor sensible (Sensible heat storage)
LHS	Almacenamiento de calor latente (Latent heat storage)
TTES	Tanque de almacenamiento de energía térmica (Tank thermal energy storage)
CTES	Almacenamiento de energía térmica fría (Cool thermal energy storage)
PCM	Material de cambio de fase (Phase change material)
V	Volumen del material de almacenamiento [m^3]
ρ	Densidad del material [kg/m^3]
Q	Potencia de refrigeración del líquido térmico [W]
Cp	Calor específico del agua
\dot{m}	Caudal másico [kg/s]
Twe_i	Temperatura del agua a la entrada del evaporador
T_m	Temperatura del agua de la mezcla de las tres enfriadoras
COP	Coefficiente de comportamiento (Coefficient of performance)
PLR	Carga parcial (Part load ratio)
PelectricalIn	Potencia eléctrica que consume una máquina enfriadora
FM	Función de membresía o pertenencia
FLC	Controlador difuso (Fuzzy logic controller)
FIS	Sistema de inferencia difusa (Fuzzy inference system)

1 INTRODUCCIÓN

Una de las razones principales por la cual se ha decidido realizar este proyecto es para reducir el coste de la energía consumida por las máquinas enfriadoras que refrigeran un edificio completo o grandes superficies, mediante un control sencillo.

El precio de la electricidad varía a lo largo del día debido a que hay franjas horarias en la que se produce un consumo muy alto, como puede ser de 6 a 8 de la tarde, y otras donde su demanda es escasa, sobre todo en los tramos de madrugada. Esto obedece a la ley de la oferta y la demanda, ya que al producirse ese elevado consumo lo que provoca es que el precio aumente considerablemente, mientras que al haber poca demanda su precio disminuye notablemente. En la siguiente gráfica se muestra el coste actual del kilovatio/hora en España.

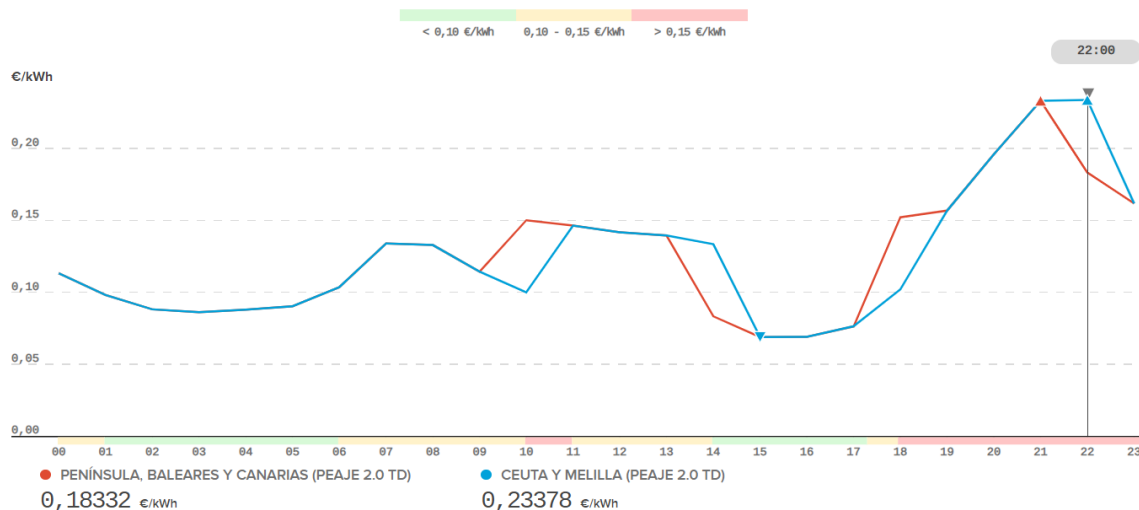


Figura 1-1. Precio de la electricidad en España para el día 2 de julio de 2024 [2].

Para abordar este problema se ha implementado un sistema de almacenamiento del frío, a partir de este momento se nombrará a este sistema mediante la abreviatura *TES* (thermal energy storage), de forma que las máquinas enfriadoras operen a una mayor carga de la que demanda el hospital en los tramos de menor coste de la luz y que se pueda así almacenar esa energía calorífica (concretamente frigorífica) excedente en dicho sistema. Esta energía que se ha acumulado será empleada en las horas de mayor coste de la electricidad, provocando así una reducción considerable de las horas y/o la carga a la que funcionan las enfriadoras para satisfacer la potencia calorífica que demanda el hospital en su totalidad.

Además de la implementación del TES, existe otra forma de reducir los gastos del hospital en electricidad. Se trata de optimizar la carga parcial a la que funcionan las tres enfriadoras a lo largo de todo el día. Esto se debe a que se tienen enfriadoras de diferentes potencias caloríficas nominales y que tienen distinto consumo dependiendo de la carga a la que trabaje. Por lo tanto, se tendrá que investigar y comparar la eficiencia energética de las tres máquinas, y con ello se determinará la carga relativa a la que deben trabajar para satisfacer la demanda de potencia con el mayor rendimiento posible.

En conclusión, la idea principal del trabajo es controlar y optimizar el caudal másico que va a circular por cada una de las distintas bombas de agua para satisfacer la potencia de refrigeración que demanda un hospital, que es utilizada en el sistema de refrigeración de dicho edificio, para conseguir un ahorro económico. Para ello se

empleará en MATLAB un algoritmo de control que es sencillo y que está basado en la forma en la que actúa el pensamiento humano. Se trata de la denominada lógica difusa o borrosa la cual será comentada a fondo en la sección 3.

La idea principal de emplear este control es por utilizar un control que no se haya visto anteriormente durante la carrera y sea viable en el entorno de MATLAB. Además, se buscaba un método que fuese bastante moldeable para poder incluir diversas variables de condición. Por ejemplo, tener en cuenta el tiempo de funcionamiento de cada enfriadora para detenerla cada cierto periodo y evitar así una posible avería causada por un funcionamiento continuo y prolongado de la máquina.

Al tratarse de un control lógico su eficacia dependerá totalmente de las condiciones que se le asignen, por lo que es de vital importancia tener un buen criterio a la hora de definir las para así tener un mejor rendimiento del control.

Esta sería una de las desventajas del control elegido y, a pesar de que el diseño del control sea sencillo, puede provocar que se tarde bastante tiempo en obtener una buena respuesta del control. Por este motivo es cierto que pueden existir otros métodos más eficaces a la hora de obtener la mejor respuesta del control del sistema, pero seguramente sean mucho más complejos y menos intuitivos.

Por otro lado, se tiene como ventaja la maleabilidad que presenta este control, debido a que se puede incluir cualquier variable que se quiera, aunque a medida que se vayan añadiendo más variables el control se va volviendo más complejo a la hora de su diseño.

Finalmente, se desarrollará también un control de tipo PI con el fin de comparar los resultados obtenidos entre la respuesta del sistema a un controlador convencional y a un controlador difuso.

2 SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DEL FRÍO

Como ya se ha comentado anteriormente, el objetivo del proyecto es realizar un control óptimo y eficiente de un sistema de almacenamiento del frío para su aplicación en un hospital. Sin embargo, antes de comenzar a desarrollar el control hay que conocer mejor el funcionamiento de este tipo de sistemas.

2.1 Estado del arte

El creciente cambio climático, producido en mayor parte por el elevado uso de combustibles fósiles y las emisiones de CO_2 a la atmósfera, ha promovido la investigación y desarrollo de diversas estrategias para maximizar el aprovechamiento de las energías renovables. Una de las últimas innovaciones que se están llevando a cabo es el denominado *hidrógeno verde* cuyo objetivo es convertir la electricidad excedente de las energías renovables en hidrógeno verde mediante la electrolisis del agua. De esta forma se consigue almacenar el gas comprimido hasta el momento en el que se requiera de dicha energía. Para convertir nuevamente el hidrógeno verde en electricidad se hace uso de unas pilas de combustible [3].

Y es que el hecho de crear plantas con sistemas de almacenamiento de energía ya se lleva realizando e investigando durante las últimas décadas. Estos sistemas tienen como fin el aprovechar de la mejor manera posible las energías renovables debido a que estas son irregulares durante el transcurso de un día. También se puede tener en cuenta este tipo de sistemas a largo plazo, como, por ejemplo, en los meses de invierno la temperatura suele ser baja y hay menos horas de luz del sol lo que conlleva a que no se pueda producir tanta energía solar, por lo que se almacena la energía en los meses más cálidos para ser empleado en los meses con menor temperatura. Y es que esto es una de las grandes desventajas que presentan las energías renovables, pero gracias a estos sistemas se consigue almacenar toda la energía producida excedente durante un determinado tiempo para su posterior uso.

En este proyecto se profundizará en los sistemas de almacenamiento de energía térmica o *TES* (del inglés *thermal energy storage*), en especial, el almacenamiento de energía fría (*CTES*, del inglés *cool thermal energy storage*) los cuáles pueden almacenar la energía desde varias horas hasta meses, dependiendo del diseño del sistema y de la propia necesidad de satisfacer una alta demanda de energía [4].

2.2 Tipos de TES

2.2.1 Método de almacenamiento

Existen tres tipos distintos de TES dependiendo del método que se emplee en el almacenamiento. Se conoce como almacenamiento de calor sensible (*SHS*, del inglés *sensible heat storage*) a aquellos sistemas que emplean directamente un material que aumenta o disminuye su temperatura al aplicarle energía térmica. En cambio, en el almacenamiento de calor latente (*LHS*, del inglés *latent heat storage*) se emplea la energía térmica para provocar que el material cambie de fase, almacenándose así la energía, y que libera toda esa energía al volver a su estado de fase inicial. Por último, se encuentra el almacenamiento termoquímico de calor (*THS*, del inglés *thermochemical heat storage*) el cual se encuentra asociado a las reacciones químicas reversibles [4], [5], [6], [7], [8].

El método más sencillo y desarrollado es el de calor sensible al variar la temperatura del material, siendo el material más empleado el agua, debido a que es el más barato y tiene un alto calor específico [4], [7]. Sin embargo, el agua presenta algunos inconvenientes como son tener una alta corrosividad, una alta presión de

vapor y una baja conductividad térmica. Además, el rango de temperaturas a las que puede operar es de $[0,100]$ °C, es decir, entre los puntos de fusión y ebullición del agua, lo cual hace que para almacenar muy altas temperaturas sea necesario otro material [6], [7], [9]. Otros tipos de materiales empleados en los SHS pueden ser las rocas, el grafito, el aluminio o el cobre [7], [9].

La cantidad de energía que se almacena viene determinada por la ecuación (2-1),

$$\dot{Q} = m \cdot C_p \cdot \Delta T = \rho \cdot C_p \cdot V \cdot \Delta T \quad (2-1)$$

siendo \dot{Q} la cantidad de energía almacenada [J], m la masa del material [kg], C_p el calor específico del material de almacenamiento $\left[\frac{J}{kg \cdot ^\circ C} \right]$, ΔT el gradiente de temperatura [°C], ρ la densidad del material de almacenamiento $[kg/m^3]$, V el volumen del material de almacenamiento [6], [9], [10].

Por esta razón es importante seleccionar un material de almacenamiento con un alto calor específico, ya que la cantidad de energía acumulada es proporcional al mismo y a la densidad del material. Otras propiedades importantes son que tenga una buena conductividad térmica, sea asequible económicamente y con bajas emisiones de CO₂ [7], lo cual convierten al agua en un buen candidato, a pesar de sus desventajas mencionadas anteriormente.

2.2.2 Lugar de almacenamiento de los SHS

Los almacenes del material empleado en los SHS suelen ser bajo tierra, parcial o completamente. Esto se debe a que de esta manera se consigue aislar mejor el material de su interior, facilitando así la conservación de la temperatura, es decir, consiguiendo que la variación de temperatura sea mínima, ya que no está expuesto directamente a la luz solar y al resto de perturbaciones que pueden ocurrir en la superficie. Este punto es fundamental si el objetivo del SHS es almacenar la energía térmica para ser usada meses más tarde. Los sistemas de almacenamiento subterráneos pueden ser mediante tanques (TTES, del inglés tank thermal energy storage), pozos, acuíferos y perforaciones [4], [6], [9], aunque los TTES no tienen por qué ser subterráneos, incluso pueden estar completamente en la superficie, pero esto provoca que se tenga que invertir más en el aislamiento de este.

Entre los lugares de almacenamiento mencionados se profundiza, a continuación, en los TTES ya que es el que emplea el sistema y que se pretende controlar.

2.2.2.1 Almacenamiento de energía térmica en tanques (TTES)

Existen dos tipos de TTES, uno en el cual se emplean dos tanques (un tanque de agua fría y otro de agua caliente) y el otro en el que se utiliza únicamente un tanque. Se va a profundizar un poco más en el funcionamiento de este último ya que el sistema que es objeto de estudio emplea uno de dicho tipo [8].

El funcionamiento de los TTES es muy simple y consiste en variar la temperatura del agua del tanque introduciendo agua caliente o fría, dependiendo del propósito que tenga el sistema. Al existir una diferencia de densidad entre el agua caliente y la fría se provoca que en la superficie del tanque se encuentre el agua más caliente mientras que en el fondo está el agua fría, esto se denominada estratificación. Entre medio de las dos zonas se crea un área denominada termoclina la cual hace de “barrera” e impide que ambas regiones se mezclen (véase Figura 2-1). Lo ideal es que la zona termoclina sea lo más delgada posible para así tener un menor volumen de agua con la temperatura mezclada [4], [8]. En el caso de que su función sea la de almacenar la energía térmica fría (CTES) lo que se lleva a cabo es absorber de la parte superior del CTES el agua a una mayor temperatura y se lleva hasta una máquina refrigeradora o enfriadora, la cual se encarga de disminuir la temperatura del agua y se almacena nuevamente en el CTES, para ser empleada en el momento que se crea oportuno, que normalmente será en las horas del día de mayor demanda energética de la

instalación [8].

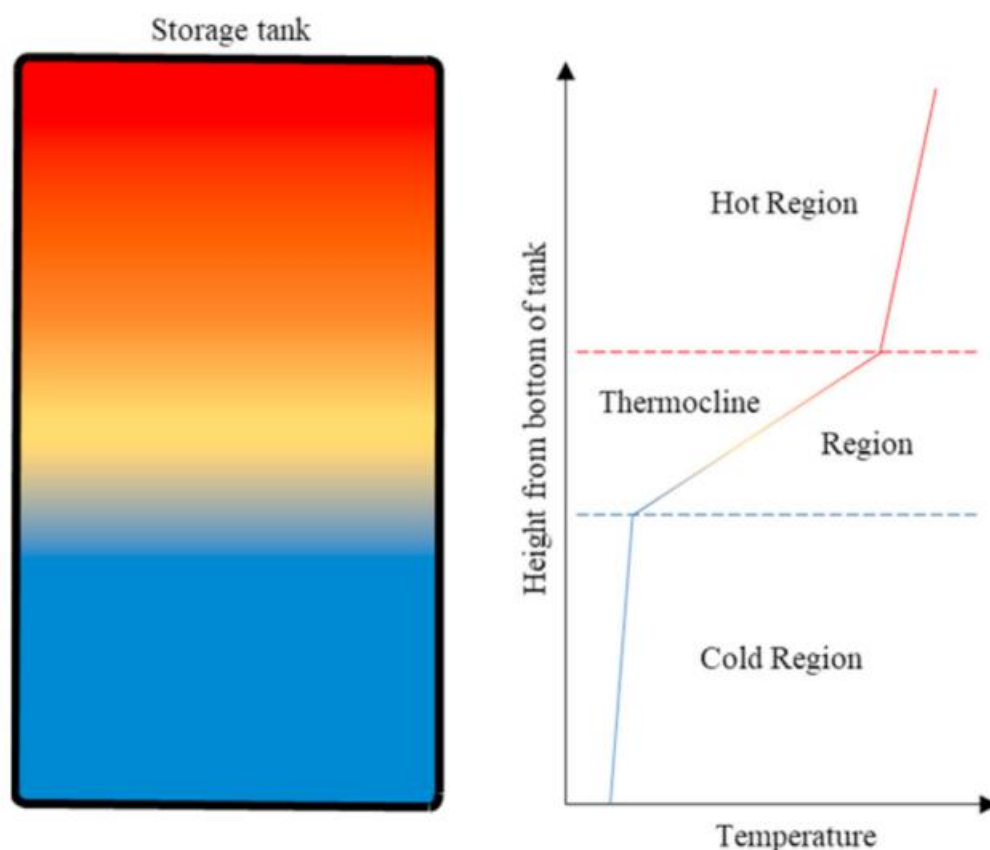


Figura 2-1. Almacenamiento de energía térmica en un tanque de agua estratificada [4].

Una de las desventajas de esta opción de almacenaje es el coste que supone la fabricación del tanque, y es que además de tener normalmente unas grandes dimensiones, los materiales en su construcción suelen ser algo costosos ya que se tiene que asegurar de que este bien aislado térmicamente. Además, es necesario garantizar que los materiales no se vayan a degradar con el paso del tiempo debido al contacto directo con el agua a temperaturas extremas [4], provocando que se tenga que reparar en un futuro o quede totalmente inservible y se necesite construir uno nuevo. Es por este motivo por el cual el mayor porcentaje del coste de un TTES se suele emplear en la construcción del tanque y, teniendo en cuenta que si el material de almacenamiento es el agua tiene aún más sentido invertir todo lo necesario en dicho tanque.

Un aspecto importante a tener en cuenta es la eficiencia que se consigue al almacenar esa energía en este tipo de tanques, teniendo en cuenta las posibles pérdidas que se pueden producir. La eficiencia de los TTES suele estar comprendida entre los [45,65] %, llegando incluso en algunos casos al 90% [4], [9], siendo este un buen rendimiento y que depende de elementos anteriormente comentados como el aislamiento del propio tanque.

2.3 Sistema de almacenamiento del frío (CTES)

En el caso de los sistemas de almacenamiento del frío, los sistemas comúnmente usados son mediante calor sensible o con calor latente. En el primero, se suele emplear el agua, por los motivos que ya se ha comentado anteriormente, directamente como el material que almacenará la energía térmica para su posterior uso, aunque también se puede hacer uso de soluciones de agua que utilizan un aditivo fluido de baja temperatura. Por el otro lado, en los sistemas de calor latente se suele emplear el agua/hielo como material de cambio de fase

(PCM, del inglés phase change materials) o hidratos de sal o algún tipo de polímero [8]. Una de las ventajas de usar el agua como PCM frente a los CTES de calor sensible el volumen del material que es necesario para contener esa energía, pues las dimensiones de un sistema de almacenamiento de calor sensible pueden llegar a ser hasta 100 veces superior a los de calor latente [10].

El almacenamiento de frío en el CTES en los tanques estratificados no es la única opción de almacenaje en tanques, como ya se ha comentado anteriormente, pero si es el más eficaz y, por tanto, el más usado. Además, tiene la particularidad de tener un funcionamiento muy sencillo, como ya se comentó en la sección 2.2.2.1 [8]. Gracias a los CTES se emplean enfriadoras más pequeñas para una misma instalación ya que no tendrán que estar preparadas para aportar todo el frío en los picos de máxima demanda, sino que serán acompañadas del frío que se almacenan en estos sistemas.

Existen dos métodos de cargar/descargar el CTES que son el *almacenamiento completo* y el *almacenamiento parcial*. De la primera forma lo que se pretende es cargar el frío únicamente en las horas de coste y/o demanda mínima, que suelen ser a lo largo de la noche y madrugada. Además, tienen la capacidad de almacenar la suficiente cantidad de frío como para abastecer la demanda total de la carga de refrigeración que impone la instalación, en las horas punta, sin necesidad de que funcione la refrigeradora. El almacenamiento parcial ese se puede subdividir en dos tipos: el *almacenamiento parcial con nivelación de carga* y el *almacenamiento parcial con limitación de la demanda*. En el primero, se diseñan las enfriadoras de tal forma que operen a su máxima capacidad durante las 24 horas del día, de tal forma que en los periodos de menor demanda el excedente de carga refrigerada sea acumulada en el CTES y en los momentos de mayor demanda sea el CTES el que aporte esa carga refrigerada necesaria que no es capaz de aportar las enfriadoras por si solas, ya que estas se diseñan para cubrir una carga de frío media y no el pico máximo de demanda, como se ha comentado anteriormente. Por el otro lado, el almacenamiento parcial con limitación de la demanda hace que las enfriadoras trabajen durante las 24 horas del día, pero no siempre a máxima potencia, sino que dependerá de la demanda. Por tanto, en horas de baja demanda las enfriadoras si suelen trabajar a una capacidad elevada, incluso pudiendo llegar a su máximo, para cargar el CTES y satisfacer esa carga que nos solicita la instalación, pero en las horas de máxima demanda las enfriadoras aportarán una parte menor de la demanda.

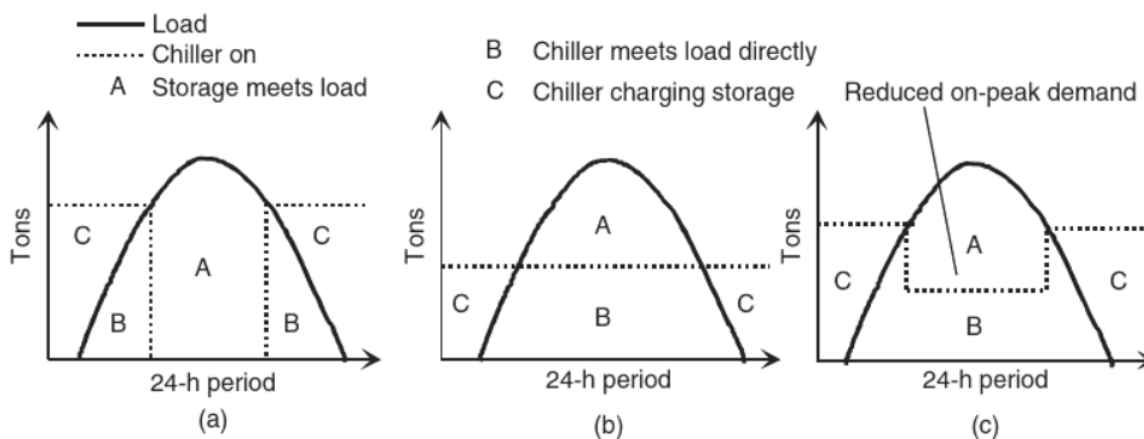


Figura 2-2. Métodos de carga del CTES: (a) carga total, (b) carga parcial con nivelación de carga y (c) carga parcial con limitación de la demanda [10].

Por tanto, es una ayuda para disminuir en cierta medida los costes que provocan la generación de ese frío en las horas punta, ya que el precio de la electricidad en las horas de menor demanda suele ser menor. Los CTES de almacenamiento completo claramente consiguen una mayor reducción de los costos en esos tramos horarios, aunque estos últimos tienen una desventaja que es la dimensión del tanque, ya que al poder hacerse cargo de toda la demanda de agua fría hace que su tamaño sea mucho mayor al del almacenamiento parcial y, por consiguiente, se necesite una mayor inversión inicial en la construcción de este [8], [11], [10], lo cual hay que tenerlo en cuenta.

Los costes de la fabricación de un CTES en Estados Unidos desde los 15 dólares a 50 dólares el kWh [10], por lo que es recomendable que sean empleados en grandes instalaciones o en industrias, pues su coste inicial es elevado y, por tanto, se tarda un tiempo considerable hasta que la instalación comienza a ser rentable económicamente. Según dicen Ibrahim Dinçer y Marc A. Rosen [10] “Energy cost can be reduced for cooling a facility by as much as 70%. Typical payback periods using CTES usually range from 2 to 6 years” [El coste de energía para enfriar una instalación pueden ser reducidos hasta un 70%. Los periodos de recuperación típicos utilizando CTES suelen estar en el rango de 2 a 6 años].

Los sistemas de almacenamiento del frío tienen múltiples aplicaciones, tanto a nivel residencial, como a nivel industrial en los sistemas de refrigeración de espacios, ya sean casas, edificios u otros procesos industriales. Su desarrollo y empleo ha sido fundamental para minimizar la energía que se tiene que producir en determinados tramos horarios, permitiendo así que no se tenga que generar más energía en esos márgenes de tiempo mediante combustibles fósiles o energía nuclear que son contaminantes, compensándose así las zonas de menor demanda. Y es que, según la Agencia Internacional de la Energía, en el año 2022 la electricidad destinada a procesos de refrigeración de espacios supuso un 9% de la energía mundial [12], por lo que si se consigue que la mayor parte de esas industrias o instituciones que consumen una gran cantidad de energía, con la finalidad de refrigerar cualquier espacio, cuenten con CTES, se conseguiría que los picos de demanda de energía no sean tan elevados y tan bajos en determinados tramos horarios, nivelándose así algo más la curva de la demanda de energía.

Haciendo un breve resumen del sistema el cual es objeto de estudio en este proyecto, se va a trabajar con un CTES de calor sensible, que usa agua como medio de almacenamiento de la energía, y cuya finalidad es aprovechar los tramos horarios de bajo coste de la electricidad, produciendo la energía térmica fría mediante unas enfriadoras y siendo almacenada en los tanques de los mencionados CTES para ser utilizada en los tramos de alta demanda del frío, aplicados a los sistemas de refrigeración de un hospital, por lo cual se tendrá un CTES de carga parcial con limitación de la demanda.

3 LÓGICA DIFUSA O BORROSA

En el mundo que nos rodea existe una enorme cantidad de sistemas que son, o pueden ser, controlados mediante diversos métodos, como, por ejemplo, los métodos de control en lazo cerrado mediante un controlador de tipo PID. Y es que a medida que transcurre el paso del tiempo son cada vez más los sistemas o aplicaciones que el ser humano intenta automatizar con el objetivo de ser más eficientes u óptimos, además de tener unos menores costes y una mayor producción, pues pueden realizar el trabajo en menor tiempo y no sienten el cansancio, a diferencia de las personas, por lo que se pueden realizar tareas pesadas durante un tiempo más prolongado. Es por ello por lo que cada vez es más común ver estos sistemas de control aplicados en distintos sectores de nuestra vida, como puede ser en una planta de producción de vehículos o en una planta de almacenaje automático, pero el problema surge cuando se tienen sistemas reales que no pueden ser modelados mediante una función de transferencia, ya sea porque son variables en el tiempo o porque no son lineales o porque es muy complejo de modelar su comportamiento mediante una función matemática.

Debido a este motivo, se han desarrollado otros métodos para poder solucionar estos casos. Uno de ellos es el conocido control mediante lógica difusa o controlador difuso, el cual va a ser objeto de estudio para este trabajo. Esta lógica se asemeja mucho más al pensamiento racional de una persona que la lógica clásica o binaria, pues en esta última siempre concluyen con resultados determinados. Sin embargo, existen numerosas situaciones en nuestra vida cotidiana donde no todo es blanco o negro, es decir, no todo está determinado, como por ejemplo el precio de una prenda de vestir, como puede ser un chándal, donde no se sabría establecer el valor en el cual el precio sea *barato*, *promedio* o *caro* ya que cada persona te puede dar uno distinto, pero lo que sí se puede hacer es establecer ciertos rangos que abarquen a estas clasificaciones del precio. Una de las tantas posibles definiciones de estos conjuntos podría ser que hasta 20 euros sea barato, entre 20 € y 40 € sea *promedio* y a partir de 40 € se considere ya caro, aunque claramente estos rangos no tienen unas fronteras bien determinadas y pueden variar según el criterio de cada persona el pertenecer a un tipo de precio u otro. En el caso de que se tuviera un precio de 39,99 €, como suele ser costumbre en los productos el tener un precio de una cierta cantidad de euros con 99 céntimos, según los conjuntos clásicos y la lógica tradicional ese chándal tendría un precio promedio ya que se encuentra en su rango establecido, pero en realidad se encuentra mucho más cerca de pertenecer a un precio *caro* ya que está a tan solo 1 céntimo de diferencia y esto es una cantidad insignificante como para que marque tanto la diferencia y eso signifique que cambie la apreciación de si un chándal es *promedio* o *caro* para una persona. Mientras que con la lógica difusa no se da una sentencia absoluta de pertenencia a estos rangos, sino que ofrece un *grado de pertenencia* a dicho conjunto, que será explicado en los siguientes apartados.

3.1 Estado del arte

Las bases del concepto, que se conoce hoy en día, de la lógica difusa (*fuzzy logic*, en inglés), o también denominada lógica borrosa, fue en 1965 y fue propuesto por el profesor de la Universidad de California en Berkeley, Lotfi Asker Zadeh, en su artículo “Fuzzy Sets” [13]. Como él dice en dicho artículo “More often than not, the classes of objects encountered in the real physical world do not precisely defined criteria of membership” [la mayoría de las veces, las clases de objetos que se encuentran en el mundo físico real no definen con precisión los criterios de pertenencia]. Por esta cita se puede deducir que Lotfi A. Zadeh no compartía la visión determinista de la lógica clásica y esto le llevó a proponer un nuevo concepto conocido como *conjuntos difusos*. En esta teoría, un elemento puede pertenecer parcialmente a un conjunto, asignándole un valor numérico, denominado *grado de pertenencia*, entre 0 y 1 [13].

Años más tarde, Lotfi A. Zadeh publicó otros dos artículos [14], [15] desarrollando aún más su teoría y otros aspectos que están íntegros en la lógica difusa actual. Para ello introdujo nuevos conceptos que son las *variables lingüísticas* y las reglas tipo *If-then*. Todo ello se profundizará en el siguiente apartado donde se explicará toda la teoría que concierne a la lógica borrosa para su correcto entendimiento.

No sería hasta 1974 cuando se diseñaría el primer controlador difuso por Ebrahim H. Mamdani [16]. Su finalidad era para controlar una máquina de vapor. Además, sentó las bases del uno de los métodos de inferencia para la lógica difusa, y que sigue siendo muy utilizado en la actualidad.

Una década más tarde (1985), Tomohiro Takagi y Michio Sugeno propusieron otro método de control difuso diferente al desarrollado por Mamdani [17]. Estos dos métodos serán desarrollados en el siguiente apartado.

A partir de este momento se desarrollaron numerosas investigaciones y trabajos empleando este tipo de control, obteniendo cada vez mejores resultados.

3.2 Marco teórico

Haciendo una recapitulación de los conceptos que se han ido nombrando se va a proceder a la explicación de cada uno de ellos y del funcionamiento de la lógica difusa. Como ya se ha mencionado, esta lógica ofrece soluciones a problemas, en los que el objeto de estudio no se encuentra bien definido por una función de transferencia o son muy complejos, mediante un lenguaje mucho más natural y parecido al pensamiento humano que para nada puede otorgar valores determinados ante diversas situaciones, como la del ejemplo del precio del chándal. Es por ello por lo que se denomina lógica difusa o borrosa, ya que existen elementos que no pueden ser agrupados en los conjuntos tradicionales que conocemos porque sus márgenes no están bien definidos, lo que dio lugar a los conjuntos difusos para solventar el problema.

3.2.1 Conjuntos difusos

Se pueden definir como aquellos conjuntos que tienen la característica de que un elemento puede pertenecer a ellos o no en cierta medida, a través del denominado grado de pertenencia (μ), debido a que no se tienen unos límites bien definidos. De esta forma se le asigna a cada elemento del conjunto un valor numérico del intervalo $[0,1]$ indicando el nivel de pertenencia de ese elemento para ese conjunto, en el que un valor de 1 significaría que pertenece plenamente al conjunto mientras que un valor de 0 sería que no pertenece a ese conjunto. Esta es la gran diferencia entre los conjuntos clásicos y los difusos, ya que los primeros solo pueden tomar los valores de 0 y 1, es decir, un elemento pertenece rotundamente a ese conjunto o no lo hace, mientras que los difusos son más flexibles y permiten establecer ese grado parcial de pertenencia a ese determinado conjunto [18], [19].

