



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO**



**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**CONTROL MEDIANTE LÓGICA DIFUSA PARA
UN REACTOR MULTIVARIABLE
NO ISOTERMICO TIPO CSTR**

TESIS presentada por:

JUAN RAMÓN ROMERO BUCIO

**A la División de Estudios de Posgrado de la
Facultad de Ingeniería Química como
requisito parcial para obtener el
grado de:**

**MAESTRO EN CIENCIAS
EN
INGENIERÍA QUÍMICA**

Morelia, Mich.

Agosto 2005

RESUMEN.

CONTROL MEDIANTE LÓGICA DIFUSA PARA
UN REACTOR MULTIVARIABLE
NO ISOTERMICO TIPO CSTR.

Por
Juan Ramón Romero Bucio
Agosto del 2005
Maestro en Ciencias en Ingeniería Química
Dirigida por Dr. Agustín Jaime Castro Montoya.

El control de procesos mediante el enfoque de los sistemas expertos, como la lógica difusa, ha cobrado gran interés en la actualidad. Sobre todo para el control de sistemas matemáticamente complejos con alta no linealidad; como el Reactor agitado de mezcla completa y flujo continuo (CSTR por sus siglas en inglés). Estos sistemas son de alguna forma caóticos y altamente oscilatorios sobre todo cuando se tienen grandes energías de activación, agitación, moderados coeficientes de transmisión de calor y bajas conversiones.

Para el presente proyecto se planteó un controlador difuso para el control del volumen y otro controlador difuso para el control de la temperatura, observándose que los controladores se desempeñan adecuadamente al rechazo de las perturbaciones, "control regulador"; ya que, no hay sobretiro ni oscilaciones, pero sí un pequeño "offset". En cuanto al servo control, se observa un seguimiento eficiente al cambio del volumen de referencia de la mezcla de reacción, en tanto que el servo control para el seguimiento a un cambio a la temperatura de referencia requiere todavía mayor investigación. Se considera que se logró un sustancial avance en el control regulador, al establecer un adecuado universo de discurso, el que se dedujo por medio de las necesidades de enfriamiento proporcionado por el análisis del sistema a lazo abierto

ÍNDICE		pag.
Resumen.....		iii
Lista de figuras.....		v
Lista de tablas.....		viii
Nomenclatura de variables.....		ix
Nomenclatura de abreviaturas.....		x
Agradecimientos.....		xi
Capítulo 1. Introducción.....		1
1.1 Generalidades.....		1
1.2 Objetivo.....		2
1.3 Justificación.....		2
1.4 Alcance.....		2
1.5 Hipótesis.....		3
Capítulo 2. Antecedentes.....		4
2.1 El control de los reactores químicos.....		4
2.2 El control mediante la lógica difusa “CLD”.....		4
2.3 Arquitectura del controlador difuso “CLD”.....		8
2.4 Características del Toolbox fuzzy logic de MATLAB.....		14
2.5 Método de inferencia utilizada por el toolbox fuzzy logic.....		15
2.6 Características del Toolbox Simulink de MATLAB.....		16
Capítulo 3. Descripción del proceso.....		20
3.1 Generalidades acerca de los reactores CSTR.....		20
3.2 Modelo matemático del CSTR.....		21
3.3 Análisis de la estabilidad de los reactores CSTR.....		26
3.4 Comportamiento del “CSTR” en lazo abierto.....		28
Capítulo 4. Desarrollo del Control con Lógica Difusa		37
4.1 Estrategia de control.....		37
4.2 Establecimiento del controlador difuso para el reactor CSTR.....		40
4.3 Desarrollo de la estrategia de control difusa.....		42
Capítulo 5. Resultados.....		50
Conclusiones.....		61
Bibliografía.....		62

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Sistema de control por retroalimentación operado por un experto	6
Figura 2.2	Estructura del control difuso	8
Figura 2.3	Funciones de membresía tipo trapezoidales	10
Figura 2.4	Respuesta del proceso de primer o segundo orden	10
Figura 2.5	Superficie de control	13
Figura 2.6	Plano de control	13
Figura 3.1	Reactor típico de flujo continuo y agitado de mezcla completa "CSTR"	20
Figura 3.2	Esquema del reactor CSTR	21
Figura 3.3	Calor eliminado y calor de reacción en función de la temperatura para el CSTR	27
Figura 3.4	Diagrama de la programación en Simulink a lazo abierto del CSTR	28
Figura 3.5	Respuesta del volumen del reactor a un cambio en el flujo de alimentación " F_0 "	29
Figura 3.6	Respuesta de la temperatura del reactor " T " a un cambio en la temperatura de la alimentación del reactor " T_0 "	30
Figura 3.7	Respuesta de la temperatura del reactor " T " a un cambio en la concentración en la alimentación " C_{a0} "	31
Figura 3.8	Respuesta de la temperatura del reactor " T ", a un cambio en el flujo de alimentación de reactivos " F_0 "	32
Figura 3.9	Respuesta de la temperatura del reactor " T " a un cambio en el flujo de enfriamiento " F_{j0} "	33
Figura 3.10	Respuesta de la temperatura del reactor " T ", a un cambio en la temperatura del flujo de enfriamiento " T_{j0} "	34
Figura 3.11	Respuesta a lazo abierto del flujo de enfriamiento, a un aumento en la concentración en la alimentación	35
Figura 4.1	Reactor "CSTR" con dos lazos de control por retroalimentación, para el volumen y la temperatura	37
Figura 4.2	Arquitectura del sistema de control difuso (CLD). "MIMO"	38
Figura 4.3	Diagrama en Simulink del CSTR con dos lazos de control	39

Figura 4.4	Controlador difuso proporcional para el control de la temperatura en el CSTR	40
Figura 4.5	Editor de entradas y salidas al controlador difuso para el volumen del reactor	42
Figura 4.6	Editor de entradas y salidas al controlador difuso de la temperatura del reactor	43
Figura 4.7	Editor de funciones de membresía para la entrada al controlador difuso en términos del error del volumen “eV”	44
Figura 4.8	Editor de funciones de membresía para la salida del controlador difuso en términos del flujo de alimentación	45
Figura 4.9	Editor de funciones de membresía para la entrada al controlador difuso en términos del error de la temperatura	46
Figura 4.10	Editor de funciones de membresía para la salida del controlador difuso en términos de flujo de enfriamiento	47
Figura 4.11	Visor de reglas para el control del volumen.	48
Figura 4.12	Visor de reglas para el control de la temperatura.	48
Figura 4.13	Visor de superficie para el control difuso del volumen	49
Figura 4.14	Visor de superficie para el control de la temperatura	49
Figura 5.1	Respuesta con control difuso del volumen para el estado estable del reactor CSTR	50
Figura 5.2	Respuesta con control difuso en el estado estable para el control de la temperatura	51
Figura 5.3	Respuesta de la temperatura con control difuso a un cambio en temperatura de la alimentación a las 5 horas	52
Figura 5.4	Respuesta de la temperatura del control difuso y proporcional convencional, a un cambio de $T_0=20^\circ\text{K}$	52
Figura 5.5	Respuesta de la concentración con control difuso y proporcional a un cambio de la temperatura de la alimentación de “ T_0 ”= 20°K	53
Figura 5.6	Respuesta del flujo de enfriamiento con control difuso y proporcional a un cambio de $T_0= 20^\circ\text{K}$	53

Figura 5.7a	Respuesta de la temperatura con control difuso a un cambio $C_{ao}=50\%$, a un tiempo de simulación de 7hrs	54
Figura 5.7b	Respuesta de la temperatura con control difuso a un cambio en $C_{ao}=50\%$ a un tiempo de simulación de 20hrs	54
Figura 5.8a	Respuesta de la temperatura con control proporcional y difuso a un cambio en $C_{ao}=50\%$, a un tiempo de simulación de 7 horas	55
Figura 5.8b	Respuesta de la temperatura con control proporcional y difuso a un cambio en $C_{ao}=50\%$ a un tiempo de simulación de 20 horas	55
Figura 5.9a	Respuesta del flujo de enfriamiento a un cambio en $C_{ao}=50\%$ a un tiempo de simulación de 7 horas	56
Figura 5.9b	Respuesta del flujo de enfriamiento a un cambio $C_{a0}=+50\%$ para un tiempo de simulación de 20 horas	56
Figura 5.10a	Respuesta de la temperatura a un cambio en el volumen de la mezcla de reacción del 50% a un tiempo de simulación de 7 horas	57
Figura 5.10b	Respuesta de la temperatura a un cambio en el volumen de la mezcla de reacción del 50% a un tiempo de simulación de 20 horas	57
Figura 5.11a	Respuesta de la temperatura a un cambio en el volumen de la mezcla de reacción del 50%, con control difuso y proporcional a un tiempo de simulación de 7 horas	58
Figura 5.11b	Respuesta de la temperatura a un cambio en el volumen de la mezcla de reacción del 50%, a un tiempo de simulación de 20 horas	58
Figura 5.12	Efecto del cambio en el número de funciones de membresía tipo gaussianas en la temperatura	59
Figura 5.13	Efecto del cambio de las funciones de membresía tipo trapezoidales en la temperatura	60

LISTA DE TABLAS		Pag.
Tabla 2.1	Tabulación de las reglas base del conocimiento para la Figura No. 2.4	11
Tabla 2.2	Matriz de control difuso	12
Tabla 3.1	Valores en el estado estable para el reactor no isotérmico	26
Tabla 3.2	Estados estables para el reactor CSTR	27
Tabla 4.1	De definición de variables, funciones de membresía y el universo de discurso	41
Tabla 4.2	Definición de las reglas difusas “base del conocimiento”	41

NOMENCLATURA DE VARIABLES

eV	Error del volumen
eT	Error de la temperatura
E	Error
Ce	Cambio en el error
Tsp	Temperatura de referencia o de operación del reactor al estado estable °K
V	Volumen de la mezcla de reacción en m ³
Vsp	Punto de referencia de operación para el volumen del reactor m ³
T	Temperatura de la mezcla de reacción a la salida del reactor °K
To	Temperatura en la alimentación al reactor °K
Ca	Concentración del componente "A" a la salida del reactor K mol/m ³
Cao	Concentración de "A" en la alimentación en K mol/m ³
Fj	Flujo del fluido de enfriamiento a la salida del reactor m ³ /hr
Fjo	Flujo de enfriamiento en la alimentación m ³ /hr
Fo	Flujo de reactivos en la alimentación m ³ /hr
F	Flujo de reactivos a la salida del reactor m ³ /hr
Vj	Volumen de la chaqueta de enfriamiento m ³
E	Energía de activación J/Kmol
U	Coefficiente global de transmisión de calor J/hrm ² °K
ρ	Densidad de la mezcla de reacción
ρj	Densidad de fluido de enfriamiento
α	Factor de frecuencia h ⁻¹
R	Constante de los gases ideales J/Kmol°K
λ	Calor de reacción J/Kmol
C	Capacidad calorífica de la mezcla de reacción J/Kg°K
Cj	Capacidad calorífica de la mezcla de reacción J/Kg °K
k	Constante específica de velocidad de reacción en h ⁻¹

NOMENCALTURA DE ABREVIATURAS

CSTR	Reactor químico de flujo continuo de mezcla completa
CLD	Control mediante lógica difusa
FIS	Sistema de inferencia difusa
FS	Conjuntos difusos
GUI	Inter face gráfica de usuario
MIMO	Múltiples entradas múltiples salidas
E/S	Entrada/salida
°K	Grado Kelvin
R-K	Método numérico de Runge-Kutta
Ss	Estado estable
Crisp	Número real
TT	Transmisor de temperatura
TL	Transmisor de nivel
CA	Con ajuste
SA	Sin ajuste

AGRADECIMIENTOS

A la gloriosa UMSNH

A La Facultad de Ingeniería Química

A mi asesor de Tesis; **Dr. Agustín Jaime Castro Montoya**, por su colaboración incondicional en el desarrollo de éste trabajo de tesis.

A mis revisores de Tesis: **Dr. Luís Ignacio Salcedo Estrada, Dr. Javier Lara Romero, Dra. Mariana Ramos Estrada y M.C. José María Ponce Ortega**, les doy las gracias por sus atinadas observaciones.

A todos los **Maestros del Posgrado** de La Maestría en Ingeniería Química mi más aprecio y respeto.

Al personal técnico y de apoyo administrativo

¡A todos mil gracias!

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

Se establecen las generalidades sobre los reactores químicos, y la importancia de trabajar en el control de estos sistemas altamente no lineales. Así también se define el objetivo a alcanzar con el trabajo, y se plantea la hipótesis a comprobar.

1.1 Generalidades

El control de procesos tiene una función vital en el avance de la ingeniería y de la ciencia, ya que permite la producción con la confiabilidad y calidad que las altas exigencias del proceso y del mercado imponen.

En lo que se refiere a la industria química, su valor radica en la necesidad del control de una serie de variables de estado como: presión, temperatura y flujo entre otras.

De los diversos equipos que tenemos en las plantas de proceso los reactores químicos son, sin lugar a dudas, los que representan un mayor reto para poder implementar un sistema de control, ya que son sistemas altamente complejos.

Dentro de la gran variedad de reactores químicos, los de flujo continuo de mezcla completa no isotérmicos CSTR (*Continuous Stirred Tank Reactor*), por sus siglas en inglés, constituyen un ejemplo de reactores donde su modelo exhibe una fuerte no linealidad y múltiples estados estables [1].

Si bien, la mayoría de los procesos son inherentemente estables a lazo abierto, una interesante excepción a ésta regla lo constituyen los reactores químicos exotérmicos, como los “CSTR” [2].

Para obtener los parámetros de ajuste de los controladores en estos sistemas altamente no lineales, algunos investigadores han propuesto que el proceso se caracterice mediante un modelo de primer orden o segundo orden con tiempo muerto [3].

Sin embargo se ha reportado recientemente, que la sintonización del control de la temperatura en los CSTR no es un problema trivial, y que el uso de los métodos de sintonización tradicionales generan respuestas pronunciadamente oscilatorias [2].

En la industria química, para este tipo de reactores generalmente se manejan controladores clásicos proporcional integral “PI” o proporcional integral derivativo “PID”, pero en gran medida los parámetros de ajuste para el controlador, son obtenidos industrialmente con sintonización empírica para alcanzar coeficientes

razonables de amortiguamiento a lazo cerrado, por no contar con métodos convencionales para su determinación [2]. Para estos sistemas el objetivo primario es mantener la conversión en un valor deseado, sin embargo el objetivo práctico es mantener el control de la temperatura. Cuando la temperatura esta bien controlada, las variaciones en la conversión del reactivo van muy de acuerdo con las variaciones de la temperatura [4].

Para el presente trabajo, se ha elegido una reacción irreversible y exotérmica de primer orden, que presenta tres posibles estados estables. Dos de ellos, se pueden alcanzar sin necesidad de control, en tanto que el estado estable intermedio necesita de un controlador necesariamente. Aspecto muy común dentro de la industria, puesto que es el punto de operación o de trabajo en los CSTR [1]. A este estado intermedio se le conoce como estado meta estable. El estado meta estable, satisface las condiciones de balance pero no las condiciones de estabilidad local.

1.2 Objetivo

Diseñar un controlador mediante lógica difusa para el control de temperatura y volumen de un reactor de mezcla completa continuo no isotérmico, conocido como CSTR.

1.3 Justificación

Dado a que el trabajo con reactores químicos como los CSTR son altamente no lineales y la solución en cuanto al control no ha sido resuelta en su totalidad [2], es necesario plantearse nuevos caminos para poder controlar estos sistemas con mayor precisión.

Por lo anteriormente expuesto, se plantea la necesidad de utilizar otros enfoques tecnológicos, tal como la aplicación de la lógica difusa, como una alternativa novedosa para el control del reactor CSTR, dado que según reportes recientes una gran variedad de sistemas lineales y no lineales, han utilizado esta alternativa de control, tanto en el campo de equipo industrial, comercial y de servicios.

1.4 Alcance

Se plantea la posibilidad de que el diseño del controlador difuso sea capaz de estabilizar el reactor, que es un sistema altamente no lineal y manifieste suficiente

robustez en el servo control o seguimiento a un cambio en el punto de referencia y en el control regulador o rechazo a las perturbaciones.

1.5 Hipótesis

Se considera que los controladores basados en la lógica difusa que han sido aplicados a sistemas no lineales, sean una alternativa real para el control de reactores químicos utilizando solo descripciones lingüísticas de su comportamiento dinámico.

CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES

En este apartado, se analizan los antecedentes con los que se cuenta en la literatura especializada para establecer la necesidad real de aplicar el control difuso al reactor conocido como CSTR.

2.1 El control de los reactores químicos

El control de los reactores químicos es un problema aún no resuelto en su totalidad [2]. Los modelos seleccionados para éstos sistemas por diversos investigadores [5,6,7], establecen modelos de primero o segundo orden con tiempo muerto, como una aproximación para sistemas inestables a lazo abierto.

Sin embargo, se ha demostrado que este tipo de modelos no es apropiado para los reactores agitados de mezcla completa de flujo continuo, con reacción exotérmica e irreversible, aún para la reacción más simple de primer orden. Por ejemplo, el uso de los parámetros de Ziegler-Nichols frecuentemente producen sistemas a lazo cerrado que son también oscilatorios [2].

Los estudios desarrollados, normalmente establecen modelos linealizados a volumen constante, situación que simplifica en gran medida el modelo matemático [2]. Sin embargo el sistema bajo estudio es más complejo ya que considera también como variable el volumen del reactor CSTR.

En cuanto a los trabajos que se han desarrollado mediante el control con lógica difusa para reactores continuos, estos son todavía escasos y solamente corresponden a modelos linealizados, lo que se le conoce como control convencional difuso [8].

El presente trabajo plantea el diseño de un controlador a partir de la información que nos proporciona el sistema en lazo abierto, aspecto que es muy valioso, ya que parte de la información propia del reactor y en la literatura científica, no se ha planteado un enfoque similar.

2.2 El control mediante lógica difusa “CLD”

La lógica difusa nació desde la época de los grandes filósofos griegos, donde se ha venido cuestionando la efectividad de la dicotomía cierto – falso, posteriores investigadores también han formulado sus conceptos respecto a este tema, siguiendo con la idea de la dicotomía.

Fue Lotfi Zadeh quién habló primero de los conjuntos difusos y moldea luego la teoría de la lógica difusa de forma sistemática. En 1964 aparece por primera vez la noción de conjuntos difusos en un memorando debido al mismo Zadeh en la Universidad de California en Berkeley. Dicho memorando es publicado un año más tarde bajo el título: "*Fuzzy Sets*" (Conjuntos difusos). En 1965, la revista "*Information and Control*", publica el memorando anterior. Zadeh ha interpretado los sistemas difusos, como computación con palabras, y ha introducido la teoría de computación con percepciones [16].

En 1974, se demuestra la aplicabilidad de la lógica difusa en el campo del control. Se desarrolla el primer sistema de control Fuzzy práctico, a la regulación de una máquina de vapor [9]. A finales de los 70's, los ingenieros daneses Lauritz Peter Holmbland y Jens-Jurgen Ostergaard desarrollan el primer sistema de control difuso comercial, destinado a una planta de cemento, y además se realizó un estudio del control de la temperatura en intercambiadores de calor [10], la aplicación en procesos de lodos activados [11], el control de temperatura en máquinas de moldeo de plásticos [12], el control de la dosificación de reactivos en plantas de tratamiento de agua [13], la generación de una patente para el control del nivel de líquido [14], el desarrollo de un sistema de arranque de un reactor anaerobio usando lógica difusa [15], donde la variable medida era el pH y, el control difuso de temperatura en un horno eléctrico [16], son algunos de los estudios más relevantes aplicados a la ingeniería química donde se utiliza la lógica difusa.

Esta forma alternativa del control mediante lógica difusa, utiliza el conocimiento de un operador experto para lograr los objetivos de control como contrapartida al control convencional.

Es loable tener presente, que se cuenta básicamente con dos caminos para adquirir el conocimiento que se requiere para diseñar un controlador difuso. El primero de ellos es mediante la operación de un equipo por cierto tiempo hasta lograr conocerlo bien, y el otro mediante la utilización de un modelo matemático, el que se programa y simula mediante el uso de una computadora. En ambas formas de adquirir el conocimiento, es necesario expresar bajo una oración de sentencia "si-entonces" el conocimiento, y ordenar el conocimiento de la dinámica de operación. Con ésta estructura de sentencia y de enlace entre las proposiciones, es posible aplicar una inferencia de forma más precisa.

La Figura 2.1 explica gráficamente éste hecho. En ella, se observa que el operador experto es capaz de detectar las desviaciones del proceso, y por lo tanto, deberá tomar la mejor decisión en tiempo real. Se obtiene la diferencia entre la variable a controlar “T”, y lo compara con el valor de referencia o de operación T_{sp} . Con esta información, obtiene el grado de desviación, que el sistema a controlar presenta respecto a su punto de operación o referencia. Al conocer la desviación, el operador experto toma la mejor decisión, con el objeto de minimizar la desviación. Esta mejor decisión se verá reflejada en la variable a manipular, y esta variable se encargará de ejercer la acción final de control.

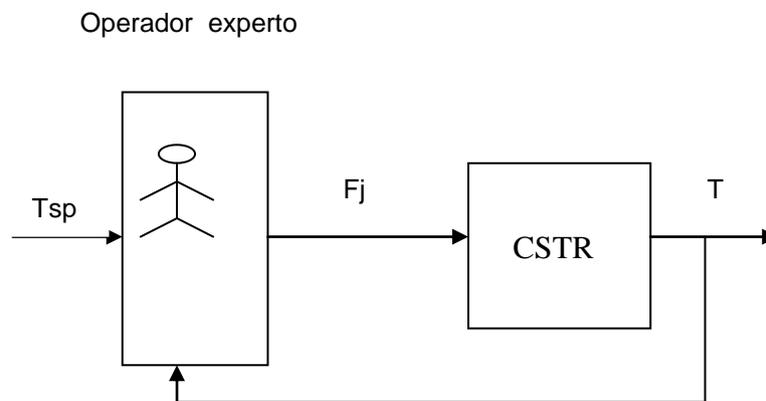


Figura 2.1 Sistema de control por retroalimentación operado por un experto

El operador experto tomará todas las decisiones que necesite para controlar al reactor. Sólo se espera que no se canse ni se equivoque. La lógica difusa puede ser utilizada para sustituir al operador experto e implementar políticas heurísticas de control expresadas verbalmente, sin equivocarse y prácticamente sin presentar cansancio. Por lo tanto, el propósito de este trabajo, es automatizar un proceso complejo mediante lógica difusa, tal como un reactor químico, tal como lo haría un operador experto.

La estructura de control, que el operador maneja, podrá ser expresada lingüísticamente como un conjunto de enunciados condicionales imprecisos, pero dentro del rango de operación.

Por ejemplo, una regla típica para el control de temperatura es: “Si la temperatura es alta y está aumentando; entonces la acción a tomar será: incrementa mucho el enfriamiento”. Esta información la puede proporcionar el operador experto o la simulación del sistema a lazo abierto.

Para el cálculo de las acciones de control, se emplean las estrategias de evaluar el error, convertirlo en variables difusas, evaluar las reglas de decisión mediante un mecanismo de inferencia y determinar una salida regular del proceso. El método lingüístico basado en conjuntos difusos ofrece las siguientes ventajas sobre los métodos directos:

- a).- El álgebra difusa proporciona una base formal para la síntesis lingüística.
- b).- El método lingüístico es más apropiado para razonamiento aproximado.
- c).- Los algoritmos lingüísticos son sintetizados directamente de la experiencia del personal que opera el proceso

En tanto que las características más relevantes de un controlador difuso son:

1. Es hábil para trasladar conocimientos imprecisos o vagos de expertos humanos.
2. Simple y tecnológicamente fácil de implementar
3. Diseño de software y soporte de implantación en software en lenguajes comunes de programación.
4. Los algoritmos son transportables.
5. Comportamiento suave del controlador.
6. Hábil para controlar sistemas inestables.

