



PONTIFICIA **UNIVERSIDAD CATÓLICA** DEL PERÚ

Esta obra ha sido publicada bajo la licencia Creative Commons
Reconocimiento-No comercial-Compartir bajo la misma licencia 2.5 Perú.

Para ver una copia de dicha licencia, visite
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.5/pe/>



Pontificia Universidad Católica del Perú

Escuela de Graduados



**Diseño de un Neurocontrolador Dinámico
(DBP) aplicado a un Reactor Químico
Continuo (CSTR)**

Tesis para optar por el Título de:

**MAGISTER EN INGENIERÍA DE CONTROL Y
AUTOMATIZACIÓN**

Presentada por :

HENRY A. MENDIBURU DÍAZ

**Lima – Perú
2005**

El agradecimiento a mis padres Miguel y Esther, a mi hermano Carlos, y a todos aquellos que colaboraron de alguna u otra manera en el desarrollo de la presente Tesis.

El agradecimiento al Dr. Antonio Morán, cuya experiencia y consejos fueron muy importantes para la realización de este trabajo.

INDICE

INTRODUCCIÓN	01
Capítulo 1: ESTADO DEL ARTE DE LA AUTOMATIZACIÓN DE REACTORES CSTR	
1.1. Introducción a la automatización de CSTR	03
1.2. Estado del arte de la automatización de reactores químicos	05
1.2.1. Principales investigaciones y logros	05
1.3. Objetivos de la tesis	17
Capítulo 2: MODELAMIENTO MATEMÁTICO DEL REACTOR CSTR	
2.1. Introducción a los reactores químicos	19
2.1.1. Conceptos generales	19
2.1.2. Tipos de reactores químicos	22
2.1.3. Reactor tanque agitado continuo (CSTR)	32
2.2. Modelación matemática de un reactor químico continuo	34
2.2.1. Descripción de la reacción química	34
2.2.2. Descripción y características de la planta	36
2.2.3. Modelo matemático del CSTR	39
2.3. Validación del modelo matemático	50
2.3.1 Simulación del modelo	50
2.3.2. Validación del modelo	54
2.4. Estabilidad del sistema	56

Capítulo 3: DESARROLLO DE LOS CONTROLADORES APLICADOS AL REACTOR CSTR	
3.1. Introducción a las Redes Neuronales	60
3.1.1. Teoría básica sobre redes neuronales	60
3.1.2. Aprendizaje de la red neuronal	65
3.1.3. Diseño de neurocontroladores	70
3.2. Desarrollo de los sistemas de control aplicados al reactor	75
3.2.1. Desarrollo de un controlador PID discreto	76
3.2.2. Desarrollo de un controlador Optimal	80
3.2.3. Desarrollo de un neurocontrolador Estático	83
3.2.4. Desarrollo de un neurocontrolador Estático Modificado	87
3.2.5. Desarrollo de un neurocontrolador Dinámico DBP	90
Capítulo 4: VALIDACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL APLICADO AL REACTOR CSTR	
4.1. Introducción	97
4.2. Simulación utilizando ley de control PID aplicado al reactor químico	102
4.3. Simulación utilizando un controlador optimal aplicado al reactor químico	104
4.4. Simulación del neurocontrolador estático aplicado al reactor químico	106
4.5. Simulación del neurocontrolador estático modificado aplicado al reactor químico	108
4.6. Simulación del neurocontrolador dinámico DBP aplicado al reactor químico	110
4.7. Respuesta de los controladores frente a perturbaciones y ruido	115
4.7.1. Respuesta frente a perturbaciones	115

4.7.2. Respuesta frente a ruido	127	
4.7.3. Respuesta frente a perturbaciones y ruido	133	
4.8. Análisis de los resultados obtenidos	137	
CONCLUSIONES	149	
BIBLIOGRAFÍA	152	
Anexo 1: Simulación del sistema utilizando LabView	163	
Anexo 2: Simulación del sistema utilizando Matlab	169	
FIGURAS		
Figura 2.1	Esquema de un reactor tanque con agitación continua	33
Figura 2.2	Esquema de la Planta	37
Figura 2.3	Respuesta en el tiempo de la Temperatura en el Reactor, Temperatura en la Camisa de Refrigeración, y Nivel de pH	52
Figura 2.4	Respuesta en el tiempo de la concentración de Hidróxido de Sodio y Acetato de Etilo	53
Figura 2.5	Respuesta en el tiempo de la concentración de Acetato de Sodio y Etanol	53
Figura 2.6	Validación de Respuesta en el tiempo de la Temperatura en el Reactor	54
Figura 2.7	Respuesta en el tiempo de la Temperatura en el Reactor, según Hernández y Borregales.	55
Figura 3.1	Modelo de Red Neuronal	61