3.2.2 Variables lingüísticas

La definición ofrecida por el propio Lotfi Zadeh en uno de sus artículos [14] es “A linguistic variable is defined as a variable whose values are sentences in a natural or artificial language. Thus, if *tall*, *not tall*, *very tall*, *very very tall*, etc. are values of *height*, then *height* is a linguistic variable” [Una variable lingüística se define como una variable cuyos valores son sentencias en un lenguaje natural o artificial. Así, si *alto*, *no alto*, *muy alto*, *muy muy alto*, etc. son valores de la *altura*, entonces la *altura* es una variable lingüística]. Por tanto, se puede decir que las variables lingüísticas son aquellas en las que los diversos valores que pueden tomar dichas variables no son cuantitativos, sino que vienen dados por una palabra o expresión, la cual representan a un intervalo cuantitativo que es difuso, es decir, representan a un conjunto difuso definido. Esta forma se asemeja mucho más a la forma de expresión que tiene una persona para distinguir entre los valores de una cierta característica. Por ejemplo, en el caso del ejemplo del chándal, la variable lingüística sería el precio, ya que los diferentes valores que se le ha asignado han sido *barato*, *promedio* y *caro*.

3.2.3 Funciones de membresía

Las funciones de membresía o pertenencia definen a los conjuntos difusos, estableciendo los límites difusos para ese determinado conjunto difuso y proporcionando el grado de pertenencia al mismo. Existen distintos tipos de funciones de membresía entre las que se encuentran la función triangular, trapezoidal, gaussiana, sigmoideal y la FM de campana. Es frecuente emplear las funciones triangulares y trapezoidal debido a su estructura lineal, aunque hay casos en lo que esto no conviene y es recomendable el uso de otras de las ya mencionadas [20], [21].

Para una misma variable lingüística se necesitarán tantas funciones de pertenencias como conjuntos difusos se quieran definir para abarcar todos los posibles valores del universo de discurso de esa variable lingüística, es decir, todos los valores cuantitativos que puede tomar en ese determinado caso de estudio.

En el caso del ejemplo del precio del chándal se podrían definir las funciones de membresía que aparecen en la Figura 3-1.

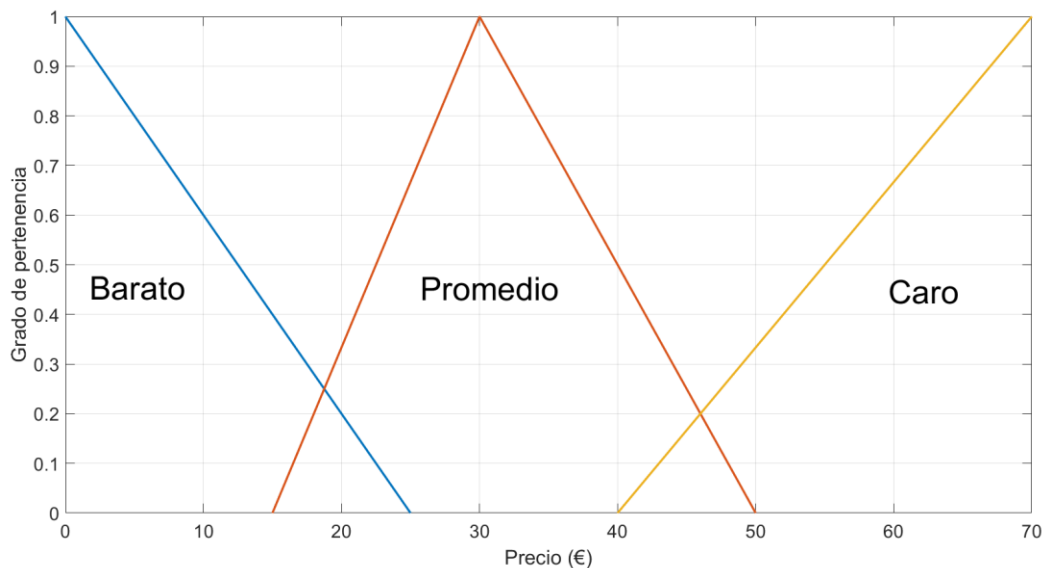


Figura 3-1. Ejemplo de funciones de membresía para el ejemplo del chándal.

Como se puede observar, se han definido tres funciones de membresía que se corresponden con cada uno de los valores que tiene la variable lingüística del precio en el ejemplo. Para ello, se ha empleado las funciones de membresía triangulares, aunque tanto la FM de *barato* como *caro* no aparece una arista, pero su explicación viene de querer otorgarle el mayor grado de pertenencia en los vértices, pues todo los precios cercanos a 0€ son *barato* mientras que todos los superiores a 70€ son *caro*. También se puede observar cómo hay regiones en las que dos funciones de membresía se solapan y es debido al mismo hecho de que no se sabe exactamente el verdadero valor donde comienza una y termina la otra.

Hay diversos métodos para definir las funciones de pertenencia, siendo uno de ellos la intuición o el conocimiento que tiene un experto sobre el sistema. Otro tipo sería el empleo de redes neuronal o algoritmos genéticos [20], [21].

3.2.4 Reglas difusas (IF-THEN)

En el caso de que se quiera realizar un controlador se necesitará establecer unas reglas difusas que estén basadas en el conocimiento experto sobre el ámbito del problema de estudio, de esta forma se crea una base de

conocimiento mediante la cual se regirá la lógica difusa. Estas reglas son del tipo IF-THEN y mediante ellas se relacionan los conjuntos difusos que intervengan en la premisa de la regla con el conjunto difuso que dictamine la regla [19]. La estructura es la siguiente:

$$IF < \text{proposicion difusa} > THEN < \text{proposicion difusa} > \quad (3-1)$$

Las proposiciones difusas pueden ser atómicas o compuestas [19] siendo las primeras una asignación sencilla como “ x es A ”, donde x viene a ser una variable lingüística y A es uno de los conjuntos difusos que se ha definido mediante una determinada función de pertenencia, como, por ejemplo, mediante una función triangular. Las proposiciones difusas compuestas no son más que varias proposiciones atómicas que son unidas por operadores lógicos como *and*, *or* y *not*. Una posible regla con una proposición compuesta sería “Si X_1 es A o X_2 es B entonces Y_1 es C ”, siendo X_1 , X_2 y Y_1 tres variables lingüísticas (X_1 , X_2 son variables lingüísticas de entrada y Y_1 es de salida) y A , B , C son conjuntos difusos establecidos de dichas variables.

De esta forma se pueden establecer relaciones entre las entradas que obtiene el controlador con la salida que se proporciona, formándose así la base de conocimiento mencionada anteriormente. Además, todas las reglas son formuladas lingüísticamente, es decir, no se emplea ningún dato numérico, lo que hace asemejarse más al control que haría un persona sobre un sistema. Por ejemplo, si se quiere controlar la velocidad de un ventilador dependiendo de la temperatura que haga, lo cual es bastante común emplear este tipo de controlador difuso en control de temperatura, una regla podría ser “Si Temperatura es Alta entonces Velocidad_ventilador es Alta”.

3.2.4.1 Operaciones lógicas con conjuntos difusos

Se ha mencionado que las proposiciones de este tipo de reglas pueden estar formadas por el resultado de operaciones lógicas entre conjuntos difusos, por lo que es necesario señalar como funcionan para su entendimiento. Las tres operaciones lógicas más comunes son *and*, *or* y *not*. Para el caso de una operación lógica de tipo *and*, es decir, para la unión de dos conjuntos lo que se hará será tomar el valor mínimo del grado de pertenencia entre los grados de pertenencia que tienen esos conjuntos difusos para así formar un único conjunto difuso. En cambio, para la operación lógica de tipo *or*, es decir, para la unión de dos conjuntos difusos lo que se hará es elegir el grado de pertenencia máximo, mientras que para *not* lo que se le hará es el complemento de la función de pertenencia [20], [22]. En la siguiente figura se puede ver el funcionamiento de estas operaciones lógicas.

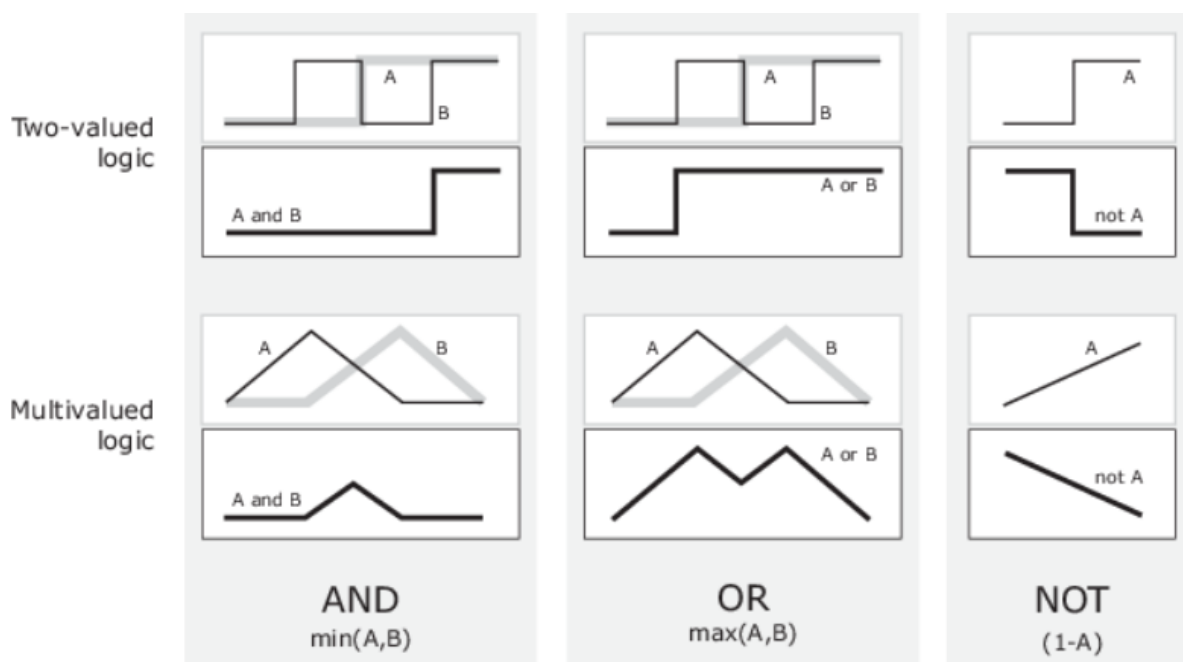


Figura 3-2. Operadores lógicos aplicados a los conjuntos difusos [23].

3.3 Controlador difuso (FLC)

Una vez definidas los conceptos principales de la lógica difusa se va a exponer a continuación el procedimiento para realizar un controlador difuso (FLC, Fuzzy logic controller). El esquema del funcionamiento de un FLC se puede apreciar en la Figura 3-3.

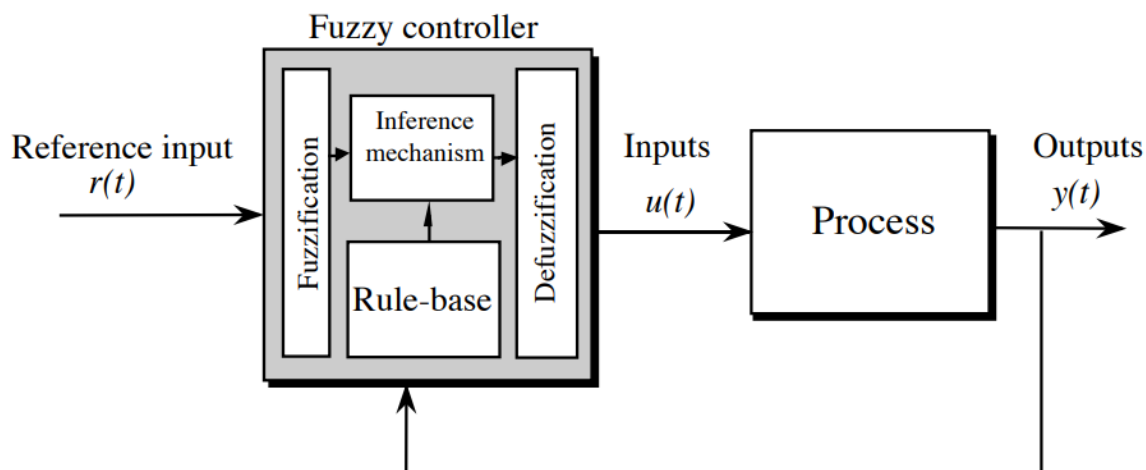


Figura 3-3. Esquema de un controlador difuso [24].

Se pueden distinguir claramente cuatro elementos que intervienen en la obtención de una señal de control, para un determinado sistema, empleando la lógica difusa, los cuales se comentarán a continuación.

3.3.1 Fuzzificación

Se conoce como fuzzificación al proceso mediante el cual las señales de entrada, que son numéricas, son convertidas a señales difusas. Para ello se establecen los conjuntos difusos que conforman las distintas variables lingüísticas (entradas). Gracias a las correspondientes funciones de pertenencia se puede obtener el grado de pertenencia a ese conjunto, el cual será empleado en la evaluación de las reglas [25], [22].

3.3.2 Base de reglas

La base de reglas es la creación de un conjunto de reglas del tipo IF-THEN que se han comentado anteriormente mediante la experiencia o el conocimiento de una persona sobre el ámbito de estudio que a través del razonamiento difuso.

Se pueden distinguir dos tipos de reglas dependiendo de la forma de la proposición referida al consecuente de dicha regla. Si en la proposición se emplean conjuntos difusos, entonces se puede decir que son reglas del tipo Mamdani, mientras que si lo que se usa es una ecuación lineal o función matemática, entonces será del tipo Takagi-Sugeno-Kang [22].

3.3.3 Evaluación de las reglas e implicación (mecanismo de inferencia)

El mecanismo de inferencia es el proceso en el que se evalúan las entradas según todas las reglas establecidas y proporciona una salida difusa.

El proceso de implicación de las reglas es el proceso de generar el consecuente de una regla debido a su antecedente. Existen varios tipos de métodos de implicación, destacándose el método del mínimo (o max-min) y el producto (o max-product). El primero lo que realiza es básicamente truncar o recortar el conjunto difuso de salida (el que se le ha asignado a esa regla) por el grado de pertenencia que indica el antecedente. En cambio, el método del producto lo que hace básicamente es escalar el conjunto difuso de salida correspondiente, para ello multiplica cada valor del grado de pertenencia de la función de membresía de dicho conjunto por el grado de pertenencia que indica el antecedente. De esta última forma se consigue preservar la forma de la función de pertenencia original [20], [22].

En la Figura 3-4 se puede ver un ejemplo de MATLAB en la que se tienen unas entradas, se aplican los operadores lógicos y luego se hace la implicación mediante truncamiento.

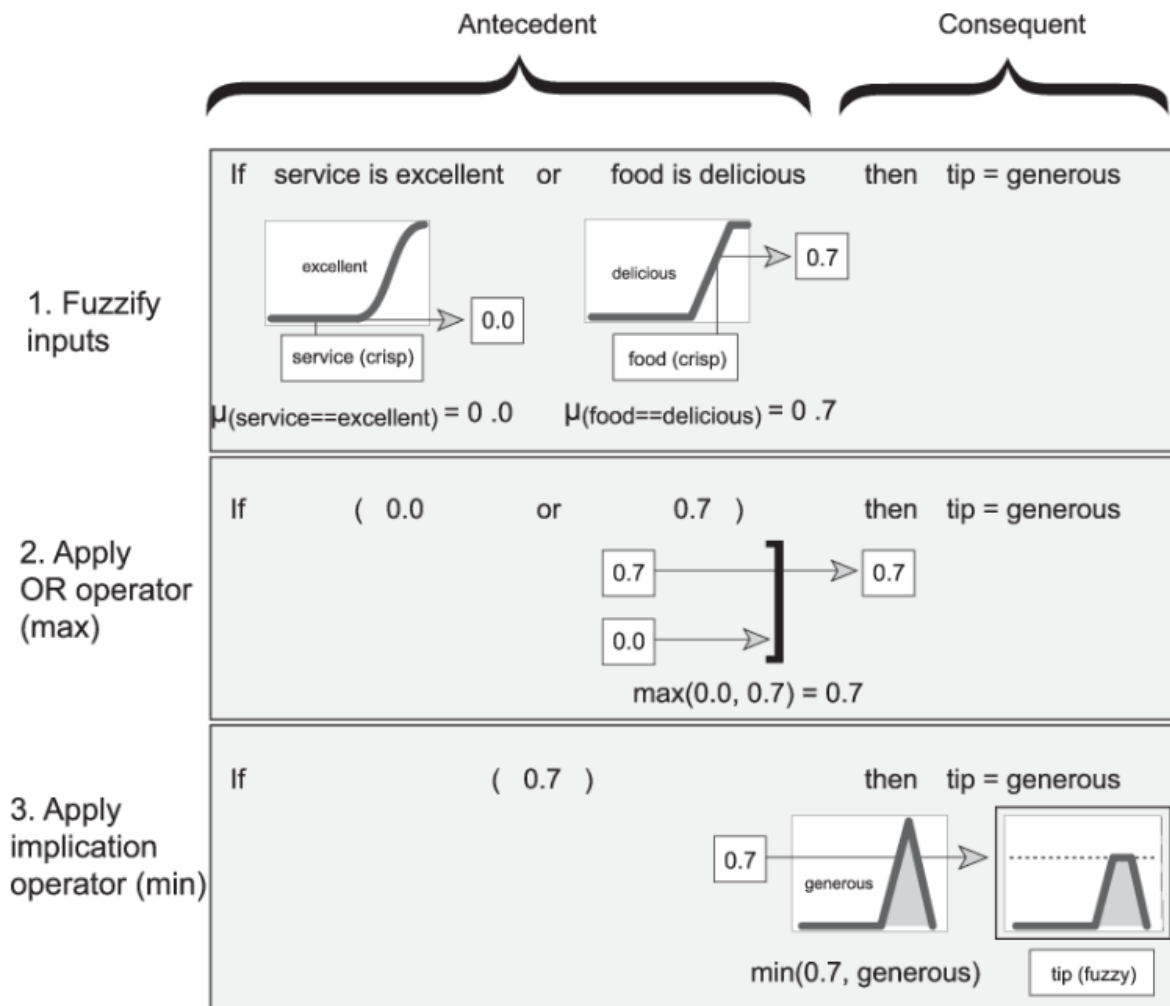


Figura 3-4. Ejemplo de la evaluación de unas reglas difusas [23].

Este es el proceso para evaluar una regla, pero se tiene una base de reglas por lo que hay que combinar el resultado de cada una de ellas. Este proceso se conoce como agregación de las salidas. Nuevamente se pueden distinguir dos formas:

- **Conjuntivo:** En este caso la solución total de todas las reglas dependerá de que se cumplan conjuntamente todas las reglas, por lo que el conjunto difuso de salida será la conjunción de la evaluación de todas las reglas, o lo que es lo mismo se tomará el valor mínimo de grado de pertenencia.
- **Disyuntivo:** En este caso no se tienen que cumplir obligatoriamente todas las reglas, por lo que se tomará el valor máximo del grado de pertenencia [20].

3.3.4 Defuzzificación

La defuzzificación es el proceso contrario a la fuzzificación, es decir, convertir la salida difusa que se ha obtenido mediante el mecanismo de inferencia en datos numéricos que serán la salida final del controlador. Existen diversos métodos para realizar este proceso, siendo algunos de ellos son los siguientes [18], [22] :

- **Centroide o centro de gravedad (center of areas):** en este método el valor numérico de salida viene determinado por el centroide, del conjunto difuso de salida tras realizar la agregación [18]. Este método suele ser el más utilizado en las aplicaciones de control [25].

- Bisectriz o áreas iguales (equal areas): el valor final será aquel donde se divide el conjunto difuso en dos partes que contienen el mismo área [18].
- Máximo inferior (lower maximum): en este tipo tan solo hay que tomar el valor donde se produce el primer máximo (con un grado de pertenencia de 1 tiene que ser), en el caso de que haya más de un pico máximo) del conjunto de salida resultante del proceso de agregación [18].
- Máximo superior (upper maximum): este método es similar al anterior con la diferencia es que se toma el valor donde se produce el último máximo [18].
- Media de máximos o centro de máximos (mean of maxima): en este método se toma el punto donde se produce la media de los máximos del conjunto de salida, empleando en la media el máximo superior y el inferior [18]. Este método también es muy utilizado en microcontroladores [22].

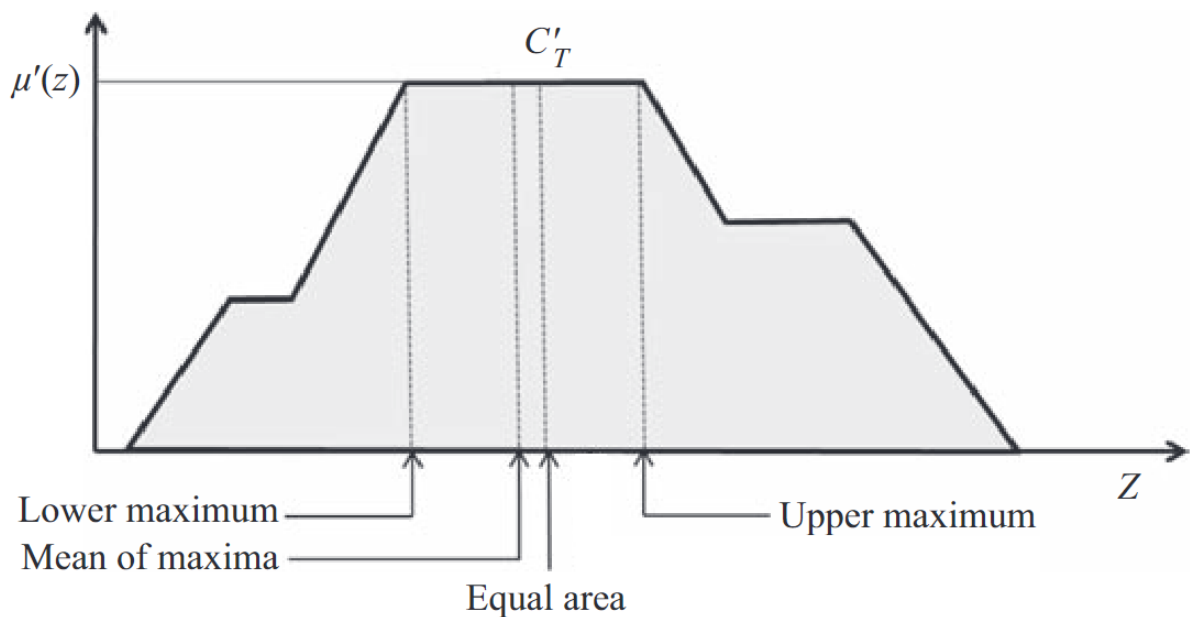


Figura 3-5. Varios métodos de defuzzificación [18].

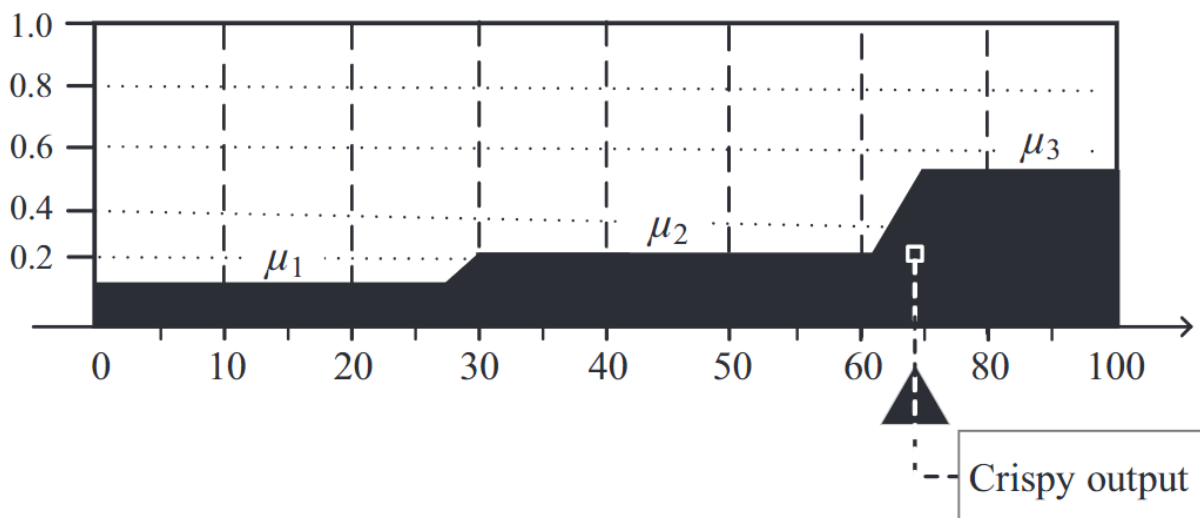


Figura 3-6. Método de defuzzificación del centroide [22].

A continuación, se muestra un ejemplo en el que se realizan los cuatro pasos para un problema dado, el cual consiste en la propina que se va a dar en un restaurante o bar, teniendo como variables lingüísticas de entrada la calidad de la comida y el trato del servicio, y como salida la propina.

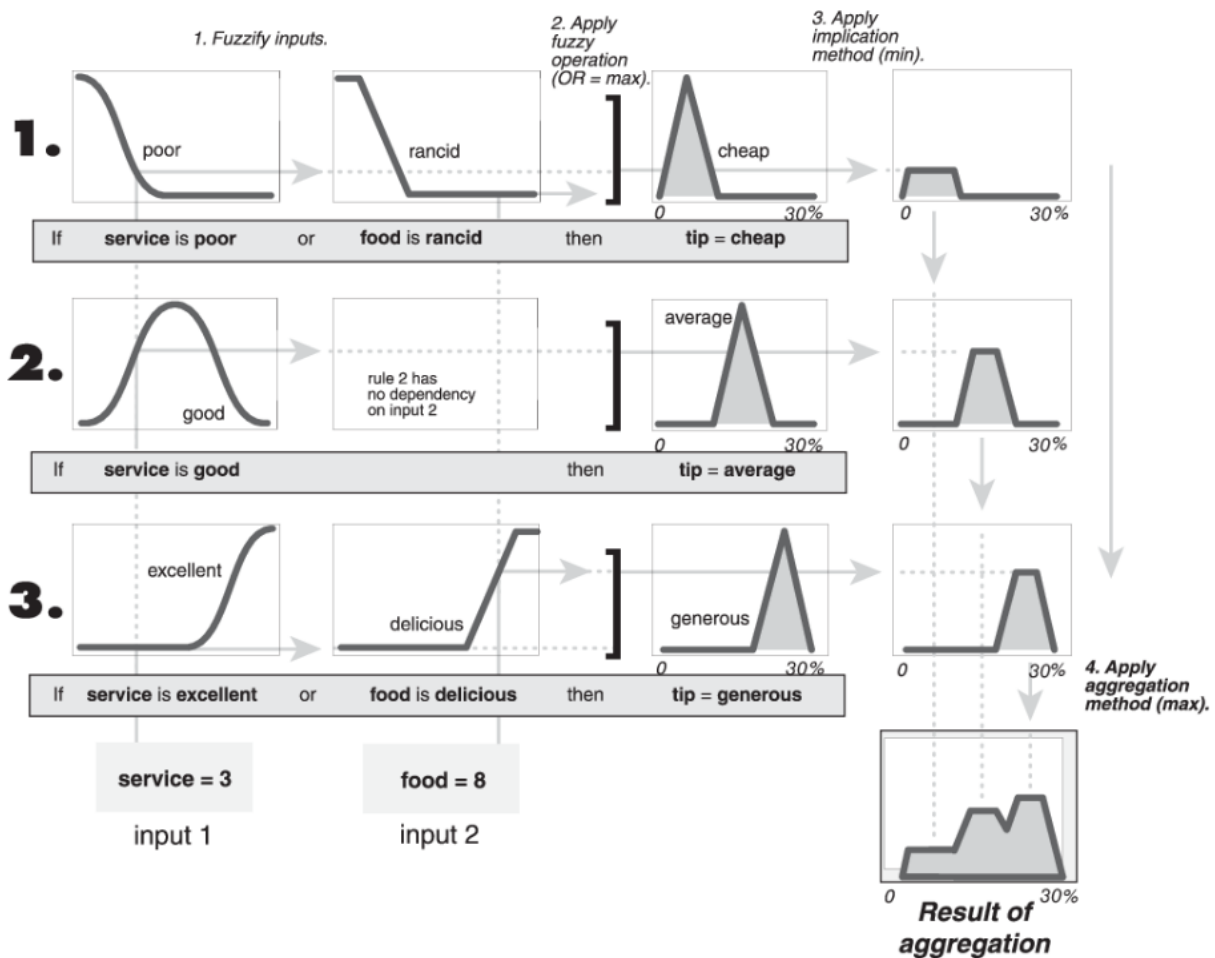


Figura 3-7. Ejemplo de la propina mediante lógica difusa [26].

3.4 Controlador de lógica difusa en MATLAB

3.4.1 Creación del archivo *.fis

Una vez explicada toda la información necesaria para entender el funcionamiento de esta metodología y sus aplicaciones actuales, se va a comentar brevemente como se puede trabajar con ella en MATLAB. Para ello, el primer paso a realizar es ejecutar el comando *fuzzy* mediante el cual se abre el diseñador de lógica difusa que viene integrado el propio entorno de programación de MATLAB (véase la Figura 3-8). Al guardar lo realizado en este editor se crea el archivo FIS (*.fis), cuyas siglas significa *fuzzy inference system* (sistema de inferencia difusa), que se puede realizar dándole a File > Export > To file.

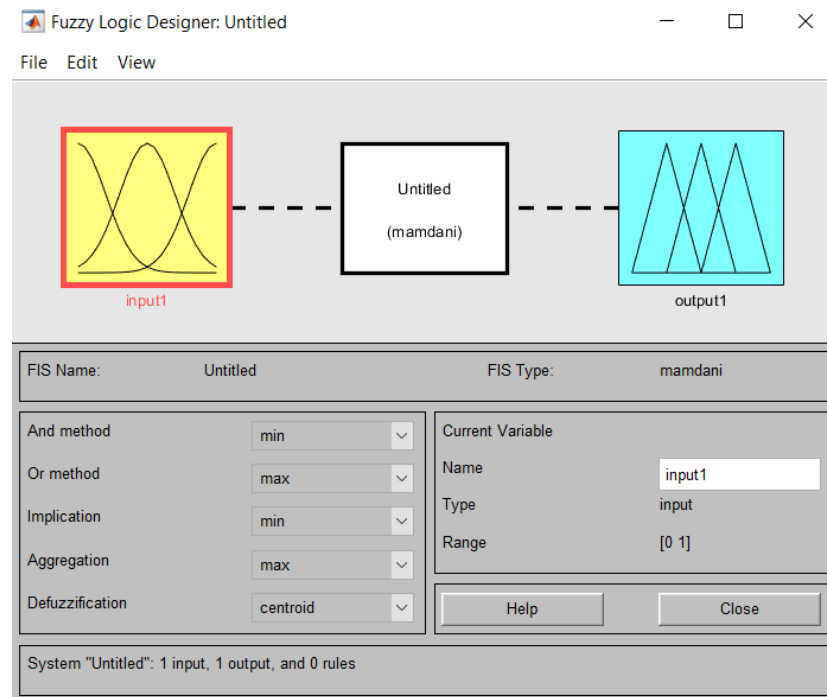


Figura 3-8. Diseñador de lógica difusa en MATLAB.