Como estrategias básicas para el diseño del controlador difuso se tiene que:

1. Entender y caracterizar el comportamiento del sistema utilizando la experiencia y el conocimiento. En el caso de estudio, se pretende tener éste conocimiento a partir de la dinámica del reactor a lazo abierto.

2. Diseñar directamente el algoritmo de control, utilizando reglas difusas que describan los objetivos de control, en términos de relación de entradas con las salidas.
3. Depurar y/o simular el sistema. Si no son satisfactorios los resultados deberán modificarse las reglas y/ o los conjuntos difusos.

2.3 Arquitectura del controlador difuso “CLD”

La arquitectura del controlador a utilizar depende de la aplicación concreta que se efectuará. No resulta fácil realizar una clasificación genérica de todas las arquitecturas posibles de controladores basados en lógica difusa; no obstante, consideraremos los siguientes tres grandes grupos de controladores [17].

- 1-Controladores difusos directos sin optimización. En éste controlador no se le da ningún tratamiento a la variable de desviación.
- 2.-Controladores difusos con optimización. En éste controlador se le aplica alguna función a la variable de desviación tendiente a minimizar la desviación.
- 3.-Controladores difusos híbridos. Estos son en realidad sistemas que integran los controladores difusos y convencionales.

Para un sistema de una entrada y una salida conocido como SISO, la arquitectura del controlador tiene la siguiente forma, ver la Figura 2.2.

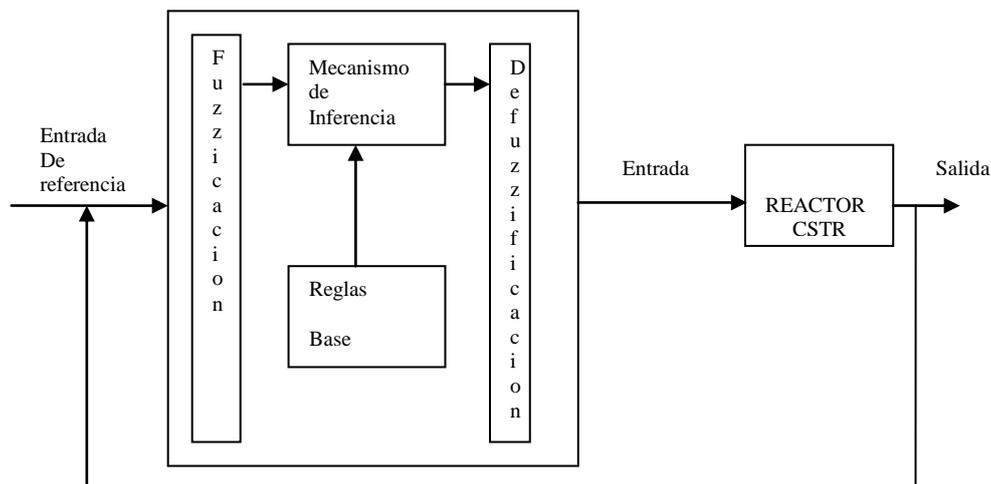


Figura 2.2 Estructura del control difuso

Se observa en la Figura 2.2 que el controlador difuso consta de cuatro elementos básicos [18]:

1.-Las reglas base

Son un conjunto de reglas, las cuales contienen la descripción lingüística de un experto quien describe la mejor forma de alcanzar un buen control. Su estructura es:

Si **antecedente** es “A” Entonces **Consecuente** es “B”

2.-La fuzzificación

Conocida también como interfase de fuzzificación, convierte las entradas al controlador de tal forma que el mecanismo de inferencia lo pueda entender fácilmente en la aplicación de las reglas.

3.-El mecanismo de inferencia

También es llamado máquina de inferencia o inferencia fuzzy, la cual emula la decisión del experto haciendo una interpretación, y aplica el conocimiento de la mejor forma para el control del proceso.

La evaluación de las reglas es la etapa inteligente del CLD, ya que posee la capacidad de imitar la forma humana de tomar decisiones basada en conceptos difusos y de inferir acciones de control difusas. La evaluación de las reglas difusas, pueden ser resueltas mediante circuitos utilizando bloques mínimo y máximo, dependiendo del método de inferencia elegido [18].

4.-La etapa de defuzzificación

Convierte las conclusiones del mecanismo de inferencia a valores adecuados, para que puedan ser las entradas al proceso, es decir, que sean la acción apropiada que debe tomar el elemento final de control.

La etapa de defuzzificación parte de un conjunto de funciones de membresía definidas sobre alguna variable de salida de un CLD y que están truncadas. Estos conjuntos truncados representan una respuesta o conclusión difusa. De los conjuntos truncados se obtienen las conclusiones utilizando diversos métodos para su cálculo, como por ejemplo el del centro de gravedad.

Una forma de establecer el dictado de reglas

En el diseño de control difuso, es necesario identificar las variables de entrada y salida. Establecer los límites de cada variable, y poder definir correctamente el perfil de los conjuntos difusos. Posteriormente se procede a precisar cualitativamente los significados de las etiquetas lingüísticas tales como “Muy

grande”, “Poco lento”, Muy rápido” etc., y a continuación se establecen las funciones de membresía.

En la mayoría de las aplicaciones orientadas al control, se suelen definir conjuntos difusos sobre cada variable de entrada/salida, normalmente se establecen siete [4]. Es conveniente nombrar los conjuntos difusos con una notación estándar, y así, simplificar el dictado de reglas. La notación más aceptada se establece bajo los siguientes términos:

NG	Negativo grande	PP	Positivo pequeño	CE	Cero
NM	Negativo Medio	PM	Positivo medio		
NP	Negativo pequeño	PG	Positivo grande		

Los conjuntos difusos, le dan nombres específicos a las funciones de membresía, sobre el universo de discurso.

El conjunto difuso, etiquetado como “Positivo pequeño”, definido sobre la variable Temperatura, se leerá como: “La temperatura es positiva pequeña”.

Las funciones de membresía se muestran en la Figura 2.3, normalmente tiene un cierto traslape. El más común es del 25%. Cada función de membresía, se le nombra con un conjunto difuso en particular.



Figura 2.3 Funciones de membresía tipo trapezoidales

Típicamente el error y el cambio del error en un sistema de control retroalimentado, presenta una respuesta como la que se aprecia en la Figura 2.4

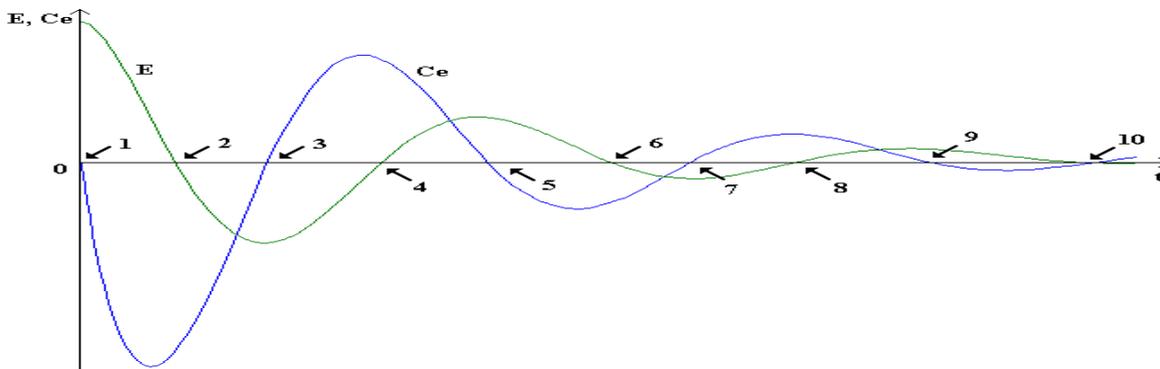


Figura 2.4 Respuesta del proceso de primer o segundo orden

El control se puede dividir en 10 fases, que representarán a los conjuntos difusos del sistema.

Se debe proponer una regla difusa para cada fase mostrada en la Figura 2.4 para lograr el objetivo de control, el que está representado por la línea horizontal que es la referencia.

La primera fase (punto 1) ver la Figura 2.4, corresponde a un antecedente difuso de la forma siguiente “E es PG, CE es CE”. Donde “E” significa el error medido y “CE”, representa el cambio del error medido. Así mismo, se construyen las nueve reglas base que hacen falta.

Las formas de representar todas las reglas base que describen el comportamiento dinámico de un sistema, es mediante tres formas, la primera de ellas es mediante su tabulación, ver la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Tabulación de las reglas base del conocimiento para la Figura 2.4

REGLA	E	Ce	C
1	PG	CE	NG
2	CE	NG	PG
3	NM	CE	PM
4	CE	PM	NM
5	PP	CE	NP
6	CE	NP	PP
7	NP	CE	PP
8	CE	PP	NP
9	PP	CE	NP
10	CE	CE	CE

La segunda forma típica de ordenar las reglas que describen el comportamiento del proceso o “reglas base del conocimiento”, es mediante lo que se conoce como la matriz de control.

A continuación se muestra un ejemplo de una matriz de control difuso, ver la Tabla 2.2. En este arreglo se colocan las variables de entrada al inicio de la fila y de la columna. Normalmente es el error, el cambio del error, la integral del error, como variables de entrada, y las variables de salida son aquellas que se encargan en los procesos de ejercer la acción de control, las que encuentran en el centro de la matriz de control. Como ejemplo, para controlar el volumen del reactor se podrá medir el error en el volumen, y el cambio del error en el volumen como variables de

entrada, y como salida, el flujo de alimentación, que es la variable que se va a manipular para controlar el volumen del reactor. Este último valor es descrito en el cuerpo de la matriz de control.

Tabla 2.2 Matriz de control difuso

e\Ce	NG	NM	NP	CE	PP	PM	PG
NG				NG			
NM				NM			
NP				NP			
CE	NP	NM	NP	CE	PM	PG	PG
PP				PP			
PM				PM			
PG				PG			

Una tercer forma de expresar el conocimiento es establecer simplemente una lista de las reglas base, todo dependerá de la elección que se prefiera.

Ejemplo:

- 1.- Si E = PG y CE = NP Entonces Y = PP
- 2.- Si E = PP y CE = NP Entonces Y = NP
- 3.-....

Para determinar el número de reglas que se pueden definir, se utiliza la ecuación 2.1.

$$\text{Número de reglas} = m^n \tag{2.1}$$

Donde:

- m = funciones de membresía
- n = variables de entrada

Por ejemplo, si se tienen 7 funciones de membresía y 2 variables de entrada, entonces se tienen 49 posibles reglas base del conocimiento que se pueden plantear.

Sin embargo, esta cantidad de reglas, solamente representa las combinaciones posibles que se pueden realizar en relación con las variables y conjuntos definidos en los antecedentes de las reglas base. La estructura de las reglas base pueden contener una o dos premisas.

Si ahora se considera que tales combinaciones pueden apuntar a M conjuntos definidos en el consecuente, entonces el número real de reglas distintas se pueden definir con la ecuación 2.2.

$$\text{Numero de reglas totales es} = M(m^n) \tag{2.2}$$

Donde:

M = Conjuntos difusos en el consecuente.

Superficies de control y plano de control

La respuesta que en todo momento entrega el CLD, describe la dinámica del controlador. Generalmente es una superficie o plano no lineal variante con el tiempo, ver Figuras 2.5 y 2.6.

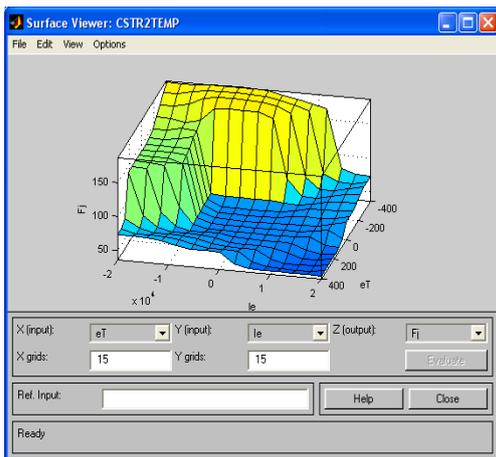


Figura 2.5 Superficie de control

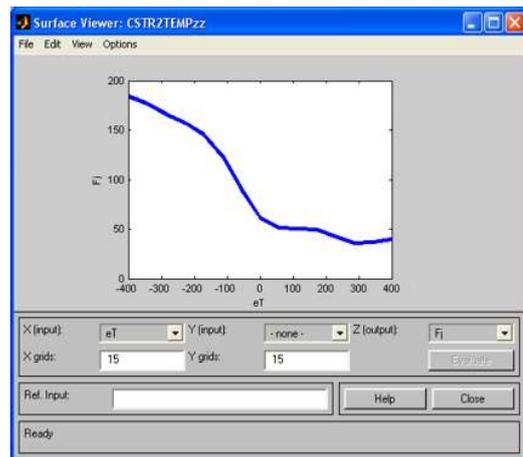


Figura 2.6 Plano de control

Esta superficie o gráfica muestra la forma en que el controlador realizará la función del control. Se puede modificar la superficie de control de muchas formas: variando los conjuntos difusos, modificando las reglas difusas o cambiando el método de inferencia. Cualquier acción que se tome se reflejará en la superficie de control. Estos cambios corresponden, a una parte de lo que se conoce como la sintonización del controlador difuso.

Construir las reglas a partir de la respuesta de un modelo de retroalimentación simple, no resulta muy complicado, porque hay información muy clara, comparado con un sistema que es inherentemente inestable, como el CSTR, situación que complica la construcción del controlador.

2.4 Características del toolbox fuzzy logic de MATLAB

Para diseñar el controlador mediante lógica difusa se utilizará el toolbox de fuzzy logic de Matlab, por lo que se hará una descripción, solo con la finalidad de establecer sus principales definiciones y su forma de operación.

El toolbox de fuzzy logic (caja de herramientas de la lógica difusa) es un software empleado para construir, editar y observar los sistemas de inferencia difusos, y tiene cinco herramientas primarias de interfase gráfica de usuario (GUI) [19] que son:

- El sistema de inferencia difusa o editor FIS. Este editor contiene la información general acerca del sistema de inferencia difusa. Con ayuda de él se dan de alta los nombres de las variables de entrada y salida y los tipos de inferencia como **Mamdani** o **Sugeno**.
- El editor de funciones de membresía. Es usado para definir las formas de todas las funciones de membresía asociadas con cada variable. Comparte algunas características del editor FIS, es la herramienta que permite desplegar y editar todas las funciones de membresía para todo el sistema de inferencia difuso, de todas las variables de entrada y salida. Se pueden modificar los límites del intervalo de la variable considerada (Universo de Discurso) y el nombre, posición y forma de la función de membresía.
- El visor de reglas. Muestra el diagrama de inferencia difusa. Es usado como un diagnóstico para mostrar qué reglas están activas, o cómo las formas de las funciones de membresía individuales están influyendo en los resultados. Este visor de reglas despliega un mapa entero del proceso de inferencia difusa. Se puede introducir un valor de entrada específico, si se desea. Cada regla es una fila de planos y cada columna es una variable. Así la primera columna de planos (si es una entrada, dos columnas si son dos entradas, etc.,) muestra las funciones de membresía referenciadas por los antecedentes de la parte si (*if*), de cada regla. La segunda columna de planos muestran las funciones de membresía referenciados por los consecuentes, o la parte entonces (*then*) de cada regla. Puede cambiarse el valor de la entrada y determinar el grado de membresía para una regla en particular al igual que visualizar el valor de salida defuzificado. El visor de reglas muestra cómo la forma de ciertas funciones de membresía está influyendo en el resultado final, se visualiza un cálculo a la vez en gran detalle. En este sentido, presenta una especie de vista microscópica del sistema de inferencia difusa.

- El visor de superficies. Muestra en forma gráfica, cómo una de las salidas depende de una o dos entradas, mediante la generación de un mapa de la superficie de salida para el sistema. Este visor presenta una curva de dos o tres dimensiones que representa la gráfica de las variables de entrada y de salida. En el caso de una entrada y una salida, se puede ver la gráfica entera en un plano bidimensional. Sistemas de dos entradas y una salida generan un plano en tres dimensiones que MATLAB puede manejar adecuadamente. Se pueden tomar los ejes y reajustarlos para hacer una vista tridimensional de datos diferente. El campo de entrada de referencia se usa en las situaciones cuando hay más entradas en el sistema.

Estas diferentes GUI's se pueden tener trabajando en forma individual o todas al mismo tiempo para cualquier sistema dado. Los últimos dos GUI's se usan para observar al FIS y son herramientas de sólo lectura. Algunas de las herramientas de GUI tienen el potencial para ejercer influencia sobre los otros.

Por ejemplo, si se agrega una regla, se puede esperar ver el cambio de la superficie de salida en el visor de superficies.

Los cinco principales editores de GUI intercambian información, si es necesario. Cualquiera de ellos puede leer y escribir al *workspace* (área de memoria reservada para datos) o en forma de archivo almacenado en el disco duro de la computadora.

2.5 Método de inferencia utilizada por toolbox fuzzy logic

Los tipos de sistemas de inferencia difusa que pueden implementarse con el toolbox de lógica difusa son: el tipo *Mamdani* y el tipo *Sugeno*. Estos dos sistemas son similares en las primeras dos partes del proceso de inferencia difusa, la Fuzzificación de las entradas y la aplicación de los operadores difusos, en cuanto a los antecedentes de las reglas, son exactamente iguales. Las únicas diferencias se encuentran en la manera en como las salidas son determinadas.

La metodología difusa de *Mamdani* es normalmente usada por el toolbox de lógica difusa [19], sintetizando un conjunto de reglas de control lingüísticas obtenidas de los operadores humanos experimentados. El esfuerzo de *Mamdani* estaba basado en el artículo de 1973 de Lotfi Zadeh sobre los algoritmos difusos para sistemas complejos y procesos de decisión [19]. En este sistema de inferencia los conjuntos difusos del consecuente de cada regla son combinados a través del

operador de agregación y el conjunto difuso resultante es defuzificado para alcanzar la salida del sistema. Después del proceso de agregación, hay un conjunto difuso para cada variable de salida que necesita defuzificarse. En el proceso de defuzificación, el método de *Mamdani* calcula el *centroide* de una función bidimensional. El método de inferencia difusa de *Sugeno* o el método de *Takagi-Sugeno-Kang* fue introducido en 1985 [19]. En este sistema de inferencia el consecuente de cada regla es una combinación lineal de las entradas. La salida es una combinación de los pesos, en forma lineal, de los consecuentes. Las funciones de membresía son *singlenton* (espigas) en lugar de conjuntos difusos distribuidos, o funciones matemáticas y la implicación y los métodos de agregación son fijos y no pueden editarse. La función de membresía tipo *singlenton* puede ser vista como un conjunto difuso predefuzificado, que refuerza la eficacia del proceso de defuzificación, dado que simplifica en gran medida el cálculo requerido por el método de *Mamdani*.

2.6 Características del toolbox simulink de MATLAB

Para simular el sistema bajo estudio a lazo abierto y probar la efectividad del control difuso se utilizará simulink de Matlab.

Las estructuras de datos usadas para dibujar y editar modelos de simulink han sido diseñadas para facilitar la representación gráfica de sistemas dinámicos en forma de bloques [20]. Estos modelos gráficos nos presentan las características necesarias para efectuar la simulación de los sistemas. La primera fase de una simulación consiste en generar un nuevo conjunto de estructura de datos. Varias acciones tienen lugar durante esta fase.

Primero, los parámetros de cada bloque se evalúan por MATLAB. En este punto, las variables o funciones usadas como parámetros de los bloques son reemplazados por números, si se cambian los valores en las variables del workspace, después de esto, no se afectan en la simulación hasta que se empiece de nuevo (a menos que la caja de diálogo del parámetro de un bloque se abra y se cierre).

Luego, se clasifican los bloques en el orden en que serán actualizados. En este momento, la cadena es alineada y se detectan lazos algebraicos. La jerarquía introducida por el uso de bloques del subsistema no es útil durante la simulación. Conceptualmente, todos los subsistemas se reemplazan por los bloques que ellos

contienen. En interés por la velocidad de ejecución todos los bloques no-numéricos (las notas, los puertos, los subsistemas) se eliminan en este paso. Simulink busca un orden para actualizar los bloques.

Si un bloque depende de su entrada, produce una salida para ese momento, ese bloque no debe actualizarse hasta después de que el bloque que maneja su entrada se haya actualizado. Un lazo algebraico es un lazo de un bloque, dónde el final de éste depende de su propia salida para producirse ésta. En este caso, deben realizarse las iteraciones a cada paso para resolver un conjunto de ecuaciones algebraicas.

Finalmente, se verifican las conexiones entre los bloques para asegurar que la longitud del vector de salida de cada bloque sea igual que la entrada esperada por el bloque operador.

Después de que las estructuras de datos se construyen, la simulación está lista para ser realizada. Los modelos son simulados usando integración numérica. Cada una de las fuentes integradoras (para los algoritmos de simulación) depende de la habilidad del modelo de simulink, el cuál es una función S que proporciona las derivadas de todos los estados de ese modelo. El cálculo de estas derivadas es un proceso de dos pasos. Primero, la salida de cada bloque es calculada en el orden determinado durante la inicialización. Un segundo paso en el cual cada bloque calcula su derivada con respecto al tiempo, sus entradas y sus estados. El vector derivativo resultante se devuelve al integrador que lo usa para calcular un nuevo vector de estado. Cuando un nuevo vector de estado es calculado, el bloque de muestreo de datos y la pantalla son actualizados.

Simulink contiene una gran diversidad de bloques para diferentes aplicaciones, concentrados en bibliotecas. Las bibliotecas de bloques se despliegan cuando el comando de simulink se ejecuta y estas son generadas por un archivo mdl. La biblioteca simplemente es un modelo que contiene un tipo de cada bloque, agrupado por una función.

Esto es igual para cualquier modelo ya establecido y para cualquier otro que se construya. Simulink tiene ocho bibliotecas de bloques diferentes, las cuales se mencionan a continuación:

- **Sources.** La cual contiene bloques de fuentes de excitación como constantes, generador de señales, señal escalón, señal rampa, ondas senoidales, generador de pulsos, señales de reloj, datos desde un archivo o desde el workspace, etc.

- **Sinks.** A esta biblioteca pertenecen los bloques de despliegue de resultados, gráficos y numéricos, así como bloques que salvan las salidas en un archivo de datos o bien en el workspace.
- **Discrete.** Esta biblioteca agrupa bloques en tiempo discreto, de espacio de estado en tiempo discreto, funciones de transferencia y filtros entre otros.
- **Linear.** Los bloques que se encuentran en esta biblioteca son de ganancia, sumadores, integradores, derivadores, etc., de respuesta lineal.
- **Non_linear.** Corresponden a esta biblioteca bloques de respuesta no lineal como de funciones trigonométricas e hiperbólicas, operadores relacionales y lógicos, etc.
- **Connections.** A esta biblioteca se vinculan bloques de puertos de conexión de entrada y salida, subsistemas, multiplexores, demultiplexores, de condiciones iniciales, etc.
- **Demos.** Contiene archivos de programas demostrativos que explican en forma clara y sencilla como se utilizan los recursos de MATLAB, toolboxes, simulink, etc.

La mayoría de los bloques de simulink proporcionan una caja de diálogo de parámetros. Estas cajas de diálogo tienen elementos en común, los cuales se listan a continuación [20]:

- El nombre y tipo del bloque aparecen en la esquina superior izquierda.
- Debajo del título hay una descripción breve del bloque.
- Cada campo es etiquetado con el nombre del bloque.
- En la parte inferior central de la caja de diálogo del bloque hay un renglón de cuatro botones etiquetados como *actualizar*, *anterior*, *cancelar* y *aceptar*; generalmente. Seleccionando actualizar se actualiza el valor del campo indicado. Oprimiendo el botón anterior se revierten todos los cambios de valores de los parámetros anteriores a sus valores en el momento en que la ventana fue abierta. La opción cancelar pierde cualquier cambio hecho cuando la ventana fue abierta y se cierra la ventana de diálogo. Oprimiendo el botón aceptar, se aceptan los parámetros y se cierra la caja de diálogo.