3.4.2 Variables y funciones de membresía

A continuación, se deben establecer las variables de entrada y salida que tiene el controlador difuso y, tras ello, hay que establecer las funciones de membresía de estas variables. Esto se realiza haciendo clic sobre la variable deseada y aparecerá el diseñador de funciones de membresía (véase Figura 3-9). Existen diferentes tipos de funciones a la hora de configurar una función de membresía, ya que dependerá del comportamiento de las variables que posee el controlador en cuestión, siendo algunas de ellas la triangular, trapezoidal, sigmoideal y gaussiana.

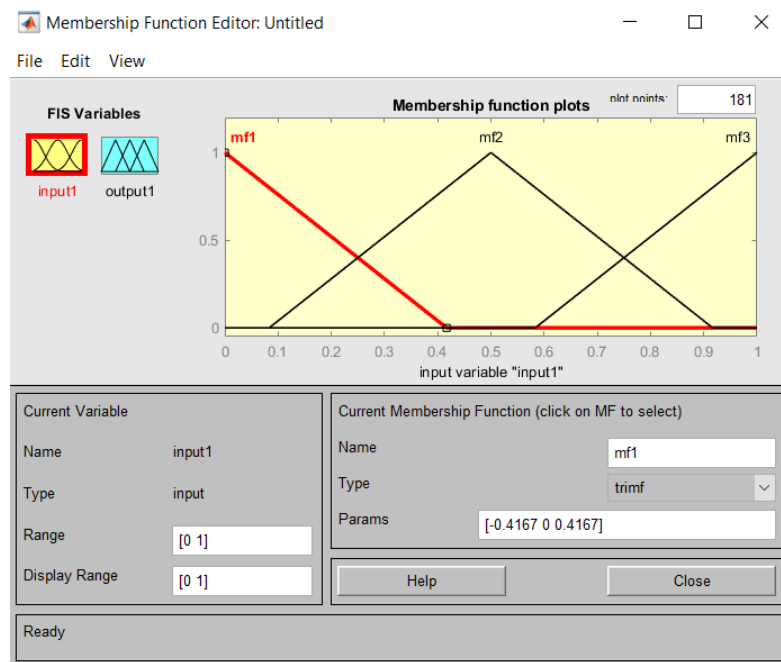


Figura 3-9. Diseñador de funciones de membresía.

3.4.3 Reglas de inferencia

Seguidamente de haber configurado todas las variables del controlador difuso, es necesario establecer las reglas de inferencia que registrarán el comportamiento del controlador. Para ello hay que hacer clic sobre el cuadro blanco de la ventana del diseñador de lógica difusa (Figura 3-8), que tiene el nombre con el que se guarda el archivo e indica que es del tipo Mamdani (o Sugeno, dependiendo del tipo empleado). Como se dijo en apartados anteriores, estas reglas son del tipo “IF-THEN” y se puede crear tantas sentencias como sea necesario, teniendo en cuenta que habrá un límite que depende de las variables y funciones de membresía. Un aspecto importante que destacar es que se pueden establecer “peso” o importancia a cada regla, teniendo que ser su valor numérico entre 0 y 1 [27], es decir, puede ser que una regla se quiera que pondere menos que el resto y se le asigna un valor positivo e inferior a 1, aunque normalmente se establecen todas con el mismo nivel de importancia.

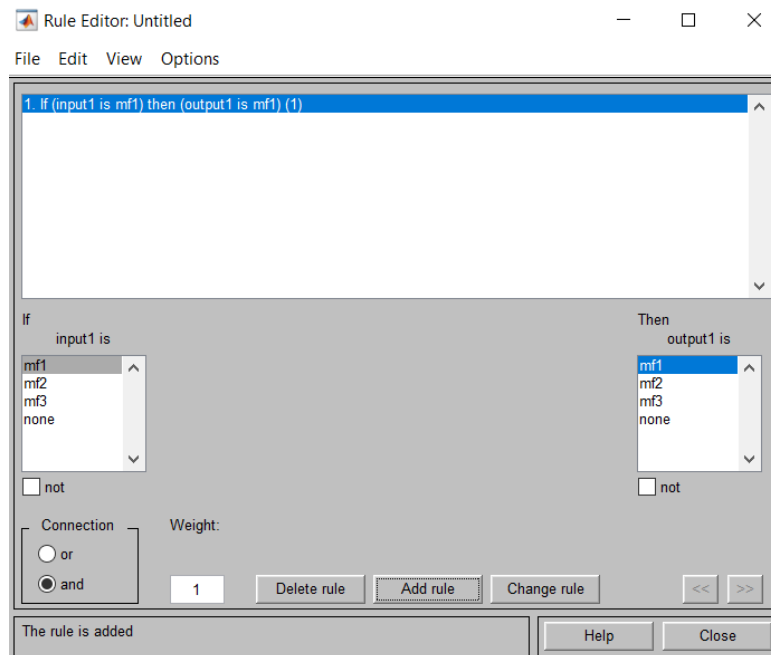


Figura 3-10. Editor de reglas de inferencia.

3.4.4 Visualizador de reglas

Tras establecer las reglas lógicas y haber exportado el archivo, se finaliza la configuración del archivo del controlador y ya puede ser implementado en Simulink. Sin embargo, existe la posibilidad de comprobar el comportamiento de las sentencias mediante un visualizador que se encuentra integrado en el diseñador de lógica difusa. Para abrirlo hay que clicar en View > Rules (arriba a la izquierda de la Figura 3-8).

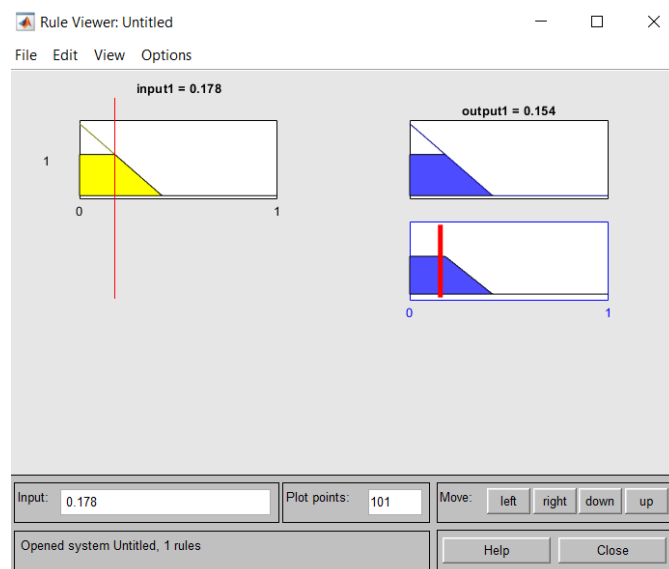


Figura 3-11. Visualizador de reglas.

Como se puede apreciar, aparecen distintos gráficos y se puede modificar el valor de las entradas moviendo la delgada línea roja. Hay que resaltar que en cada columna de las entradas habrá tantos gráficos como reglas se hayan establecido, mientras que en cada columna de las salidas habrá un gráfico extra que muestra el valor

resultante de dicha salida, siendo este último el que presenta una línea roja más gruesa.

Esta herramienta es muy útil ya que permite apreciar si el controlador funciona correctamente, mediante las reglas establecidas, de manera aislada y sin tener en cuenta el resto del modelo que se tiene en Simulink. Además, si se implementase directamente y al simular no ofreciera los resultados esperados, no se sabría si es por algún error en la implementación o porque las reglas o funciones de membresía no son válidas.

3.4.5 Implementación en Simulink

Para insertar el archivo que ha ya sido creado en Simulink tan solo es necesario hacer uso del bloque “Fuzzy logic controller” y escribir el nombre del archivo entre comillas simples, incluyendo la raíz. Por ejemplo, para un archivo guardado con el título de “prueba” habría que poner en el interior del bloque de Simulink ‘prueba.fis’.

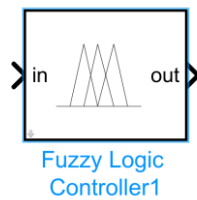


Figura 3-12. Bloque para insertar el controlador difuso en Simulink.

4 MODELO DE PARTIDA DEL SISTEMA EN SIMULINK

Como ya se ha comentado previamente, este proyecto parte del trabajo realizado por Manuel G. Satué en su artículo “Modelado, control y optimización de una planta de producción de frío con almacenamiento de energía”, cuyo modelado en Simulink fue creado por Luis F. Acedo [1]. Por este motivo, se van a describir las distintas partes de las que consta para entender así el funcionamiento del modelo y conocer el estado desde el que se parte.

Haciendo un breve recordatorio del sistema de estudio, se tienen tres enfriadoras de distintas potencias nominales que van a abastecer con agua fría tanto a un sistema de almacenamiento de la energía térmica (TES) como a un hospital, siendo este último edificio la carga real del sistema. También presenta una línea de *bypass* (véase Figura 4-1) que conecta la línea de entrada de agua refrigerada al hospital con la línea de agua caliente que expulsa el hospital. Esto es muy importante porque permite que se cumpla la ley de conservación de las masas, ya que si se produjera un caudal másico superior del que se necesita en el hospital el *bypass* permitiría devolver ese excedente hacia el interior de las enfriadoras nuevamente. Lo mismo ocurriría con el caso contrario en el que el caudal másico excedente lo aportase el hospital, lo que haría que se inyectara en la línea refrigerada ya que a las enfriadoras le debe entrar el mismo caudal másico que sale [1].

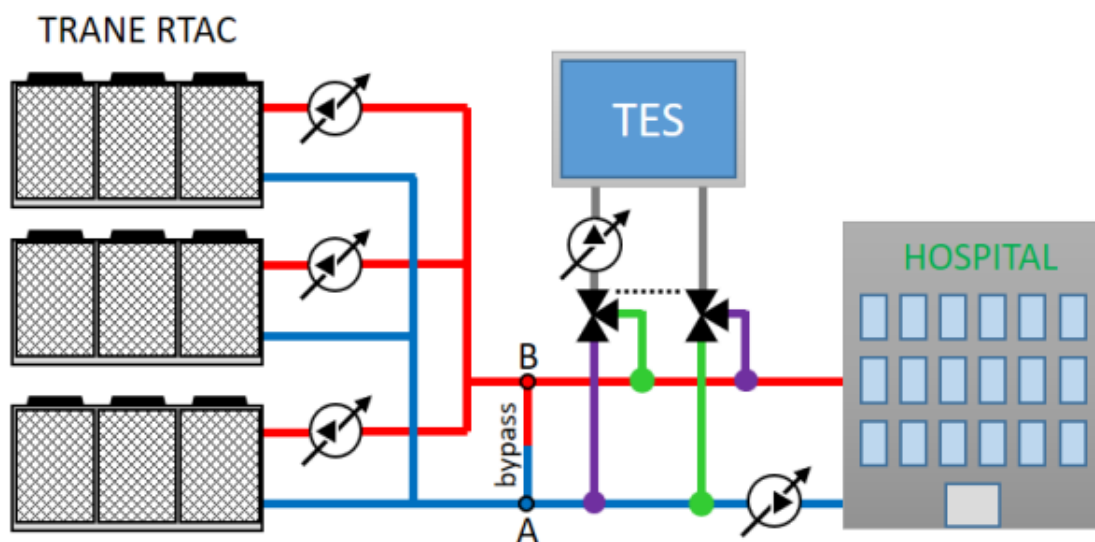


Figura 4-1. Esquema del sistema objeto de estudio [1].

El almacenamiento del frío en el TES, el cual es un tanque de agua de 1000 m^3 constantes, y su descarga se realiza mediante dos válvulas de tres vías. La configuración de las vías en color verde (véase Figura 4-1) es para la descarga del TES, es decir, se está inyectando un caudal de agua fría desde el TES a la línea de agua refrigerada por las enfriadoras a su vez que entra agua caliente, procedente de la salida del hospital, para mantener constante el volumen del TES. Mientras que en color morado es para el caso contrario, es decir es el proceso de carga del TES [1]. Para el movimiento de los caudales de agua existen bombas de agua, siendo en

total 5, donde tres de ellas son para impulsar el agua caliente procedente del hospital hacia cada enfriadora, otra es para la entrada del propio hospital, y la última es para el TES.

4.1 Análisis del modelo de partida en Simulink

El modelo, cedido por los compañeros Luis F. Acedo y Manuel Satué [1], se podría decir que está compuesto por tres partes o subsistemas, que se corresponden con las enfriadoras del líquido térmico del sistema, el sistema de almacenamiento de energía o TES y el hospital que va a establecer la potencia calorífica que se va a necesitar para su refrigeración. Además, para conectar las distintas partes se han empleado fuentes de caudal másico y existe una línea de *bypass* para enviar el excedente de caudal másico de nuevo a las enfriadoras en el caso de que no sea necesario para el hospital. La siguiente figura muestra el modelo completo del sistema ya implementado en Simulink.

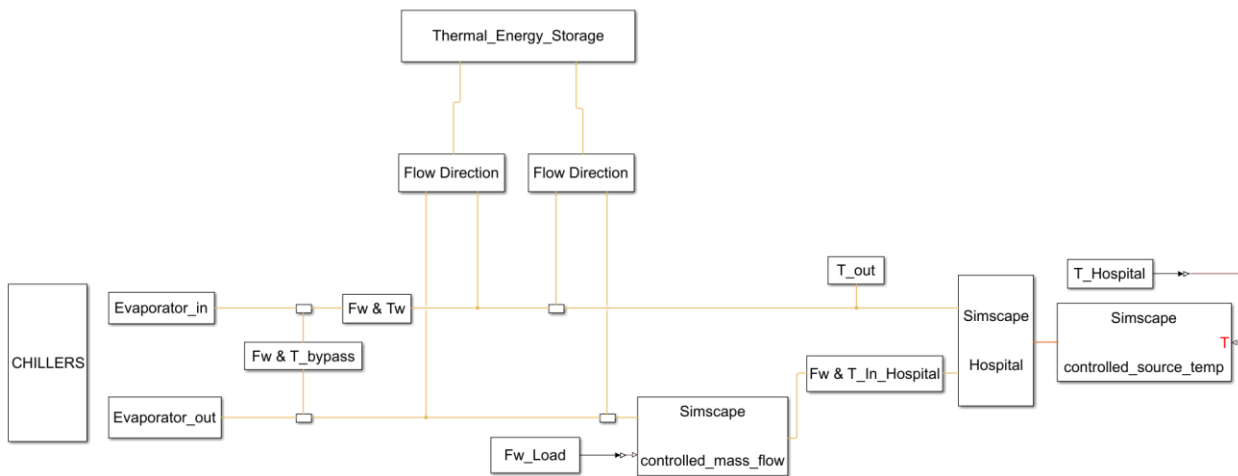


Figura 4-2. Modelo completo del sistema de refrigeración del hospital en Simulink.

4.1.1 Enfriadoras o chillers

Analizando el modelo de izquierda a derecha, lo primero que se puede apreciar son las enfriadoras o *chillers*. En este subsistema se encuentran las máquinas que se encargan de enfriar el agua caliente procedente del hospital, y es donde se obtiene el caudal másico total que aportan las enfriadoras y la temperatura a la que sale el agua mediante una mezcla isoentálpica. Se trata de tres enfriadoras con distintas potencias de enfriamiento nominales, concretamente son de 400, 300 y 250 tons (que al cambio de unidades sería de 1404.3, 1060.1 y 834 kW respectivamente). Estas máquinas van a representar a los modelos reales de la serie Model RTAC de Air-Cooled Series R, cuyo datasheet se adjunta en el proyecto para corroborar los datos empleados en los experimentos.

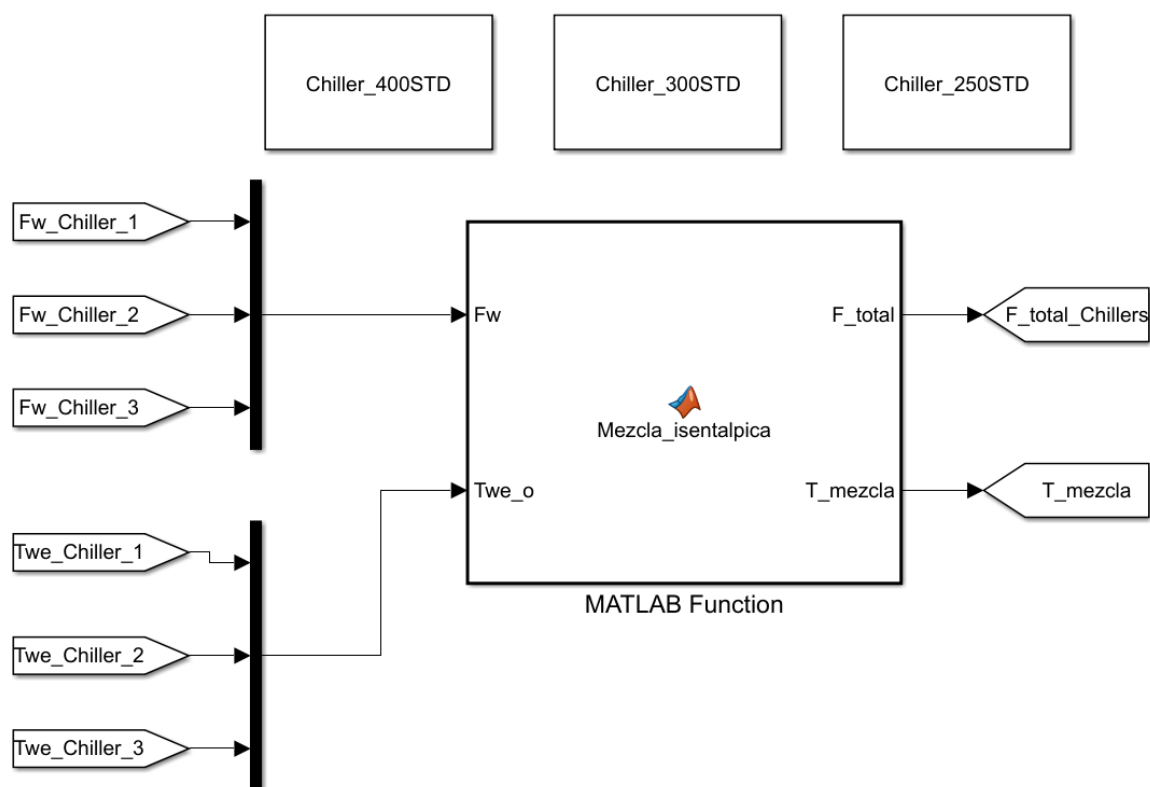


Figura 4-3. Subsistema de las enfriadoras para el cálculo de la temperatura y caudal másico total.

Se puede apreciar en la anterior figura que este subsistema se divide a su vez en otros tres que se corresponden con cada una de las enfriadoras. Dentro del subsistema de cada enfriadora se realiza el cálculo de la potencia eléctrica que está consumiendo la máquina, $P_{electricalIn}$, la potencia del fluido térmico, el COP y la carga relativa a la cual está operando. El COP o *coefficient of performance* es una medida que representa la relación entre la potencia eléctrica que ha generado dicha enfriadora y la que ha consumido, por ello lo óptimo sería tener un COP lo más alto posible, ya que significaría que se genera mucho frío, en el caso que nos ocupa, necesitando poca energía eléctrica, es decir, tiene un buen rendimiento. Hay que tener en cuenta que la potencia eléctrica que consumen estas enfriadoras dependerá de la carga parcial (Part Load Ratio, PLR). Estos datos los proporciona su fabricante en su correspondiente *datasheet* y que se verán en los próximos apartados.

Hay que resaltar que estas enfriadoras no han sido modeladas mediante ecuaciones que describan el proceso de refrigeración, sino que se emplean datos del fabricante como la potencia nominal y el COP en distintos puntos de operación, pero hay puntos de operación donde no se sabe su valor. La solución que adoptó Manuel G. Satué como el mismo dice fue mediante “la interpolación a partir de los datos del fabricante en función de la temperatura del agua a la salida del evaporador, la temperatura del aire a la entrada del condensador y el ratio de carga (PLR, part load ratio)” [1]. Es por ello por lo que dentro del subsistema de cada enfriadora se emplea una *MATLAB function* en la cual se hacen los cálculos de las siguientes ecuaciones que se van a expresar a continuación.

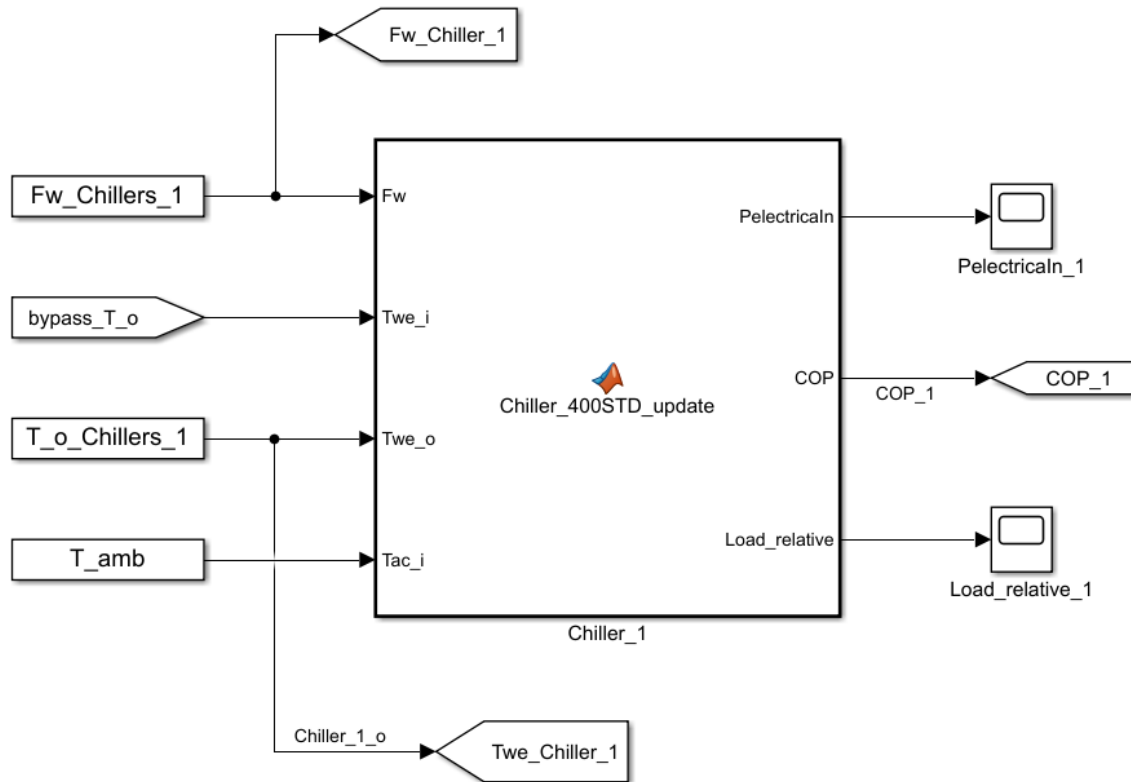


Figura 4-4. Subsistema de una máquina enfriadora.

Para realizar el cálculo de los parámetros anteriormente descritos se hace uso de la ecuación que permite obtener la potencia eléctrica térmica de refrigeración del líquido térmico.

$$\dot{Q} = C_p \cdot F_w \cdot (Twe_i - Twe_o) \quad (4-1)$$

Siendo:

- \dot{Q} la potencia térmica de refrigeración [kW],
- C_p es el calor específico del líquido térmico, que al tratarse del agua es de 4.184 [kJ/kg·K],
- F_w es el caudal másico que transcurre por esa zona [kg/s],
- Twe_i es la temperatura del agua a la entrada del evaporador [K],
- Twe_o es la temperatura del agua a la salida del evaporador [K].

El caudal másico que transcurre por las enfriadoras, al igual que otros parámetros, se establecen antes de realizar cualquier simulación. Para ello hay que cargar el archivo *PerfilesPruebas.mat* que se adjunta con el modelado. Esto se debe a que se ha supuesto que está cerrado el control de bajo nivel de la simulación, de modo que el simulador tan solo recibe las referencias de los caudales másicos. También se ha propuesto un método de optimización mediante algoritmos genéticos basados en el operador de cruce *BLX-alpha* y selección por torneo.

La temperatura del agua a la entrada al evaporador se obtiene directamente mediante los sensores de temperatura existentes antes de su entrada al evaporador, mientras que la temperatura de salida también son

datos establecidos, teniendo que ser entre 5 y 9 grados centígrados como indica la hoja de datos del fabricante.

Con todo ello se obtiene la potencia eléctrica generada por la enfriadora (Q) y, al tener el valor de su carga nominal gracias al fabricante, se obtiene la carga parcial o relativa a la que está operando la enfriadora, realizando simplemente la división entre la potencia calculada y su COP.

$$Load_{relative} = \frac{Q}{Q_{nominal}} \quad (4-2)$$

Por último, una vez obtenido el COP ya tan solo es necesario despejar la potencia eléctrica consumida por la máquina, pues era la relación entre la potencia generada, que se acaba de calcular, y la consumida.

$$Pelectrica_{in} = \frac{Q}{COP} \quad (4-3)$$

Las ecuaciones (4-1), (4-2) y (4-3) son todas las operaciones realizadas por el bloque de *MATLAB function* de cada enfriadora.

El caudal másico total a la salida de las enfriadoras será la suma de los caudales másicos de cada una, mientras que para la temperatura se realiza una mezcla isoentálpica de las mismas, todo ello se calcula en la *MATLAB function* de la Figura 4-3 según las siguientes expresiones.

$$\dot{m}_T = \sum_{i=1}^3 \dot{m}_i \quad (4-4)$$

$$T_m = \frac{\sum_{i=1}^3 \dot{m}_i \cdot T_{Si}}{\dot{m}_T} \quad (4-5)$$

Donde:

- T_{Si} es la temperatura de salida de la enfriadora i -ésima [K]
- \dot{m}_i el caudal másico que circula por la enfriadora i -ésima [kg/s]

La entrada/salida de agua en el evaporador de las enfriadoras se podría decir que no se encuentra conectado internamente. La entrada del evaporador, representado por el subsistema *Evaporator_in*, representa tan solo a un depósito infinito de agua en el cual se va a almacenar el caudal másico, mientras que la salida del evaporador, representado por el subsistema *Evaporator_out*, es un depósito infinito a presión constante cuya temperatura a la que sale expulsada depende de la obtenida en la mezcla isoentálpica respectivamente (mediante la ecuación (4-5)). Además, se tiene una fuente de energía mecánica ideal haciendo el papel de la bomba de agua, la cual no tiene resistencia al flujo ni intercambio de calor con el entorno, cuyo caudal másico viene dado por una señal física, siendo en este caso la suma de los tres caudales másicos que salen de las tres enfriadoras.

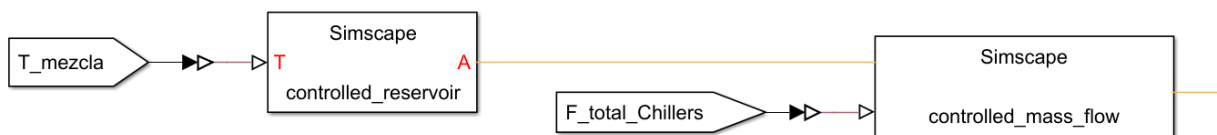


Figura 4-5. Subsistema de la salida de agua del evaporador de las enfriadoras.

Es por este motivo por el cual se dice que no están conectadas realmente, pero en realidad se consigue el mismo fin. Además, se tiene en cuenta que el caudal másico que entra en el subsistema del evaporador sea el mismo que sale, para que se siga cumpliendo el balance de masas.

4.1.2 Hospital

El hospital se ha modelado de una forma sencilla como una tubería a la cual se le aporta calor para así incrementar la temperatura del líquido térmico al atravesar esta zona. Este calor aportado se introduce como si fuese la temperatura real media del hospital, pero al emplear este método en Simulink, el líquido térmico apenas incrementa su temperatura y es por este motivo por el cual se establecen valores elevados para la temperatura del hospital, con el fin de obtener un incremento significativo.

Para modelar el caudal másico que va a atravesar el hospital, se ha modelado en Simscape una bomba de agua similar a la que presenta la salida del evaporador de agua, y el valor de su caudal másico, al paso del tiempo, se indica mediante la variable Fw_load , que es otra de los datos que se introducen con los perfiles de pruebas.

4.1.3 TES

El sistema de almacenamiento del frío se ha modelado como un depósito de agua de volumen constante igual a 1000 m^3 , pero en la que se puede conservar la energía calorífica que aumentará o disminuirá dependiendo de si el sistema se carga o descarga. Esto se debe al almacenamiento en tanques estratificados como se explicó en la sección 2.2.2.1. Sin embargo, en el modelo de Simulink no se encuentra estratificado, sino que se considera una mezcla perfecta del agua. Esto es solo válido en tanque que son muy grandes, como es este caso.

Existen dos válvulas de tres vías por las que se puede almacenar energía en el sistema o descargar. Al tratarse de válvulas de tres vías, se tienen tres nodos los cuales se encuentran conectados al propio TES, al agua procedente de las enfriadoras y al agua saliente del hospital. Para controlar la dirección del caudal de agua a través de cada válvula, es decir, para controlar la posición de una válvula se emplean dos variables que indican el caudal másico que transcurre por el nodo conectado al agua refrigerada y al agua calentada al atravesar el hospital, siendo necesario que una de las variables sea prácticamente nula para establecer claramente la posición de la válvula.

Por ejemplo, para cargar el TES es necesario que se extraiga agua refrigerada a través de la válvula que se encuentra a la izquierda, por lo que se necesita que la variable en ese nodo sea alta para que transcurra el flujo de agua, mientras que la variable del otro nodo de esa misma válvula será prácticamente cero, pues se encuentra cerrado. Al mismo tiempo se debe configurar la válvula de la derecha para verter el caudal másico en el agua saliente del hospital y que se cumpla así el balance de masas, pues como ya se ha dicho el tanque es a volumen constante por lo que el mismo caudal másico que entra debe salir del TES. En resumen, para almacenar energía en el TES es necesario que por los nodos 1 y 3 transcurra el agua (teniendo un valor elevado de caudal másico en la variable) y que los nodos 2 y 4 estén cerrados (estableciendo en la variable un caudal másico prácticamente nulo). En el caso de que se quiera descargar habría que hacer el caso opuesto, cerrando los nodos que antes estaban abiertos y viceversa para así conseguir verter el agua almacenada en el TES en la que va a entrar al hospital. En la siguiente figura se muestra un diagrama de bloques del sistema donde se pueden ver la numeración de los nodos que tienen que ver con los procesos de carga y descarga del TES.

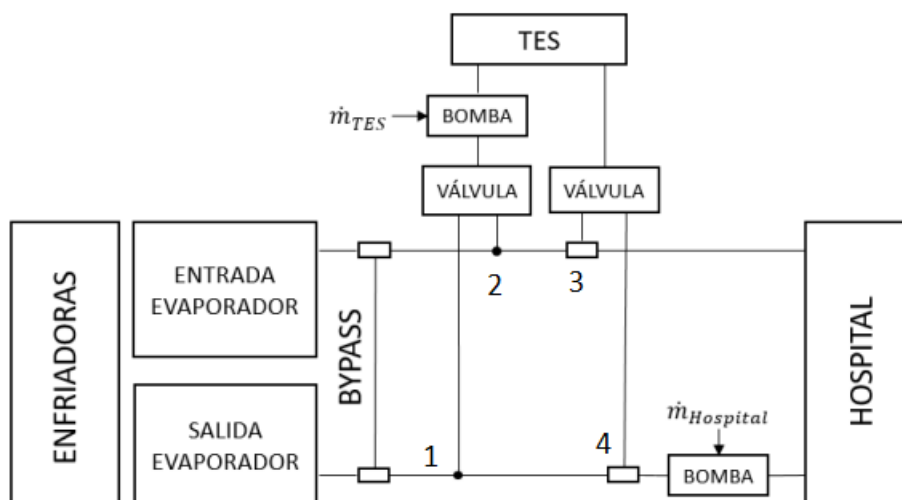


Figura 4-6. Diagrama de bloques del sistema con numeración de los nodos que intervienen en el proceso de carga/descarga del TES [1].