Simulink guarda las cadenas introducidas en estos campos y los pasa a MATLAB para su evaluación cuando una simulación se inicie. Si se usan las variables de MATLAB, la simulación usa los valores que existen en el workspace al principio de la

simulación (qué no necesariamente son iguales que cuando las variables se introducen en los campos de la caja de diálogo).

Si una simulación se está ejecutando y un parámetro se cambia, MATLAB evalúa el parámetro en cuanto el indicador deje la región de texto de edición.

El toolbox de lógica difusa está diseñado para trabajar de manera conjunta con Simulink, Una vez que se ha creado un sistema difuso que usa las herramientas de GUI y se está listo para simularlo.

Para construir sistemas propios en simulink que usan la lógica difusa, simplemente se copia el bloque del controlador de lógica difusa fuera de este sistema o cualquiera de los otros sistemas de simulink disponible en el toolbox y, se coloca en un diagrama de bloques. También se puede abrir el sistema de simulink llamado fuzblock, que contiene el bloque del controlador de lógica difusa. Debe asegurarse que es sistema de inferencia difusa (FIS) y su correspondiente matriz del sistema difuso estén en el workspace de MATLAB y que se refiera a ellos, por su nombre, en la caja de dialogo asociada con el bloque del controlador de lógica difusa

CAPÍTULO 3. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

Se describe al proceso tanto como es posible, planteando las expresiones de balance de masa y energía, a fin de obtener el modelo matemático que pueda describirnos el comportamiento del sistema. Se simula el reactor a lazo abierto, utilizando Simulink de Matlab que es un sistema de programación muy eficiente y práctico, con el objeto de conocer el comportamiento del sistema y obtener generalizaciones que ayuden al diseño del controlador difuso.

3.1 Generalidades acerca de los reactores CSTR

Con la finalidad de conocer el sistema a estudiar con mayor detalle, es necesario describirlo tanto como sea posible, principalmente porque no se trata de un sistema simple.

Un reactor CSTR es un recipiente dotado de agitación, y de una chaqueta de enfriamiento para controlar el calor generado por la reacción, mediante la adición de un líquido para el enfriamiento, como se muestra en la Figura 3.1. Este sistema puede operar en fase líquida y en fase gaseosa. Particularmente el reactor bajo estudio operará en fase líquida.



Figura 3.1 Reactor típico de flujo continuo y agitado de mezcla completa “CSTR”

En la Figura 3.1, se observan detalles del interior del reactor, tales como el sistema de agitación, la chaqueta de enfriamiento, los conductos de alimentación y su forma geométrica.

Ahora bien, para mayor claridad, en la Figura 3.2 tenemos una representación esquemática de la operación del reactor. En ella se muestra además, las líneas de alimentación y salida de los reactivos y productos, así como las corrientes del flujo de enfriamiento. Se considera un mezclado perfecto para el reactor, por lo que es un sistema de parámetros concentrados

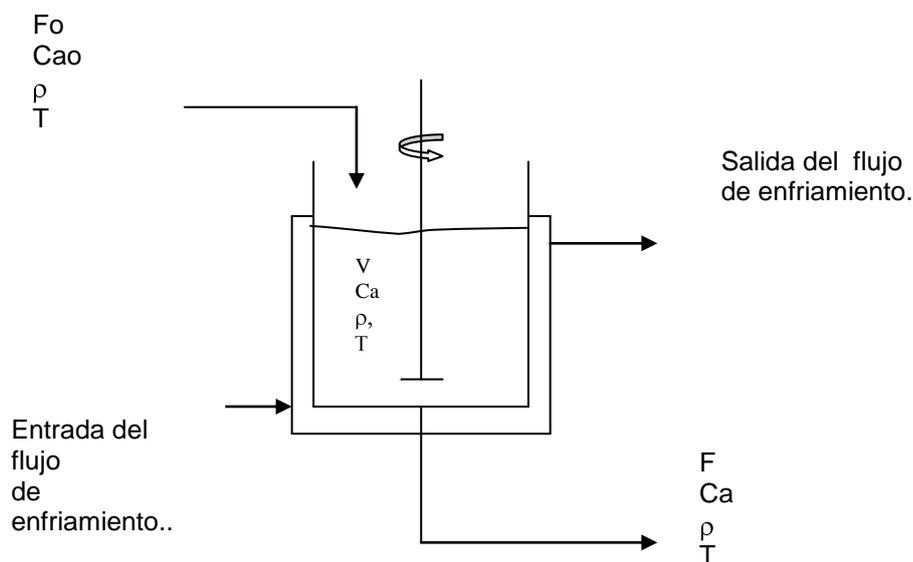


Figura 3.2 Esquema del reactor CSTR

Una de las principales aplicaciones prácticas de éstos reactores son: producción de etilen glicol, producción de propilen glicol y descomposición de peróxido de hidrógeno entre otros.

Para este trabajo se ha considerado el caso de una reacción de primer orden irreversible y exotérmica, en un reactor perfectamente mezclado con flujo continuo no isotérmico y con la posibilidad de que el volumen de la mezcla de reacción cambie durante el proceso.

3.2 Modelo matemático del CSTR

Para saber el comportamiento de estos equipos, se necesita establecer un modelo matemático.

Las bases para la construcción de los modelos matemáticos son: las leyes básicas de la física y de la química, en combinación como las leyes de la conservación de masa, energía y momentum expresado en forma de una ecuación diferencial

Considerando la densidad constante durante todo el proceso, tenemos que la expresión de balance total de masa, esta determinada por la ecuación 3.1.

$$\frac{dV}{dt} = F_o - F \quad (3.1)$$

Donde:

V = Volumen de la mezcla de reacción en m³.

F_o = Flujo de entrada al reactor en m³/hr.

F = Flujo de salida del reactor en m³/hr

La expresión para el balance molar por componentes es:

$$\frac{d(VCa)}{dt} = F_o Ca_o - F Ca - V k Ca \quad (3.2)$$

Donde:

Ca_o = Concentración del reactivo en la alimentación en Kmol/m³

Ca = Concentración del reactivo a la salida del reactor en Kmol/m³

k = Constante específica de velocidad de reacción hr⁻¹

t = Tiempo

El balance molar por componentes, tiene como variables la concentración a la salida del reactor, el volumen y la temperatura. Es por ello que las dos primeras variables han quedado dentro del operador de derivación.

En tanto que para el balance de energía del reactor continuo, se toma en cuenta un término de generación de calor, ya que es una reacción exotérmica, un término para la adición de calor en la alimentación, un término para la pérdida de calor por la corriente de salida de productos y la pérdida de calor por la chaqueta de enfriamiento, además del termino de acumulación de energía.

Para la expresión de balance de energía, se han establecidos las siguientes suposiciones:

- La densidad es constante durante todo el proceso
- La entalpía molar parcial del componente "i" solo depende de la temperatura
- No hay variación considerable en la capacidad calorífica.
- La energía cinética y potencial son muy pequeñas y no se tomarán en cuenta.
- El tanque de reacción esta perfectamente mezclado.

- El reactor esta perfectamente aislado.

Así se tiene la ecuación 3.3 para el balance de energía en la mezcla de reacción.

$$\rho C_p \frac{d(VT)}{dt} = \rho C_p (F_o T_o - FT) + Q - \lambda V k C_a \quad (3.3)$$

Donde:

- ρ = Densidad de la mezcla de reacción en Kg/m³
 C_p = Capacidad calorífica de la mezcla de reacción en J/Kg^oK
 Q = Calor de enfriamiento J/hr
 T = Temperatura de operación dentro de la mezcla de reacción en ^oK
 T_o = Temperatura de la alimentación al reactor en ^oK
 k = Constante específica de velocidad de reacción en h⁻¹
 λ = Calor de reacción en J/Kmol

Como el volumen del reactor y la temperatura de reacción no son constantes quedarán formando parte de la derivada.

Por otra parte, para remover el calor, se utilizará una chaqueta de enfriamiento alrededor del reactor, con una superficie de transmisión de calor constante y un coeficiente global de transmisión de calor dado. Por lo que el calor removido del reactor será obtenido por la ecuación 3.4.

$$Q = UA_H (T - T_j) \quad (3.4)$$

Donde:

- U = Coeficiente global de transmisión de calor en J/hrm² ^oK.
 A_H = Área de transferencia de calor en m².
 T_j = Temperatura promedio del flujo de enfriamiento en ^oK.

Sustituyendo en la ecuación.3.4 dentro de la 3.3 y dividiendo entre ρC_p se tiene:

$$\frac{d(VT)}{dt} = F_o T_o - FT + \frac{UA_H (T - T_j)}{\rho C_p} - \frac{\lambda V k C_a}{\rho C_p} \quad (3.5)$$

La ecuación 3.5 es la expresión de balance de energía de la mezcla de reacción y es una ecuación diferencial ordinaria no lineal.

Básicamente las no linealidades son: el producto de dos variables y la expresión de Arrhenius para el cálculo de la constante específica de velocidad de reacción.

Por último si se realiza un balance de energía para la chaqueta de enfriamiento y procediendo de forma muy similar a la ecuación anterior, excepto que ahora, no se tiene el término de generación, la expresión toma la siguiente forma:

$$\frac{dT_j}{dt} = \frac{F_j(T_{j_0} - T_j)}{V_j} + \frac{UA_H}{\rho_j V_j C_j} (T - T_j) \quad (3.6)$$

Donde:

- T_{j_0} = Temperatura a la entrada del fluido de enfriamiento °K.
- V_j = Volumen de la chaqueta de enfriamiento en m^3 .
- ρ_j = Densidad del fluido de enfriamiento en Kg/m^3 .
- C_j = Capacidad calorífica del fluido de enfriamiento en $J/Kg \text{ } ^\circ K$.
- F_j = Flujo del fluido de enfriamiento en m^3/hr .

La dependencia de la velocidad de reacción con la temperatura se expresa a través de la ecuación de Arrhenius.

$$k = \alpha e^{-E/RT} \quad (3.7)$$

Donde:

- α = Factor de frecuencia hr^{-1} .
- E = Energía de activación en $J/K \text{ mol}$.
- R = Constante de los gases ideales en $J/K \text{ mol } ^\circ K$.

De acuerdo a todas las suposiciones establecidas y guardando las proporciones relativas, el planteamiento matemático del sistema bajo estudio, se ha logrado construir un modelo, lo bastante aproximado a una situación de aplicación en la práctica industrial.

Por lo tanto el modelo matemático para conocer la dinámica del sistema bajo estudio, esta dado por las ecuaciones siguientes:

$$\frac{dV}{dt} = F_0 - F \quad (3.1)$$

$$\frac{d(n_A)}{dt} = \frac{d(C_A V)}{dt} = C_{A_0} F_0 - C_A F - V k C_A \quad (3.2)$$

$$\frac{d(TV)}{dt} = F_0 T_0 - FT - \frac{-\Delta H_R V k C_A}{\rho C_p} - \frac{U A_H}{\rho C_p} (T - T_j) \quad (3.3)$$

$$\frac{dT_j}{dt} = \frac{F_j (T_{j_0} - T_j)}{V_j} + \frac{U A_H}{\rho_j V_j C_j} (T - T_j) \quad (3.5)$$

$$k = \alpha e^{-E/RT} \quad (3.7)$$

Como no se cuenta con una solución analítica para éste modelo sin recurrir con aproximaciones, la resolución simultánea de las cuatro ecuaciones diferenciales se realizará utilizando Simulink de Matlab, aplicando un método numérico como el Runge-Kutta.

Los parámetros con los que se cuenta para operar este sistema dinámico en un cierto estado estable se reportan en la Tabla 3.1 [21]. Se han elegido éstos parámetros, por los antecedentes de estudio con se cuenta, de forma que se puedan establecer comparación entre ciertos resultados.

Estos parámetros de operación corresponden al estado estable intermedio, conocido como estado meta estable.

Con el objeto de que sean un poco más manejables, se han utilizado las unidades de tiempo en horas, así como los moles han sido expresados en kilo - moles.

Cabe señalar, que con estos parámetros, cada ecuación del modelo se aproxima a un valor de cero, como era de esperarse para el estado estable. Todas las dimensiones están expresadas en el sistema internacional de unidades con la finalidad de estar acordes con ésta importante convención de carácter internacional.

Tabla 3.1. Valores en el estado estable para el reactor no isotérmico

VALORES PARA LAS VARIABLES EN EL ESTADO ESTABLE			PARÁMETROS		
F _s	=	1.133 m ³ /hr	V _J	=	0.109 m ³ .
Ca _o	=	8.008475 K mol A / m ³ .	E	=	69758000 J/K mol.
T _s	=	333.333 °K.	U	=	3065347.339 J/hr m ² °K.
F _{js}	=	1.413 m ³ /hr.	T _{j_o}	=	294.444 °K.
V _s	=	1.36 m ³ .	C _p	=	3139J / Kg °K.
Cas	=	3.92415 K mol A / m ³	ρ	=	800.8474458Kg/ m ³ .
T _{js}	=	330.356 °K .	α	=	7.08 * 10 ¹⁰ hr ⁻¹ .
T _{o_s}	=	294.444 °K.	R	=	8329J/K mol °K.
			A _H	=	0.109m ² .
			λ	=	-69758000 J/Kmol.
			C _j	=	4185 J/Kg °K.
			ρ _j	=	997.855932 Kg/ m ³
			T ^{set}	=	333.333 °K

3.3 Análisis de la estabilidad de los reactores CSTR

Es común, que para conocer los múltiples estados estables en este tipo de reactores se grafica el calor de reacción y el calor de eliminación en función de la temperatura. Para el sistema en estudio, se tiene el comportamiento que se muestra en la Figura 3.3. El estado intermedio de “estabilidad” es en realidad inestable para estos sistemas. Cualquier cambio que se presente en la alimentación al reactor hará que la forma y posición de éstas curvas sean modificadas. Algunos valores del estado estable incluso podrían desaparecer. Por ejemplo una perturbación en el flujo de enfriamiento, en la temperatura de alimentación, en el flujo de alimentación de materia prima, y variación del coeficiente global de transmisión de calor entre

otras perturbaciones, provocan que el sistema se vea afectado cambiando las condiciones de normales de trabajo.

Así, en la Figura 3.3 se observa el comportamiento del reactor, y el estado meta estable se localiza a los 333.333 °K, mientras que el estado inferior y el superior de estabilidad se alcanzan a una temperatura de 298 °K y 362 °K respectivamente. Cualquiera de los factores que se han señalado pueden ocasionar que se alcancen los estados inferior o superior, pero el intermedio no se podrá sostener por si solo, a menos que se adicione un sistema de control.

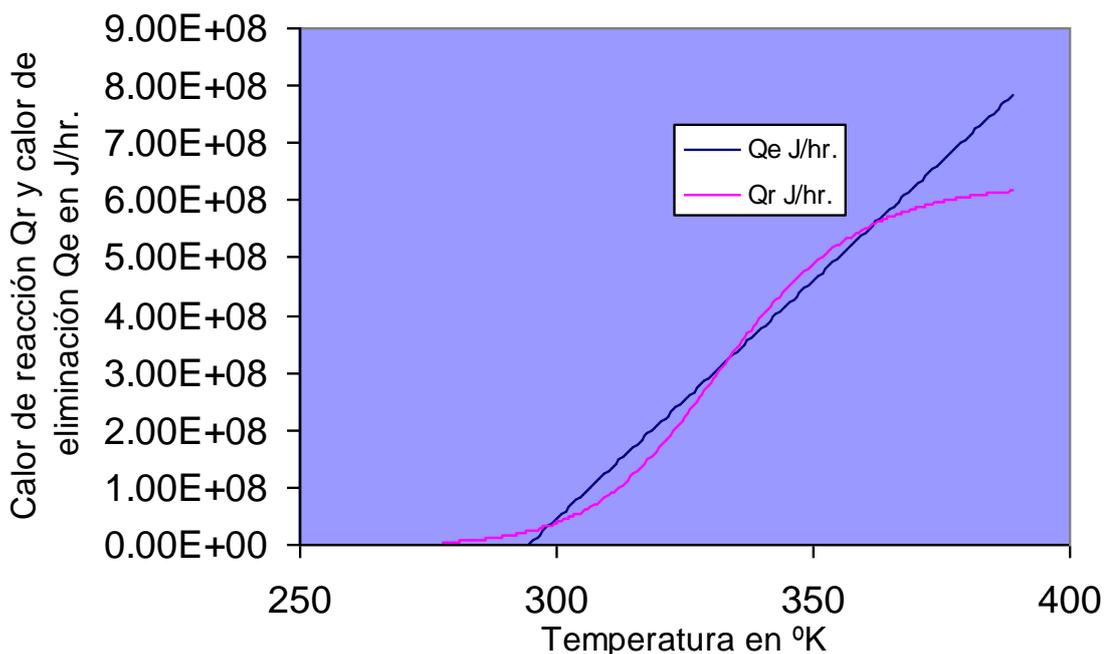


Figura 3.3 Calor eliminado y calor de reacción en función de la temperatura para el CSTR

En la Tabla 3.2 se reportan los tres estados estables para el CSTR bajo estudio.

Tabla 3.2 Estados estables para el reactor CSTR.

Estado inferior de estabilidad.	Estado intermedio de estabilidad.	Estado superior de estabilidad.
T = 298.425 °K	T = 333.333 °K	T = 361.7 °K
Ca = 7.590 Kmol/m ³	Ca = 3.92 Kmol/m ³ .	Ca = 0.947 Kmol/m ³
Tjo = 298.12 °K	Tjo= 294.444 °K	Tjo = 356.5 °K.

3.4.-Comportamiento del “CSTR” en lazo abierto

Con el propósito de conocer como se comporta dinámicamente el sistema bajo estudio, y que éste conocimiento sea útil para el diseño del controlador basado en lógica difusa, se procederá a simularlo por computadora utilizando Simulink de Matlab.

En la Figura 3.4 vemos un diagrama enmascarado en Simulink del proceso a lazo abierto para el reactor CSTR.

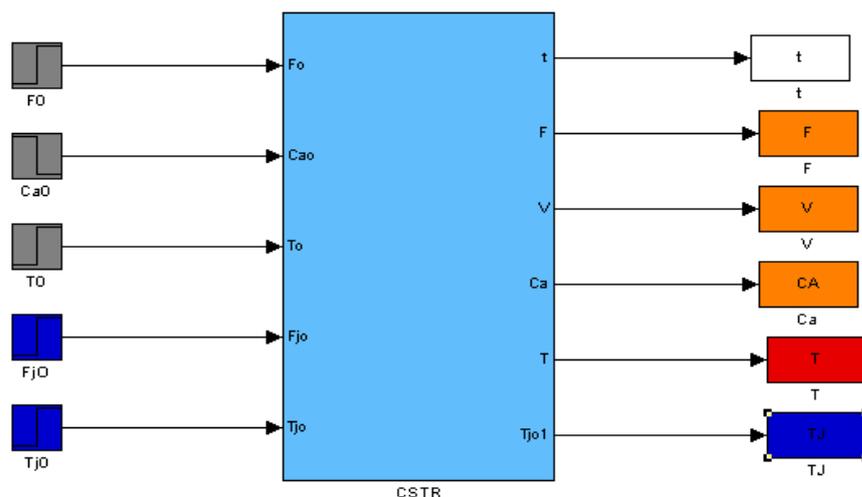


Figura 3.4 Diagrama de la programación en Simulink a lazo abierto del CSTR

En la Figura 3.4, se muestra, que es posible generar diversos cambios a las variables de entrada al reactor, tales como: el flujo de alimentación de reactivos “Fo”, la concentración de la alimentación “Cao”, la temperatura de alimentación de reactivos “To”, el flujo del fluido de enfriamiento Fjo y la temperatura del flujo del fluido de enfriamiento Tjo, que son los bloques de la izquierda, y así, conocer como responde el reactor bajo estos cambios. Para ello es necesario graficar la respuesta de las variables de salida, tales como: el flujo de salida de la mezcla de reacción “F”, la temperatura en el flujo de salida de la mezcla de reacción “T”, la concentración de los reactivos a la salida del reactor “Ca”, el comportamiento en el volumen de la mezcla de reacción “V” y la salida de del fluido de enfriamiento “Fj”.

El comportamiento de las respuestas y su magnitud a lazo abierto, es valioso para un controlador basado en la lógica difusa, ya que el controlador necesita del conocimiento de la dinámica del sistema a controlar, con el objeto de establecer las reglas base del conocimiento y del universo de discurso más acorde con el sistema bajo análisis.

Así por ejemplo, para el control del volumen es necesario conocer la dinámica del reactor bajo ciertos cambios que lo afecten, como el flujo de alimentación de reactivos “ F_o ”, ver la Figura No. 3.5. Un aumento en el flujo de alimentación de $0.085 \text{ m}^3/\text{hr.}$, hará aumentar el volumen del reactor hasta 1.57 m^3 , lo que representa 0.218 m^3 por arriba del punto de referencia. Para una disminución del flujo de $-0.085 \text{ m}^3/\text{hr}$ el volumen disminuirá hasta 1.18 m^3 , lo que equivale a disminuir 0.180 m^3 por abajo del punto de referencia.

Como primera generalización a este cambio, se tiene una proporcionalidad directa entre el flujo de alimentación y el volumen del reactor, lo que lingüísticamente es posible expresar de la siguiente forma: Si el flujo en la alimentación “ F_o ” aumenta, entonces el volumen “ V ” del reactor aumenta. Como segunda observación bajo este tipo de cambios es, que la magnitud del universo de discurso y con ello se puede definir el rango de operación para cada cambio, ver la Figura 3.5.

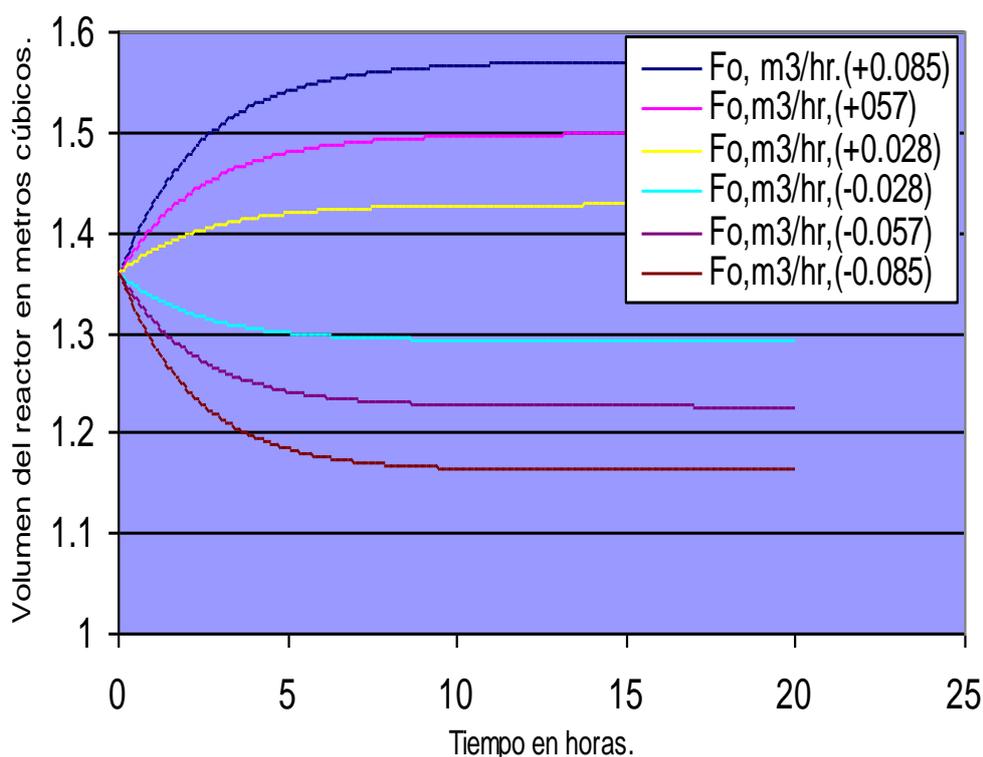


Figura 3.5 Respuesta del volumen del reactor a un cambio en el flujo de alimentación “ F_o ”

Por ejemplo para estos cambios el universo de discurso máximo será de 0.390 m^3 . Si los cambios son menores o mayores, se podrá en todos los casos

determinar el universo de discurso, el cual también será menor o mayor dependiendo de la magnitud del cambio.

Con ésta información tenemos ya algunos de los lineamientos para diseñar el controlador difuso para el volumen, bajo diversos cambios en el flujo de la alimentación. Desde luego que esta Figura 3.5, solo muestra algunos cambios de una gran cantidad de cambios y simulaciones realizadas.

En cuanto al diseño del controlador de temperatura se han generado diversos cambios a las perturbaciones, que, como sabemos afectan a la temperatura de forma importante en el desarrollo de una reacción química.

Tanto la respuesta dinámica del reactor a esos cambios, como el orden de magnitud de los valores de la temperatura, son sumamente valiosos para el diseño del controlador difuso. Como primer cambio o perturbación al sistema se tiene la variación en la temperatura en la alimentación de reactivos, ver Figura 3.6.

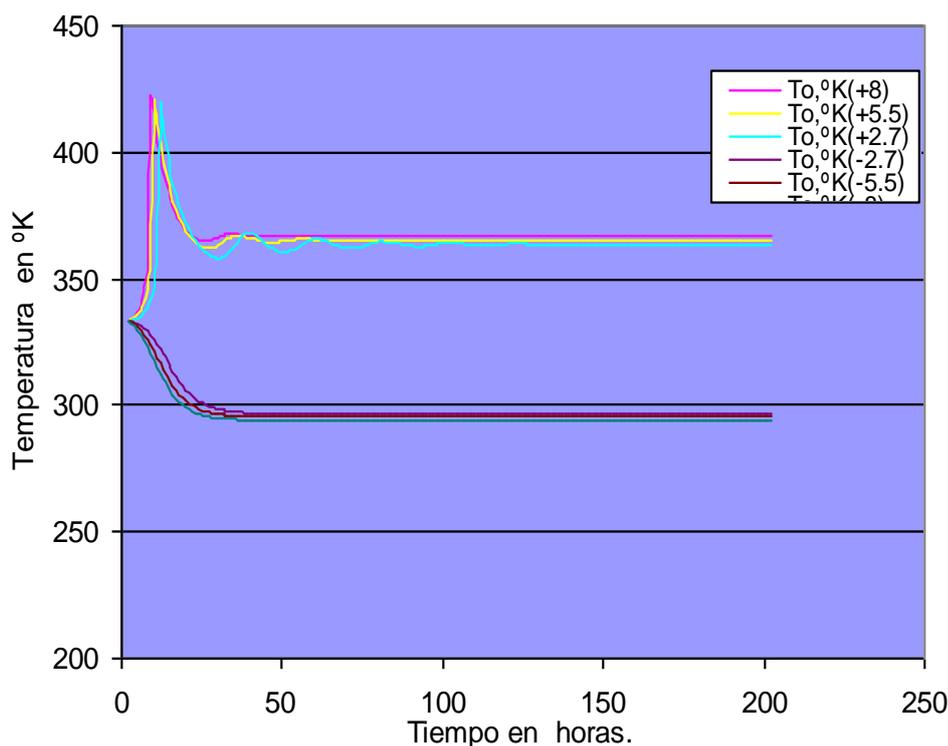


Figura 3.6 Respuesta de la temperatura del reactor “T” a un cambio en la temperatura de la alimentación del reactor “To”.

De acuerdo a lo que se observa en la Figura 3.6, lingüísticamente se puede expresar el comportamiento de la temperatura del reactor de la forma siguiente “Si la temperatura de alimentación “To” aumenta entonces la temperatura a la salida del reactor “T” aumenta mucho”, recordando que para la lógica difusa es muy

importante la tendencia del comportamiento, por eso, el mismo creador la llamo la computación con percepciones.

Por otra parte, lingüísticamente también es posible expresar que, si la temperatura de alimentación “ T_0 ” disminuye entonces la temperatura a la salida del reactor “ T ” disminuye mucho.

La temperatura de la mezcla de reacción dentro del reactor “ T ”, a tenido un valor máximo de 425 °K y un valor mínimo de 297 °K. Esto representa una variación entre estos dos estados de 128 °K, variación que deberá ser tomada en cuenta para definir el universo de discurso para éste controlador.

Si fuera mayor el aumento en la temperatura en la alimentación, es claro que este universo de discurso deberá ser mayor, por lo que se ha establecido, en base a numerosas pruebas que un universo de discurso 400 °K da buenos resultados y tiene una considerable holgura para soportar perturbaciones más pronunciadas.

Una variación pequeña en la concentración, afecta aún más a la temperatura del reactor, y para estas variaciones se necesitará que el universo de discurso sea aún mayor que con los cambios del flujo o temperatura en la alimentación. Así, si se realizara un cambio en la concentración a la entrada de los reactivos, obtendremos el comportamiento de la temperatura que se muestra en la Figura 3.7

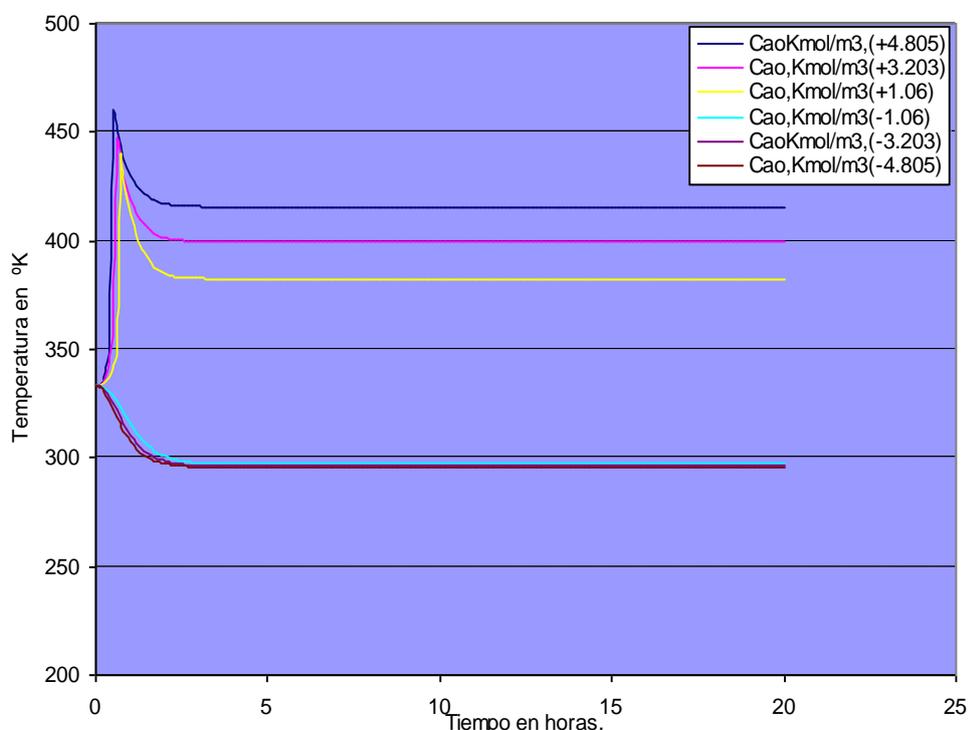


Figura 3.7 Respuesta de la Temperatura del reactor “ T ” a un cambio en la concentración en la alimentación “ C_{ao} ”

De ésta Figura 3.7 se desprende que: si la concentración en la alimentación “ C_{ao} ” aumenta, la temperatura a la salida del reactor “ T ” aumenta mucho, y que si la concentración en la alimentación “ C_{ao} ” disminuye, entonces la temperatura a la salida del reactor “ T ” disminuye mucho.

En la Figura 3.7, el valor máximo de la temperatura a la salida del reactor “ T ” es de 480°K a un cambio 60% en la concentración de la alimentación “ C_{ao} ”. Para una disminución en la concentración en la alimentación, todos los valores de la temperatura tienden a un el valor mínimo es de 297 °K.

En tanto que una respuesta semejante a las anteriores, se tiene cuando se presenta un cambio en el flujo de alimentación de reactivos, ver Figura 3.8.

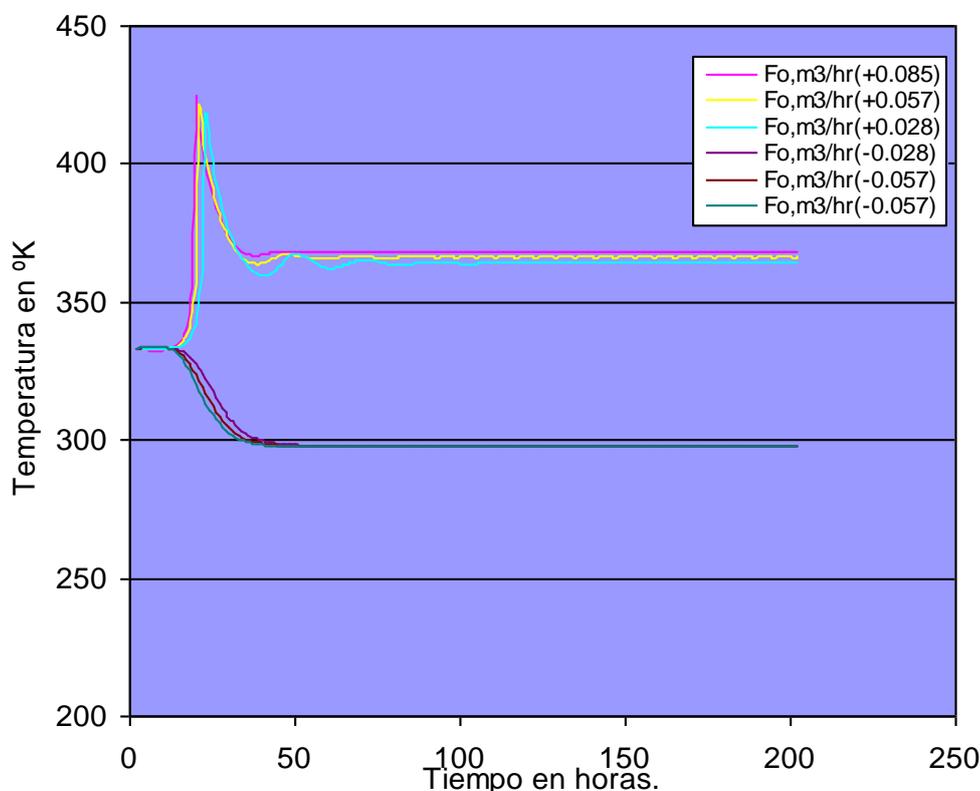


Figura 3.8 Respuesta de la Temperatura del reactor “ T ”, a un cambio en el flujo en la alimentación de reactivos “ F_o ”

La expresión lingüística ente este cambio puede ser enunciada como “si el flujo de alimentación de reactivos “ F_o ” aumenta, entonces, la temperatura a la salida del reactor “ T ” aumenta”, de forma similar que cuando se tienen los cambios en T_o y C_{ao} .

Cuando al reactor se alimenta con mayor cantidad de materia prima, la concentración aumenta y por lo tanto la velocidad de reacción junto con la

temperatura del sistema también aumentan. La máxima temperatura que se alcanza para estos cambios es de 425°K y como temperatura mínima se tienen 297 °K, dando como resultado un universo de discurso de 120 °K. Obviamente que si el flujo de alimentación aumentara, el universo de discurso también será mayor.

Así mismo, para un cambio en el fluido de enfriamiento se presenta la respuesta de la Figura 3.9. Nuevamente es semejante el comportamiento a los anteriores cambios.

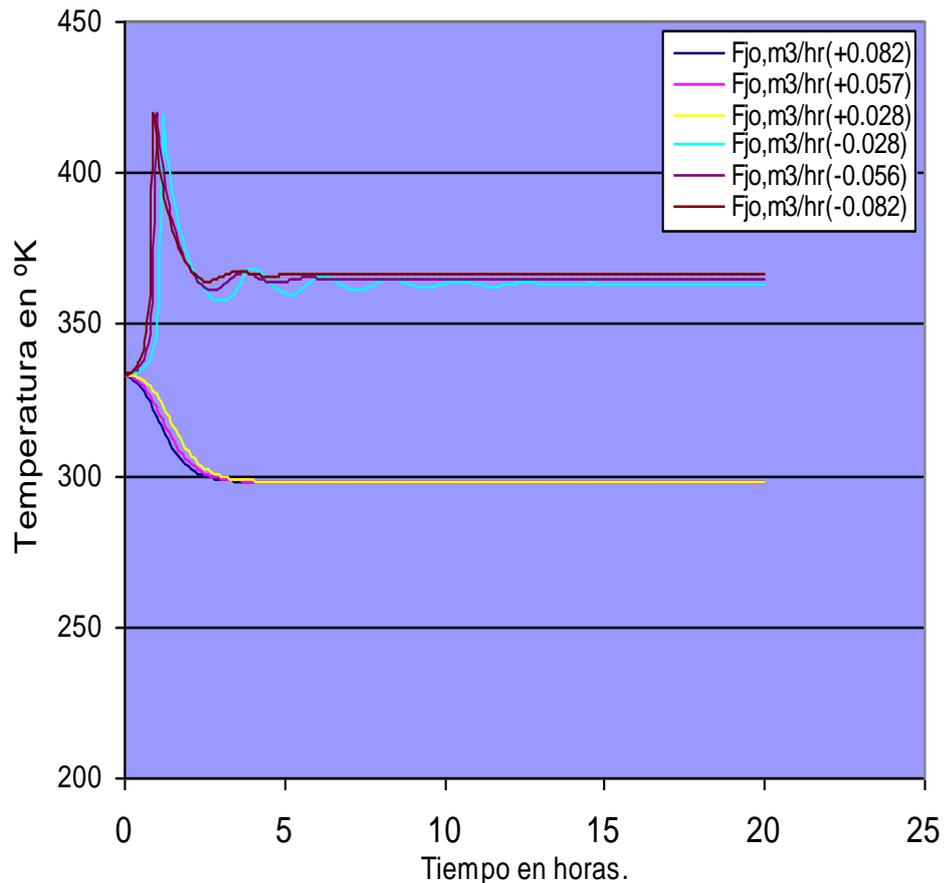


Figura 3.9 Respuesta de la temperatura del reactor “T” a un cambio en el flujo de enfriamiento “Fjo”

La expresión lingüística para estos cambios tendrá la siguiente forma: Si el flujo de enfriamiento aumenta “Fjo”, entonces la temperatura del reactor “T” “disminuye. Su relación ahora es inversamente proporcional.

El universo de discurso también puede ser establecido con la diferencia en los valores mínimo y máximo en la respuesta de la temperatura de la Figura 3.9. Pareciera un poco repetitiva la forma de llegar a estas conclusiones pero son determinantes, por muy sencillas que parezcan.

Por último, un cambio en la temperatura del fluido de enfriamiento “ T_{jo} ” se presenta el mismo patrón de respuestas para los cambios de “ T_o ,” “ Cao ” y “ Fo ”, ver la Figura 3.10.

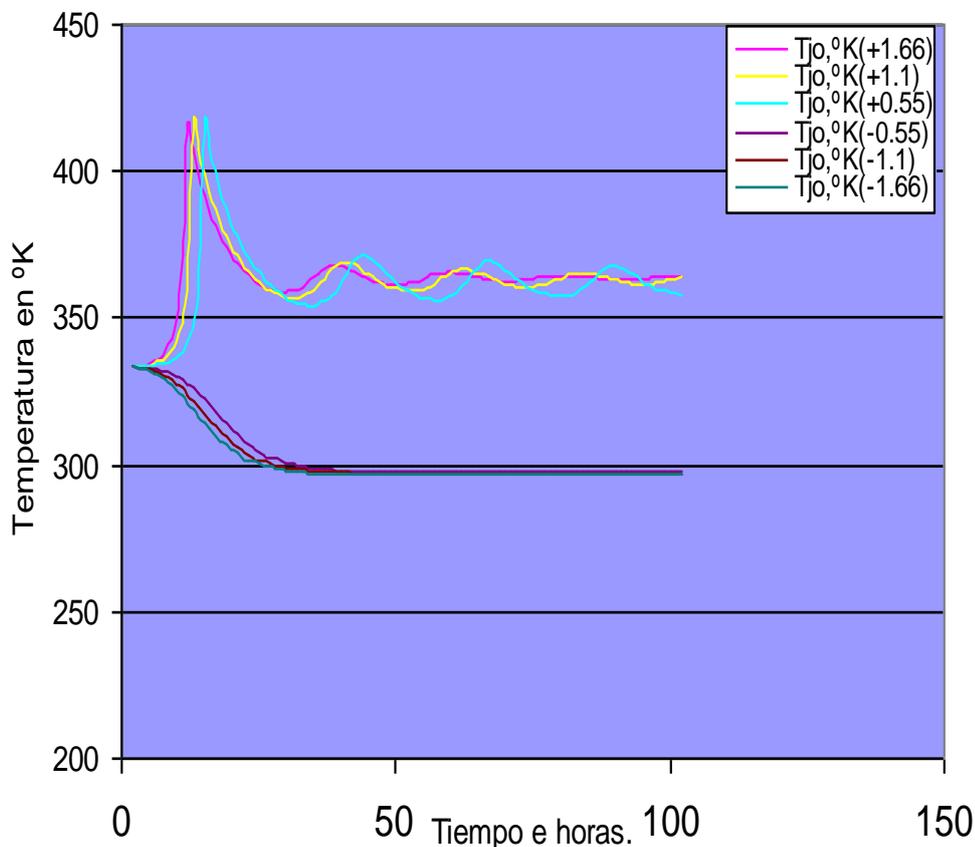


Figura 3.10 Respuesta de la temperatura del reactor “ T ”, a un cambio en la temperatura del flujo de enfriamiento “ T_{jo} ”

Las expresiones lingüísticas para los cambios de la Figura 4.10, se definen de la siguiente forma: “si la temperatura en el fluido de enfriamiento “ T_{jo} ” aumenta entonces la temperatura a la salida del reactor “ T ” aumenta y si la temperatura a la entrada del fluido de enfriamiento “ T_{jo} ” disminuye, entonces la temperatura a la salida del reactor “ T ” disminuye. Prácticamente el reactor tiene un comportamiento similar en todos estos cambios que ayuda a definir el universo de discurso en cada caso.

Como un análisis adicional, y del programa en Simulink del CSTR a lazo abierto, se ha determinado las necesidades de enfriamiento F_j para el reactor CSTR a partir del balance de energía del lado del condensador “chaqueta de enfriamiento”. Se ha obtenido una respuesta tendiente a conocer los requerimientos del fluido de

enfriamiento., ver la Figura 3.11. Esta tendencia ha sido posible considerando que el sistema es inherentemente inestable.

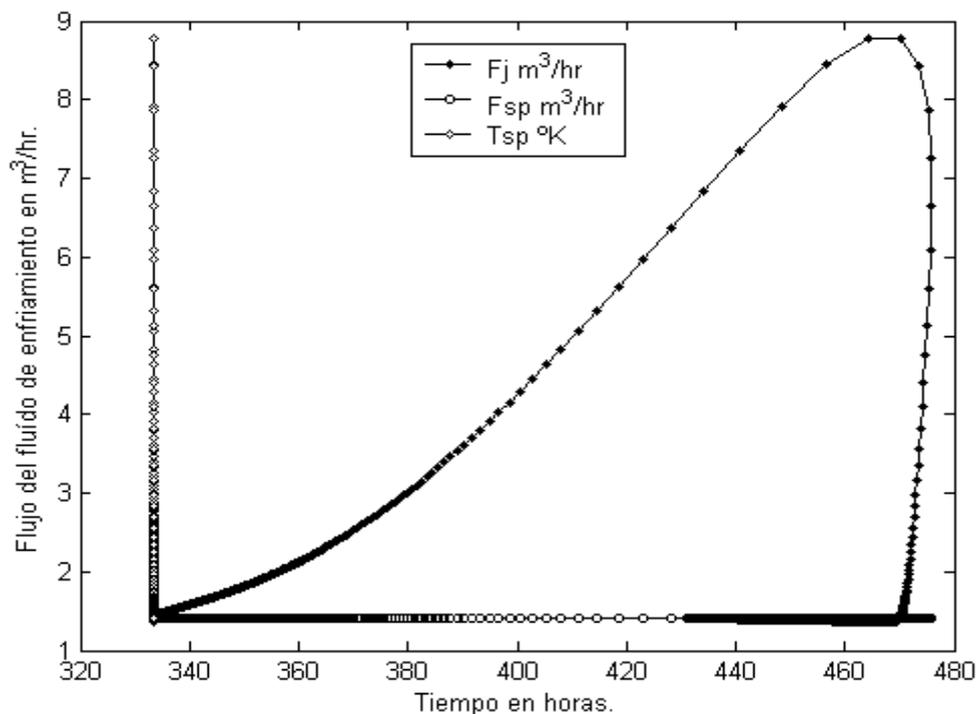


Figura 3.11 Respuesta a lazo abierto del flujo de enfriamiento, a un aumento en la concentración en la alimentación

Se observa aquí, las necesidades de enfriamiento en función de la temperatura. Con ésta curva, es posible plantear las reglas base del conocimiento con valores lingüísticos y con valores numéricos lingüísticos, para el controlador difuso de la temperatura. Sin embargo el controlador difuso puede operar con valores imprecisos y vagos, pero dentro de los rangos reales de operación y dentro de las tendencias lógicas del comportamiento del sistema bajo estudio. Por lo que la mayor aportación de la Figura 3.11 es, darnos los valores máximos de flujo del fluido de enfriamiento para el CSTR, bajo una perturbación que afecte considerablemente a la temperatura del sistema y, esta perturbación es el cambio en la concentración en la alimentación, como ya se ha mencionado. Esta Figura 3.11 establece claramente el rango más preciso del universo de discurso del flujo del fluido de enfriamiento a manejar.

Finalmente se puede decir que con esta información podemos ya establecer de manera más conciente la forma en que debemos de construir las reglas base del

conocimiento, y establecer los universos de discurso más apropiados, tanto para el controlador de temperatura como el controlador del volumen.

Al analizar este comportamiento del reactor CSTR a lazo abierto se han podido concluir varios aspectos relevantes que en resumen son:

- ❖ Si el flujo de alimentación aumenta el volumen del reactor aumenta.
- ❖ Si la Temperatura de alimentación “ T_o ” aumenta, la temperatura del reactor “ T ” a aumenta. Si la Temperatura de alimentación “ T_o ” disminuye, entonces “ T ” disminuye.
- ❖ Si la concentración de la alimentación “ C_{ao} ” aumenta, la temperatura del reactor aumenta sensiblemente hasta un valor cercano a los 450 °K.
- ❖ Si la concentración disminuye “ C_{ao} ”, la temperatura del reactor disminuye nuevamente hasta 297 °K.
- ❖ Si ahora “ F_o ” aumenta, la temperatura del reactor “ T ” también aumenta. Sin embargo relativamente el aumento es ligeramente menor que el originado por el aumento de C_{ao} .
- ❖ Si se tiene un cambio positivo en el flujo de enfriamiento el reactor tiende a bajar su temperatura hasta 297 °K y, si se presenta una disminución en el fluido de enfriamiento el reactor tenderá a subir la temperatura por arriba de los 400°K para luego estabilizarse.
- ❖ Es posible con todo ello, definir un rango de operación más acertado, que si éste es elegido sin ningún sustento, ya que con los valores máximos “450°K” y mínimos “297°K” se definen los universos de discurso o rangos de operación bajo distintos cambios.