4.2 Resultados del modelo actual

Una vez conocido todo el modelo se procede a comentar los resultados iniciales que se obtienen. Hay que recordar que se presupone que el modelo está ya controlado, aunque no se tiene diseñado un control como tal en el simulador, sino que se aportan directamente los caudales máxicos que circulan por las tres enfriadoras, así como el que fluye por la bomba que lleva el agua hacia las instalaciones del hospital y el de la bomba que controla el TES. También se ofrecen las temperaturas del agua a la salida del evaporador de cada enfriadora, y todo ello se carga mediante el archivo externo denominado *PerfilesPruebas.mat*.

La primera gráfica para analizar es la correspondiente a la potencia calorífica, ya que se trata de la variable a controlar en este estudio. En la Figura 4-7 se puede apreciar que se consigue el control de la potencia que demanda el hospital gracias a la potencia conjunta que aporta el TES y las enfriadoras.

Por otro lado, gracias a la información conjunta de la Figura 4-7 y Figura 4-8 se puede distinguir cuando el TES se encuentra descargando o cargándose. El proceso de carga del TES ocurre cuando se tiene una potencia negativa, que además coincide con los puntos donde las enfriadoras están generando una potencia frigorífica bastante superior a la que demanda el hospital, por lo que esta potencia sobrante va a parar al TES. Estos procesos de carga y descarga se pueden apreciar claramente mediante los flujos máxicos de la Figura 4-8, donde se cumple que el flujo máxico que entra por la primera válvula es igual al que sale a través de la segunda. Por ejemplo, a las 20 horas de la simulación se está produciendo este proceso de carga del TES, donde las enfriadoras han producido unos 1000 kW extra a lo que se necesita y teniendo en ese mismo punto una potencia negativa de 1000 kW en el TES, y además hay unos caudales máxicos de unos 35 kg/s por las vías de carga de las válvulas.

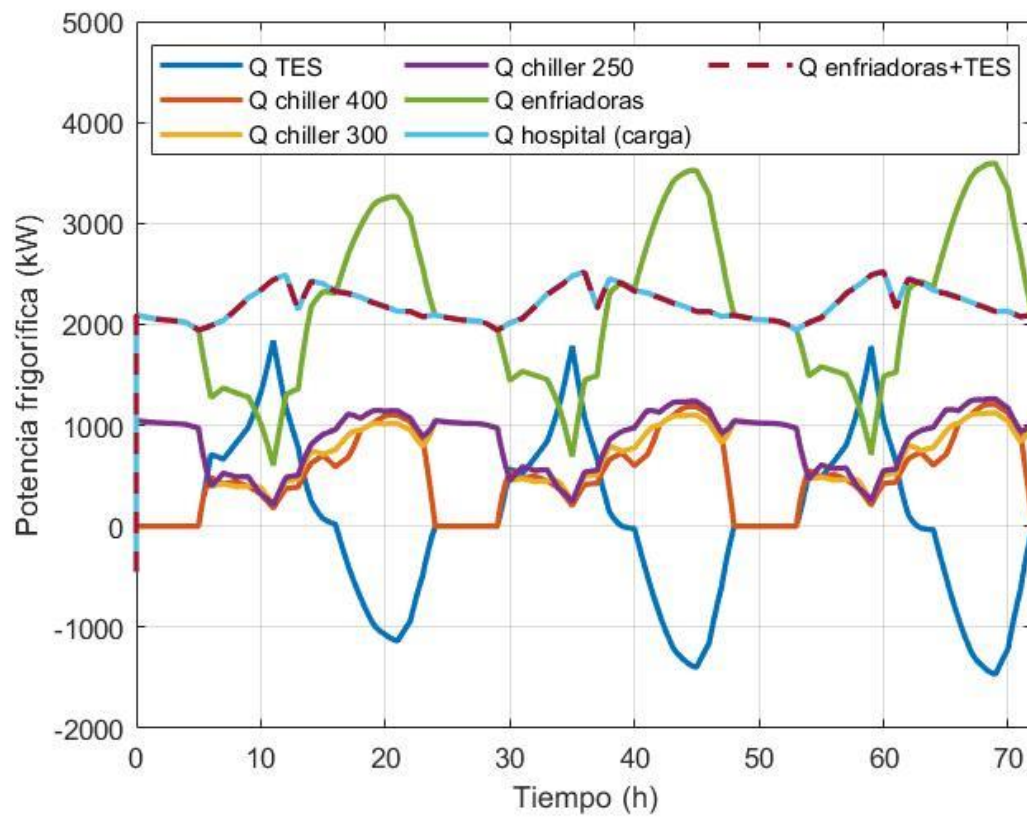


Figura 4-7. Potencias frigoríficas resultantes de la simulación.

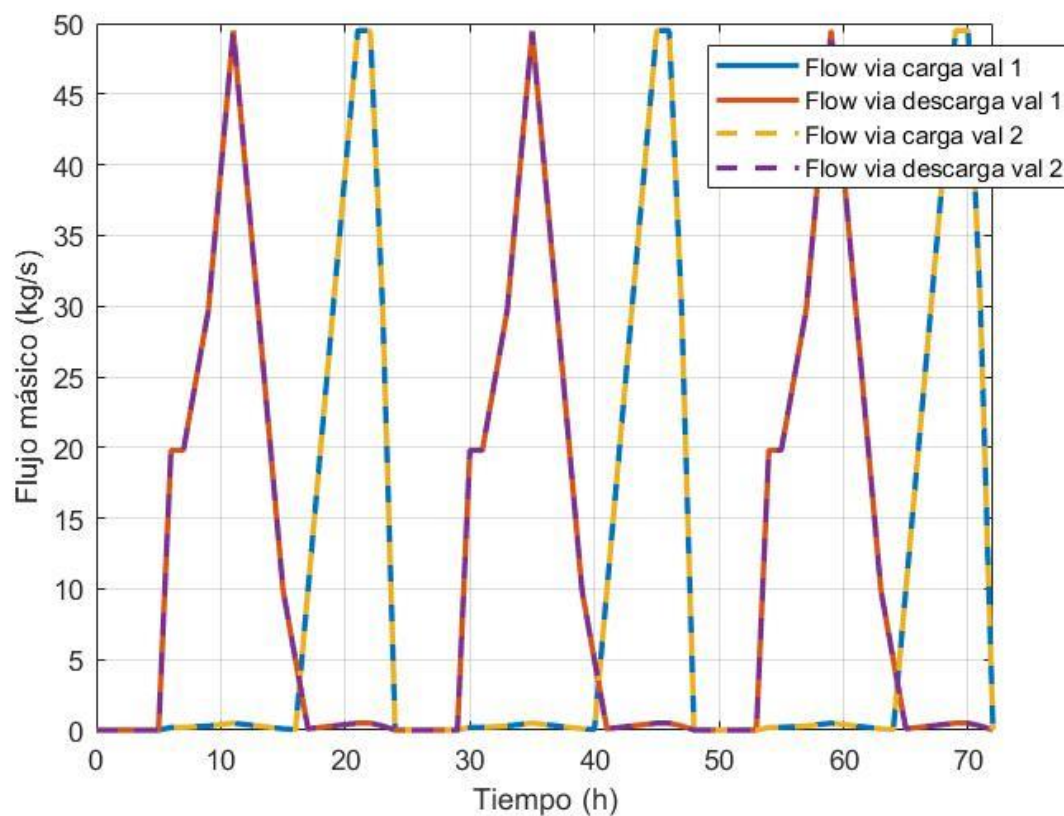


Figura 4-8. Flujos másicos de las dos entradas de las válvulas de tres vías.

Otro punto importante a analizar son los flujos másicos del sistema (Figura 4-9) ya que es necesario comprobar que se cumpla que los flujos másicos que entran en el evaporador de las enfriadoras sean igual a los que salen.

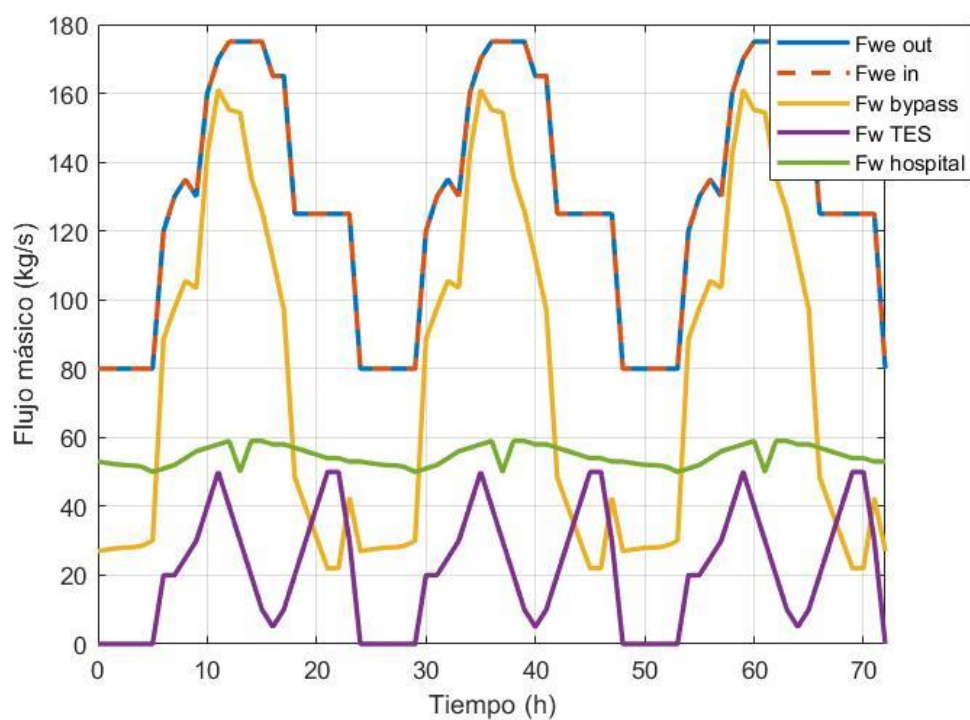


Figura 4-9. Flujos másicos obtenidos de la simulación del sistema.

Por último, la última gráfica que nos aporta esta simulación es la de las temperaturas del agua en diferentes partes del sistema y la temperatura del ambiente en el hospital (Figura 4-10). En ésta es importante fijarse en la que la temperatura de entrada al evaporador de las enfriadoras sea siempre superior a las que salen y que el agua al paso por el hospital incremente su temperatura.

Volviendo al caso de las 20 horas, se comprueba que se está cargando al tener en ese punto una temperatura de entrada al TES de unos 6 °C, que coincide con la temperatura del agua que procede de las tres enfriadoras, lo que nos indica que se está extrayendo directamente desde la misma salida de éstas.

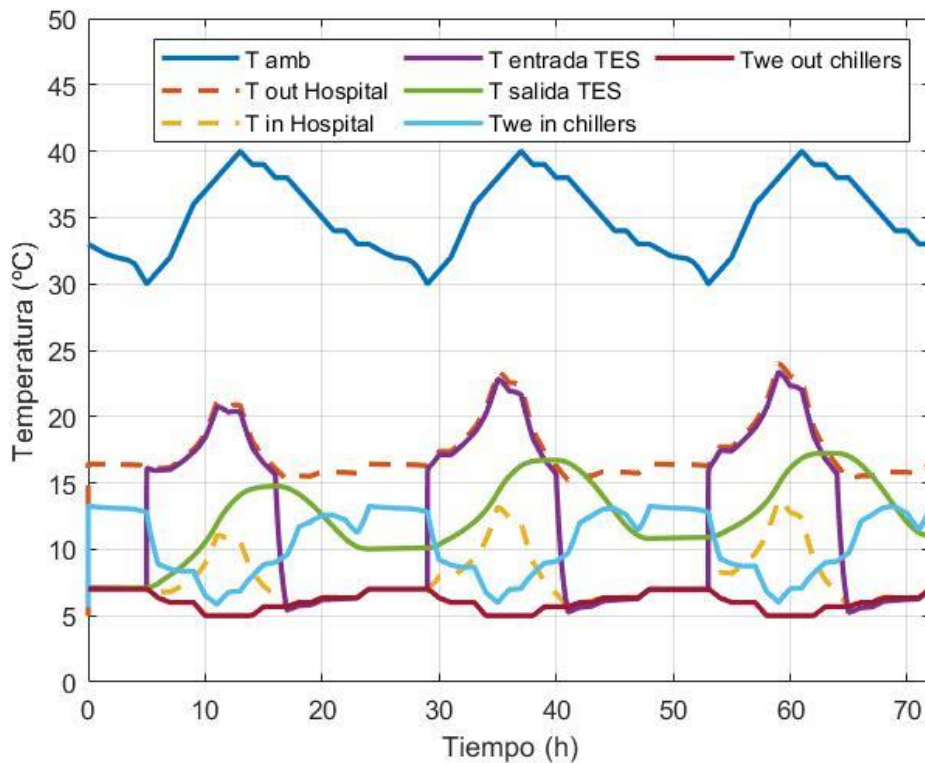


Figura 4-10. Temperaturas del ambiente en el hospital y la del agua a la entrada/salida del TES, hospital y evaporador.

5 DESARROLLO DEL TRABAJO

Una vez presentado y conocido el funcionamiento del sistema se procede a comenzar con el desarrollo del controlador difuso. El primer controlador que se diseñará será el equivalente a un PI convencional, por lo que también se diseñará este último para realizar una comparación entre ambos controles y poder sacar así mejores conclusiones sobre los resultados obtenidos. Ambos se encargarán de controlar el caudal másico que impulsa la bomba de agua hacia el hospital. Más adelante se diseñará un segundo control difuso que este ya se encargue de controlar los caudales másicos de las enfriadoras y del TES, indicando cuando se procede a cargar o descargar.

5.1 Diseño del controlador del caudal másico que circula por el hospital

Las posibles variables de control presentes en el modelo son los caudales másicos que salen del evaporador de las enfriadoras, junto con la temperatura del agua, los caudales másicos del TES y el caudal másico que impulsa la bomba de agua hacia el hospital. Como el primer control tiene como finalidad conseguir seguir la potencia de refrigeración que demande el hospital se ha elegido como variable de control el caudal másico del hospital y se han mantenido constantes el resto de las variables, ya que la potencia de refrigeración depende del incremento de temperatura del agua y del caudal másico, como indica la ecuación (4-1).

Para los caudales másicos de las enfriadoras se ha determinado que sean constantes e igual al máximo que pueden aportar a pleno rendimiento. Según el datasheet, las enfriadoras tienen unos caudales máximos de 105, 68 y 47 kg/s para las enfriadoras de 400, 300 y 250 Tons respectivamente.

La temperatura del agua enfriada está en el intervalo de 5 a 9 °C, y se ha seleccionado una temperatura intermedia de 7°C.

Por último, se ha decidido que el TES en este controlador inicial no sea incluido para facilitar el diseño del primer controlador difuso, por lo cual los caudales másicos por las vías de tres válvulas son nulos.

5.1.1 Diseño del controlador PI en tiempo continuo

Se ha seleccionado el control PI porque es uno de los más empleados en la industria para así tener una comparación con un controlador convencional. El primer paso para realizar este controlador es obtener la función de transferencia en tiempo continuo mediante la experimentación con el sistema.

El punto de operación elegido de la bomba de agua para los experimentos ha sido el de 50 kg/s y, teniendo en cuenta que el caudal másico máximo que puede impulsar dicha bomba hacia el hospital es de 268.4 kg/s, se le ha dado un escalón de 40.26 kg/s que se corresponde con un 15% del rango máximo de la variable de control. El escalón se ha añadido a los 1000 s de simulación para darle tiempo al sistema a estabilizarse.

Ha sido necesario modelar el tiempo que tardan las bombas de agua en acelerarse o desacelerarse para que puedan aportar esos caudales másicos al hospital. Para ello se ha empleado una función de transferencia de primer orden con una constante de tiempo (τ) de 5/3, pues se ha considerado un tiempo de subida en bucle cerrado de 5 segundos. Este modelado es importante a la hora de verificar el sistema porque si no éste carece de dinámica, es decir, es estático.

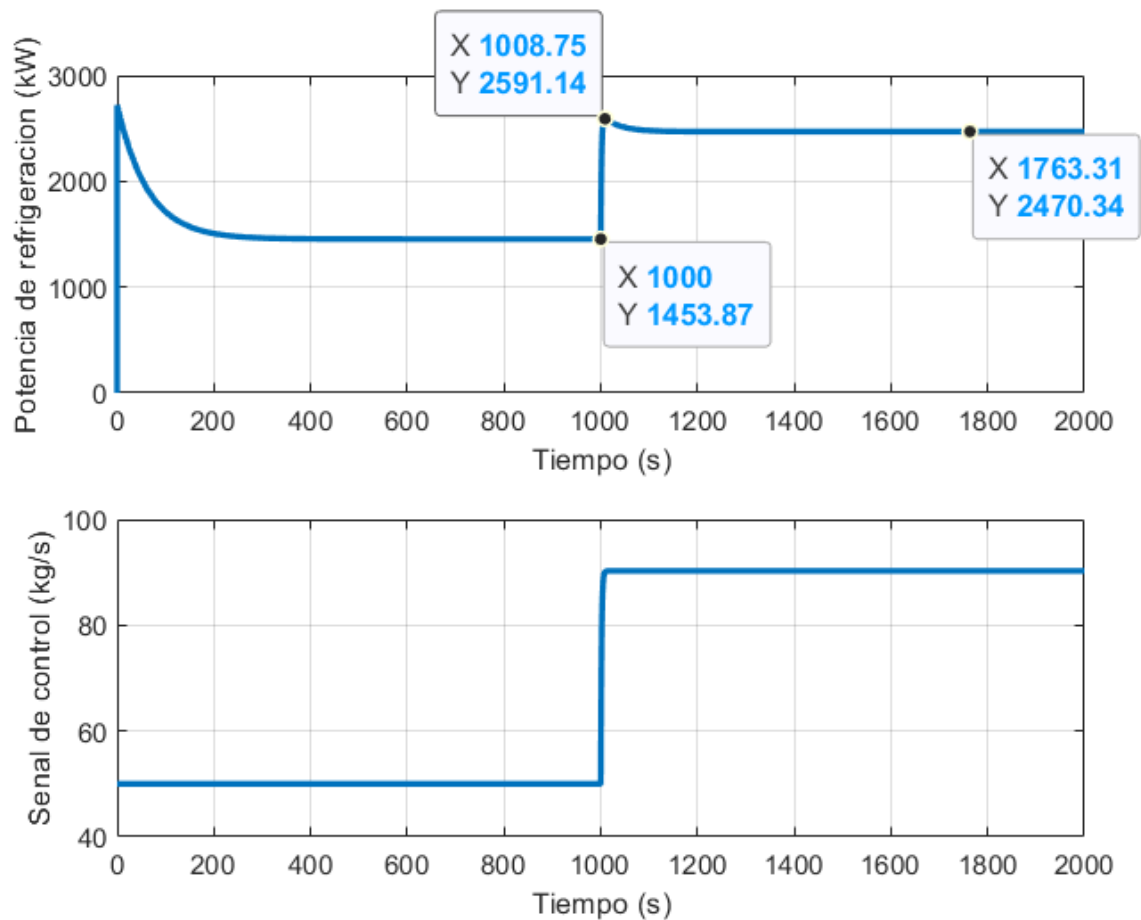


Figura 5-1. Respuesta del sistema ante escalón.

Según lo que se puede apreciar en la Figura 5-1 se concluye que el sistema es de segundo orden sobreamortiguado con un polo añadido debido a que la respuesta presenta una sobreoscilación pero no continua oscilando sino que tiene un acercamiento suave a la referencia. Como ya se ha estudiado en la carrera, la adicción de un polo provoca que aumente la sobreoscilación y disminuya el tiempo de subida. Recordando un poco los conceptos que se han adquirido a lo largo de la carrera se procede a calcular su función de transferencia que, según lo comentado anteriormente, queda de la siguiente forma:

$$G(s) = \frac{K(\tau_{cero} \cdot s + 1)}{(\tau_{lenta} \cdot s + 1)(\tau_{rapida} \cdot s + 1)} \quad (5-1)$$

La ganancia estática se puede obtener directamente gracias a los datos de la Figura 5-1 y el incremento en la señal de control son los 40.26 kg/s que se ha comentado previamente.

$$K = \frac{\Delta y}{\Delta u} = \frac{2470.34 - 1453.87}{40.26} = 25.25 \frac{kW}{kg/s}$$

Para la constante de tiempo rápida se toma como en los casos de sistemas de primer orden, es decir, se averigua el intervalo de tiempo que hay entre el tiempo donde se produce el escalón y el 63% del incremento de la señal de salida antes que se produzca el pico. Teniendo en cuenta que el régimen permanente es de 2470.34 kg/s y antes del escalón era de 1453.87 kg/s se obtiene que se produce un incremento de la salida de 1016.47 kg/s, donde el 63% son 640.38 kg/s que sumado al valor inicial da un resultado de 2094.25 kg/s. Entonces la constante de tiempo rápida es el intervalo de tiempo entre los 1000s, que es donde se produce el escalón, y donde la salida alcanza este valor calculado.

Por otro lado, la constante de tiempo lenta se ha tomado cuando el sistema ya ha alcanzado prácticamente el régimen permanente, tomándose un error del 2% respecto al incremento que se produce en la salida, es decir, el 2% de 1016.47 kg/s que son 20.33 kg/s, por lo cual sumado a su valor del régimen permanente da un valor de 2490.67 kg/s.

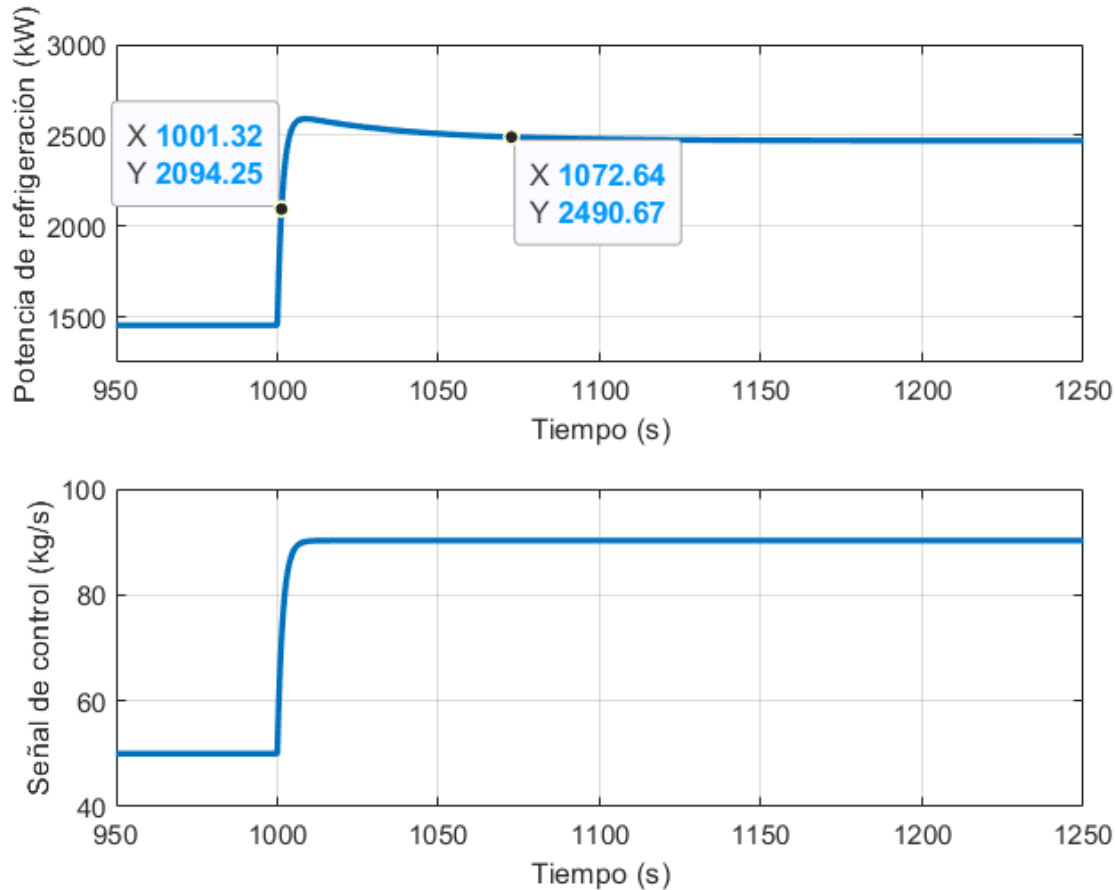


Figura 5-2. Datos para obtener las constantes de tiempo de la función de transferencia.

Según la Figura 5-2, la constante de tiempo rápida es de 1.32 segundos mientras que la constante de tiempo lenta es de 72.64 segundos. Por último, el cero que se le añade debe tener una constante de tiempo superior a la constante de tiempo lenta para que así se produzca la sobreoscilación. Tras probar diferentes valores se ha obtenido una buena respuesta con una constante de tiempo para el cero de 82.1 segundos. Por todo ello, la función de transferencia del sistema queda finalmente de la siguiente manera:

$$G(s) = \frac{25.25(82.1 s + 1)}{(72.64 s + 1)(1.32 s + 1)}$$

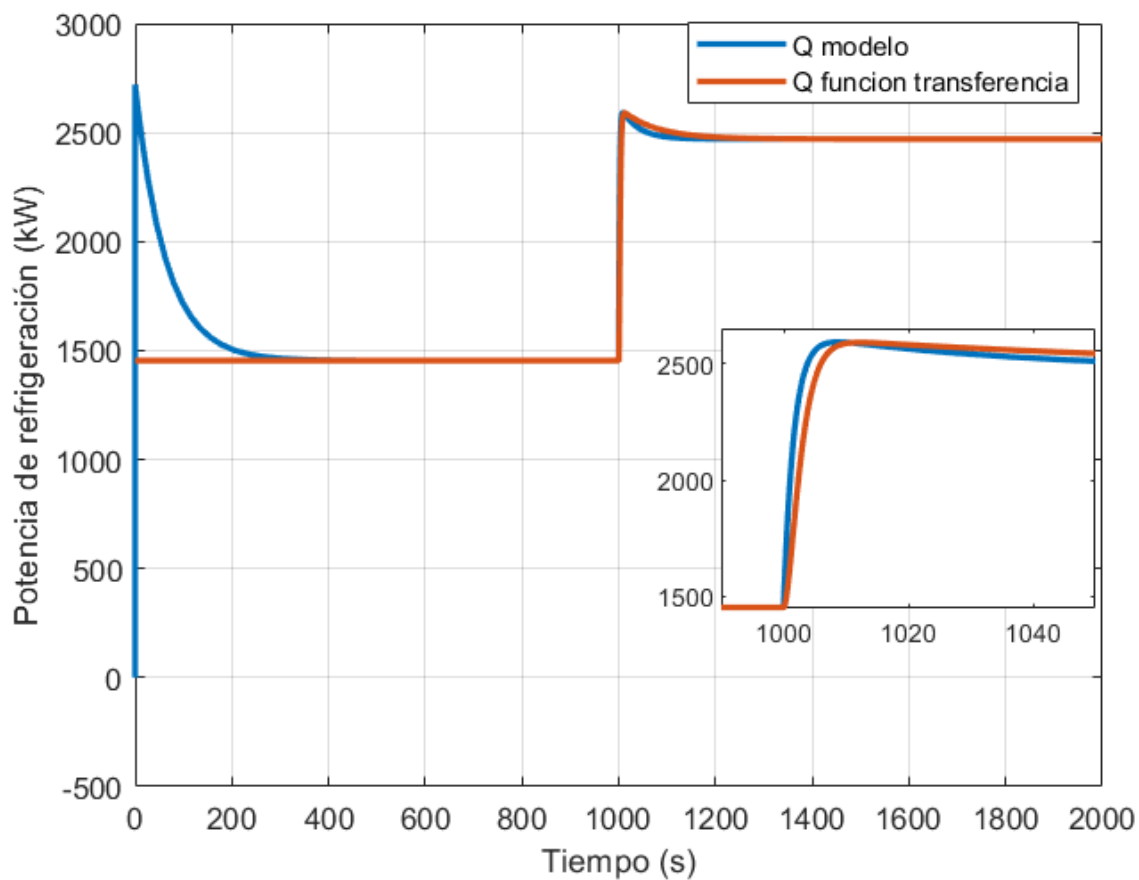


Figura 5-3. Comparación entre la respuesta del sistema y la de la función de transferencia.

La función de transferencia calculada consigue modelar el comportamiento del sistema de una buena forma como se puede comprobar en la Figura 5-3. Se ha añadido una vista aumentada en el momento en el que se produce el escalón para que se pueda apreciar correctamente el régimen transitorio y el momento de la sobreoscilación.

Una vez que se tiene la función de transferencia del sistema de segundo orden se procede a diseñar el controlador PI sin cancelación dinámica, comparándolo con la función de transferencia de este tipo de controladores que es de la forma (5-2).

$$C(s) = K_p \frac{T_I s + 1}{T_I s} \quad (5-2)$$

El cero del controlador PI se ha diseñado pseudo cancelando la dinámica equivalente del sistema (T_I aproximadamente igual a $\tau_{lenta} + \tau_{rapida}$), habiendo ajustado la ganancia para obtener una rapidez de respuesta aceptable.

Luego la función de transferencia del controlador PI queda finalmente:

$$C(s) = 1.7482 \cdot \frac{73.5684s + 1}{73.5684s}$$

5.1.2 Análisis del controlador PI convencional en tiempo continuo

El esquema de la implementación del controlador PI en el sistema se puede apreciar en la siguiente figura.

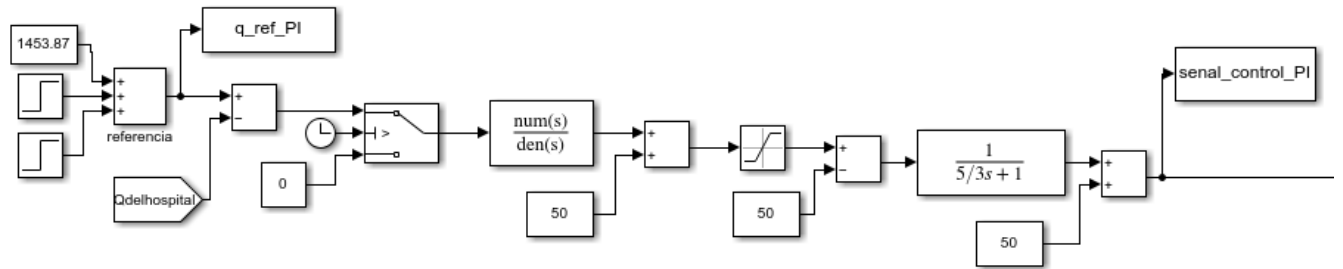


Figura 5-4. Implementación del controlador PI en Simulink.

Al modelo implementado se le ha tenido que establecer el punto de operación al cual fue diseñado, el cual era una señal de control de equilibrio de 50 kg/s y tiene una salida de equilibrio de 1453.87 kW. Para comprobar el funcionamiento del control ante cambios de referencia se le ha introducido dos saltos, siendo el primero de 3000 kW a los 1000 segundos de simulación y el segundo de 200 kW a los 1500 s.

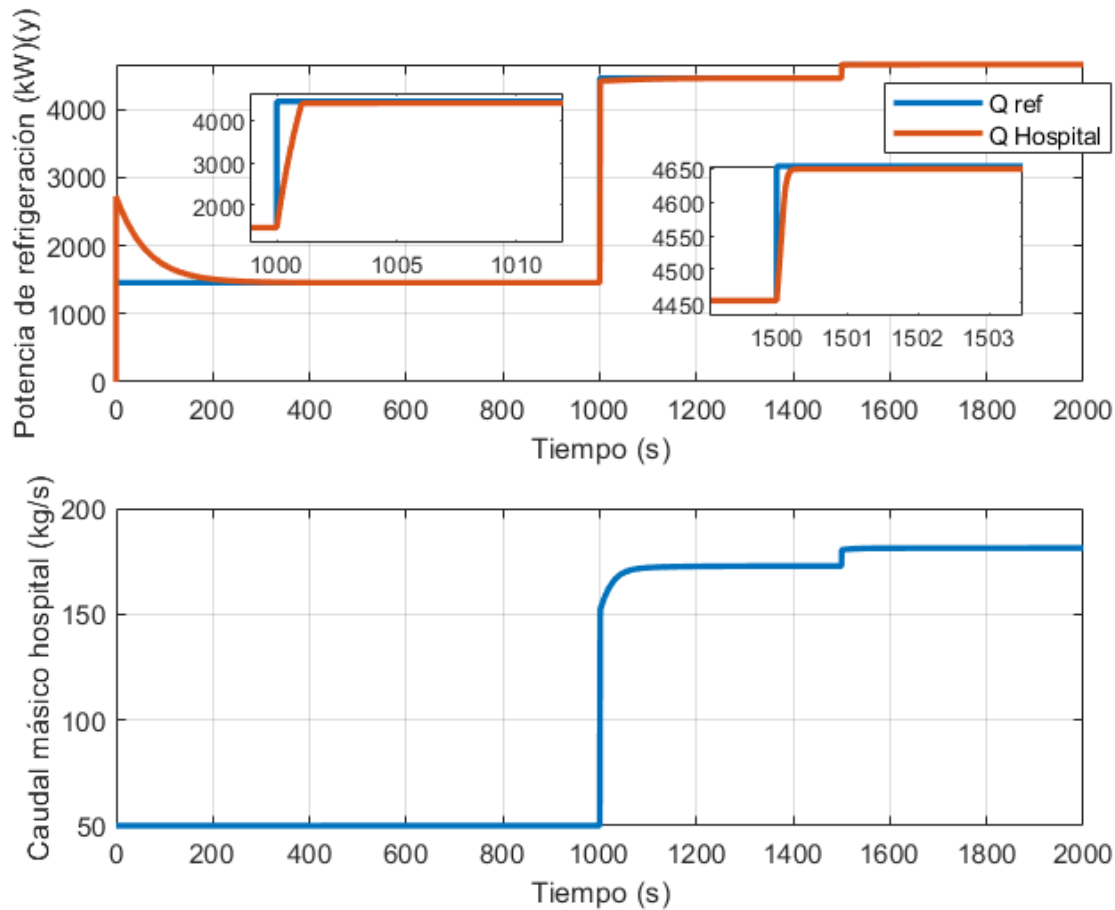


Figura 5-5. Respuesta del sistema al controlador PI.

Como se puede apreciar, el sistema es capaz de seguir la potencia de refrigeración que está demandando el hospital de una forma muy rápida provocando que su acercamiento no sea muy suave.

5.1.3 Diseño controlador difuso

El controlador difuso que se propone es uno que se asemeja a un control PI convencional, de ahí el motivo también de haber diseñado previamente este controlador. Este controlador presenta dos entradas, las cuales son el error actual (5-3), que se tiene con respecto a la referencia, y el cambio del error (5-4). Se puede definir entonces como:

$$e(k) = ref(k) - y(k) \quad (5-3)$$

$$ce(k) = e(k) - e(k - 1) \quad (5-4)$$

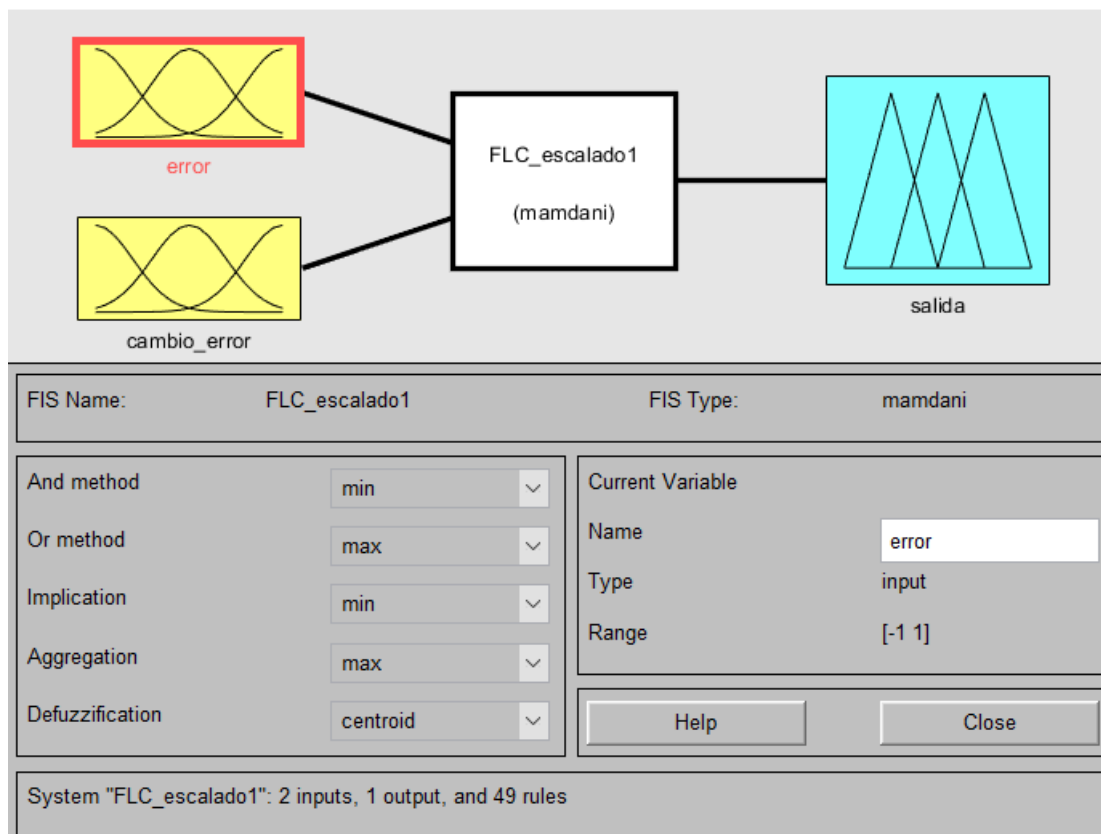


Figura 5-6. Descripción general del FLC.

En la Figura 5-6 se puede observar la descripción general del controlador, donde se indican las entradas, salidas y los métodos que se emplean para los procesos de agregación, implicación, defuzzificación y para las operaciones lógicas and y or. En este caso, se ha optado por emplear el método del centroide para la defuzzificación, ya que es uno de los más empleados como ya se comentó, el máximo y el mínimo de los grados de pertenencia para los operadores lógicos or y and respectivamente. El método de la implicación es el de truncamiento, es decir, el mínimo y, por último, el método de agregación de todas las reglas ha sido el del máximo. Este controlador tiene un sistema de inferencia de tipo Mamdani, es decir, en las reglas se emplean solo conjuntos difusos.

El primer paso en el desarrollo del FLC es configurar las entradas y salidas del controlador, que como se acaba de decir, tiene dos entradas y una única salida, la cual es el incremento del caudal másico de la bomba del hospital. Para ello se ha decidido que cada entrada y salida sea representada por 7 conjuntos difusos siendo estos: positivo alto “PA”, positivo medio “PM”, positivo bajo “PB”, cero “Cero”, negativo bajo “NB”,

negativo medio “NM” y negativo alto “NA”. Estos conjuntos se han diseñado con funciones de membresía triangulares, excepto los correspondientes a los extremos de las variables lingüísticas para los cuales se ha seleccionado la función trapezoidal, para indicar que a partir de cierto punto se considere que se pertenece 100% a ese conjunto difuso, es decir, tiene un grado de pertenencia de 1.

El universo de discurso tanto para las entradas como para la salida es del intervalo $[-1, 1]$, ya que es más práctico dejarlo normalizado y aplicarle unos factores de escala en el propio simulador para así poder configurarlo rápidamente, sino habría que modificar el archivo del controlador cada vez que se quiera cambiar el rango que ocupa cada función de pertenencia. Una forma de diseñar estos controladores inicialmente es definir todos las funciones de membresía sean simétricas y de forma equidistante una de otras.

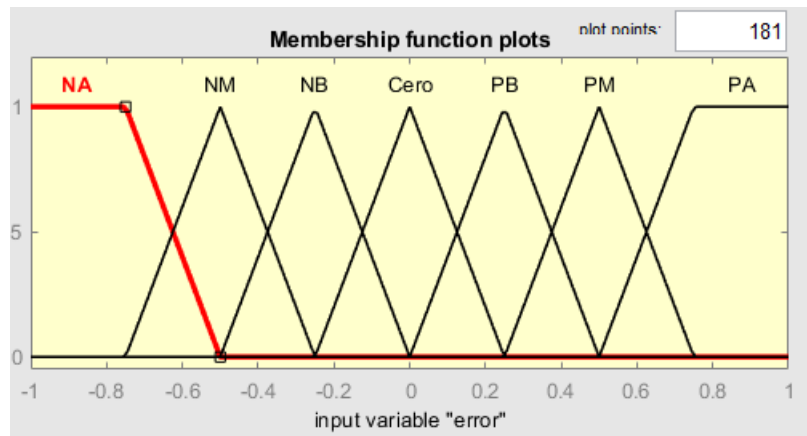


Figura 5-7. Funciones de membresía para la entrada del error.

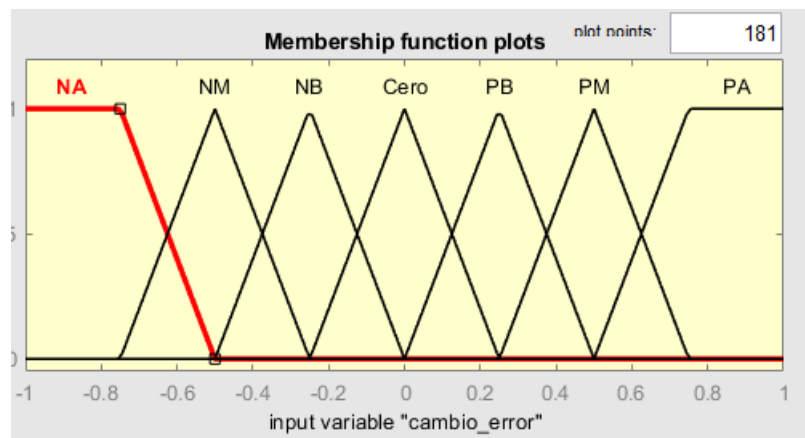


Figura 5-8. Funciones de membresía para el cambio del error.

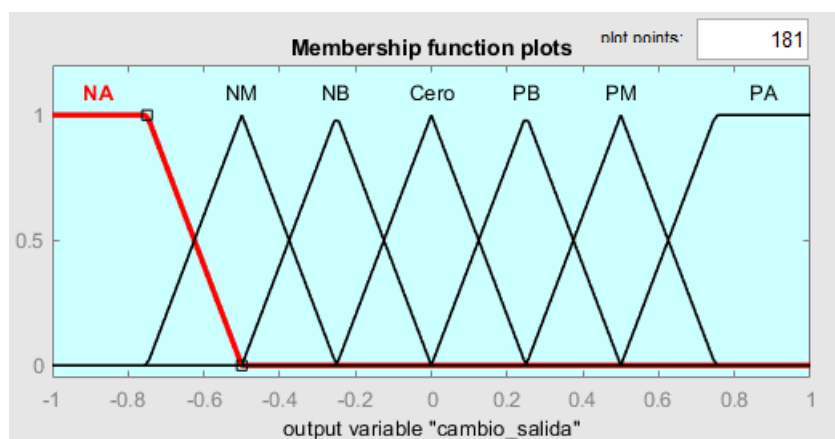


Figura 5-9. Función de membresía para el cambio de la señal de control (caudal másico de del hospital).

Una vez que se ya se tienen las funciones de membresía establecidas se pasa a definir las reglas que funcionará como base de conocimiento que tiene el sistema para actuar de una determinada forma. Al presentar dos entradas con 7 funciones de membresía cada una, el máximo número de reglas posibles son de 49. Cabe destacar que estas reglas para este tipo de control Fuzzy PI son comunes y son iguales a las desarrolladas por otras personas o con ligeras variaciones en el número de funciones de membresía elegidas o en alguna regla, pero la esencia es común (como en [28]). En Tabla 5-1 se presentan las 49 reglas de este controlador.

CE↓/E→	NEG ALTO	NEG MEDIO	NEG BAJO	CERO	POS BAJO	POS MEDIO	POS ALTO
NEG ALTO	NA	NA	NA	NM	NM	NB	CERO
NEG MEDIO	NA	NA	NM	NM	NB	CERO	PB
NEG BAJO	NA	NM	NM	NB	CERO	PB	PM
CERO	NM	NM	NB	CERO	PB	PM	PM
POS BAJO	NM	NB	CERO	PB	PM	PM	PA
POS MEDIO	NB	CERO	PB	PM	PM	PA	PA
POS ALTO	CERO	PB	PM	PM	PA	PA	PA

Tabla 5-1. Reglas del FLC del estilo PI.

Estas reglas son fáciles de entender de la siguiente manera. Si se tiene un error positivo significa que se tiene una salida del sistema inferior a la marcada por la referencia, y si su cambio del error es negativo significa que se está aproximando cada vez más a la referencia. En cambio, si se tiene un error negativo entonces se estará aproximando a la referencia cuando se tenga un cambio de error positivo. Supongamos que se tiene la siguiente regla:

IF error = PB and cambio_error = NA THEN cambio_salida = NM

En este caso la salida real del sistema es ligeramente inferior a la referencia, pero se está acercando a una velocidad muy elevada al tener un cambio del error negativo alto, luego el controlador lo que hace es disminuir el caudal másico del hospital porque si no en la siguiente iteración se va a pasar, es decir, se va disminuyendo para tener una aproximación a la referencia suavizada. Sin embargo, en los casos en los que el error sea positivo y el cambio del error sea negativo (o viceversa) y ambos tengan el mismo intensificador (alto, medio o bajo) la salida no varía porque se considera que la transición está siendo correcta.

5.1.4 Análisis del FLC de estilo PI

Una vez que se ha definido tanto las funciones de membresía como sus reglas ya se tiene el FLC listo para ser implementado en Simulink. El diagrama de bloques para su implementación es el siguiente.

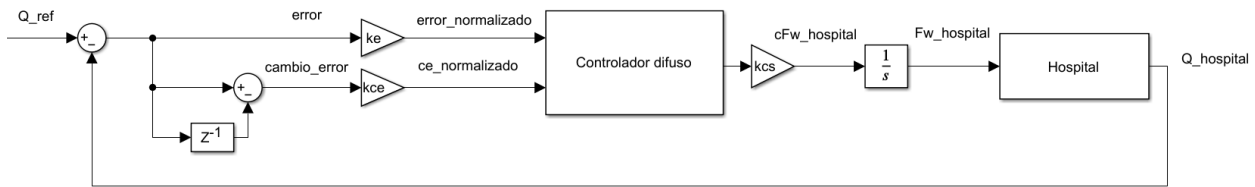


Figura 5-10. Diagrama de bloques del controlador Fuzzy estilo PI.

En este diagrama se observa la presencia de las ganancias para normalizar las entradas y salidas del controlador, como la integral de la salida del controlador, ya que se recuerda que esta es la variación de la salida, por lo que al integrar dicha señal se obtiene el valor de la señal de control que recibe la bomba de agua del hospital.

El establecer los factores de escala se puede realizar mediante diversos procedimientos, siendo uno de ellos el ensayo y error que es el método que se ha empleado en esta ocasión, aunque también se pueden emplear algoritmos genéticos con el cual se puede conseguir un mejor resultado.

Para la primera selección de dichos factores se ha tenido en cuenta los valores del universo de discurso de cada variable, es decir, los factores de escala serán directamente los que normalizan las entradas y salidas. Teniendo en cuenta que el caudal másico máximo que puede impulsar la bomba del hospital es de 268.4 kg/s y el incremento máximo de temperatura que se ha considera en su paso por la instalación del hospital es de 10 °C, junto con la ecuación (4-1) se obtiene la potencia de refrigeración máxima del sistema.

$$Q_{max} = c_p \cdot Fw_{max} \cdot \Delta T_{max} = 4.184 \cdot 268.4 \cdot 10 = 11229.9 \text{ kW}$$

Suponiendo entonces que el sistema pasa de no requerir nada de potencia de refrigeración a pedir el máximo se tendrá entonces un error y cambio de error de 11229.9 kW.

$$k_{error} = k_{cambio_{error}} = \frac{1}{Q_{max}} = 0.000089$$

Sin embargo, para la salida, el incremento máximo del caudal másico es de 268.4 kg/s, luego su ganancia es dicho valor porque esta sale normalizada del FLC, es decir, su valor está entre [-1,1].

$$k_{cambio_{salida}} = 268.4$$

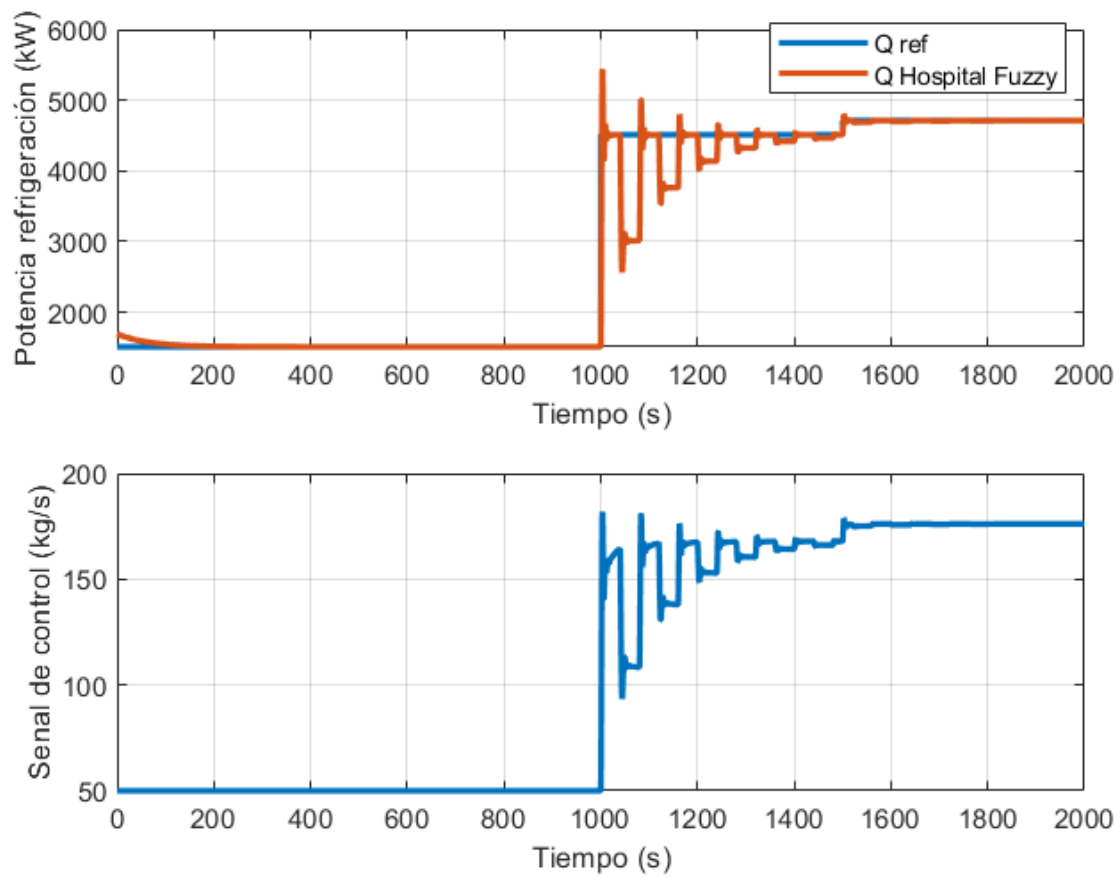


Figura 5-11. Respuesta del sistema al FLC con ganancias normalizadas.

El seguimiento de la referencia lo consigue alcanzar con estos factores de escala, pero se tarda bastante tiempo en ser alcanzada y con oscilaciones. Por ello, el primer paso ha sido ir ajustando el factor de escala del cambio del error para conseguir que se alcance antes la referencia. Una vez conseguido, se ha procedido a modificar el factor del error para reducir el pico de las oscilaciones en la mayor medida. Los factores de escala que se ha considerado que aportan un buen resultados han sido los siguientes.

$$k_{error} = 0.000015$$

$$k_{cambio_{error}} = 0.000000039$$

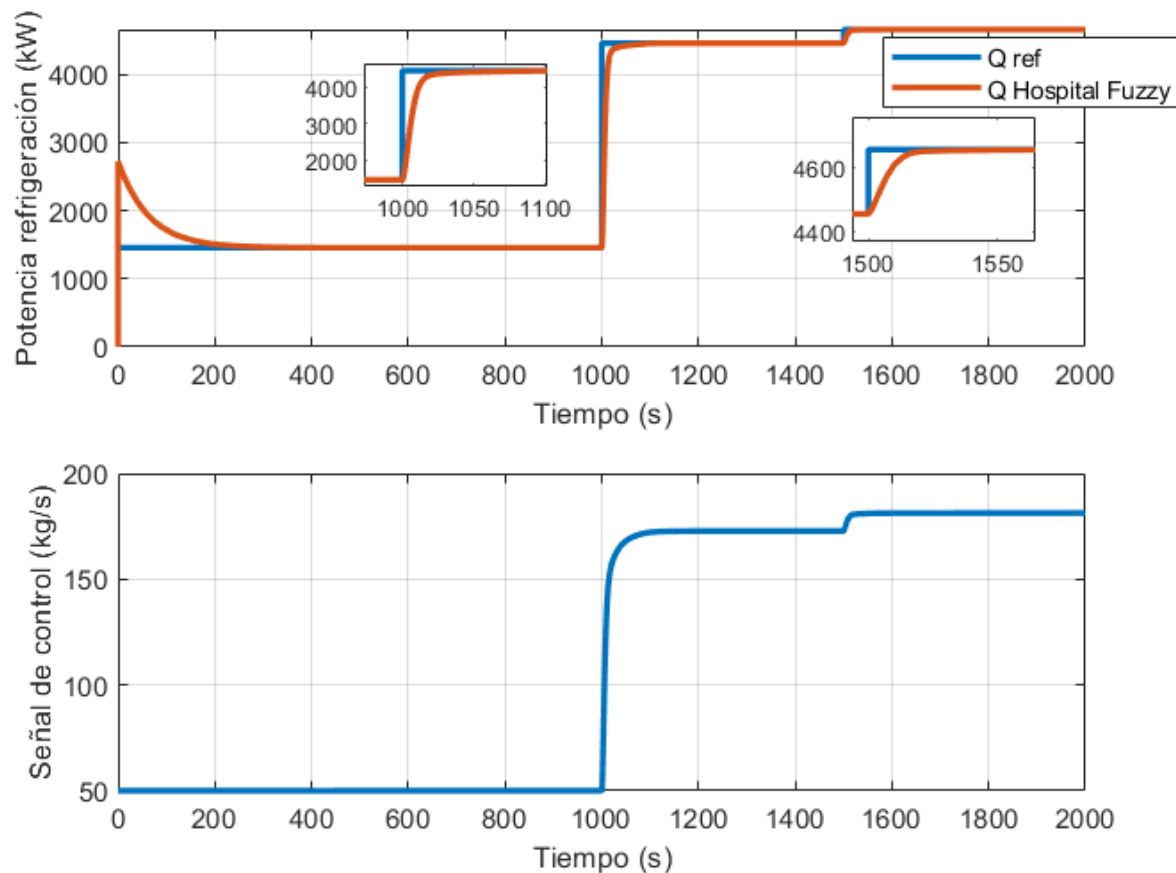


Figura 5-12. Respuesta del sistema al FLC con ganancias ajustadas.

El cambio ha sido bastante notorio y se ha conseguido obtener un buen resultado de simulación. Se ha conseguido eliminar la sobreoscilación y alcanzar la referencia en un tiempo razonable. La ganancia del error apenas se ha tenido que modificar, en cambio la del cambio del error ha tenido que ser reducida en 1000 veces para que funcionen correctamente las funciones de membresía que se han creado. Esto significa que las FM abarcan ahora un mayor intervalo de valores del cambio del error porque los valores que entran son más pequeños que los que entraban con la anterior ganancia.

5.1.5 Comparación de resultados entre FLC y PI convencional

Se procede a comparar el resultado obtenido mediante los diferentes tipos de controladores.

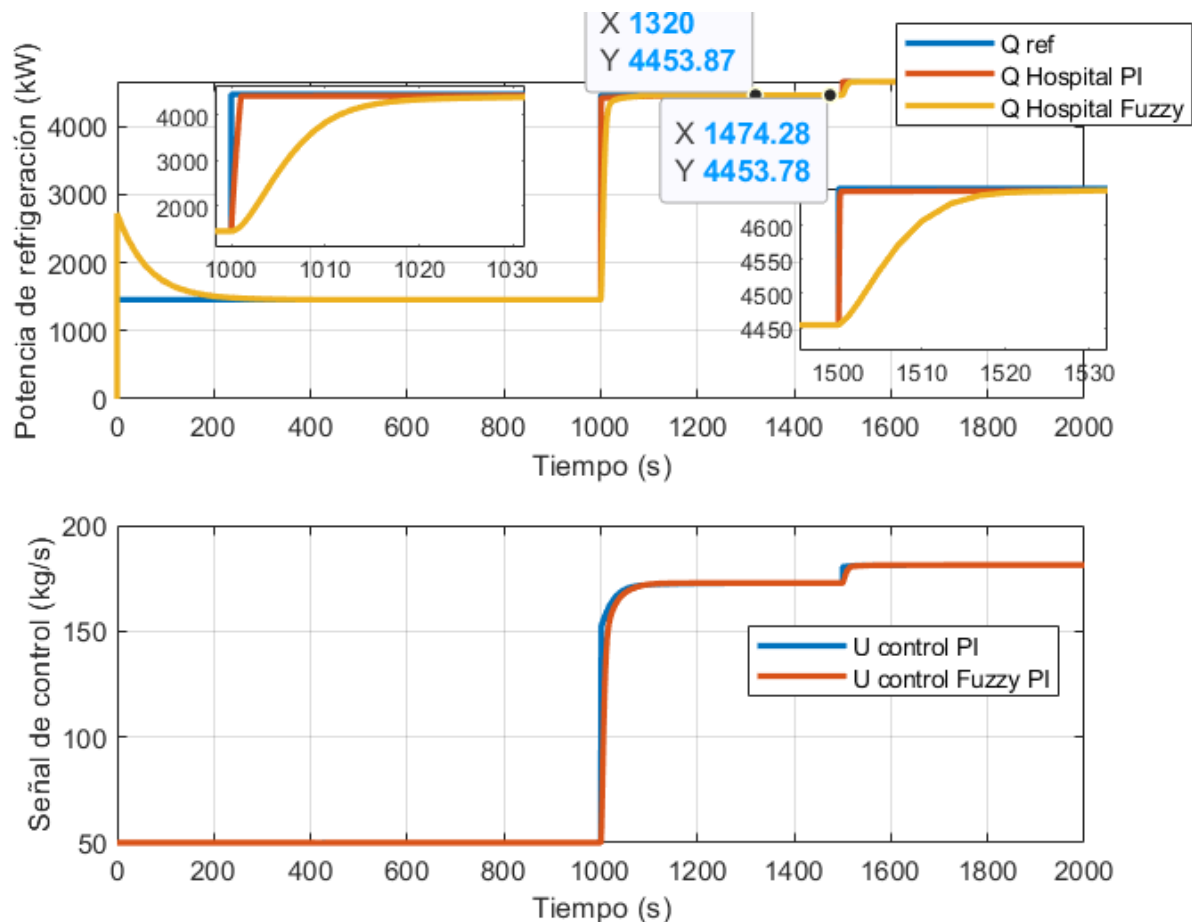


Figura 5-13. Comparación del controlador PI convencional y el FLC.

Se puede apreciar que ambos controles cumplen su función, alcanzan la referencia en un tiempo razonable para el sistema y sin producir oscilaciones. Si nos fijamos en la Figura 5-13, se puede apreciar que el tiempo de subida (del 0% al 100%) que tarda el control FLC es de 320 segundos, mientras que el PI no es capaz de alcanzar exactamente la referencia dada, aunque tan solo varía unas décimas de kW. Se puede decir entonces que en menos de tres minutos el sistema es capaz de alcanzar la referencia, aportando la potencia de refrigeración necesaria, mediante los dos controles lo cual es un tiempo razonable para la instalación del hospital.

Por otra parte, el régimen transitorio del PI es más rápido que el del FLC al tener una pendiente mayor de la evolución de la potencia de refrigeración, pero el FLC tiene un acercamiento mucho más suave y no es tan brusco el cambio.

En definitiva, se puede concluir que ambos controladores pueden ser empleados en el sistema, cada uno con alguna ventaja e inconveniente. En el caso del FLC tiene como ventaja que no ha sido necesario conocer su función de transferencia para realizarlo, sino que su única tarea más complicada ha sido el ajuste de las ganancias. Además, este es un problema simple de control en el que lo único que se está controlando es una señal de control, pero el FLC también permite trabajar con múltiples entradas y/o salidas.

5.2 Diseño del controlador del caudal másico de las tres enfriadoras y TES

El siguiente paso es conseguir que las enfriadoras que, junto con el TES, consigan aportar el caudal másico que está requiriendo el hospital, es decir, que sean capaces de conseguir aportar el caudal másico de la señal de control del primer FLC. Para dicha tarea se plantea realizar un segundo FLC.

5.2.1 Diseño del FLC de las enfriadoras

Primero se quiere realizar un FLC un poco más sencillo, en el cual solo se controlen los caudales másicos de cada enfriadora, sin tener en cuenta el TES como se realizó en el anterior apartado.

Para ello se propone que la única entrada sea la señal de control del primer FLC y las salidas sean el caudal másico de cada enfriadora.