CAPITULO 4. DESARROLLO DEL CONTROL CON LOGICA DIFUSA

En este apartado, se plantea la metodología para construir el controlador difuso, que sea capaz de lograr los objetivos de control, tanto para el control del volumen del reactor como para el control de la temperatura.

4.1- Estrategia de Control

Para la implementación del sistema de control difuso, se utilizará una estrategia de control, con dos lazos en retroalimentación. Un lazo de control corresponderá al control automático del nivel de la mezcla de reacción en el tanque, y el otro lazo de control corresponderá al control automático de la temperatura, ver la Figura 4.1

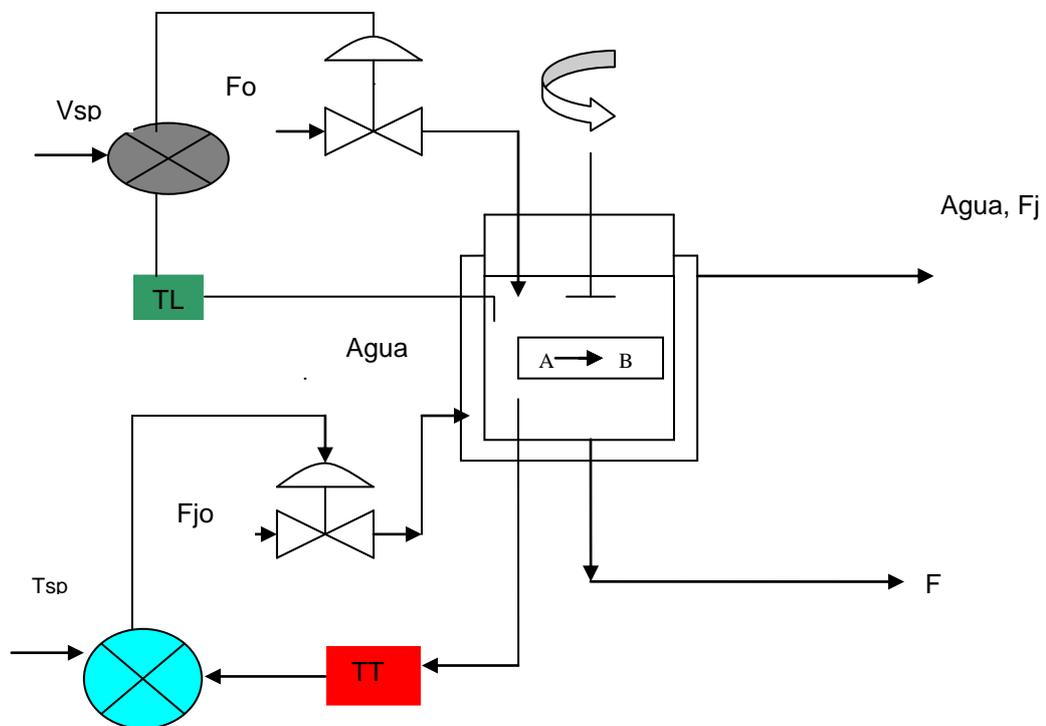


Figura 4.1 Reactor “CSTR” con dos lazos de control por retroalimentación, para el volumen y la temperatura

Para controlar el nivel, se contará con una válvula de control en la alimentación al reactor, y para controlar la temperatura, se contará con otra válvula de control instalada a la entrada del fluido de enfriamiento. Claramente se observa que los dos lazos de control interactúan.

Los dos lazos acoplados, interactúan principalmente en un sentido. Los cambios en el flujo de refrigeración o los cambios en la temperatura de entrada en la alimentación de reactivos, no afectan el volumen de reacción, pero los cambios en el

nivel del líquido, si afectan a la temperatura, a través del contenido calorífico del volumen de reacción, este es una perturbación no medida en el controlador de temperatura.

Para enlazar los dos lazos de control, se plantea una arquitectura para sistemas de control multivariable. "MIMO" por sus siglas en inglés, ver la Figura 4.2

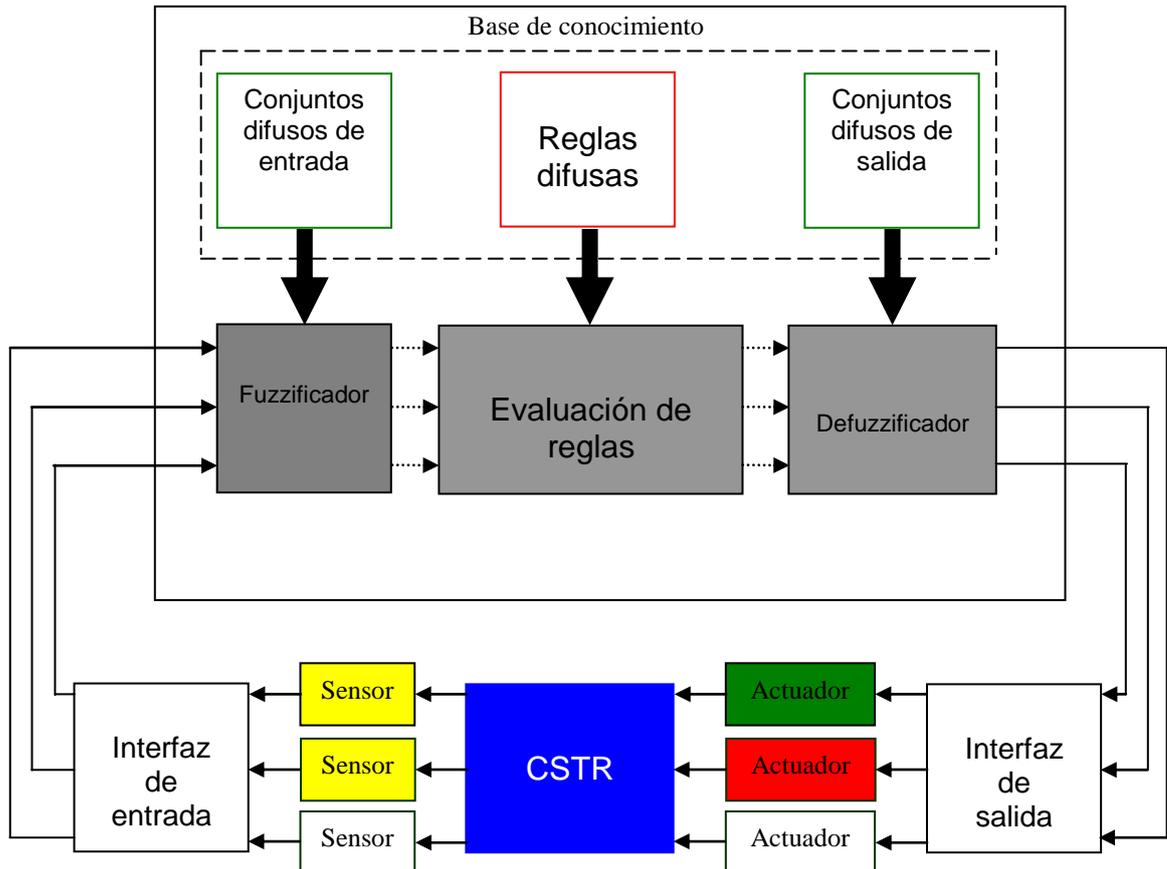


Figura 4.2. Arquitectura del sistema de control difuso (CLD). "MIMO"

En el diagrama de la Figura 4.2, se observa el camino de las señales desde que es medida la variable de control, hasta que se ejerce la acción de control a través del actuador.

En la parte superior, se presenta las diversas partes que conforman el controlador difuso. En la etapa de fuzzificación se tienen los conjuntos difusos y en la etapa de evaluación de las reglas se tiene el mecanismo de inferencia, y por último, en la etapa de defuzzificación se tienen los conjuntos difusos de salida.

La entrada al controlador es fuzzificada, y a continuación, mediante el mecanismo de inferencia y las reglas base del conocimiento, se consigue tener una conclusión sobre la mejor decisión del control para ser defuzzificada y así, ser enviada la señal al actuador. Una vez que el actuador ejerce la acción de control,

nuevamente el sensor envía la señal al controlador por medio de la interfaz de entrada, y que, de acuerdo a la variación del error, el controlador ejercerá la mejor decisión, hasta que desaparezca la desviación de la variable a controlar.

Por lo tanto, ahora es posible dotar al sistema bajo estudio de un sistema de control bajo una cierta estrategia. Dentro de la gran variedad de estrategias de control la más utilizadas es la del control por retroalimentación, y dado que, se cuenta con un modelo matemático del sistema bajo estudio, es posible simular el sistema con dos lazos de control. Uno para el control del volumen y otro para el control de la temperatura. Para ello se ha programado en Simulink de MATLAB el modelo matemático para el CSTR junto con los dos lazos de control en retroalimentación ver Figura 4.3.

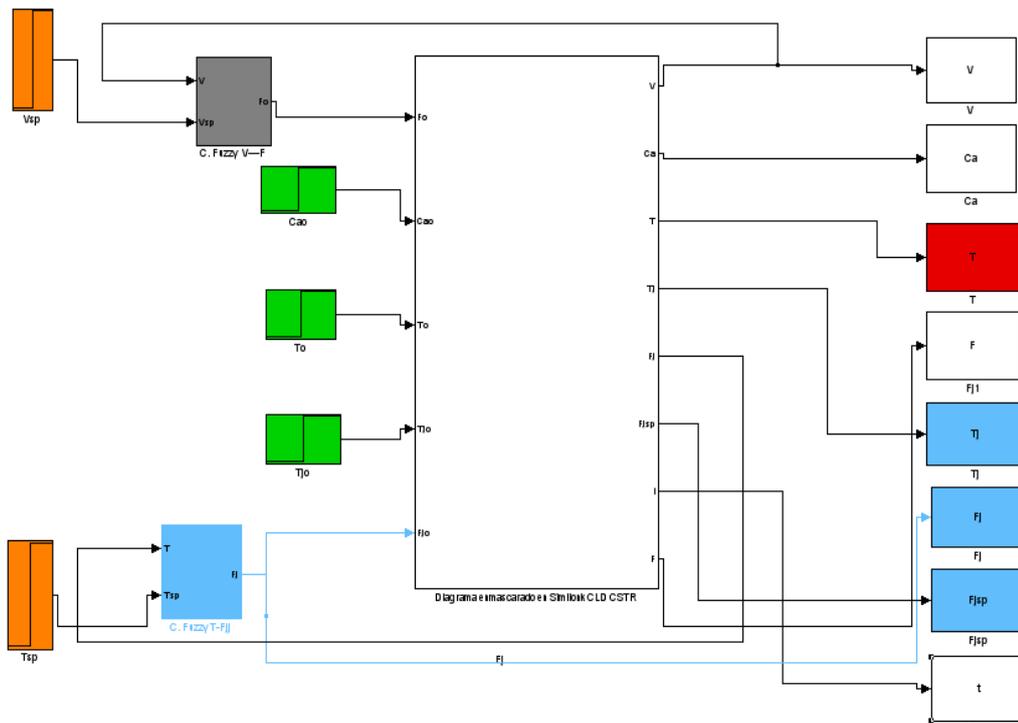


Figura 4.3 Diagrama en Simulink del CSTR con dos lazos de control

El bloque de control difuso para el volumen, esta en el lazo de control superior izquierdo, y el bloque de control difuso para la temperatura está al lado inferior izquierdo. En este diagrama, de la Figura 4.3, se generan las diferentes perturbaciones a que esta expuesto con mayor frecuencia el reactor químico, y se obtienen las respuestas de las diversas variables, tales como la temperatura y el flujo de salida. Cada una de las respuestas que se obtienen, deberán analizarse con detenimiento, para revisar si son congruentes con el comportamiento esperado.

Para mayor claridad, se muestra en la Figura 4.4, el controlador difuso proporcional, para el lazo de control de la temperatura.

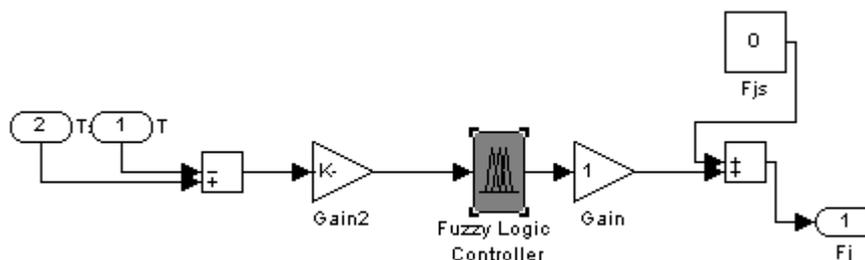


Figura 4.4 Controlador difuso proporcional para el control de la temperatura en el CSTR

Corresponde ahora, aplicar la metodología utilizada en el desarrollo del controlador difuso, tomando como base lo mencionado en el capítulo anterior.

Para el sistema de control de la temperatura se establece la siguiente metodología:

- 1.- Establecer la forma en que las observaciones del proceso se expresan en conjuntos difusos.
- 2.- Diseñar una base de reglas difusas. Describiendo primero las reglas obvias y luego las menos obvias.
- 3.- Establecer la estrategia de control difuso. Para ello se editan los puntos anteriores utilizando el toolbox de fuzzy logic de MATLAB y se obtiene la superficie de control verificando los resultados y la suavidad. Se salva la unidad de inferencia difusa en el WORKSPACE de MATLAB, para posteriormente generar su bloque (CLD) en Simulink.
- 4.- Se simula y optimiza el sistema, utilizando el modelo matemático.
- 5.- Posteriormente se prueba en la planta.

4.2 Establecimiento del controlador difuso para el reactor CSTR

1.- Para establecer la forma del controlador difuso, y como las observaciones al proceso se expresan en conjuntos difusos, es necesario definir las variables y los conjuntos difusos.

La definición de las variables, consiste en identificarlas y establecer los rangos de cada una de las variables de entrada y salida en unidades de ingeniería así como su universo de discurso, además de definir el número de funciones de

membresía o conjuntos difusos a utilizar. No existe una regla para definir el número de funciones de membresía, sólo la experiencia y el análisis en la respuesta de control deseada, dará la pauta para esta elección, ver la Tabla 4.1.

Tabla 4.1 Definición de variables, funciones de membresía y el universo de discurso

Variable	Nombre	Tipo	Universo de Discurso	Unidades de Ingeniería	Funciones de Membresía
Señal del error.	eV	Entrada	-5 a 5	M ³	5 Triangulares
Variable de control.	Fo	Salida	0.133 a 2.133	M ³ /hr	5 Gaussianas
Señal de error	eT	Entrada	-400 +400	K	7 Gaussianas
Variable de control	Fj	Salida	0.143 10.143	M ³ /hr	7 Gaussianas

La definición de los conjuntos difusos es la subdivisión del Universo de Discurso de la variable en regiones geométricas, estos pueden tener forma triangular, trapezoidal, singleton y gaussiana, entre otras y deben ser etiquetados con nombres difusos.

2.-Para la definición de las reglas difusas para el lazo de control del volumen y el control de la temperatura, se utilizarán las tendencias de variación de la temperatura y el volumen del reactor a los cambios a lazo abierto que se comentaron en el capítulo anterior. Las reglas base se puede ver en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2 Definición de las reglas difusas “base del conocimiento”

REGLA V-Fo (para el volumen)	REGLA T-Fj (para la temperatura)
1.Si eV=CE Entonces Fo=CE	1.Si eT=CE Entonces Fj =CE
2. Si eV=NG Entonces Fo=NG	2. Si eT=NP Entonces Fj=PP
3. Si eV=NM Entonces Fo=NM	3. Si eT=NM Entonces Fj=PM
4. Si eV=PP Entonces Fo=PP	4. Si eT=NG Entonces Fj=PG
5. Si eV=PG Entonces Fo=PG	5. Si eT=PP Entonces Fj=NP

4.3 Desarrollo de la estrategia de control difusa.

Recordando que los controladores difusos pretenden producir resultados “exactos” a partir de datos imprecisos, se han establecido las reglas base en términos de las variables lingüísticas.

Una vez establecido los conjuntos difusos y las reglas difusas se procede a su edición en el toolbox de fuzzy logic de MATLAB.

Las Figuras 4.5 y 4.6, muestran la estrategia de entradas y salidas que el controlador seleccionado debe de tener para el control del volumen y el control de la temperatura, utilizando el editor de entradas y salidas.

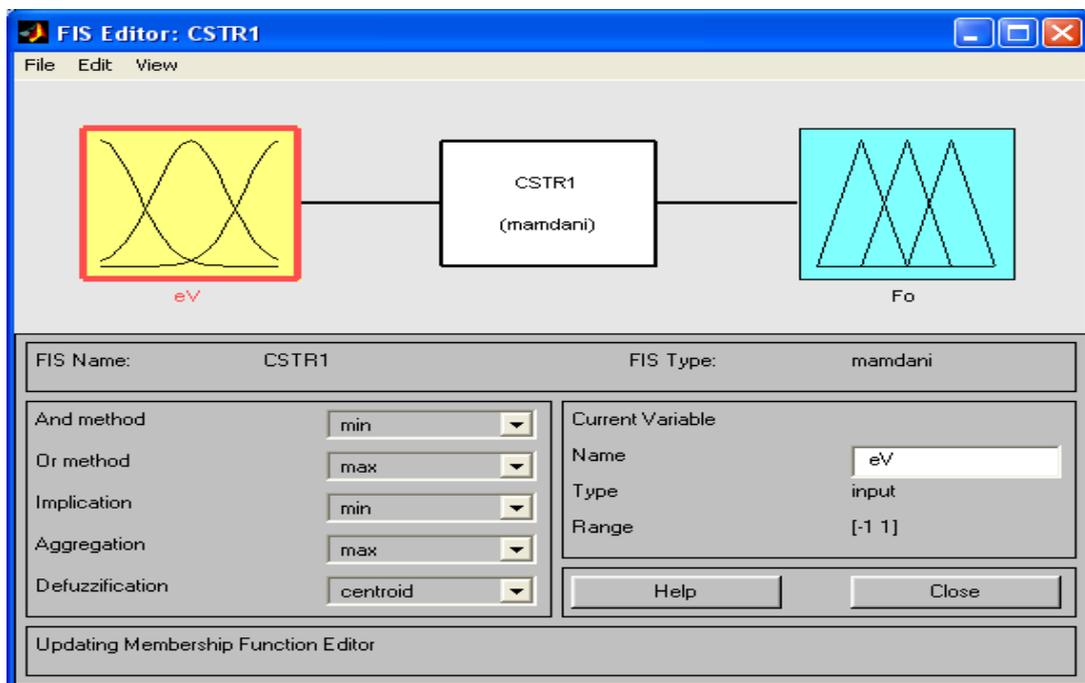


Figura 4.5 Editor de entradas y salidas al controlador difuso para el volumen del reactor

En este editor de entradas y salidas, es necesario establecer un nombre para cada una de las entradas y salidas, de acuerdo a lo que se quiera trabajar en el controlador. Por ejemplo en el caso del control del volumen, se ha elegido el error del volumen o la desviación en el volumen para la entrada y el flujo de alimentación de reactivos, para la salida.

Para elegir el tipo de funciones de membresía, conjuntos difusos y el universo de discurso entre otros parámetros de sintonización difusa, se abrirá el recuadro resaltado en rojo, de la Figura 4.5. Una vez que se ha abierto se suprimen

las funciones que se proporcionan automáticamente para establecer las que el sistema de control bajo análisis necesite.

En tanto que, el editor de funciones de membresía, para el control de la temperatura se muestra la Figura 4.6. En él se establecen los nombres de la entrada y salida del controlador.

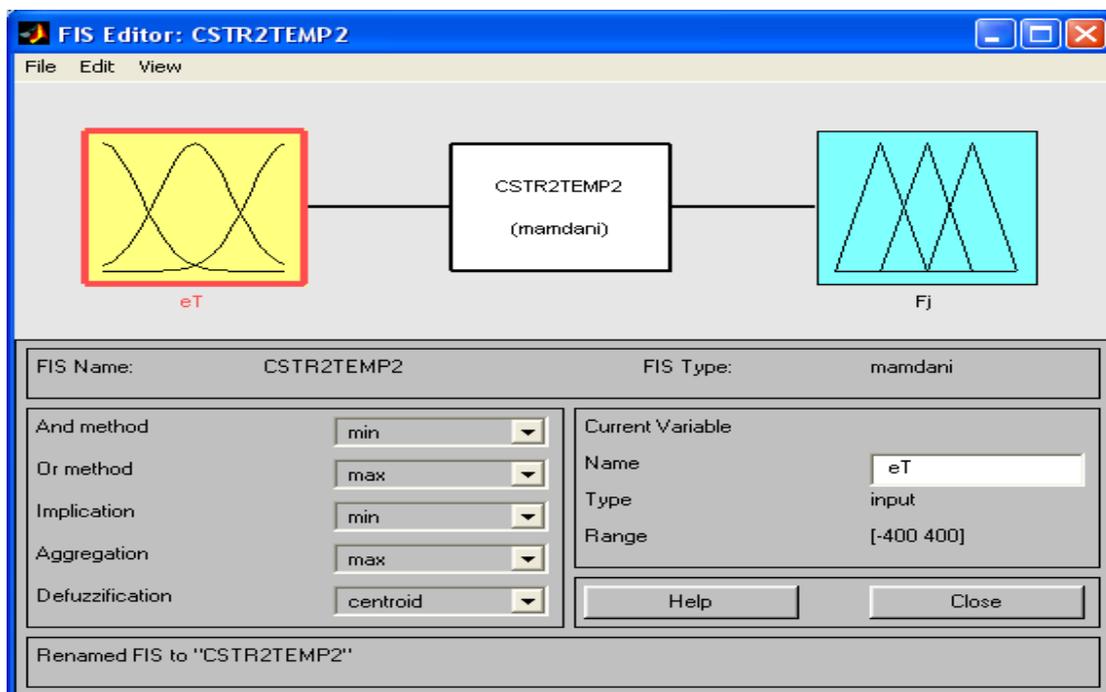


Figura 4.6 Editor de entradas y salidas al controlador difuso de la temperatura del reactor

La entrada a éste controlador, es el error en la temperatura y la salida es el flujo de enfriamiento. En necesario para este editor, establecer la notación con la que trabajará el controlador durante todo el tiempo de operación. Esta notación se establece en un recuadro ubicado a la derecha del editor como “eT”.

En el editor de entradas y salidas se aprecian y se seleccionan el tipo de reglas que se van a emplear, las que utilizan la conjunción o la disyunción, así como el método agregación y el método de defuzzificación a utilizar. También se indica el nombre del controlador, tal y como deberá asignársele cuando se una el bloque del controlador difuso junto con el proceso al que deseamos controlar, dentro de la estrategia de control en retroalimentación. La estructura tipo Mamdani es la más simple y una de las más utilizadas en el control de procesos industriales, por lo que la emplearemos dentro del controlador, tanto para el volumen como para la temperatura. Los algoritmos de inferencia están incluidos dentro del sistema de toolbox de Matlab, por lo que no es necesario programarlos.

Toca el turno, el realizar una elección muy cuidadosa del número y tipo de funciones de membresía, para ello se iniciará con uno de los controladores.

En el control del volumen, se han definido cinco funciones de membresía triangulares, ver Tabla 4.2, con sus respectivos conjuntos difusos para la entrada al controlador, ver Figura 4.7.