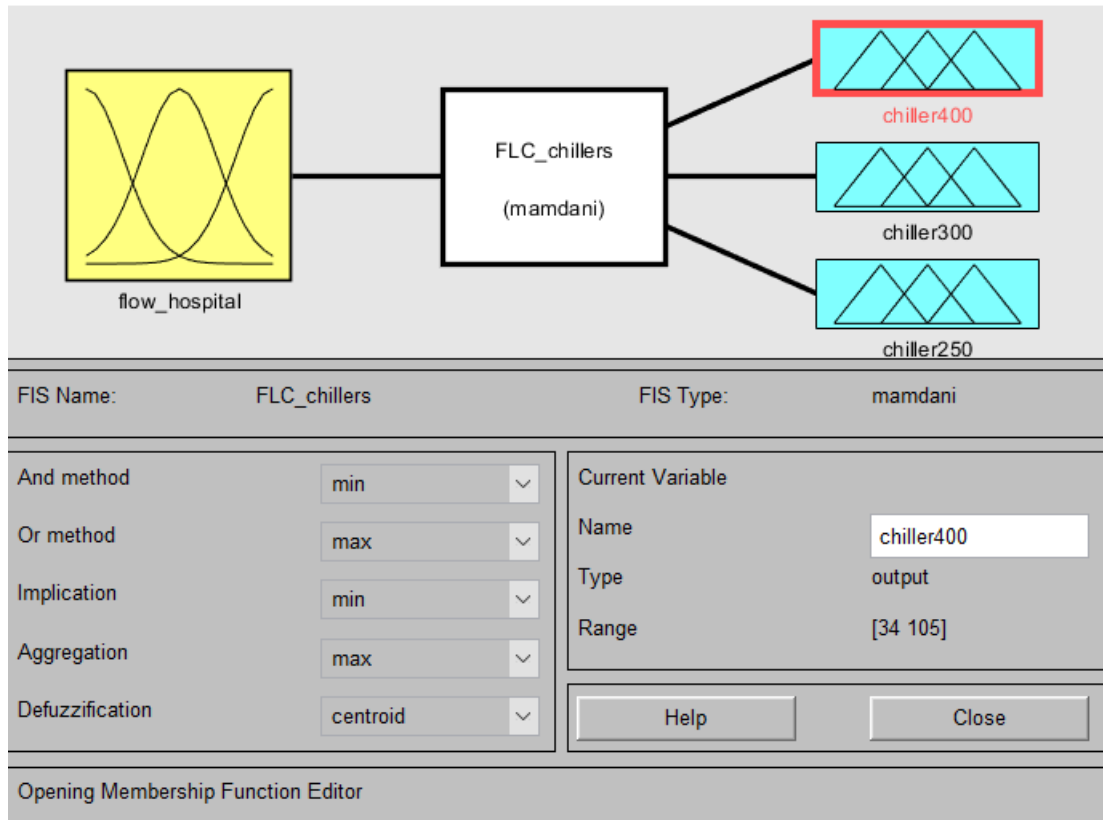


Figura 5-14. Entradas y salidas FLC enfriadoras.

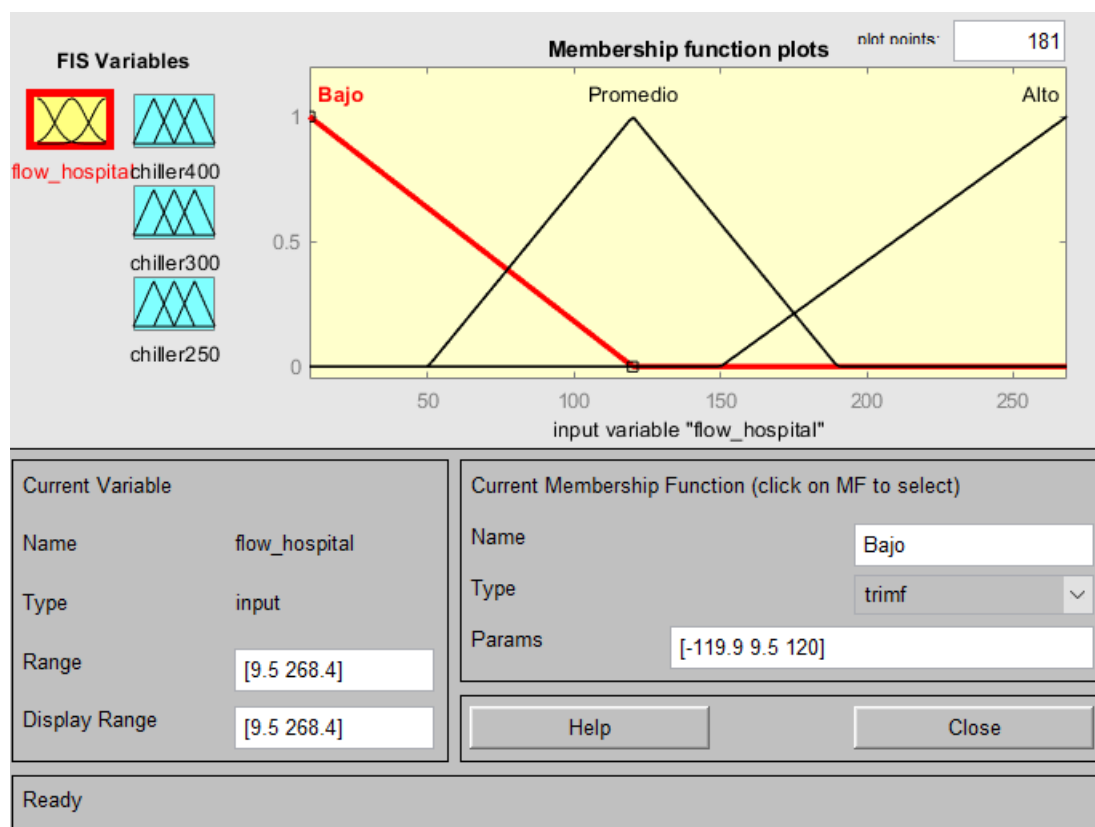


Figura 5-15. Funciones de pertenencia para la entrada del caudal másico del hospital.

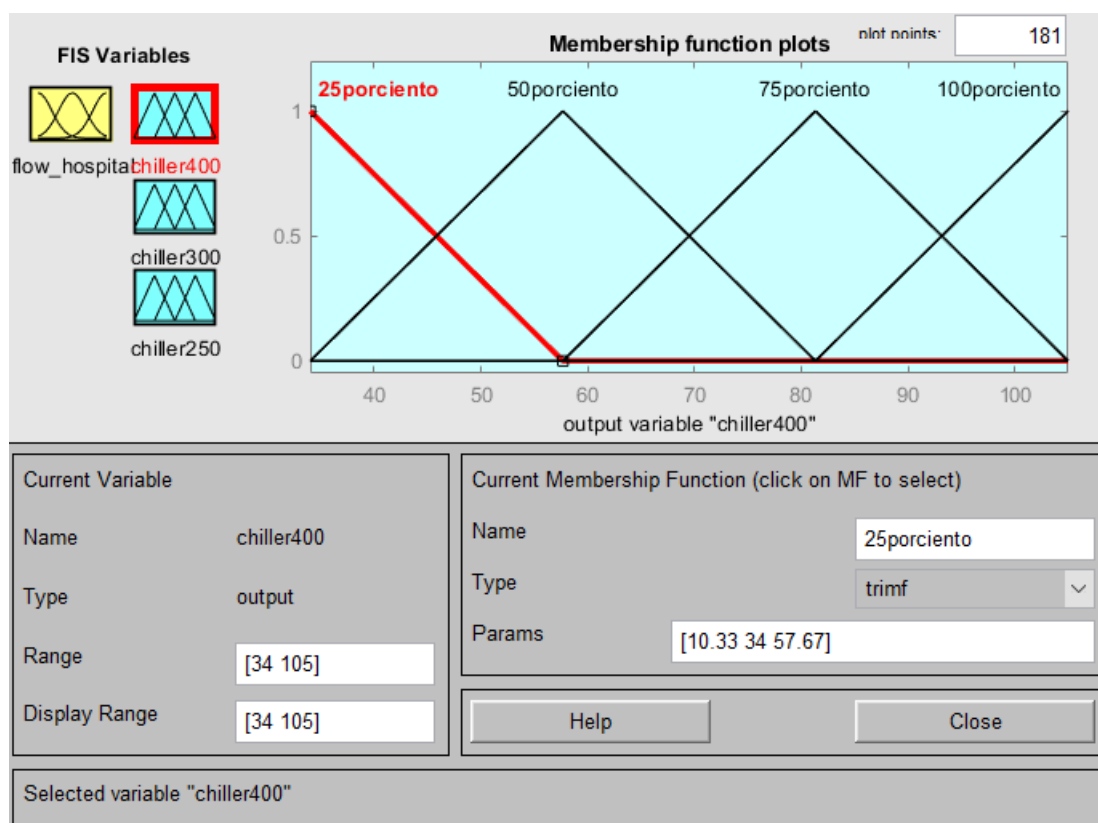


Figura 5-16. Salida del caudal másico de la enfriadora de mayor potencia nominal.

Las funciones de pertenencia que se han seleccionado para la salida de la enfriadora de mayor potencia nominal son las de la Figura 5-16, donde se ha dividido el intervalo de caudal másico que puede aportar en 4 partes, cuyos centros de funciones de pertenencia son equidistantes. Para las otras dos enfriadoras se ha seguido el mismo procedimiento para establecer sus funciones de pertenencia tan solo que acotadas al caudal másico mínimo y máximo de cada una.

Para la entrada se ha tenido que ir modificando juntamente con las reglas hasta conseguir obtener el resultado esperado. Las reglas que definen este FLC son tres.

En la siguiente tabla se recogen las reglas que se han definido para el controlador.

ENTRADA1/SALIDAS →	ENFRIADORA 400	ENFRIADORA 300	ENFRIADORA 250
BAJO	100%	25%	25%
PROMEDIO	100%	75%	75%
ALTO	100%	100%	100%

Tabla 5-2. Reglas FLC enfriadoras.

Para desarrollar estas reglas se ha tenido en cuenta el COP, para que trabajen las enfriadoras que mayor COP tenga para disminuir el consumo eléctrico. Las siguientes tablas muestran el COP de cada enfriadora según los datos que aporta el fabricante.

CARGA PARCIAL	POTENCIA SALIDA (KW)	POTENCIA ENTRADA (KW)	COP
100%	1390.97	505.81	2.75
75%	1034.35	278.05	3.72
50%	689.68	156.04	4.42
25%	345.02	59.18	5.83

Tabla 5-3. Datos de la enfriadora de 400 tons (1404.3 kW).

CARGA PARCIAL	POTENCIA SALIDA (KW)	POTENCIA ENTRADA (KW)	COP
100%	1050.18	377.4	2.78
75%	779.72	209.6	3.72
50%	519.81	128.6	4.04
25%	262.72	49.28	5.33

Tabla 5-4. Datos de la enfriadora de 300 tons (1060.1 kW).

CARGA PARCIAL	POTENCIA SALIDA (KW)	POTENCIA ENTRADA (KW)	COP
100%	825.79	300.29	2.75
75%	614.07	166.41	3.69
50%	409.38	87.29	4.69
25%	204.69	33.78	6.06

Tabla 5-5. Datos de la enfriadora de 250 tons (834 kW).

Estas tablas muestran que a menor carga parcial todas tienen un COP mayor, lo que ha significado que para las reglas se intente priorizar a que trabajen a la menor carga parcial para minimizar la potencia eléctrica que consume cada una.

5.2.2 Análisis del FLC de las enfriadoras en Simulink

La implementación de entre segundo FLC es muy sencilla ya que tan solo hay que ponerlo a continuación de la salida del primer FLC, justo donde la señal va a la bomba de agua para indicar el caudal másico porque su única entrada es el caudal másico que demanda el hospital. Cabe destacar que a las salidas se les aplica también la dinámica del actuador para que las enfriadoras tengan un tiempo de subida de 5 segundos. Una vez diseñado e implementado se va a comprobar el resultado del segundo FLC.

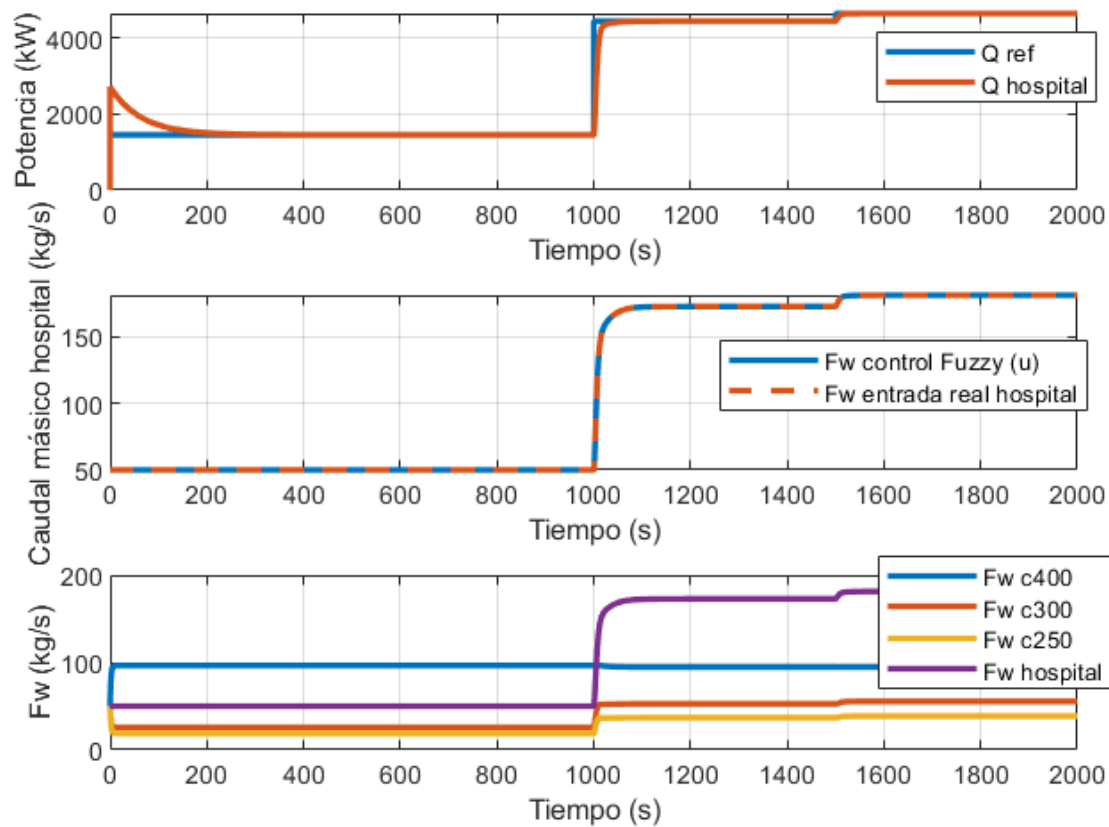


Figura 5-17. (1) Potencia de refrigeración del hospital. (2) Comparación del caudal másico que indica el primer FLC con el caudal másico real que entra. (3) Caudales másicos de las enfriadoras y hospital.

Analizando esta última figura, se puede apreciar que se consigue aportar el caudal másico que indica el primer FLC consiguiendo variar el caudal másico de cada enfriadora, por lo que se puede conseguir cumplir con la demanda de potencia calorífica del hospital. En la Figura 5-18 se aprecia mejor los caudales másicos de cada enfriadora y se indica el valor de cada una de ellas para el escalón dado.

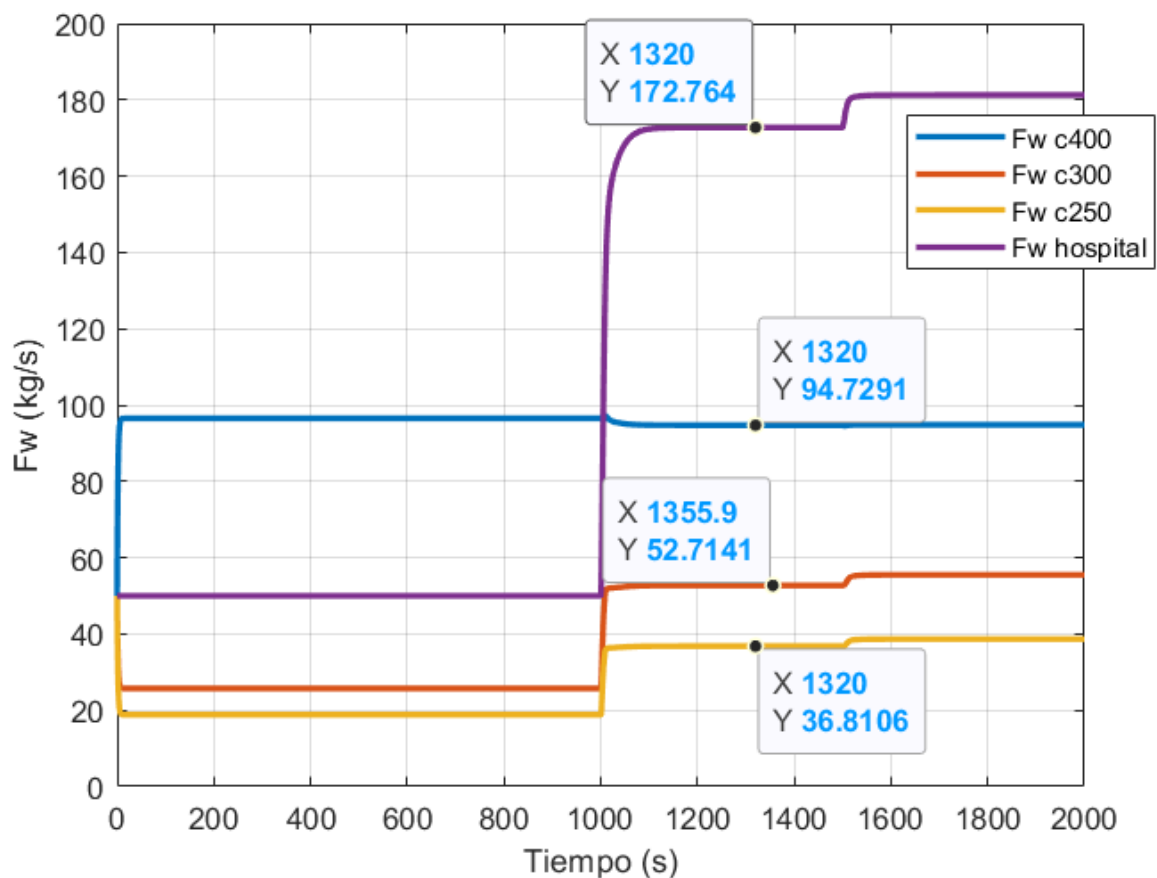


Figura 5-18. Caudales máscicos de cada enfriadora que indica el segundo FLC.

El caudal máscico que entra al hospital para cumplir con la demanda de potencia es de 172.76 kg/s y si se suma el caudal máscico de las tres enfriadoras se obtiene un valor de 184.25 kg/s, lo cual está ajustado en la medida de lo posible para que no se tenga que volver por el bypass demasiado caudal. En el siguiente apartado se tendrán que crear otras reglas porque se deberá tener en cuenta el TES.

5.2.3 Diseño del FLC para las enfriadoras y el TES

Una vez comprobado que se puede conseguir el control de las enfriadoras con el TES, se pasa a desarrollar el FLC de las enfriadoras junto al TES. Este FLC tendrá una entrada nueva, que es el precio de la electricidad, y dos salidas nuevas, una para la señal de carga y otra para la de descarga.

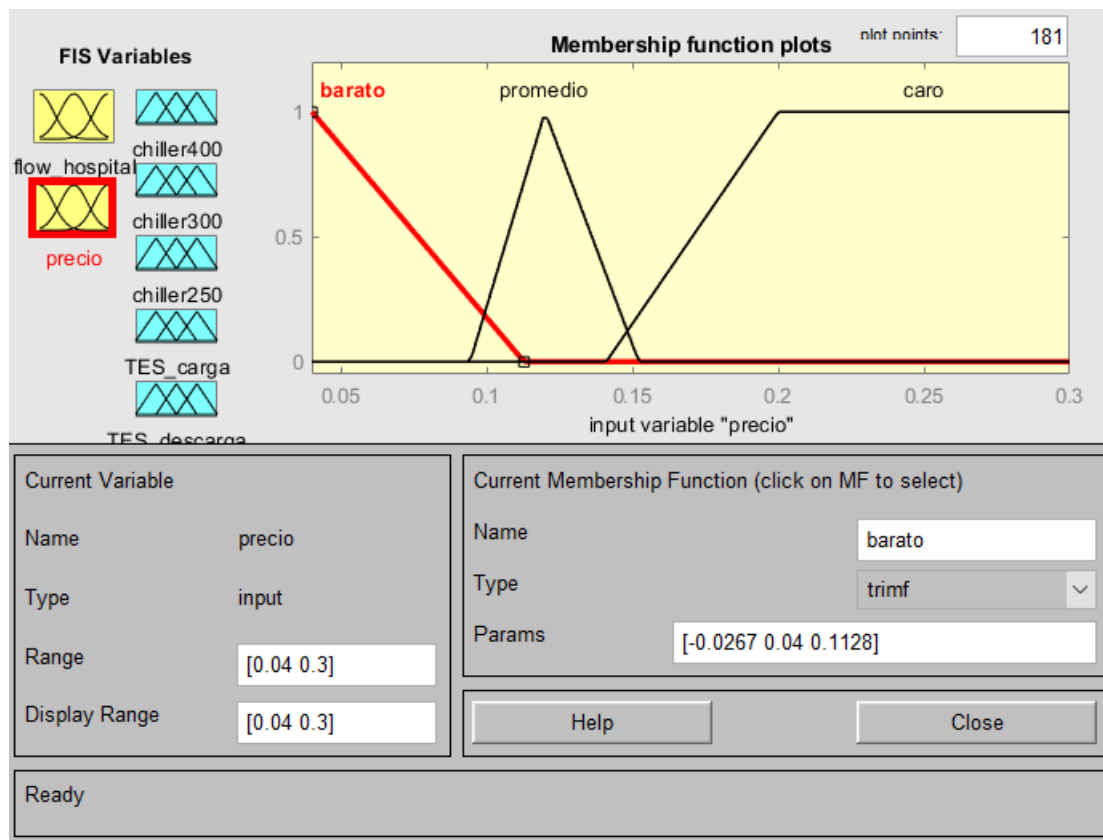


Figura 5-19. Funciones de pertenencia para el precio de la electricidad.

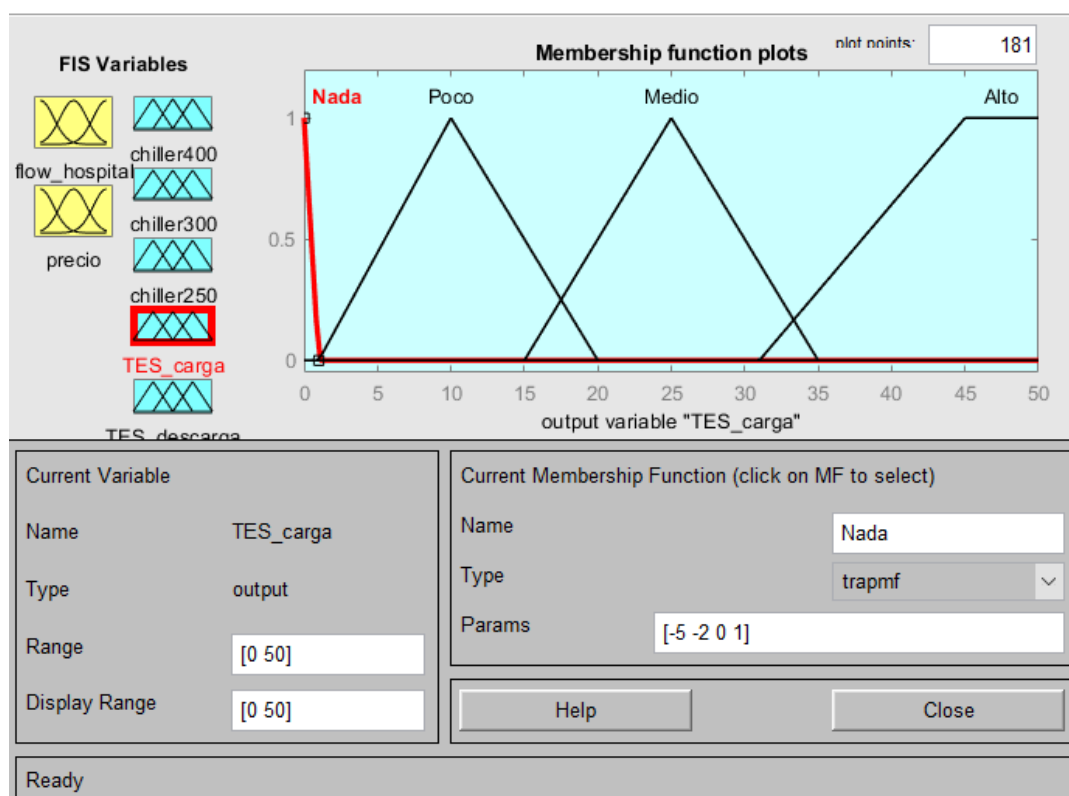


Figura 5-20. Funciones de pertenencia de la carga y descarga del TES.

Las funciones de pertenencia que ya se tenían se han mantenido, mientras que para las funciones de pertenencia del precio se ha tenido en cuenta la información publicada por la Red Eléctrica de España, cuyos precios son los que se indican en la Figura 1-1, y donde ahí mismo indican tres intervalos de precio que sería barato, promedio y caro.

Para las funciones de carga y descarga del TES se ha tenido en cuenta que el caudal másico máximo que puede impulsar su bomba es de 50 kg/s. De esta forma se ha dividido entre tres funciones de pertenencia que cargan o descargan el TES, y una única que indica que no se carga o descarga, es decir, no se realiza nada.

El criterio por el que se ha optado para indicar cuando se carga o descarga el TES viene dado por el precio de la electricidad, principalmente. Aunque también es cierto que hay que tener en cuenta que el caudal másico que nos demanda el hospital no sea excesivamente elevado para poder satisfacer tanto la demanda del TES como la del hospital en los casos de carga. Se pretende que el TES solamente se cargue en los periodos de un precio barato o como mucho promedio, y que se descargue en los periodos de un coste alto o incluso promedio si es que la demanda del hospital es elevada. En la siguiente tabla se representan las reglas empleadas, donde la primera fila y columna son las entradas y el resto las salidas.

FW HOSPITAL ↓/ PRECIO →	BARATO	PROMEDIO	CARO
BAJO	100/75/50 %	100/75/50 %	25/25/25 %
	Carga Alto	Carga Medio	Carga Nada
	Descarga Nada	Descarga Nada	Descarga Medio
PROMEDIO	100/100/100 %	100/75/75 %	50/25/25 %
	Carga Alto	Carga Poco	Carga Nada

	Descarga Nada	Descarga Nada	Descarga Alto
ALTO	100/100/100 %	100/75/75 %	100/50/50 %
	Carga Poco	Carga Nada	Carga Nada
	Descarga Nada	Descarga Poco	Descarga Alto

Tabla 5-6. Reglas del FLC del TES y las enfriadoras.

5.2.4 Implementación del FLC de las enfriadoras y el TES

Los resultados que se obtienen con el controlador propuesto han sido los siguientes, donde se le han dado los mismo saltos de referencia que en los anteriores casos, pero en esta ocasión se ha simulado un día completo para concordar correctamente el precio de la electricidad por cada hora con el que nos proporciona la Red Eléctrica de España.

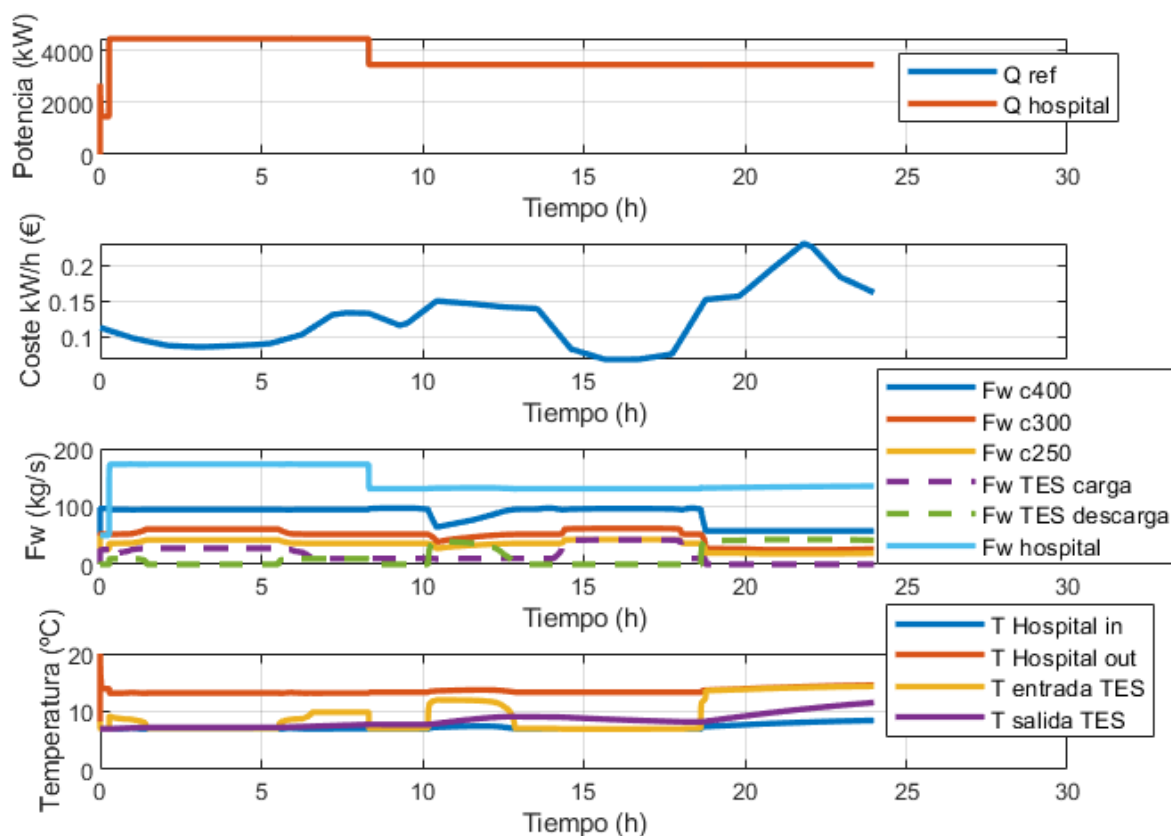


Figura 5-21. Resultados de la simulación del FLC del TES. (1) Potencia de refrigeración del hospital. (2) Precio kW/h. (3) Caudales másicos. (4) Temperaturas del agua.

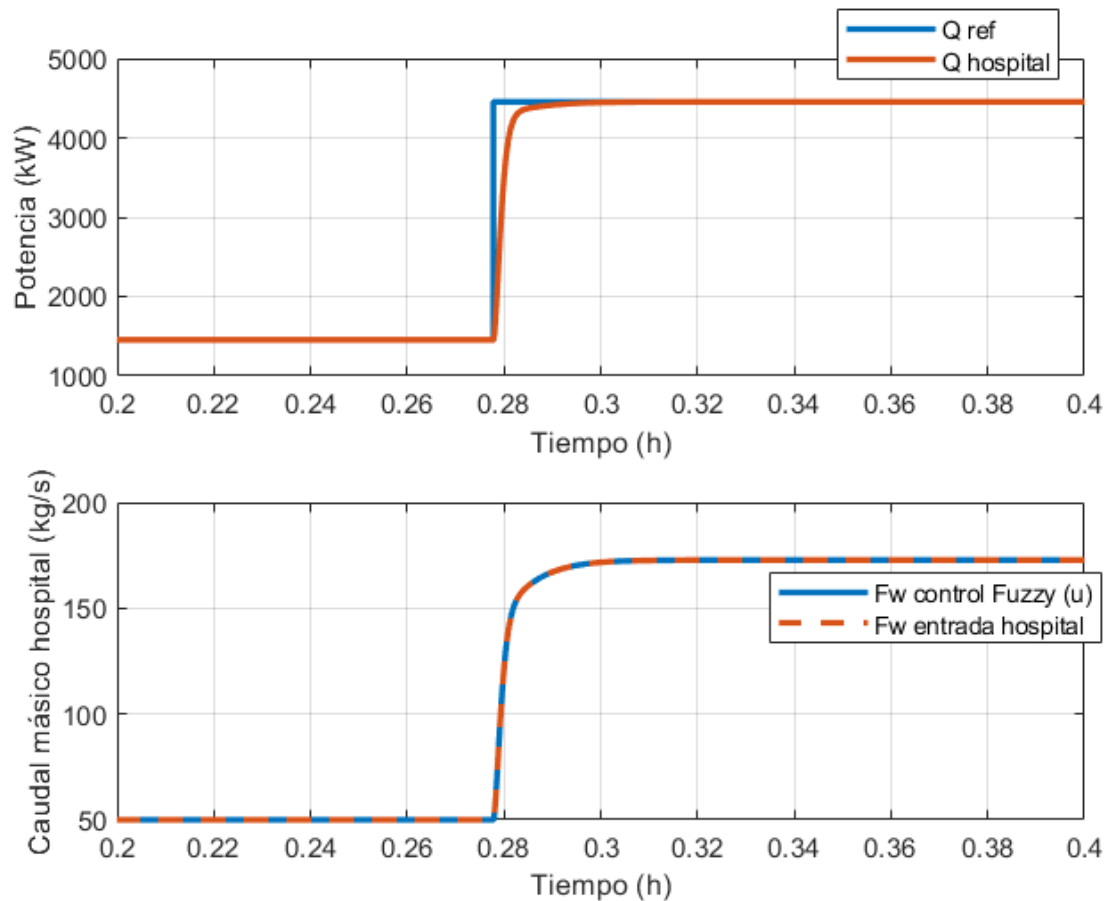


Figura 5-22. Resultados de la simulación con zoom en el cambio de referencia. (1) Potencia de refrigeración del hospital. (2) Comparación entre el caudal másico que entra en el hospital con la señal de control que proporciona el FLC del estilo PI.