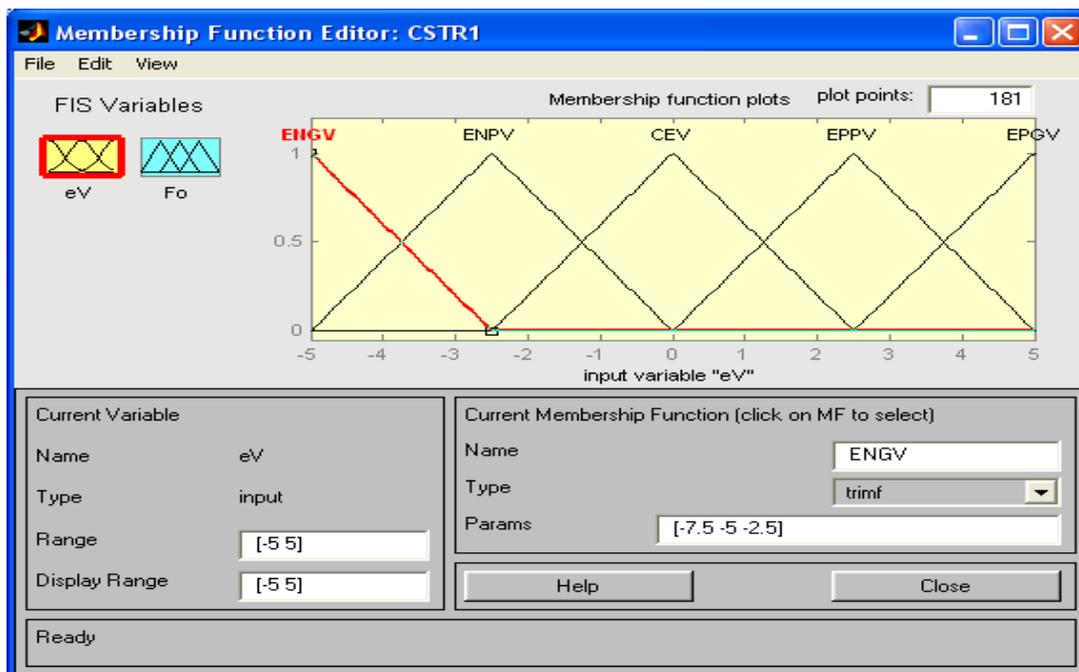


Figura 4.7 Editor de funciones de membresía para la entrada al controlador difuso en términos del error del volumen “eV”

Para la variable de salida en el controlador de volumen, se eligieron funciones de membresía gaussianas para el flujo “Fo” dado que, el nivel del volumen del reactor normalmente cambia de forma suave dentro del reactor CSTR ver Figura 4.8.

El universo de discurso, tanto para la variable de entrada como para la de salida, se ha ampliado considerablemente, a fin de asegurar una gran cantidad de posibles cambios que demanden un flujo mucho mayor al esperado. Por ello se ha duplicado el valor dentro de este rango de operación. Para la entrada, que es el error en el volumen, y conociendo que puede tomar valores positivos como negativos se estableció un universo de discurso de -5 a +5 y para el flujo de alimentación el rango será de 0.133 m³/hr para el límite inferior a 2.133 para el límite superior. Es posible aumentar aún más este valor sin que por ello afecte en gran medida a los resultados. Sin embargo, si rango es demasiado pequeño se podrán generar

múltiples problemas de viabilidad y el controlador muy probablemente fallará. En la Figura 4.8 se ven las funciones de membresía para la variable de salida para el control del volumen, del flujo de alimentación "Fo".

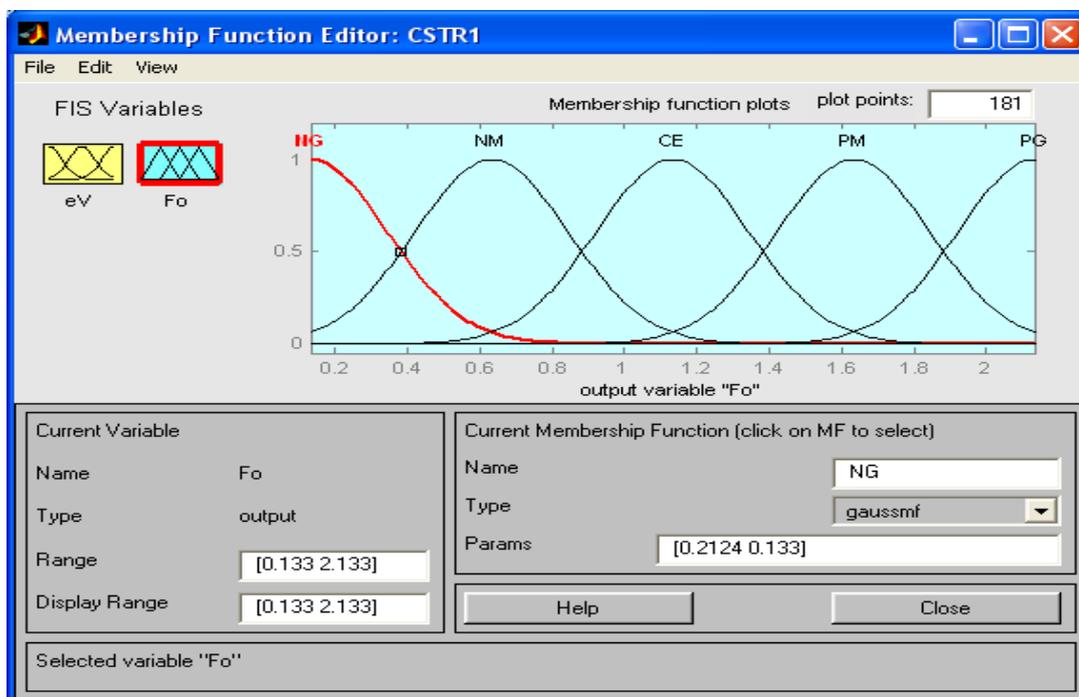


Figura 4.8 Editor de funciones de membresía para la salida del controlador difuso en términos del flujo de alimentación

En el editor de funciones de membresía, es posible apreciar los nombres de los conjuntos difusos, el universo de discurso y el grado de traslape de las funciones de membresía. En realidad todos estos parámetros pueden ser seleccionados, de modo tal, que la respuesta obtenida, sea la que más se acerque a los objetivos del control. La elección de cinco a siete funciones de membresía para el control, han sido un número recomendado en la literatura tradicional de control con lógica difusa. Para este controlador hemos elegido cinco funciones de membresía; cinco triangulares para la variable de entrada y cinco gaussianas para la variable de salida. Para la ubicación de la variable de entrada no hay gran problema, pero para la ubicación de la variable de salida, es necesario recurrir a un ajuste. Este ajuste mejorará claramente la calidad de la respuesta que se tendrá para el control del volumen. Los controladores que manejan como variable de entrada únicamente el error o la desviación de la variable a controlar, se llaman controlador proporcional difuso, ver la Figura 4.4.

En el caso del editor de funciones de membresía, para la entrada al controlador de temperatura, se han elegido siete funciones de membresía, ya que es necesario mayor precisión para ésta variable, ver la Figura 4.9.

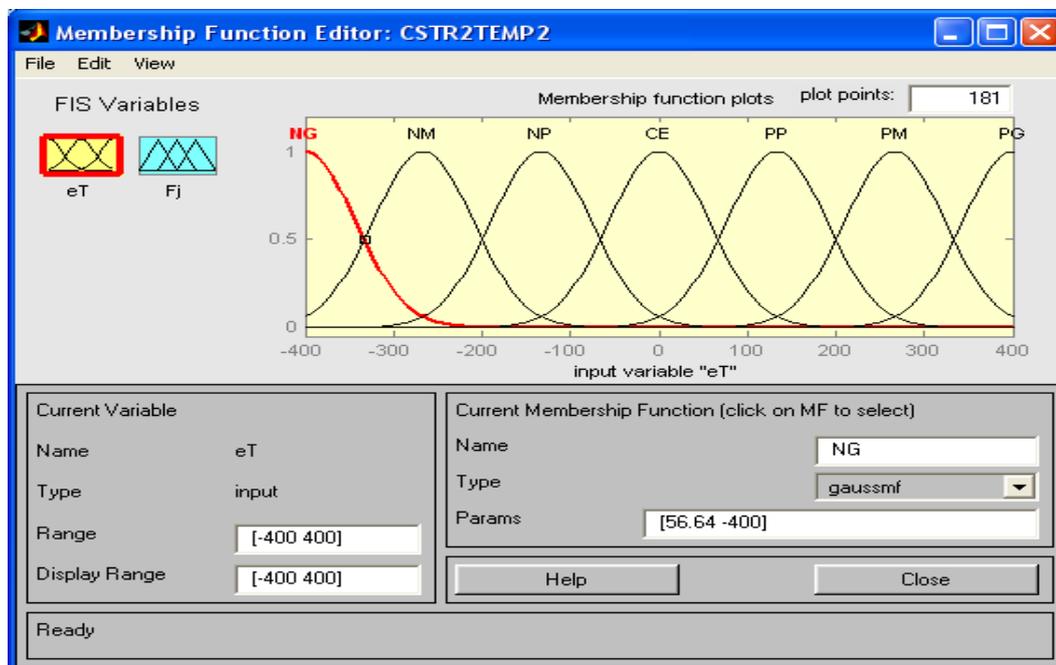


Figura 4.9 Editor de funciones de membresía para la entrada al controlador difuso en términos del error de la temperatura

El universo de discurso que se tiene para la entrada al controlador, tiene un rango de -400 a +400. Este rango de operación para el controlador difuso es relativamente el doble que el que para situaciones extremas de operación se podría emplear. Sin embargo éste hecho no es tan importante como cuando el rango es menor, ya que como se ha mencionado, para el controlador del volumen, un rango menor si afectará la operación y la fiabilidad del controlador difuso. No podrán presentarse perturbaciones severas, ya el controlador saldrá de operación llevando al sistema a situaciones incluso peligrosas.

En este momento, es necesario también resaltar, como se han asignado las etiquetas que le dan los nombres de los conjuntos difusos, para sus respectivas funciones de membresía, y analizar el grado de traslape. Para nuestro caso se ha establecido siete etiquetas para los conjuntos difusos y el traslape utilizado es que proporciona el sistema de forma automática que es del 25%. Cada una de las entradas será fuzzificadas, esta estructura que se observa en la Figura 4.9.

Para la variable salida del controlador de la temperatura, se tiene el flujo de enfriamiento y , para ello se han elegido siete funciones de membresía con sus respectivos conjuntos difusos, ello lo podemos apreciar en la Figura 4.10

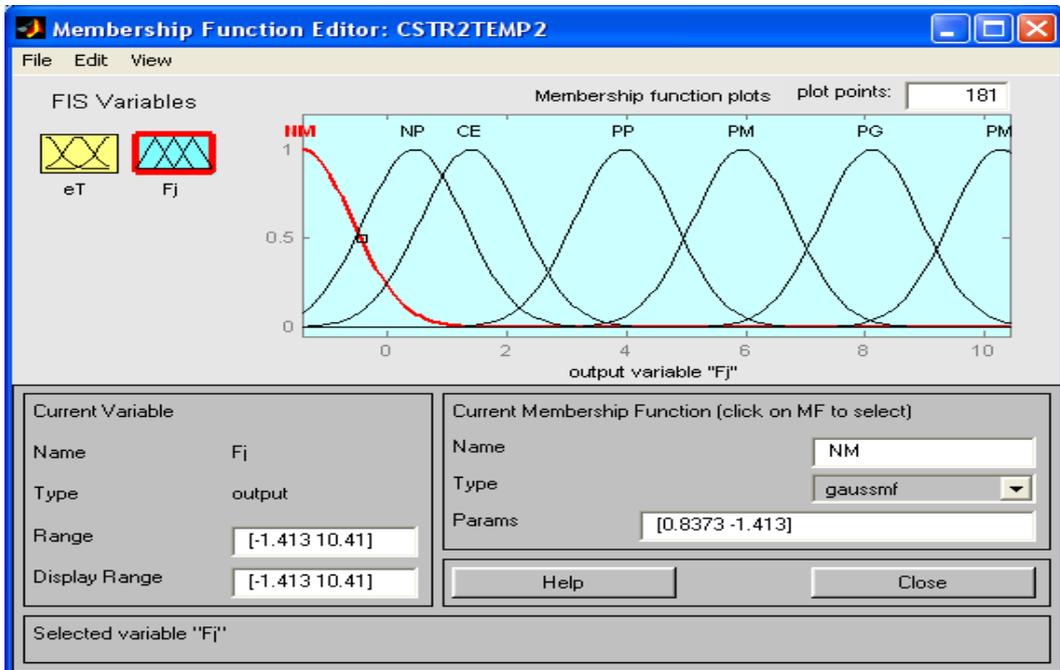


Figura 4.10 Editor de funciones de membresía para la salida del controlador difuso en términos del flujo de enfriamiento

Los siete conjuntos difusos, han sido “sintonizados” para cumplir el objetivo de control, ajustándolos de forma tal que pueda coincidir el conjunto difuso con el valor de referencia o *set point*, por sus siglas en inglés. Y, si se considera la existencia de posibles variaciones más severas o extremas dentro del reactor, es necesario considerar un universo de discurso más grande, como el que proporciona la Figura 3.11. En ésta Figura nos indica, que bajo ciertos cambios importantes de concentración a la entrada, se demandarán flujos de enfriamiento hasta de de 10 m^3/hr , situación que sin tomar en cuenta aspectos de diseño forzarán a que el controlador responda sin presentar problemas, proporcionado los flujos que sean demandados, por lo que el universo de discurso será para este controlador de 0 a 10 m^3/hr . Como ya hemos afirmado, rangos menores ha estos traerán como consecuencia que el controlador solo opere bajo pequeñas perturbaciones, pues se saldrá de su rango de operación muy fácilmente. Por ejemplo si el universo de discurso fuera de 0 a 3 m^3/hr un cambio del 50% en la concentración de la alimentación no podrá ser controlado con el controlador difuso.

Por otra parte, en éste editor se pasa, a un área, donde es posible escribir todas y cada una de las reglas base del conocimiento que se necesitan para operar el reactor, y conseguir por la contribución que cada una de ellas una conclusión determinada.

El visor de reglas para el control del volumen se tiene en la Figura 4.11, y él muestra las conclusiones que, de acuerdo al mecanismo de inferencia utilizado y la contribución que cada una de las reglas aporta.

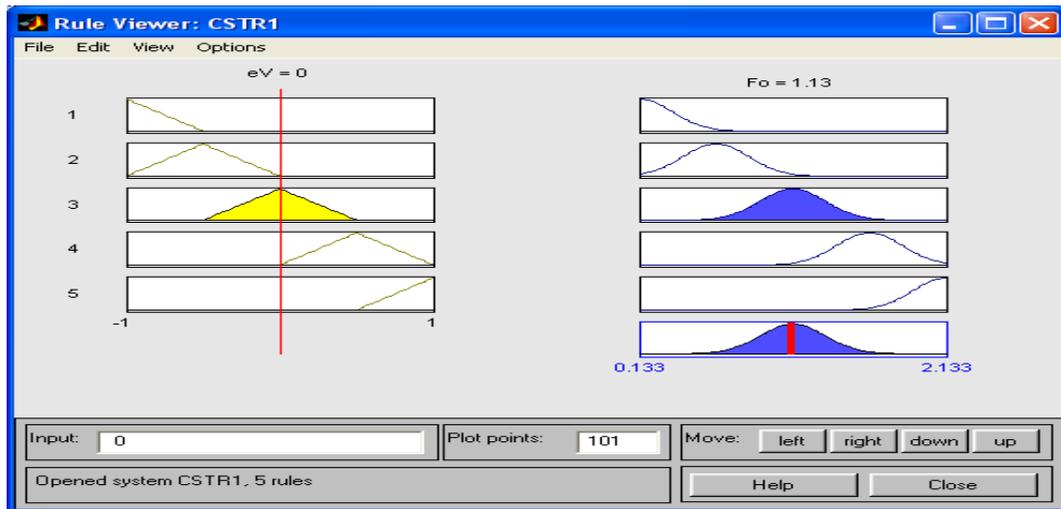


Figura 4.11 Visor de reglas para el control del volumen

Para este del visor, se observa la contribución de todas y cada una de las reglas. La regla tres, produce un error en el volumen igual con cero, y por lo tanto la conclusión alcanzada en el flujo a la salida es exactamente el objetivo del control, el cual corresponde a un flujo en la alimentación igual a 1.13 metros cúbicos por hora, ver la Figura 4.11. En tanto el visor de reglas para el control de la temperatura que se muestra en la Figura 4.12.

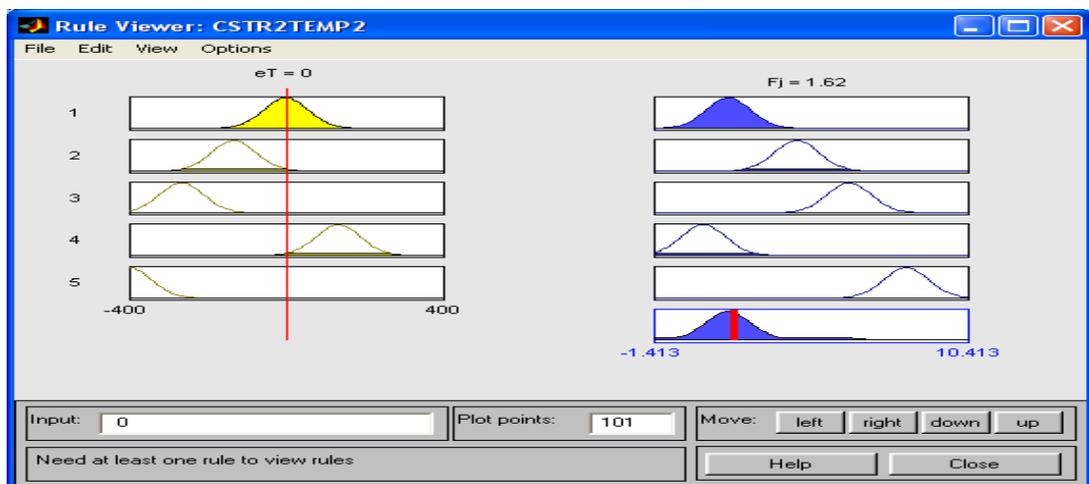


Figura 4.12 Visor de reglas para el control de la temperatura

El método de defuzzificación que se ha utilizado para este sistema es el de centro de gravedad.

En cuanto al visor de superficie, es una parte muy importante del controlador, ya que permite apreciar la forma en que el controlador se comporta, ver las Figuras 4.13 y 4.14.

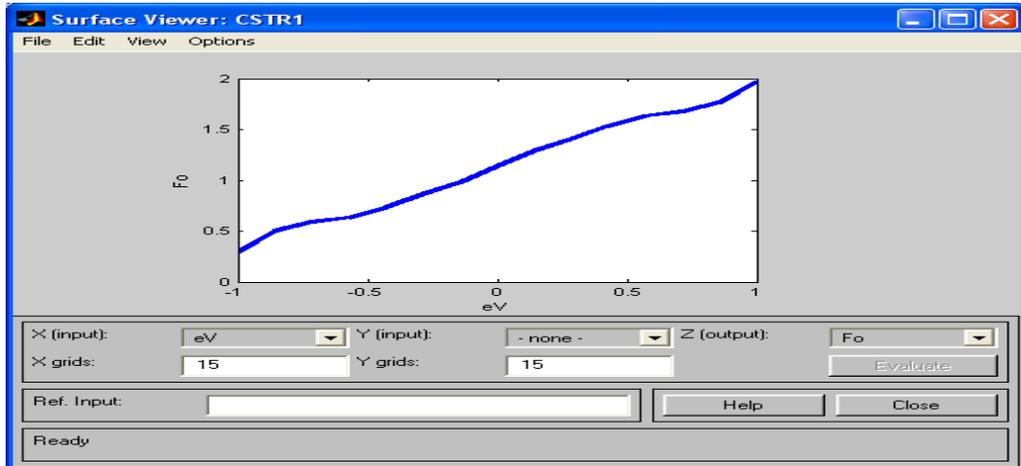


Figura 4.13 Visor de superficie para el control difuso del volumen

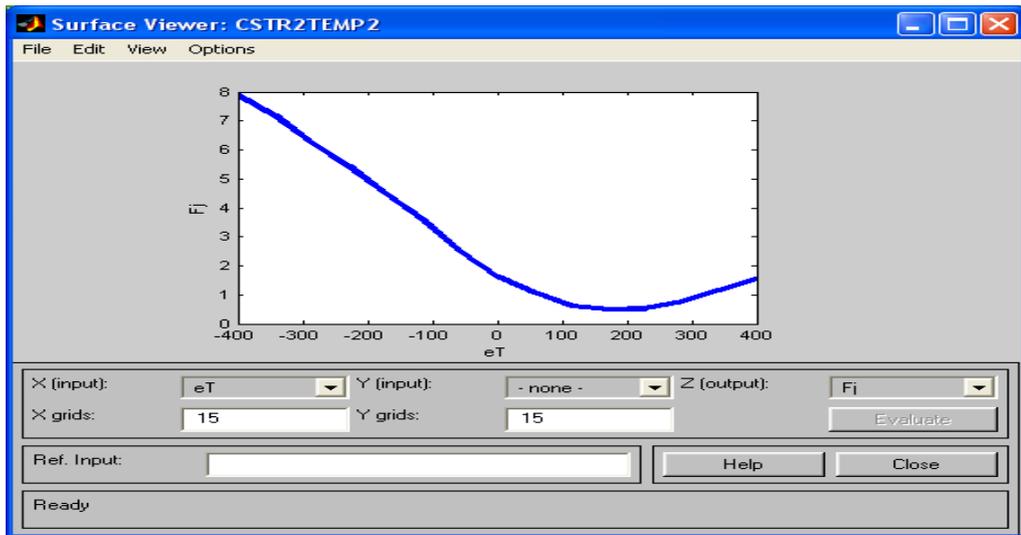


Figura 4.14 Visor de superficie para el control de la temperatura

En el caso de un controlador proporcional se obtiene una Figura en dos dimensiones como las de las aquí mostradas, ello fue suficiente para lograr el control del reactor.

CAPÍTULO 5. RESULTADOS

En la Figura 5.1, se observa el volumen del reactor a las condiciones de estado estable, y como vemos el reactor ha sido estabilizado casi de forma perfecta. El reactor debe mantenerse a un volumen de 1.36 metros cúbicos y como se muestra en la Figura 5.1, la respuesta es totalmente horizontal y no se observa algún sobretiro, o diferentes oscilaciones como las que normalmente tenemos en sistemas altamente no lineales con controladores convencionales. Aquí con el control difuso las oscilaciones son muy pequeñas y no son perceptibles.