Primero se comprueba que el controlador sea capaz de seguir la referencia como se había conseguido en casos anteriores. En la Figura 5-22 se puede corroborar que el controlador cumple su primera función, el cual sigue funcionando correctamente y alcanza la referencia en menos de tres minutos y se puede satisfacer el caudal másico que indica la señal de control del primer FLC (estilo PI), indicando que las funciones de pertenencia y reglas son adecuadas para el objetivo del control y no son demasiado restrictivas como para impedir que las enfriadoras junto con el TES no puedan alcanzar dicha cantidad de caudal másico. De esta forma se le da validez a este controlador al que se le han cambiado tanto las reglas como se le han añadido nuevas entradas y salidas con respecto al FLC del apartado 5.2.1. Véase ahora la respuesta del sistema cuando se produce un cambio de precio que conlleve a un cambio de descarga a carga del TES o viceversa.

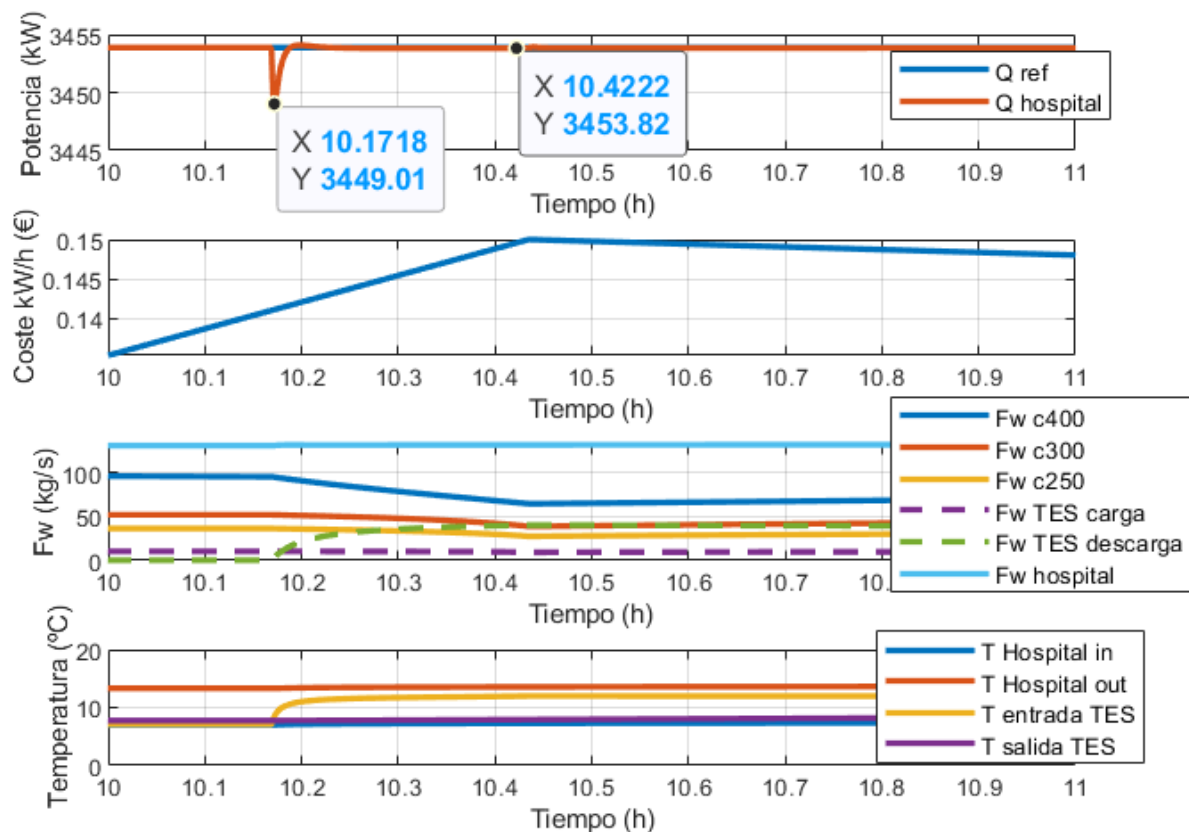


Figura 5-23. Resultados de la simulación con zoom en un cambio de precio con referencia constante. (1) Potencia de refrigeración del hospital. (2) Precio kW/h. (3) Caudales másicos. (4) Temperaturas del agua.

En esta ocasión se analiza el comportamiento del control ante un cambio del precio manteniendo la referencia de la potencia de refrigeración demandada constante. En el intervalo estudiado se produce un incremento del precio del kW/h, y pasa a ser considerado como un precio elevado, según las funciones de pertenencia que se han establecido, por lo que el sistema comienza a descargar el TES. Se puede apreciar en la Figura 5-23 que se produce una oscilación de la potencia, esto se debe a que el TES comienza a descargar la energía contenida en su interior, y el agua procedente del TES presenta una ligera variación de temperatura con respecto al agua fría procedente de las enfriadoras lo que provoca un cambio en la potencia de refrigeración del hospital. Sin embargo, el pico es realmente bajo, siendo una variación de 4.81 kW respecto al valor del régimen permanente, y se consigue controlar rápidamente.

Analizando los caudales másicos en este intervalo se puede ver como el caudal másico de la enfriadora de 400 tons se reduce significativamente, ya que es la enfriadora que aporta el mayor caudal másico, mientras que las otras dos enfriadoras el cambio es menor. Todo este caudal másico pasa a ser suplido por el TES, consiguiendo un ahorro en el coste energético de las enfriadoras en el tramo de mayor coste.

Por último, cabe destacar el incremento de la temperatura del agua que entra al TES cuando éste se comienza a descargar, ya que se toma el agua caliente procedente del hospital como ya se explicó anteriormente.

La última gráfica que se va a mostrar en este apartado es la potencia de refrigeración que aporta o demanda cada parte del sistema.

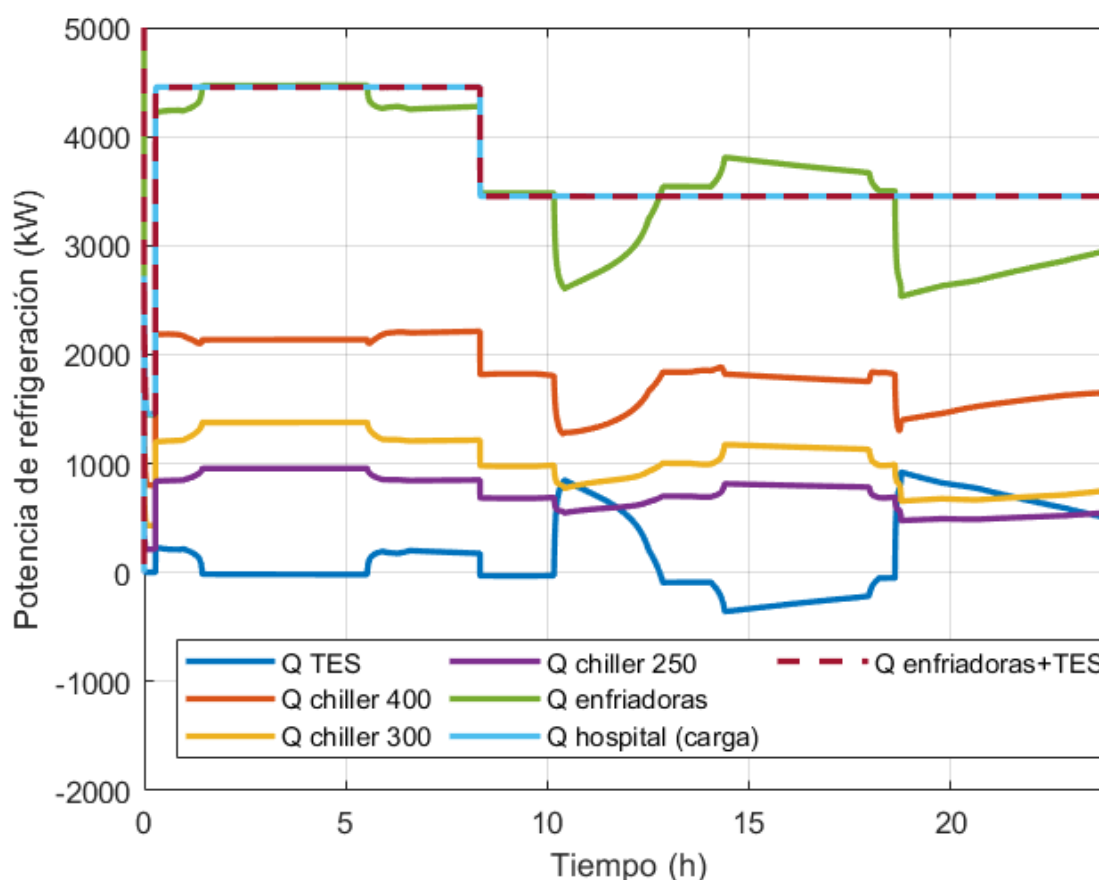


Figura 5-24. Potencias frigoríficas de la simulación del FLC del TES.

La demanda del hospital se consigue satisfacer en todo momento gracias a la potencia que aportan tanto las enfriadoras como el TES. Cabe destacar que cuando las enfriadoras generan una mayor potencia de la requerida significa que se encuentran cargando el TES y este presenta una potencia negativa, mientras que cuando se descarga la potencia generada por las enfriadoras es insuficiente para suplir la demanda, pero esa carencia la cubre el TES.

5.3 Diseño del controlador del TES teniendo en cuenta la temperatura del agua almacenada

El controlador que se acaba de presentar cumple con el objetivo de que se aporte la cantidad de potencia de refrigeración que es requerida por las instalaciones del hospital. Sin embargo, en ningún momento se está teniendo en cuenta la temperatura a la que se encuentra el agua almacenada en el TES. Este punto es importante a tener en cuenta, pues si el agua está a una temperatura elevada no tiene mucho sentido que se aporte al hospital. Por otro lado, si la temperatura del agua almacenada ya es fría no tiene sentido que se esté cargando el TES en ese momento y lo que se estaría haciendo es aumentar los costes de la energía que consumen las enfriadoras ya que aportan un caudal másico mayor al que es estrictamente necesario.

Para diseñar este nuevo controlador se ha introducido una nueva variable que tiene en cuenta la temperatura del TES. Esta variable se ha definido mediante tres funciones de membresía que representan que el agua este fría, templada o caliente. Para el agua fría se ha tenido en cuenta que las enfriadoras pueden aportar agua en el intervalo de 5 a 9 grados centígrados por lo que se ha usado una función trapezoidal que indique hasta los 9 °C que es 100% fría y a partir de ese valor cae su grado de pertenencia hasta los 10°C. Se ha decidido que el agua está templada en un intervalo de 1.5 °C, desde los 9.5 °C a los 11 °C, mientras que se puede empezar a considerar que está caliente a partir de los 10.5 °C y si el agua es superior a los 12 °C ya se considera 100%

caliente, pues es prácticamente a la temperatura a la que sale del hospital ya que ésta experimenta un incremento de unos 5 °C o 6 °C y hay que recordar que se fijó la temperatura del agua que aportan las enfriadoras en 7°C.

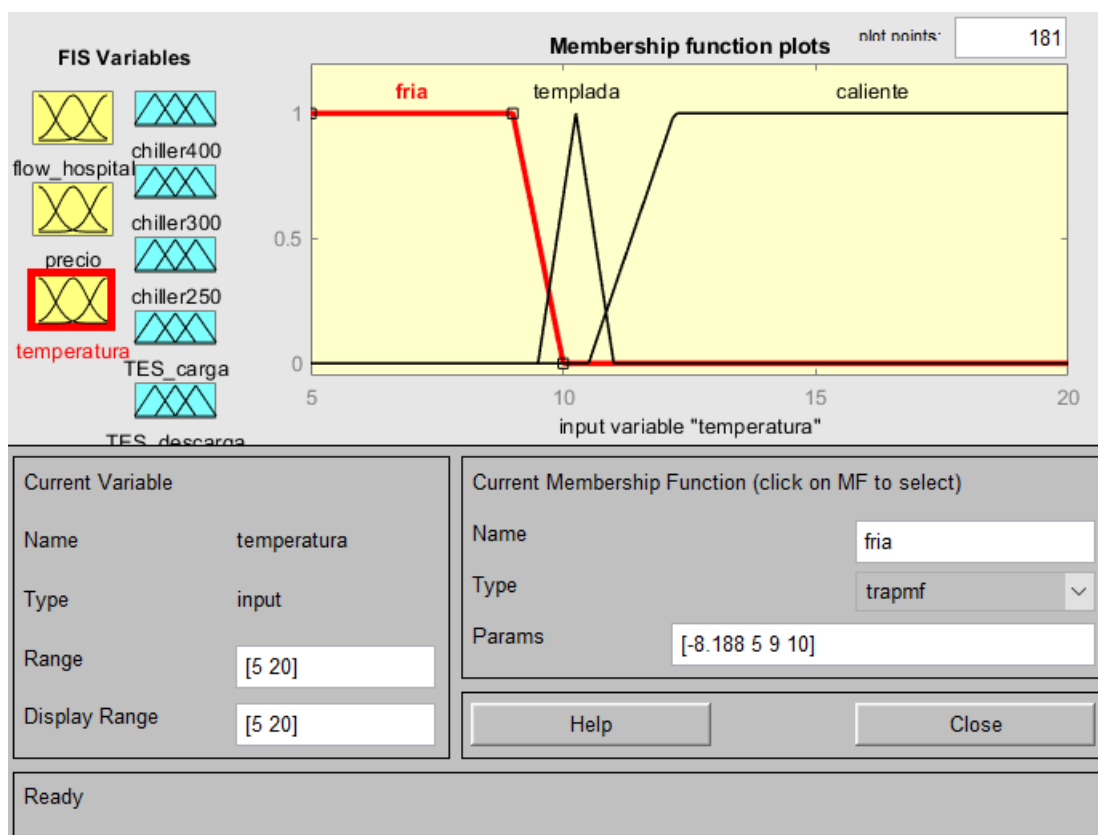


Figura 5-25. Funciones de membresía de la variable lingüística de la temperatura del agua en el TES.

Por otra parte, también se han modificado las funciones de pertenencia de las enfriadoras y se les ha añadido una nueva función de membresía para indicar que la enfriadora se encuentre apagada. Con esto se consigue optimizar aún más los caudales máxicos que son aportados, ajustándose prácticamente a los que son necesarios ya que hay ocasiones en los que no es necesario tener las tres enfriadoras funcionando, aunque se encuentren operando al mínimo porque la potencia de refrigeración demandada es baja. También se han modificado las funciones de pertenencia correspondientes al caudal máxico que solicita el hospital, añadiendo una función de membresía más para los casos donde se requiere el mayor caudal máxico posible.

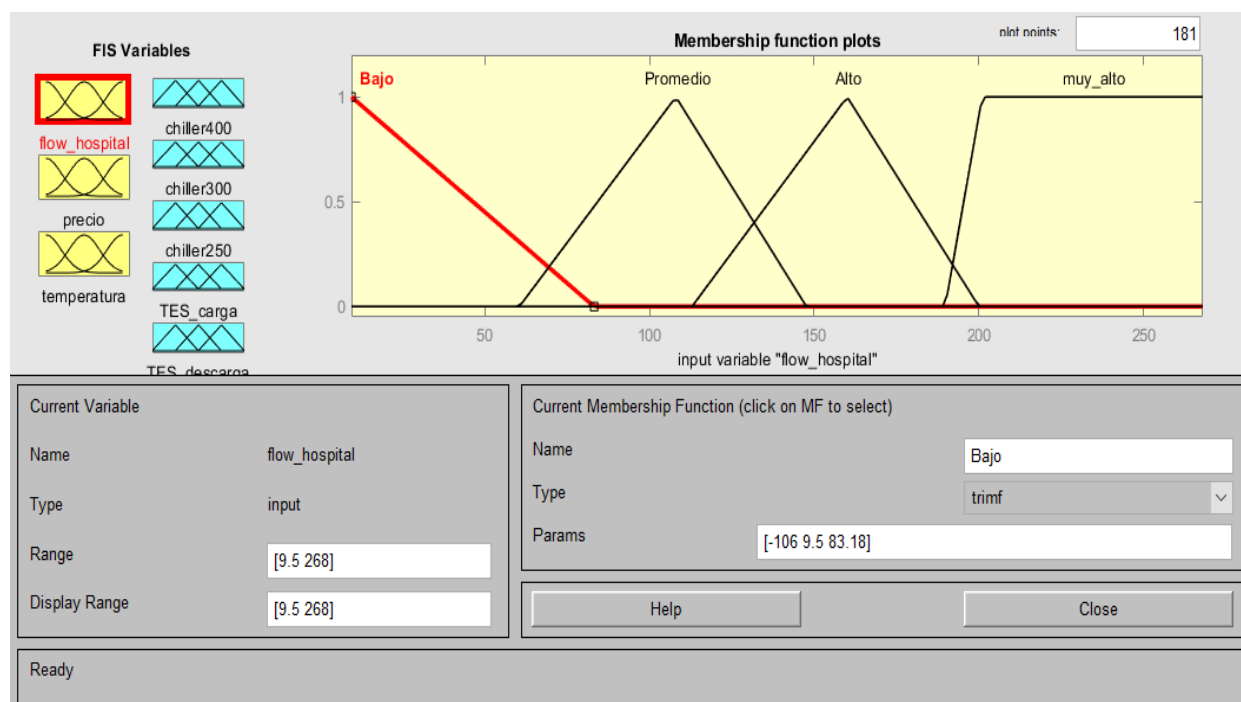


Figura 5-26. Nuevas funciones de pertenencia para el caudal másico del hospital.

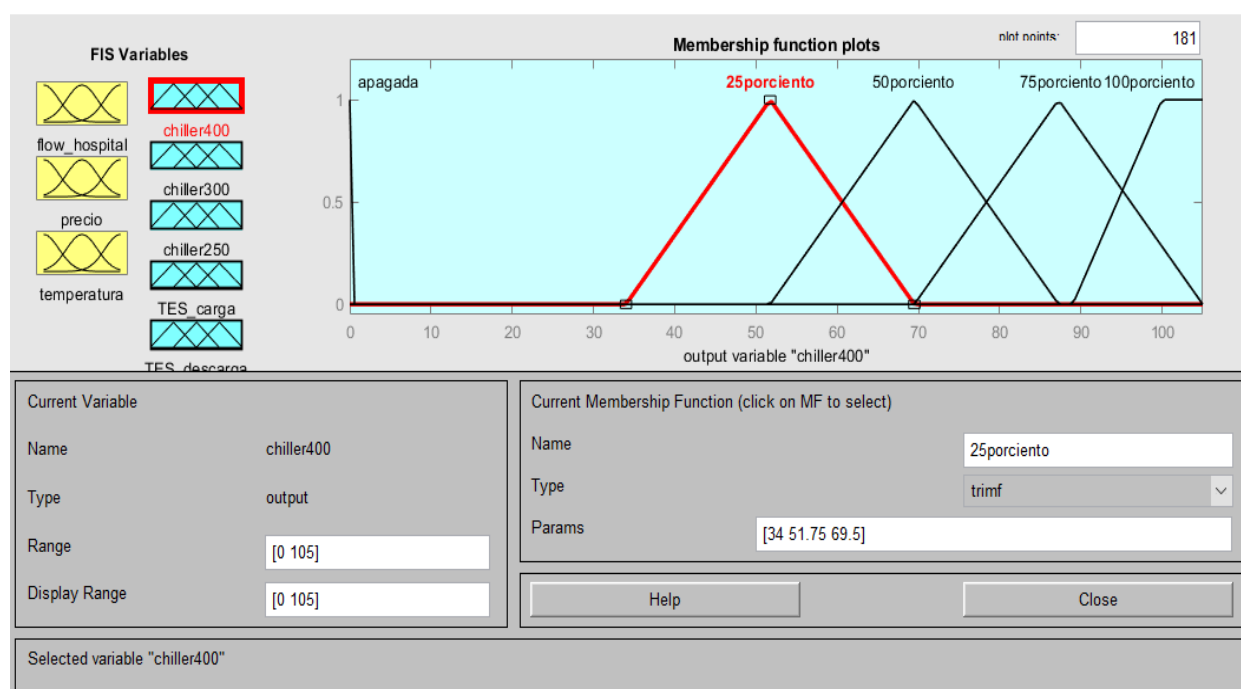


Figura 5-27. Nuevas funciones de pertenencia para la enfriadora de 400 tons (1404.3 kW).

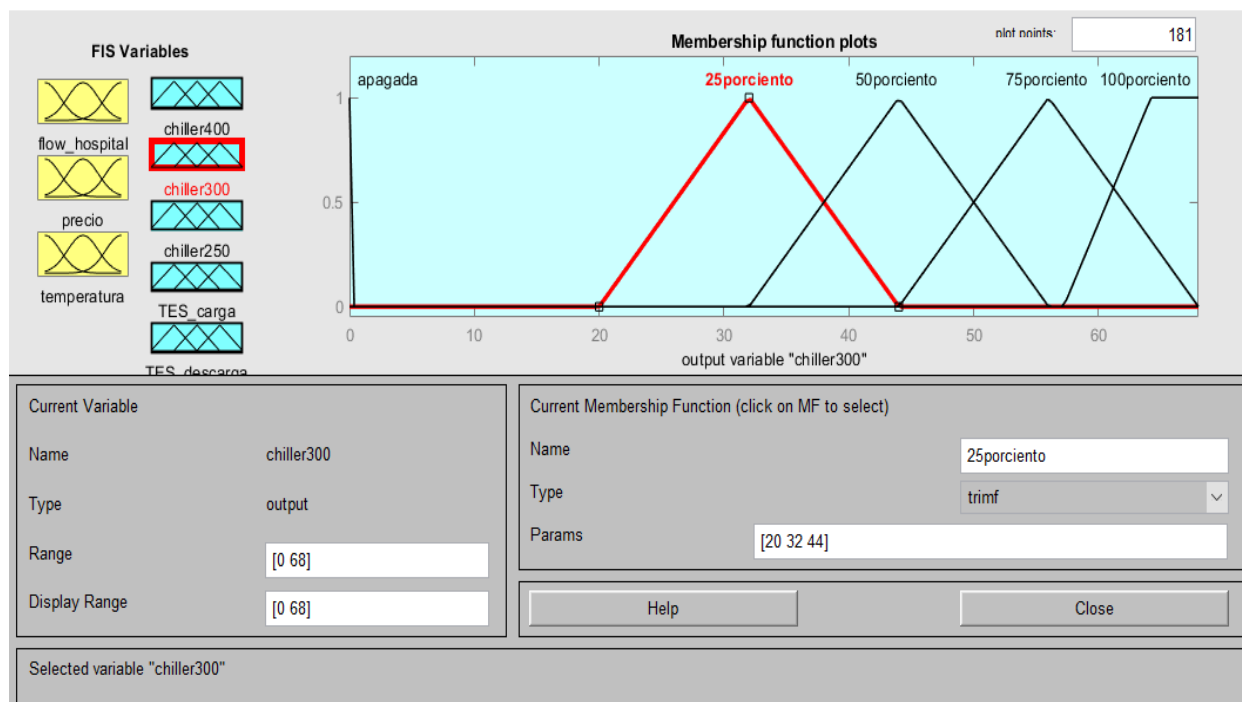


Figura 5-28. Nuevas funciones de pertenencia para la enfriadora de 300 tons (1060.1 kW).

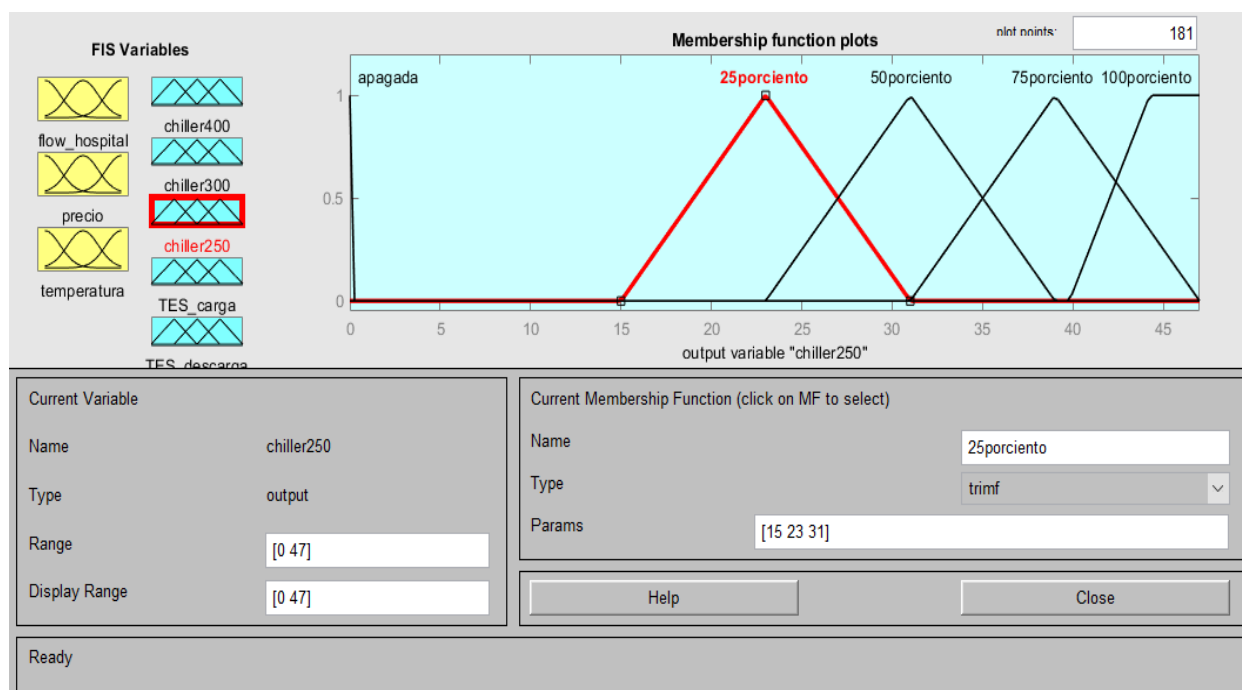


Figura 5-29. Nuevas funciones de pertenencia para la enfriadora de 250 tons (834 kW).

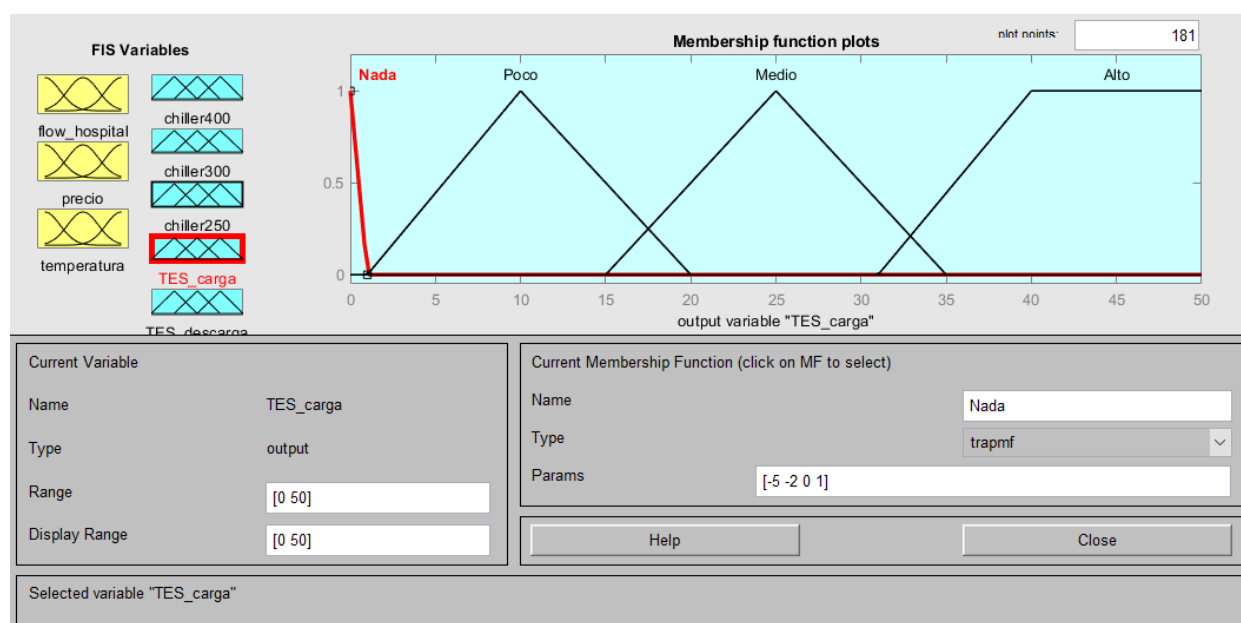


Figura 5-30. Nuevas funciones de pertenencia para la carga y descarga del TES.

Se ha decidido que el TES se cargue en los momentos en los que el agua almacenada se encuentra templada o caliente y el precio es barato o promedio. Por otro parte, se descargará el TES cuando el precio sea caro y su temperatura sea fría. También se puede descargar cuando la temperatura es templada, pero en el caso en el que se demande un caudal másico alto. En el caso de que el precio sea promedio solo se descargará el TES si la temperatura es fría y la demanda de caudal másico es alta. El TES no se descargará en general si su temperatura es caliente, aunque existe un único caso en el que sí se aporta caudal másico del TES cuando éste se encuentra a una elevada temperatura y es cuando la instalación está demandando la máxima potencia de refrigeración, ya que las tres enfriadoras no son capaces de satisfacer por si solas esa cantidad y el incremento de temperatura del agua que va a entrar en el hospital es asumible teniendo en cuenta dichas condiciones. En total el controlador difuso tiene 23 reglas, las cuales se pueden observar en la Tabla 5-7.