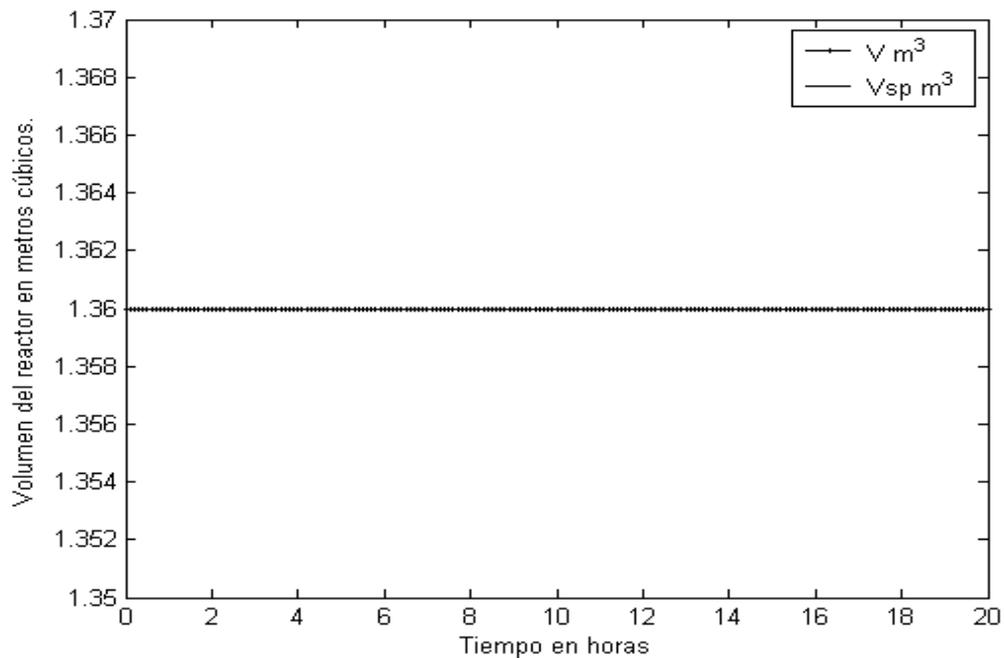


Figura 5.1 Respuesta con control difuso del volumen para el estado estable del reactor CSTR

Por otra parte, el control de la temperatura para el estado estable es aceptable, ya que presenta un pequeño offset, que es tan mínimo, que apenas se alcanza a notar la diferencia entre las dos líneas; la del comportamiento en la temperatura del reactor y el valor de referencia. Para ser más explícito, la línea con pequeñas marcas de la Figura 5.2, señala el control de la temperatura, en la que se observa inicialmente, que la respuesta disminuye un poco, y luego se sostiene durante todo el tiempo de simulación de forma constante. Se han probado simulaciones a tiempos mayores y la respuesta sigue siendo aceptable.

La línea sin marcas de puntos o continua, indica el valor en el estado estable o valor de referencia.

La pequeña diferencia entre el valor de referencia y la respuesta en la temperatura del reactor es menor de $0.001\text{ }^{\circ}\text{K}$. Como se ha ya mencionado, este offset es muy pequeño para la práctica ingenieril.

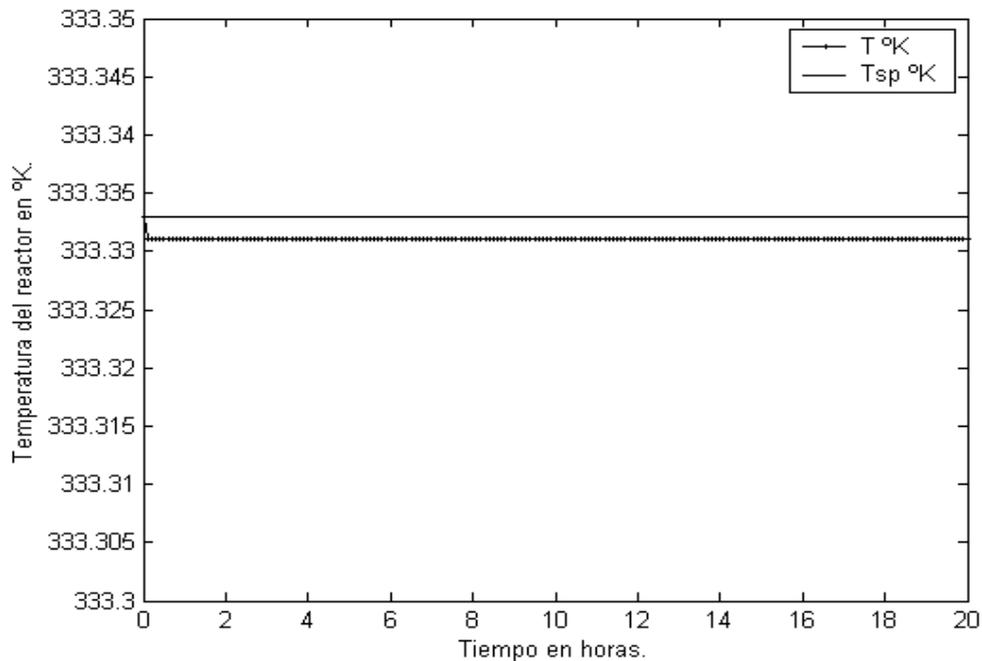


Figura 5.2 Respuesta con control difuso en el estado estable para el control de la temperatura

➤ **Simulación a un cambio escalón en la temperatura de la alimentación de veinte grados Kelvin.**

Los distintos tipos de cambios que se pueden presentar como perturbaciones a un sistema, son los tipo escalón, rampa, de impulso y senoidales. Las de tipo escalón son particularmente comunes y peligrosos. Por lo que, un sistema de control que sea capaz de rechazar estos cambios y sobre todo los de tipo escalón, es del todo deseable. En la Figura 5.3 se observa una gran estabilidad a esta perturbación en la temperatura del reactor, para un tiempo de simulación de 20 horas. La línea con marcas sigue el comportamiento de la temperatura del reactor “T” y la línea continua es la del valor de referencia “Tsp”, el offset que se tiene en esta respuesta es de $0.002\text{ }^{\circ}\text{K}$, una desviación muy pequeña. Se muestra también en la Figura 5.3, el momento en el que se presenta la perturbación, la que es las 5 horas de operación.

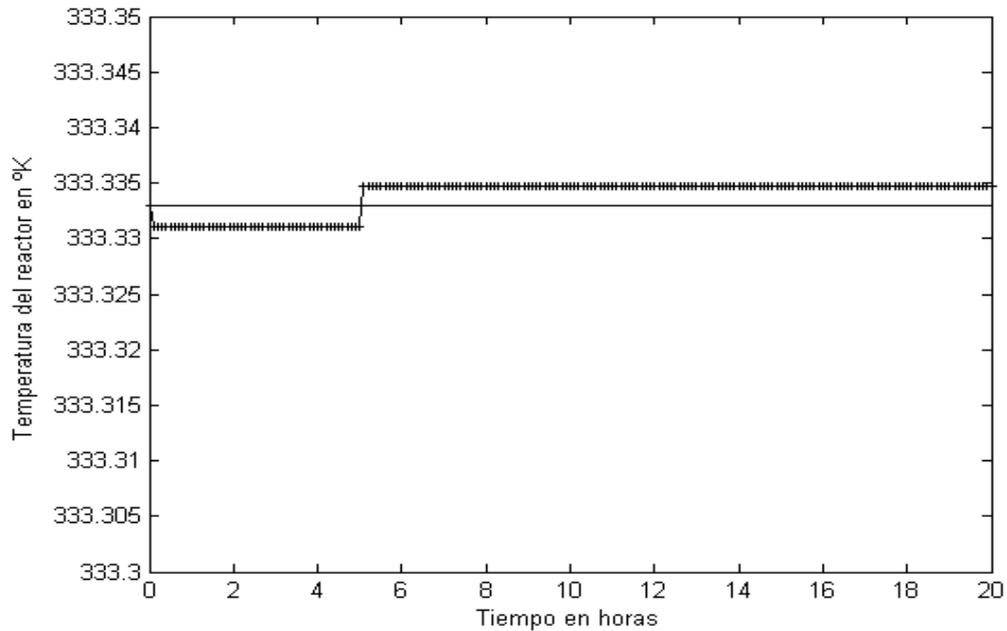


Figura 5.3 Respuesta de la temperatura con control difuso a un cambio en temperatura de la alimentación a las 5 horas

A continuación, se muestra en la Figura 5.4 una comparación entre el control difuso y el control proporcional, para un cambio de 20 °K en la temperatura de la alimentación.

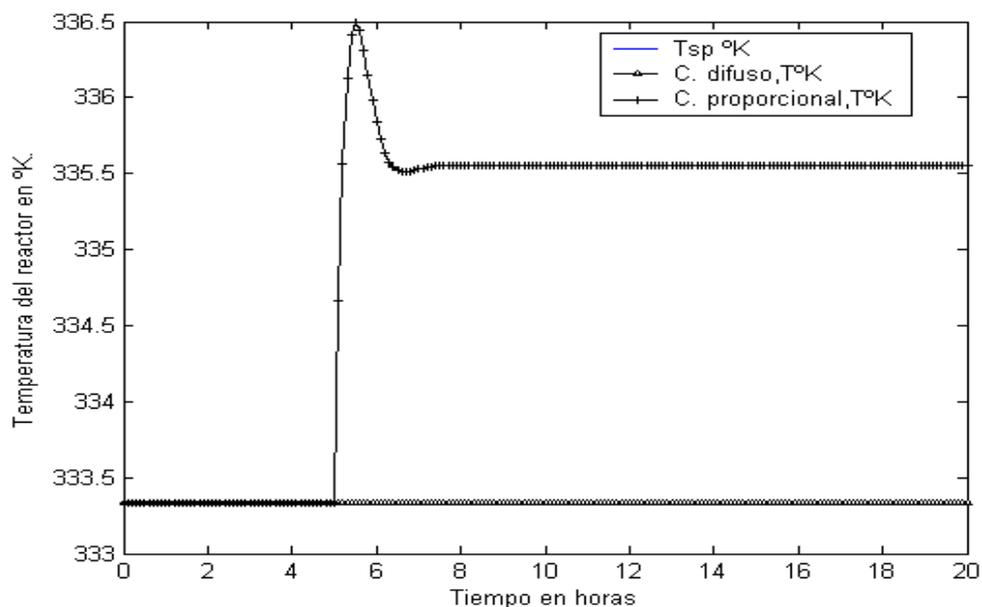


Figura 5.4 Respuesta de la temperatura del control difuso y proporcional, a un cambio de $T_0=20^{\circ}\text{K}$

La temperatura se mantiene bajo control para el difuso, no así para el proporcional, ya que presenta un offset importante antes de estabilizarse. Para el

mismo cambio de temperatura "To", se tiene la Figura 5.5, y en ella se muestra la respuesta en el control de la concentración a la salida del reactor, esta es la más cercana al valor de referencia, para el control difuso, comparada con la del control proporcional.

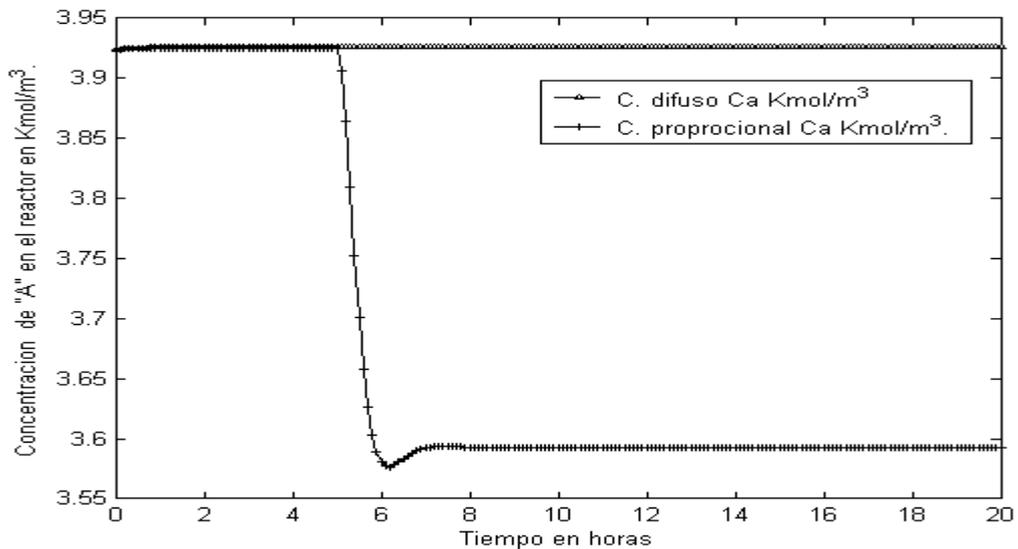


Figura 5.5 Respuesta de la concentración con control difuso y proporcional a un cambio de la temperatura de la alimentación "To"=20°K

Para este mismo cambio, el flujo enfriamiento se comporta mejor para el control difuso que para el proporcional, ver la Figura 5.6.

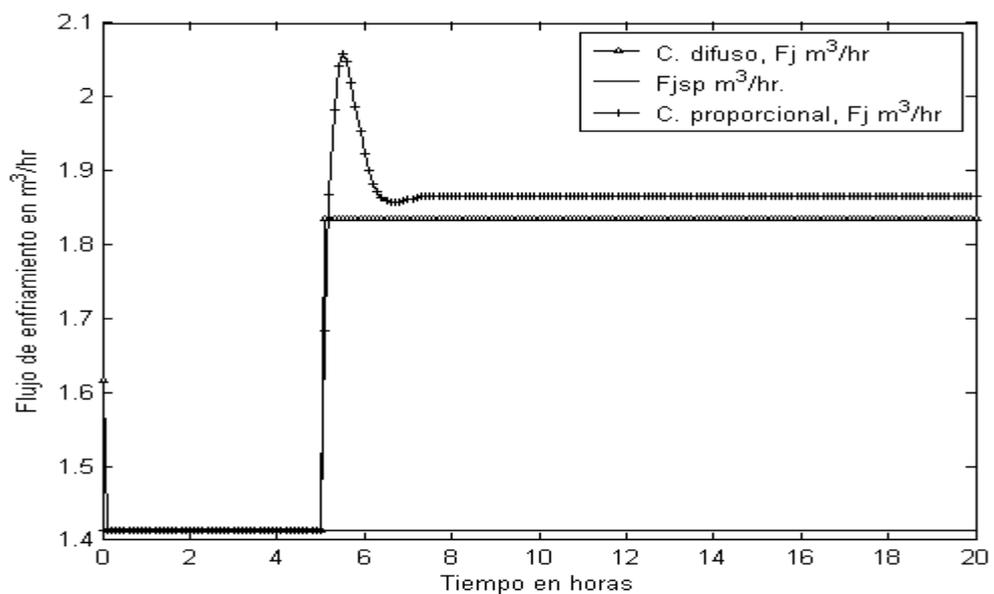


Figura 5.6 Respuesta del flujo de enfriamiento con control difuso y proporcional a un cambio de $T_o=20^\circ \text{K}$

Por otra parte, a un cambio del 50% en la concentración de la alimentación al reactor. La temperatura a la salida para éste cambio, se muestra en la Figura 5.7a.

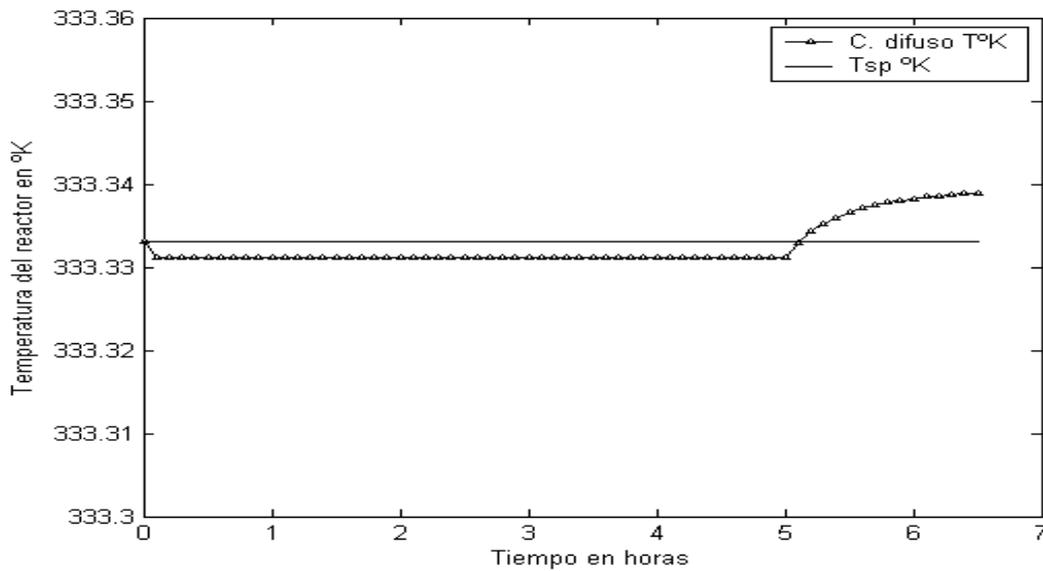


Figura 5.7a Respuesta de la temperatura con control difuso a un cambio en $C_{ao}=50\%$, a un tiempo de simulación de 7hrs

Para un tiempo mayor de 20 horas de simulación y el mismo cambio anterior, se tiene la Figura 5.7b. Manteniéndose la temperatura cerca del valor deseado.

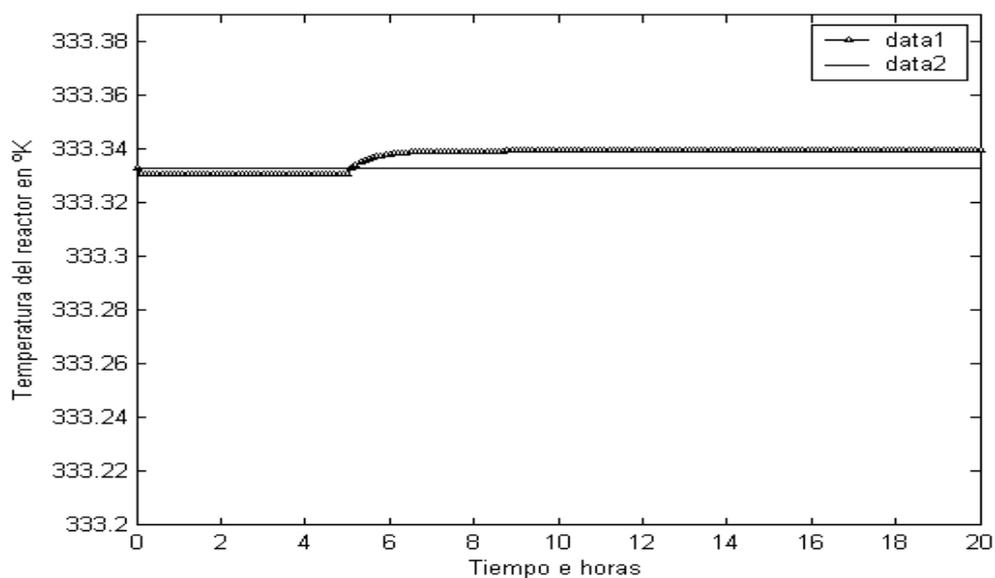


Figura 5.7b Respuesta de la temperatura con control difuso a un cambio en $C_{ao}= 50\%$ a un tiempo de simulación de 20 hrs

A un cambio en la concentración del 50%, la respuesta de la temperatura del reactor con control proporcional y difuso, se muestra la Figura 5.8a. El control difuso es la mejor respuesta, y se representa por la línea continua.

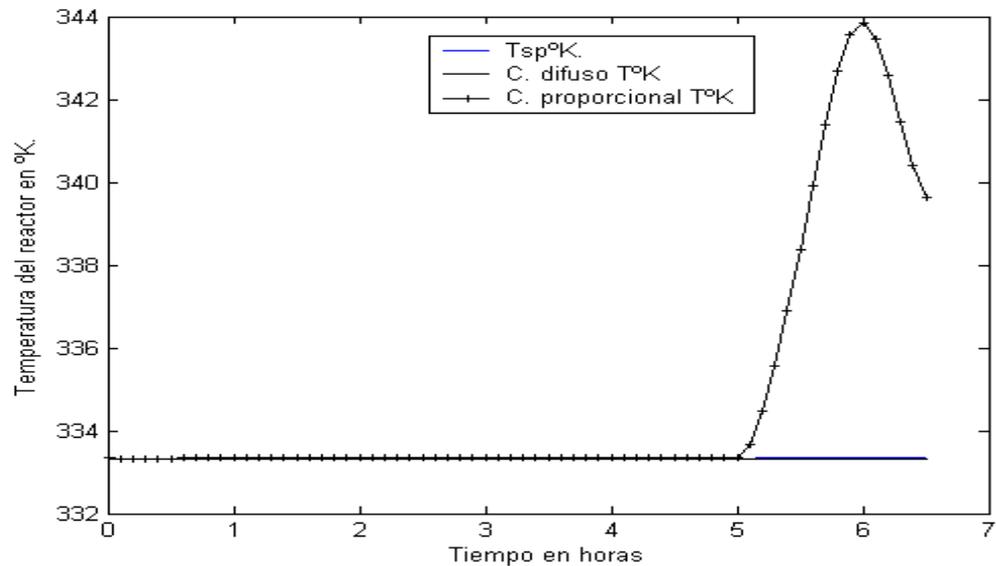


Figura 5.8a Respuesta de la temperatura con control proporcional y difuso a un cambio $C_{ao}= 50\%$, a un tiempo de simulación de 7 horas

Para una ampliación de 20 horas de operación se tiene la siguiente respuesta, donde se ve la gran estabilidad que logra el control difuso, ver la Figura 5.8b.

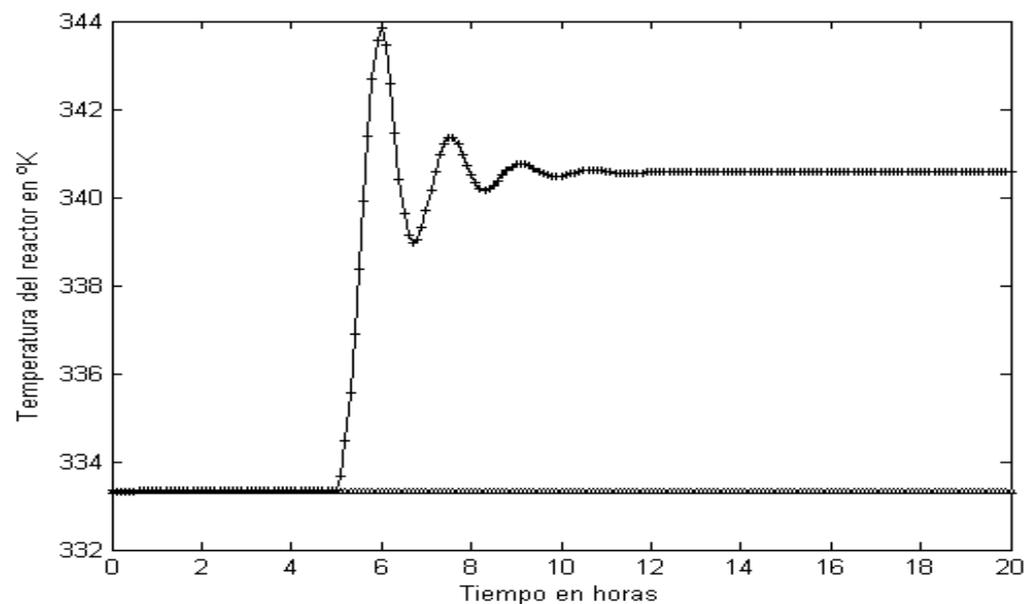


Figura 5.8b Respuesta de la temperatura con control proporcional y difuso a un cambio $C_{ao}=50\%$ a un tiempo de simulación de 20 horas

A éste mismo cambio, el flujo del fluido de enfriamiento presenta el siguiente comportamiento, siendo mejor el del control difuso comparado con el proporcional, ver la Figura 5.9a. El tiempo de simulación es de 7 horas.

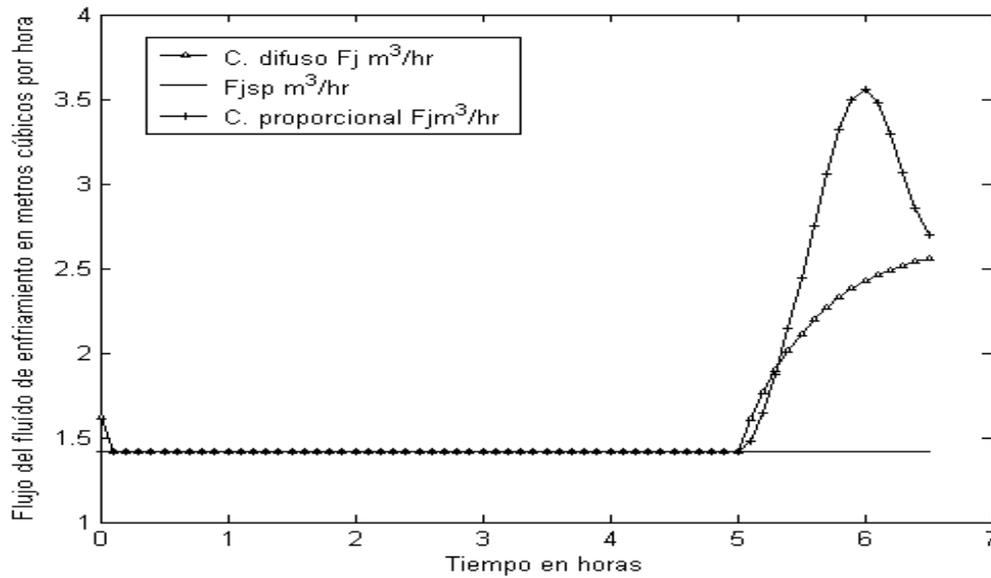


Figura 5.9a Respuesta del flujo de enfriamiento a un cambio en $C_{ao}=50\%$ a un tiempo de simulación de 7 horas

A un tiempo mayor de simulación se tiene la Figura 5.9b. La respuesta del control difuso es más suave que la del control proporcional.

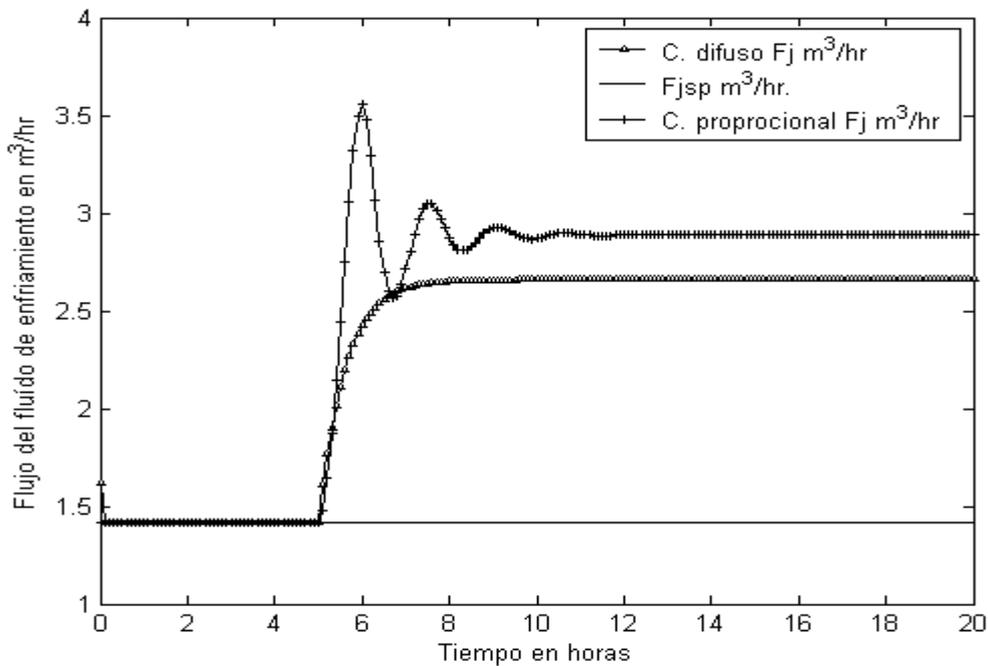


Figura 5.9b Respuesta del flujo de enfriamiento a un cambio en $C_{ao}=50\%$, para un tiempo de simulación de 20 horas

La respuesta de la temperatura a un cambio en el volumen del reactor del 50%, es la que se presenta en la Figura 5.10a.

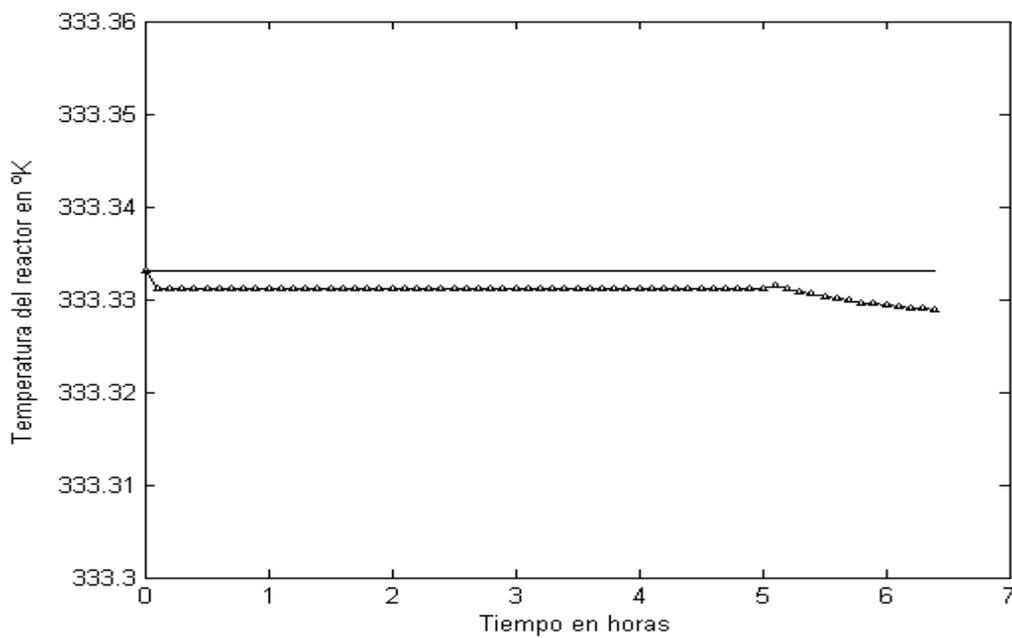


Figura 5.10a Respuesta de la temperatura a un cambio en el volumen de la mezcla de reacción del 50% a un tiempo de simulación de 7 horas

Para 20 horas de operación se tiene la siguiente respuesta de la Figura 5.10b. También hay un pequeño offset del orden de 0.01 °K.

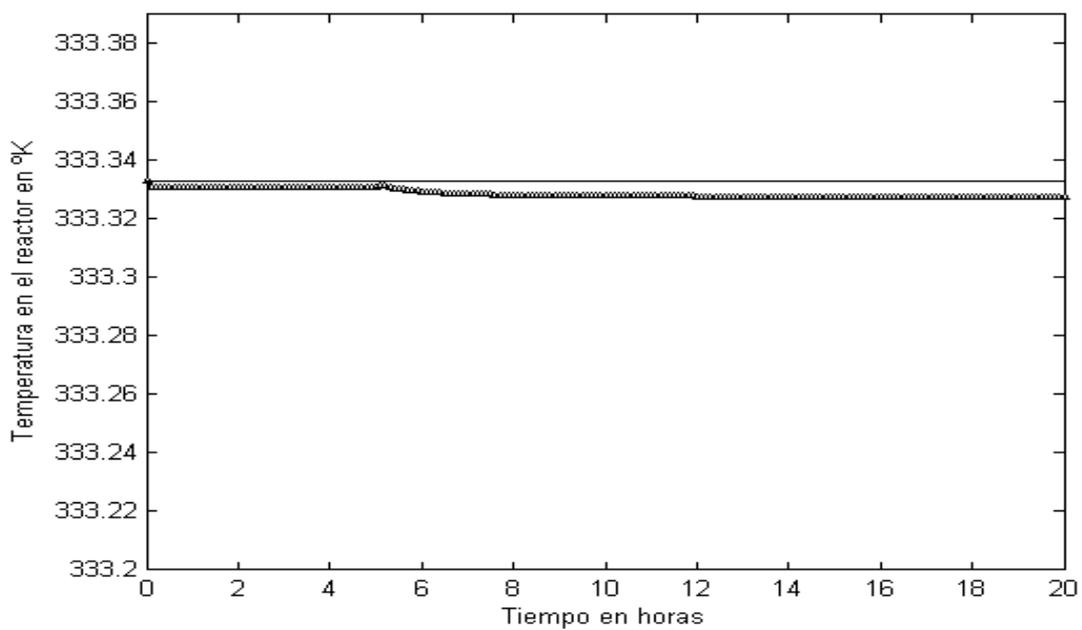


Figura 5.10b Respuesta de la temperatura a un cambio en el volumen de la mezcla de reacción del 50% a un tiempo de simulación de 20 horas

Si ahora se compara la respuesta con la del control proporcional y el control difuso, se observa el siguiente comportamiento de la Figura 5.11a. La línea de triángulos es la respuesta del control difuso y la de cruces, la del proporcional.

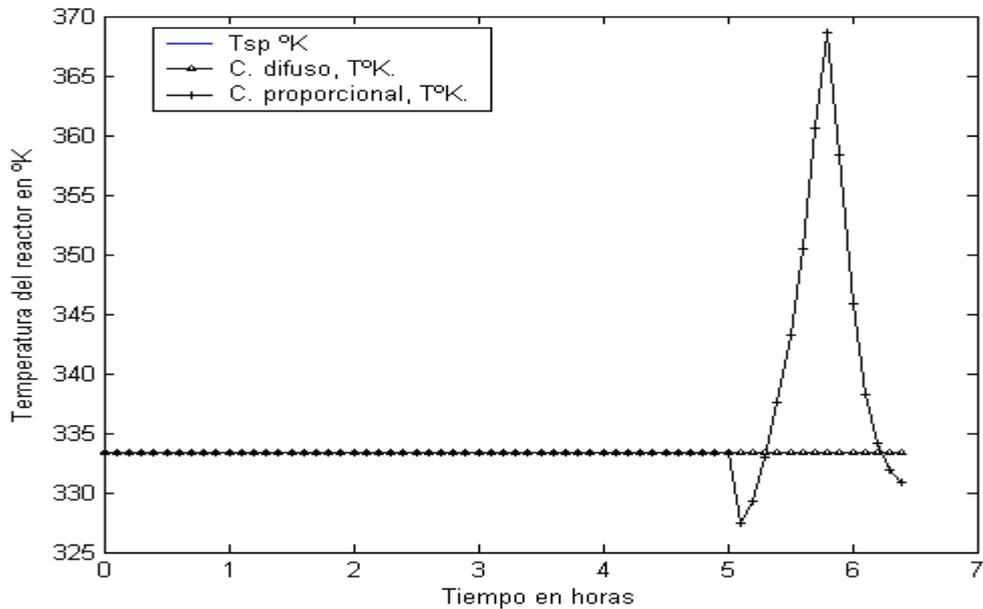


Figura 5.11a Respuesta de la temperatura a un cambio en el volumen de la mezcla de reacción del 50%, con control difuso y proporcional a un tiempo de simulación de 7 horas

Y para un rango de simulación de 20 horas, se tiene la respuesta de la Figura 5.11b.

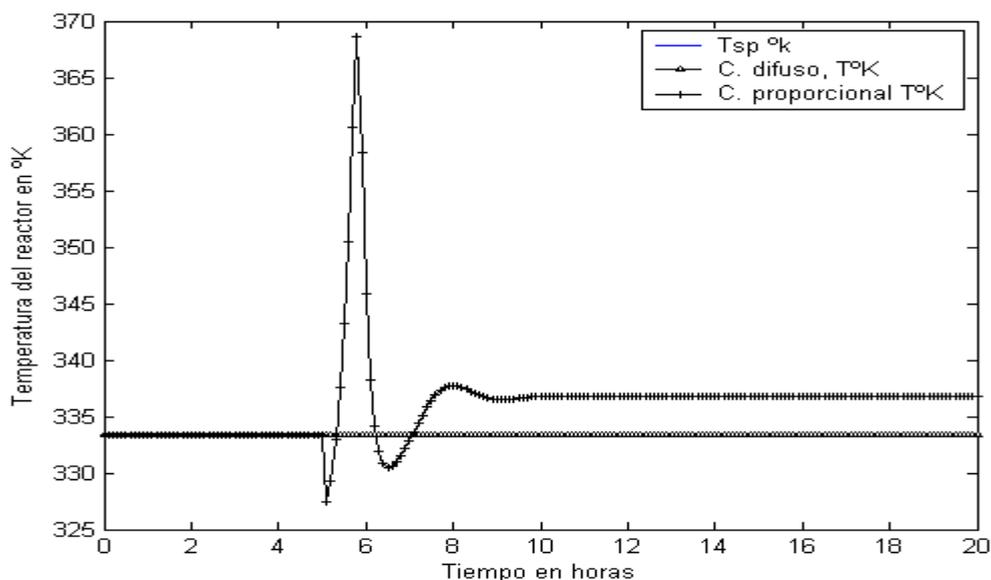


Figura 5.11b Respuesta de la temperatura a un cambio en el volumen de la mezcla de reacción del 50%, a un tiempo de simulación de 20 horas

En todos estos cambios el control difuso fue superior al control proporcional convencional.

Por otro lado, si se realizara una comparación entre un controlador proporcional integral convencional, frente el controlador difuso proporcional, se ha encontrado que el difuso es capaz de estabilizar al reactor, rechazando las perturbaciones con mayor precisión.

Es necesario señalar, que el control difuso no tiene como fin último desplazar al control convencional. Más bien ser, un complemento para lograr el mejor control de sistemas complejos, incluso se han propuesto sistemas en las que ambos controladores trabajen juntos formando esquemas híbridos, tópicos que podrán ser parte de nuevas investigaciones.

Análisis de sensibilidad del número de funciones de membresía con ajuste “CA” y sin ajuste “SA”.

Por último, es interesante ver el efecto del cambio en el número de funciones de membresía gaussianas para la respuesta de la temperatura en el estado estable. Para ello, se muestra este efecto en la Figura 5.12. A mayor funciones de membresía, mejor respuesta de la temperatura, ya que se va disminuyendo offset.

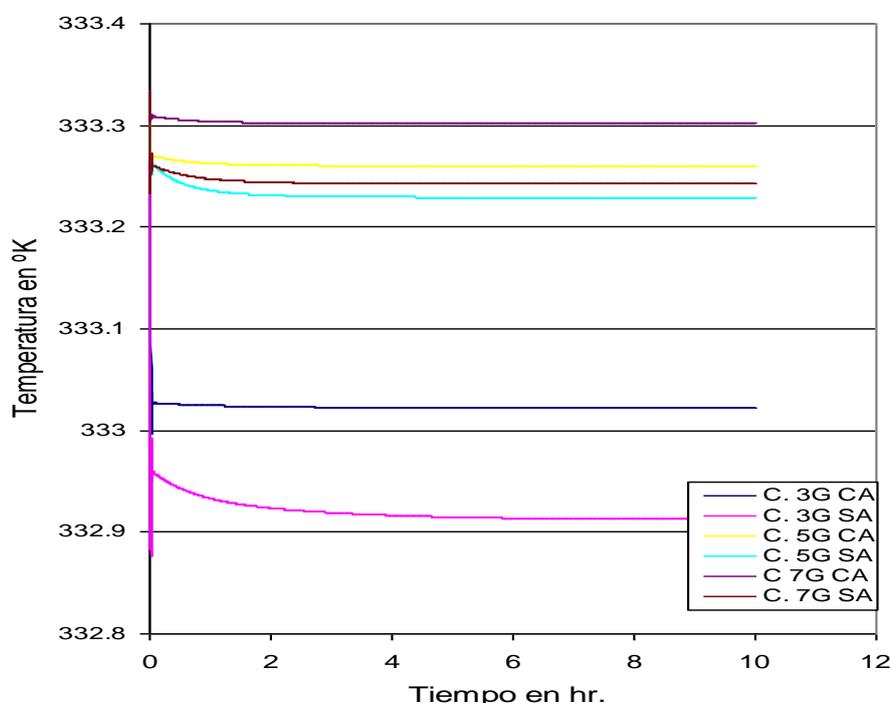


Figura 5.12 Efecto del cambio en el número de funciones de membresía tipo gaussianas en la temperatura

El efecto del cambio en el número de funciones de membresía tipo trapezoidales para la respuesta de la temperatura, se muestra en la Figura 5.13, donde se deducen estas comparaciones.

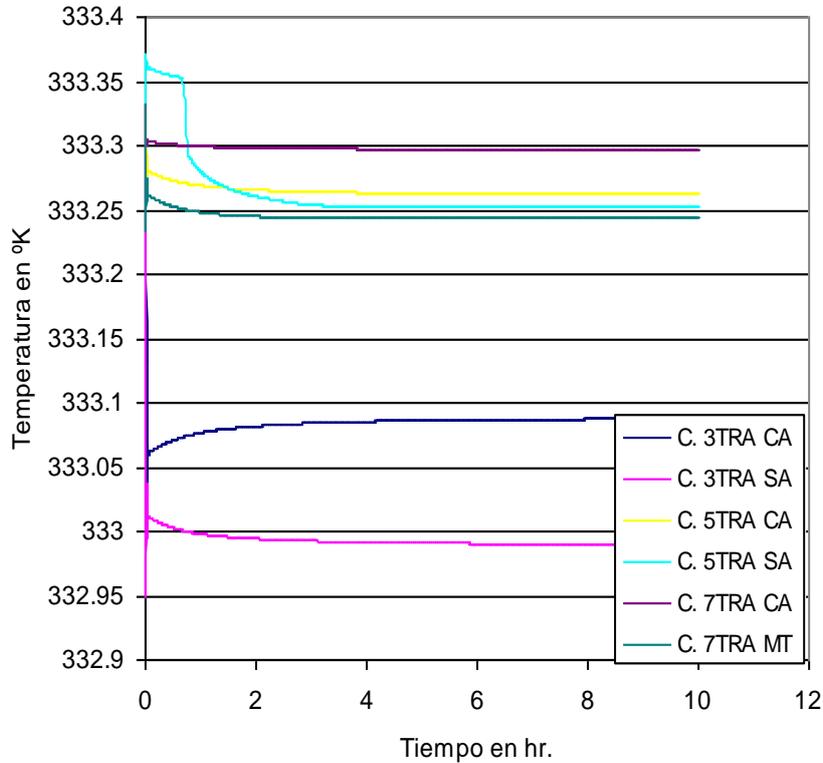


Figura 5.13 Efecto del cambio de las funciones de membresía tipo trapezoidales en la temperatura

La respuesta más exacta es aquella que se acerca al valor de referencia o de operación al estado estable que es 333.333°K y es la de siete funciones de membresía con ajuste para ambos casos. Con esto se comprende mejor el porque de la selección de cinco a siete funciones de membresía para el diseño de un controlador difuso.

CONCLUSIONES

Después de varias simulaciones, se puede decir, que se ha comprobado la hipótesis planteada, ya que los controladores difusos son una alternativa real para el control de sistemas altamente complejos, como es el caso de los reactores químicos conocidos como “CSTR” por sus siglas en inglés. En cuanto al control regulador es muy eficiente. Respecto al servo control del volumen de referencia, se observa que trabaja eficientemente. Sin embargo, es necesario proseguir con una mayor investigación para la aplicación del servo control de la temperatura. Con lo que se da margen a posteriores investigaciones. Adicionalmente se concluye que el uso de 5 a 7 funciones de membresía se obtiene una disminución del offset que, si solo se utilizan tres funciones de membresía. En cuanto al traslape tiene poca influencia en los resultados de este controlador, es más importante ajustar las funciones de membresía si es necesario para que coincidan en los rangos de operación, sobre todo para hacer coincidir el conjunto difuso CE con el valor de referencia.

Por lo tanto se puntualizarán los siguientes comentarios:

- ✓ Mediante el análisis del reactor a lazo abierto fue posible definir más claramente las reglas base y los universos de discurso para el controlador.
- ✓ Que el controlador que se utilizó para este reactor se denomina “Controlador proporcional difuso”, pues solo utiliza al error como única variable de entrada.
- ✓ Que el rechazo a las perturbaciones “Control regulador” del controlador difuso proporcional dio excelentes resultados frente al controlador proporcional convencional, comparación que es loable por los trabajos ya desarrollados en éste sentido, eliminando prácticamente el offset, no obstante que los cambios a los que estuvo sometido el sistema fueron altos, de 20 °K y 4 K mol/m³ en la temperatura y la concentración de alimentación respectivamente.
- ✓ Por todo lo anterior, se plantea que el uso del control difuso es una alternativa para en estos sistemas altamente no lineales.

BIBLIOGRAFÍA.

1. **Aris R., 1969**, "Elementary Chemical Reactor Analysis". Department of Chemical Engineering University of Minnesota. Series Editor. p 188-201
2. **Luyben W.L., 1998**, "Tunning Temperature Controllers on Open loop Unestable Reactors" American Chemical Society. 37,4322-4331.
3. **Smith-Corripio., 1996**, "Control Automático de Procesos" Ed. Limusa. p 277.
4. **Sarma P., 2002**, "Multivariable Gain-Scheduled Fuzzy Logic Control of an Exothermic Reactor". Pergamon. Engineering Application of Artificial Intelligence 14 457-471.
5. **DePaor, A.M., O'Malley, M., 1989**, "Controllers of Ziegler-Nichols Type For Unstable Process With Time Delay" Int. J. Control, 49 (4) 1273-1284.
6. **Poulin, E.,Pomerleau, A., 1996**, " PID Tuning For Integrating and Unstable Processes". IEE Proc. Control Theory Appl. 143 (5), 429-435.
7. **Shafiei, Z., Shenton, A.T., 1994**, "Tuning of PID-Type Controllers For Stable and Unstable Systems With Time Delay". Automatica, 30 (10), 1609-1615.
8. **Abonyi J., 1997**, "Takagi-Sugeno Fuzzy Control of Batch Polymerization Reactors". University of Vesprem Dept. of Chemical Engineering. Cybernetics H-8201 Vesprem Pob. 158, Hungary.
9. **Kosko Bart** "Fuzzy Engineering". Editorial Prentice Hall. p 8.
10. **Ostergaad, J.J., 1977** "Fuzzy logic control of a heat exchanger process", in Fuzzy Automata and Decision Processes, M.M.Gupta, G.N.Sariidis and B.R.Gaines,
11. **Itoh, O. K. Gotoh, Nakayama T. and Takamizawa S.,1987**, "Application of fuzzy control to activated sludge process", Proccedings of the second IFSA Congress, Tokyo, Japan, 1987.pp 282-285.
12. **Berenji, H.R., 1992**, "Fuzzy Logic Controllers: "An Introduction to Fuzy Logic Applications in Intelligent Systems", Edited by R.R. Yager and L.A.Zadeh, Kluwer Academic.
13. **Malki, H.A. H.Li and G. Chen., 1994**, "New Design and Stability Analysis of Fuzzy Proportional-Derivative Control Systems". IEEE Transactions on Fuzzy Systems, Vol. 2, November, Piscataway: 345-54.
14. **Beaverson, G.K, 1998**, "Fuzzy Logic Liquid Level Control", U.S. Patent, No. 5,809,795, Sep. 22.

-
15. **Duque M, Giraldo E.** “Arranque de un Reactor Anaerobio Piloto Usando Lógica Difusa” CITEC. Bogotá Colombia. mduque@unidades.edu.com.
 16. **Vera, F., Quintana J.A., 2001,** “Control de la Temperatura de un Horno Electrico con Lógica Difusa”, Ingeniería Química, Uruguay, aceptado para publicación.
 17. **Martín del B. B., Sanz M. A., 2002,** “Redes Neuronales Y Sistemas Difusos” Editorial Alfaomega p 276.
 18. **Passino K.M. Yurkovich S., 1998,** “Fuzzy Control” Ed. Addison-Wesley p. 43.
 19. **Gulley N. & Rger J.S., 1995,** “Fuzzy Logic TOOLBOX. For Use With MATLAB. The Math Works Inc., 1ra Edicion, USA.
 20. **Hicklin J. Grace A, Kinchen J. & Mauceri R.,1991,** “SimuLab User’s Guide. The Math Works Inc. 1ra Edicion USA.
 21. **Luyben L.W., 1989,** “Process Modeling, Simulation, And Control for Chemical Engineers”. Ed. McGraw-Hill, New York.