PRECIO	BARATO			PROMEDIO			CARO		
TEMP	FRÍA	TEMPL	CALIEN	FRÍA	TEMPL	CALIEN	FRÍA	TEMPL	CALIEN
FW HOSPI									
BAJO	25/0/25 Carga nada Descarga nada	25/25/25 Carga alto Descarga nada	25/25/25 Carga alto Descarga nada	25/0/25 Carga nada Descarga nada	25/25/25 Carga medio Descarga nada	25/25/25 Carga medio Descarga nada	25/0/0 Carga nada Descarga medio	25/25/0 Carga nada Descarga nada	25/25/0 Carga nada Descarga nada
	50/25/25 Carga nada Descarga nada	75/50/25 Carga alto Descarga nada	75/50/25 Carga alto Descarga nada	50/25/25 Carga nada Descarga nada	75/50/25 Carga poco Descarga nada	75/50/25 Carga poco Descarga nada	25/25/0 Carga nada Descarga alto	25/25/25 Carga nada Descarga nada	50/25/25 Carga nada Descarga nada
ALTO	100/75/75 Carga nada Descarga nada	100/100/7 5 Carga poco Descarga nada	100/100/7 5 Carga poco Descarga nada	100/75/75 Carga nada Descarga poco	100/100/7 5 Carga nada Descarga nada	100/100/7 5 Carga nada Descarga nada	50/50/50 Carga nada Descarga alto	75/50/50 Carga nada Descarga medio	100/75/75 Carga nada Descarga nada
	100/100/1 00 Carga nada Descarga alto	100/100/1 00 Carga nada Descarga alto	100/100/1 00 Carga nada Descarga alto	100/100/1 00 Carga nada Descarga alto	100/100/1 00 Carga nada Descarga alto	100/100/1 00 Carga nada Descarga alto	100/100/1 00 Carga nada Descarga alto	100/100/1 00 Carga nada Descarga alto	100/100/1 00 Carga nada Descarga alto

Tabla 5-7. Reglas del controlador difuso del TES teniendo en cuenta la temperatura del agua

Ahora se presentan los resultados obtenidos con todos los cambios introducidos y se analizarán a continuación.

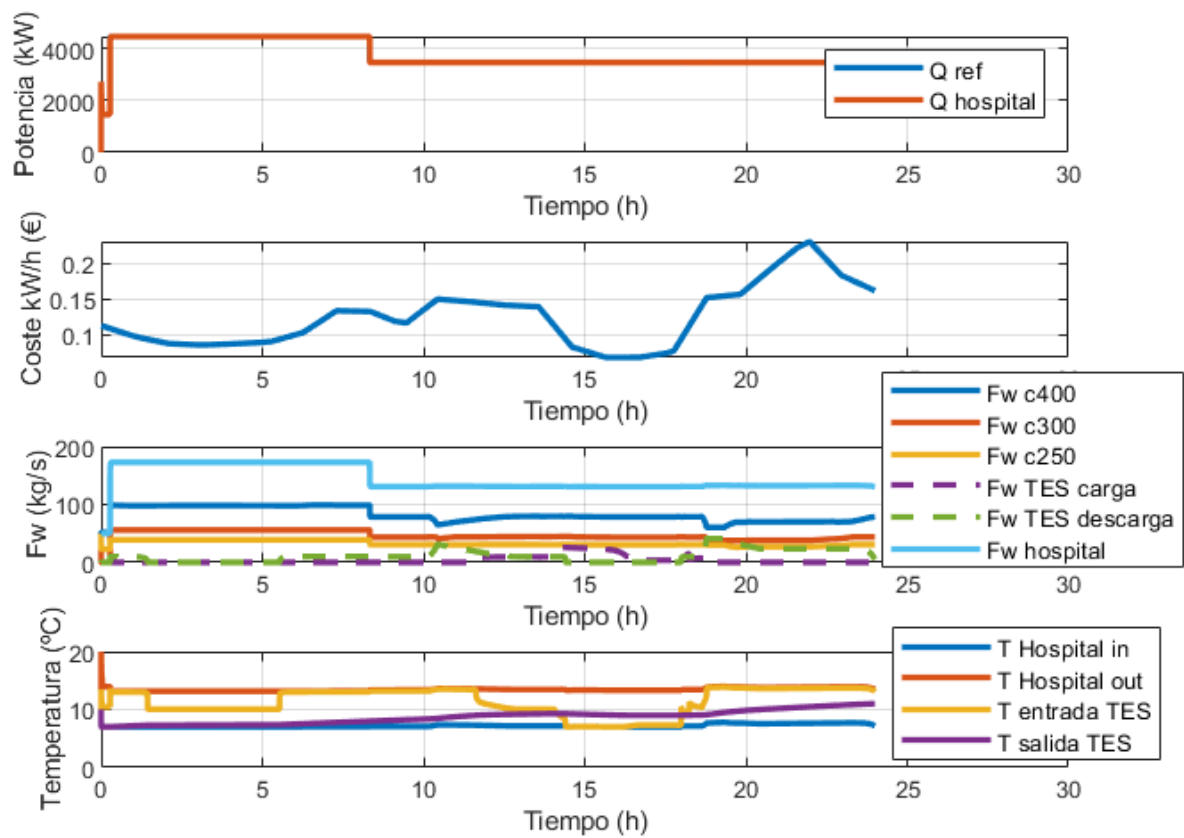


Figura 5-31. Resultados de la simulación del FLC del TES teniendo en cuenta la temperatura del agua almacenada. (1) Potencia de refrigeración del hospital. (2) Precio kW/h. (3) Caudales másicos. (4) Temperaturas del agua.

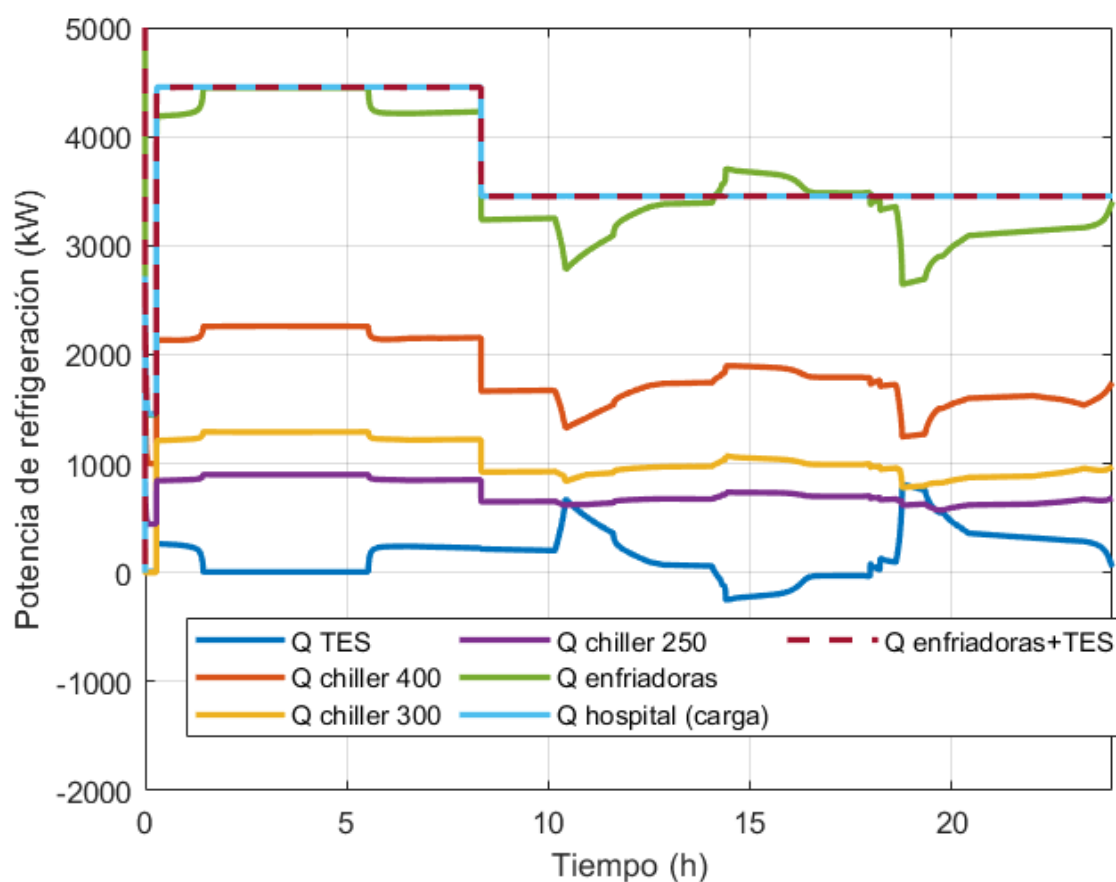


Figura 5-32. Potencias de refrigeración de la simulación del FLC del TES teniendo en cuenta la temperatura del agua almacenada.

La primera observación que se puede realizar es que durante el tramo de las 0 a las 6 horas, aproximadamente (véase la Figura 5-31), antes el TES se cargaba porque se encontraba a un precio barato el kw/h, pero en esta ocasión no ocurre porque el agua ya se encuentra a una temperatura fría. El caso en el que la temperatura del agua del TES es templada o caliente y el coste es caro no se puede apreciar correctamente en estas gráficas, al igual que cuando una enfriadora se encuentra apagada, por lo que se va a realizar otra simulación con un escalón de bajada superior para ver los resultados en otro punto de operación. En este caso se dará el mismo escalón de subida, pero el escalón de bajada será de 3000 kW para que así el caudal másico requerido sea bajo y alguna enfriadora se apague.

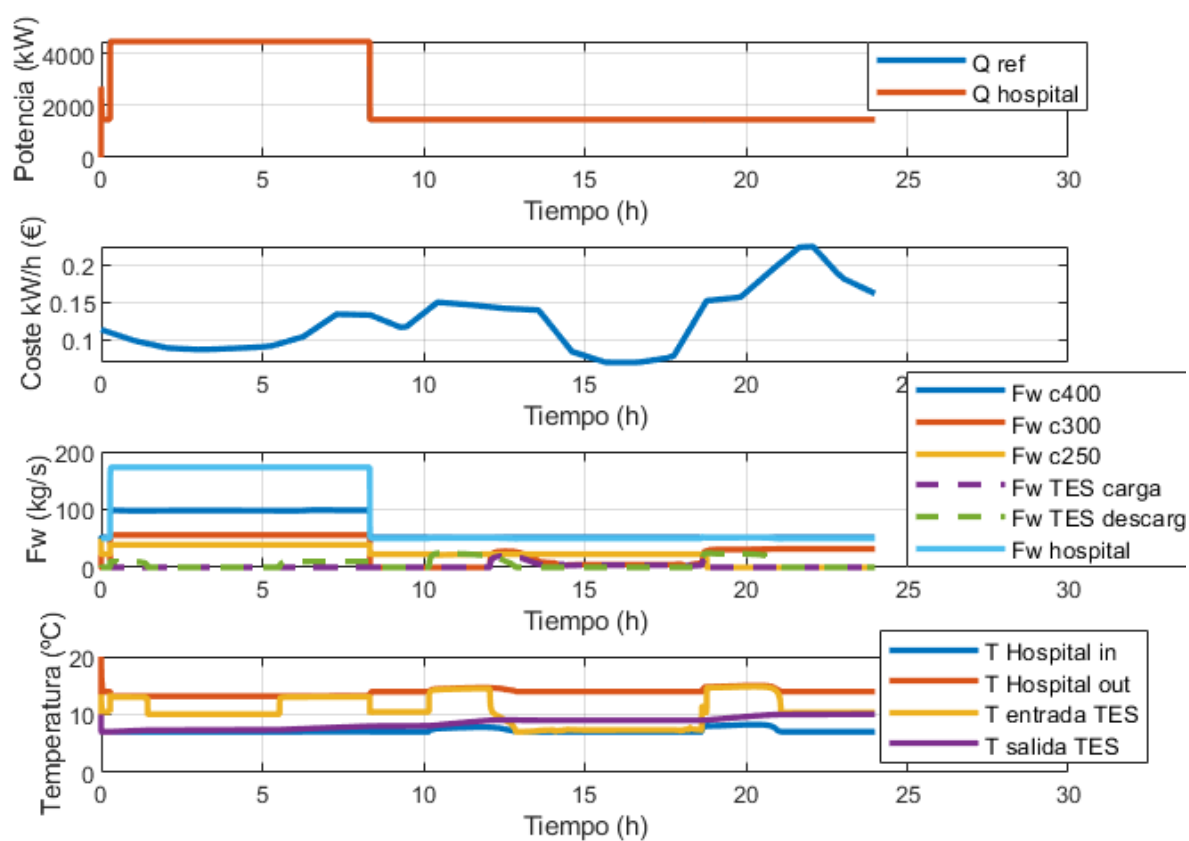


Figura 5-33. Resultados de la simulación en el segundo punto de operación del FLC del TES teniendo en cuenta la temperatura del agua almacenada. (1) Potencia de refrigeración del hospital. (2) Precio kW/h. (3) Caudales másicos. (4) Temperaturas del agua.

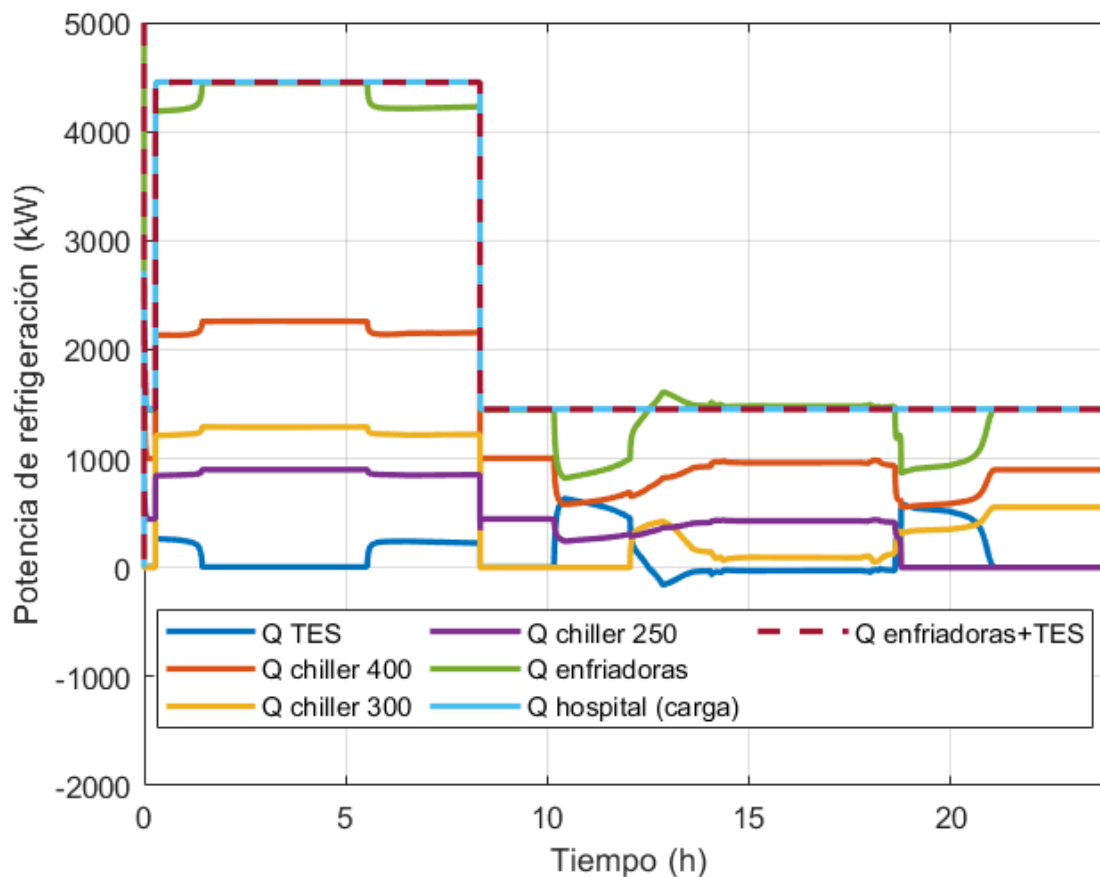


Figura 5-34. Potencias de refrigeración de la simulación del segundo punto de operación del FLC del TES teniendo en cuenta la temperatura del agua almacenada.

En esta ocasión sí resulta evidente los momentos en los que las enfriadoras de 300 y 250 tons se encuentran apagadas (en la Figura 5-34 se ve claramente cuando aportan 0 kW de refrigeración). Por otra parte, el TES antes se mantenía descargando desde las 19 horas aproximadamente hasta el final del día. Sin embargo, en este experimento no ocurre lo mismo ya que la temperatura del TES se encuentra a una temperatura templada (10°C) por lo cual se deja de aportar caudal másico procedente del TES y se puede apreciar en la Figura 5-33 que a partir de las 23 horas, aproximadamente, la temperatura de salida del TES se mantiene constante a 10°C porque no se encuentra ni descargando ni cargando.

Con esta última simulación se ha podido comprobar que el nuevo FLC sigue funcionando correctamente y ahora sí que se tiene en cuenta la temperatura del agua del TES, lo cual significará un ahorro de los costes mayor que si no se tuviese en cuenta.

5.4 Prueba de simulación con el perfil de potencia de refrigeración inicial

En este último punto se va a comprobar el seguimiento del controlador ante el perfil de la potencia de refrigeración que demanda el hospital del modelo original (Figura 4-7) y con la temperatura ambiente del hospital real, ya que hasta ahora tan solo se le daba un escalón constante durante un tiempo prolongado a la potencia demandada mientras que la temperatura del hospital se mantenía constante. Se ha cargado dicho perfil en un archivo denominado *perfil_potencia_hospital.mat* el cual es necesario cargarlo antes de realizar la simulación.

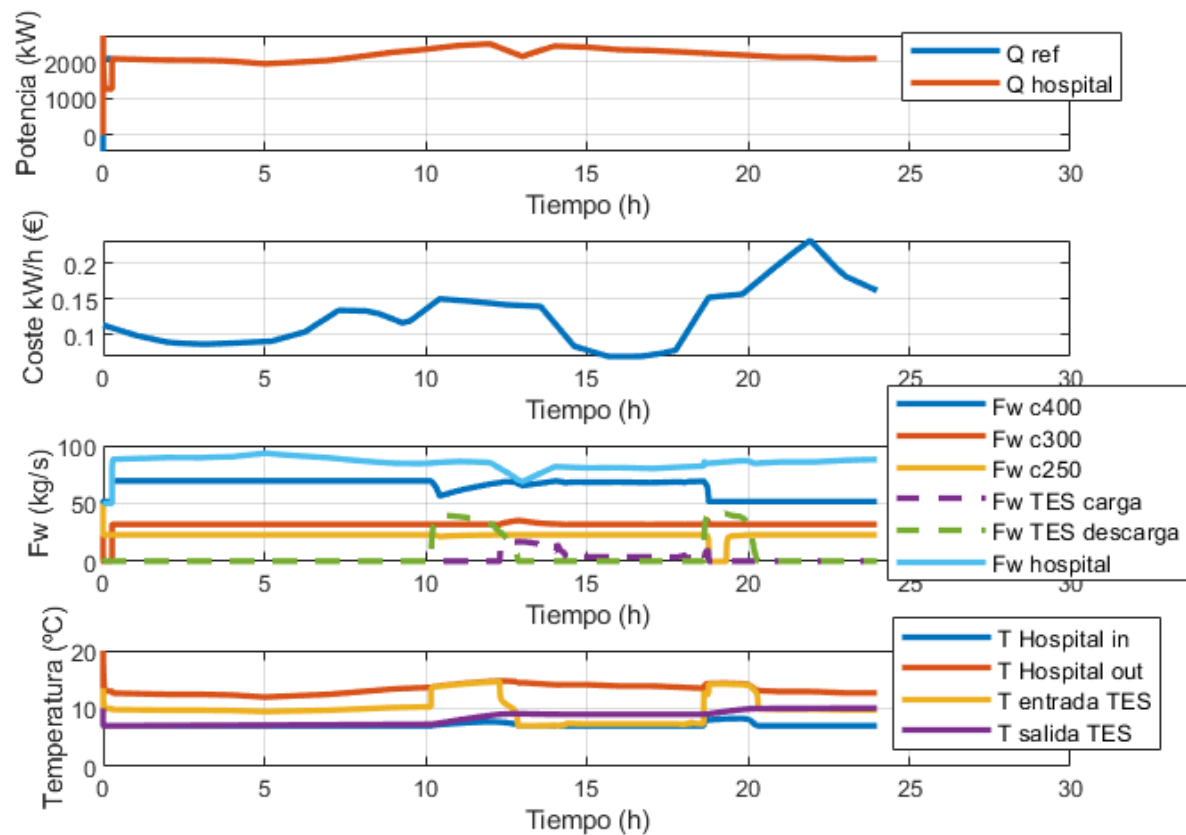


Figura 5-35. Resultados de la simulación del FLC del TES teniendo en cuenta la temperatura con el perfil de potencia de refrigeración del hospital. (1) Potencia de refrigeración del hospital. (2) Precio kW/h. (3) Caudales másicos. (4) Temperaturas del agua.

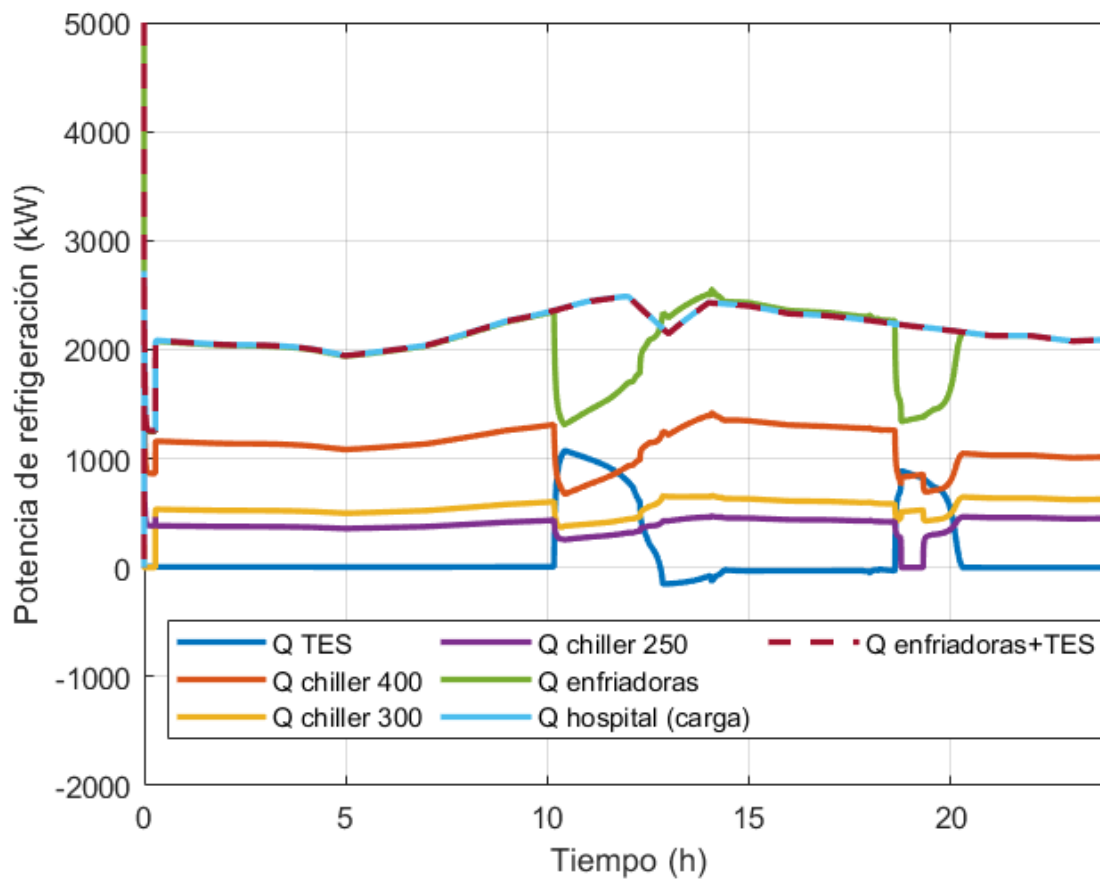


Figura 5-36. Potencias de refrigeración de la simulación del FLC del TES teniendo en cuenta la temperatura del agua almacenada con el perfil de potencias de refrigeración inicial.

El control con este perfil de potencia también se sigue a la perfección por lo cual se ha cumplido el objetivo del proyecto que era conseguir el control del sistema de refrigeración de un hospital mediante la lógica difusa.

6 CONCLUSIÓN

Una vez que se ha conseguido controlar el sistema mediante la lógica difusa se pasa a comentar los resultados obtenidos y las conclusiones que se tienen de este tipo de controladores.

Analizando de forma general los controladores que se han realizado mediante lógica difusa se ha podido comprobar que estos son fáciles de entender y de diseñar, y tan solo es necesario establecer una buena base de reglas y funciones de pertenencia que permitan a la lógica difusa actuar ante cualquier situación con las diversas entradas que presente. El punto más complicado es optimizar esas reglas y funciones para conseguir una mejor respuesta del controlador. También es cierto que a medida que se iban añadiendo entradas y salidas, las reglas comenzaban a ser más complejas y para obtener buenos resultados esta parte de optimización de complicaba aún más.

Comentando los resultados obtenidos de los controladores PI y el primer FLC, que es también de este estilo, se puede concluir en que ambos son buenas opciones para controlar esa única variable, siendo el PI ligeramente superior al tener un mejor tiempo de subida y con un régimen transitorio donde la respuesta cambia en un menor tiempo, aunque no consigue llegar exactamente a la referencia por décimas considerando el tiempo hasta que se le ha dado el segundo escalón. Sin embargo, el tiempo de establecimiento en la situación que se ha estudiado no es tan relevante porque este control no se necesita que sea excesivamente rápido al tratarse de un sistema de refrigeración, por lo cual se puede permitir estos tiempos para alcanzar la referencia total. En cuanto al diseño de ambos controladores, el FLC la parte más compleja fue la de ajustar las ganancias de las entradas para que el sistema obtuviese la mejor respuesta posible, eliminando las oscilaciones que se producían inicialmente y alcanzando la referencia lo más rápido posible. Este proceso puede ser similar a como se sintonizan los controladores mediante el método de Ziegler Nichols en el cual se va modificando la parte proporcional hasta obtener la ganancia límite, es decir, es mediante prueba y error, aunque en este trabajo se diseñó el controlador PI de forma analítica.

Por otro lado, si se considera el FLC que controla tanto el caudal másico del TES como el de las enfriadoras se ha podido comprobar como la elección de la lógica difusa como método de control ha sido una gran elección por la facilidad que tiene para manejar sistemas de múltiples entradas y/o salidas. Si se quisiera realizar este proceso de controlar el sistema de refrigeración mediante otro método tal vez sería mucho más complejo de realizar y menos intuitivo que el que se consigue con un solo FLC.

En conclusión, se ha conseguido aprender una nueva estrategia de control de sistemas la cual es empleada cada vez más en diversos sistemas por su adaptabilidad permitiendo añadir más variables de entrada o salida y por su facilidad de diseño y, sobre todo, por la similitud en la forma en la que opera el controlador con respecto al control que realizaría una persona ante la misma situación, es decir, las reglas que inducen las órdenes de control se realizan mediante palabras o variables lingüísticas en las que no se emplea ninguna fórmula matemática, siendo esta una forma más natural y fácil de entender para las personas.

REFERENCIAS

- [1] L. F. Acedo Bueno, M. Garrido Satué, M. Ruiz Arahál, C. Vivas Venegas y M. G. Ortega Linares, «Modelado, control y optimización de una planta de producción de frío con almacenamiento de energía,» *XLII Jornadas de Automática*, pp. 388-394, 2021.
- [2] Red eléctrica de España, «Término de facturación de energía activa del PVPC,» [En línea]. Available: <https://www.esios.ree.es/es/pvpc?date=02-07-2024>. [Último acceso: 2 julio 2024].
- [3] A. M. Oliveira, R. R. Beswick y Y. Yan, «A green hydrogen economy for a renewable energy society,» *Current Opinion in Chemical Engineering*, vol. 33, p. 100701, 2021.
- [4] H. Mahon, D. O'Connor, D. Friedrich y B. Hughes, «A review of thermal energy storage technologies for seasonal loops,» *Energy*, vol. 239, p. 122207, 2022.
- [5] Y. Tian y C. Y. Zhao, «A review of solar collectors and thermal energy storage in solar thermal applications,» *Applied Energy*, vol. 104, pp. 538-553, 2013.
- [6] L. Navarro et al., «Thermal energy storage in building integrated thermal systems: A review. Part 1. Active storage systems,» *Renewable Energy*, vol. 88, pp. 526-547, 2016.
- [7] R. Tiskatine et al., «Suitability and characteristics of rocks for sensible heat storage in CSP plants,» *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 169, pp. 245-257, 2017.
- [8] K. Brun, T. Allison y R. Dennis, Edits., *Thermal, Mechanical, and Hybrid Chemical Energy Storage Systems*, London: Academic Press, 2021.
- [9] I. Sarbu y C. Sebarchievici, «A Comprehensive Review of Thermal Energy Storage,» *Sustainability*, vol. 10, nº 1, p. 191, 2018.
- [10] I. Dinçer y M. A. Rosen, *Thermal Energy Storage : Systems and Applications*, Segunda ed., John Wiley & Sons, Incorporated, 2011.
- [11] M. Ban, G. Krajačić, M. Grozdek, T. Ćurko y N. Duić, «The role of cool thermal energy storage (CTES) in the integration of renewable energy source (RES) and peak load reduction,» *Energy*, vol. 48, pp. 108-117, 2012.
- [12] International Energy Agency, «Net Zero Roadmap: A Global Pathway to Keep the 1.5 °C Goal in Reach,» International Energy Agency, 2023. [En línea]. Available: <https://www.iea.org/reports/net-zero-roadmap-a-global-pathway-to-keep-the-15-0c-goal-in-reach>. [Último acceso: 4 julio 2024].
- [13] L. A. Zadeh, «Fuzzy sets,» *Information and control*, vol. 8, nº 3, pp. 338-353, 1965.
- [14] L. A. Zadeh, «Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes,» *IEEE Transactions on systems, Man, and Cybernetics*, vol. 3, nº 1, pp. 28-44, 1973.

- [15] L. A. Zadeh, «The concept of linguistic variable and its application to approximate reasoning,» *Information sciences*, vol. 8, n° 3, pp. 199-249, 1975.
- [16] E. H. Mamdani, «Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant,» *Proceedings of the institution of electrical engineers*, vol. 121, n° 12, pp. 1585-1588, 1974.
- [17] T. Takagi y M. Sugeno, «Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control,» *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*, vol. 15, n° 1, pp. 116-132, 1985.
- [18] I. H. Altaş, *Fuzzy Logic Control in Energy Systems with Design Applications in MATLAB®/Simulink®*, London: The Institution of Engineering and Technology, 2017.
- [19] J. C. García Infante, *Sistemas con Lógica Difusa*, México D.F: Instituto Politécnico Nacional, 2009.
- [20] T. J. Ross, *Fuzzy Logic with Engineering Application*, Tercera ed., John Wiley & Sons Ltd, 2010.
- [21] S. Sivanandam, S. Sumathi y S. Deepa, *Introduction to Fuzzy Logic using MATLAB*, Springer, 2007.
- [22] M. G. Simões, *Artificial Intelligence for Smarter Power Systems : Fuzzy Logic and Neural Networks*, The Institution of Engineering and Technology, 2021.
- [23] MathWorks, «Foundations of Fuzzy Logic,» [En línea]. Available: <https://es.mathworks.com/help/fuzzy/foundations-of-fuzzy-logic.html>. [Último acceso: 5 junio 2024].
- [24] K. M. Passino y S. Yurkovich, *Fuzzy Control*, Addison-Wesley Reading, MA, 1998.
- [25] D. S. Hooda y V. Raich, *Fuzzy Logic Models and Fuzzy Control : An Introduction*, Oxford: Alpha Science International Ltd, 2017.
- [26] MathWorks, «Fuzzy Inference Process,» [En línea]. Available: <https://es.mathworks.com/help/fuzzy/fuzzy-inference-process.html>. [Último acceso: 5 junio 2024].
- [27] MathWorks, «Define fuzzy rules using logic designer,» [En línea]. Available: <https://es.mathworks.com/help/fuzzy/define-fuzzy-rules-using-fuzzy-logic-designer.html>. [Último acceso: 6 junio 2024].
- [28] R. Arulmozhiyal y K. Baskaran, «Implementation of a Fuzzy PI Controller for Speed Control of Induction Motors Using FPGA,» *Journal of Power Electronics*, vol. 10, n° 1, pp. 65-71, 2010.