Figura 3.2	Modelo de Neurona Artificial estándar	62
Figura 3.3	Estructura jerárquica de un Sistema Neuronal	63
Figura 3.4	Actualización de pesos en Neuronas	67
Figura 3.5	Neuronas con Error Retropropagado	69
Figura 3.6	Red Neuronal con Error Retropropagado	69
Figura 3.7	Neurocontrolador Estático	71
Figura 3.8	Neurocontrolador DinámicoDBP	74
Figura 4.1	Controlador PID, Respuesta de los Estados y Señal de Control (CC = 0.17, CD = 0.17 , T = 306)	103
Figura 4.2	Controlador PID, Respuesta de los Estados y Señal de Control (CC = 0.25, CD = 0.25 , T = 304)	103
Figura 4.3	Controlador OPTIMAL, Respuesta de los Estados y Señal de Control (CC = 0.17 , CD = 0.17 , T = 306)	105
Figura 4.4	Controlador OPTIMAL, Respuesta de los Estados y Señal de Control (CC = 0.25 , CD = 0.25 , T = 304)	105
Figura 4.5	Neurocontrolador ESTATICO, Respuesta de los Estados y Señal de Control (CC = 0.17 , CD = 0.17 , T = 306)	107
Figura 4.6	Neurocontrolador ESTATICO, Respuesta de los Estados y Señal de Control (CC = 0.25 , CD = 0.25 , T = 304)	107
Figura 4.7	Neurocontrolador ESTATICO Modificado, Respuesta de los Estados y Señal de Control (CC = 0.17 , CD = 0.17 , T = 306)	109
Figura 4.8	Neurocontrolador ESTATICO Modificado, Respuesta de los Estados y Señal de Control (CC = 0.25 , CD = 0.25 , T = 304)	109
Figura 4.9	Neurocontrolador DINAMICO DBP, Respuesta de los Estados y Señal de Control (CC = 0.17 , CD = 0.17 , T = 306)	111

Figura 4.10	Neurocontrolador DINAMICO DBP, Respuesta de los Estados y Señal de Control ($CC = 0.25$, $CD = 0.25$, $T = 304$)	111
Figura 4.11	Respuesta frente a Perturbaciones (Caso 4) – Controlador PID	121
Figura 4.12	Respuesta frente a Perturbaciones (Caso 4) – Controlador Optimal	121
Figura 4.13	Respuesta frente a Perturbaciones (Caso 4) – Neurocontrolador Estático	122
Figura 4.14	Respuesta frente a Perturbaciones (Caso 4) – Neurocontrolador Estático Modificado	122
Figura 4.15	Respuesta frente a Perturbaciones (Caso 4) – Neurocontrolador Dinámico DBP	123
Figura 4.16	Respuesta frente a Perturbaciones (Caso 5) – Controlador PID	125
Figura 4.17	Respuesta frente a Perturbaciones (Caso 5) – Controlador Optimal	125
Figura 4.18	Respuesta frente a Perturbaciones (Caso 5) – Neurocontrolador Estático	126
Figura 4.19	Respuesta frente a Perturbaciones (Caso 5) – Neurocontrolador Estático Modificado	126
Figura 4.20	Respuesta frente a Perturbaciones (Caso 5) – Neurocontrolador Dinámico DBP	127
Figura 4.21	Respuesta frente a Ruido (Caso 3) – Controlador PID	131
Figura 4.22	Respuesta frente a Ruido (Caso 3) – Controlador Optimal	131
Figura 4.23	Respuesta frente a Ruido (Caso 3) – Neurocontrolador Estático	132
Figura 4.24	Respuesta frente a Ruido (Caso 3) – Neurocontrolador Estático Modificado	132
Figura 4.25	Respuesta frente a Ruido (Caso 3) – Neurocontrolador Dinámico DBP	133

Figura 4.26	Respuesta frente a Perturbación y Ruido – Controlador PID	135
Figura 4.27	Respuesta frente a Perturbación y Ruido – Controlador Optimal	135
Figura 4.28	Respuesta frente a Perturbación y Ruido – Neurocontrolador Estático	136
Figura 4.29	Respuesta frente a Perturbación y Ruido – Neurocontrolador Estático Modificado	136
Figura 4.30	Respuesta frente a Perturbación y Ruido – Neurocontrolador Dinámico DBP	137

TABLAS

Tabla 2.1	Comparación de curvar en validación del modelo matemático	55
Tabla 3.1	Red estática, comportamiento del sistema para N neuronas	84
Tabla 3.2	Red estática modificada, comportamiento del sistema para N neuronas	88
Tabla 3.3	Red dinámica, comportamiento del sistema para N neuronas	91
Tabla 4.1	Referencias que se desean alcanzar por los controladores	98
Tabla 4.2	Condiciones Iniciales para la simulación del sistema	100
Tabla 4.3	Variación de las Perturbaciones aplicadas al sistema	101
Tabla 4.4	Resumen de resultados obtenidos para el controlador PID	102
Tabla 4.5	Resumen de resultados obtenidos para el controlador Optimal	104
Tabla 4.6	Resumen de resultados obtenidos para el Neurocontrolador Estático	106

Tabla 4.7	Resumen de resultados obtenidos para el Neurocontrolador Estático Modificado	108
Tabla 4.8	Resumen de resultados obtenidos para el Neurocontrolador Dinámico	110
Tabla 4.9	Resumen de resultados obtenidos aplicando los controladores a diversas referencias	113
Tabla 4.10	Resumen de resultados obtenidos para evaluar la performance de los controladores	114
Tabla 4.11	Casos de combinación de perturbaciones aplicadas al reactor químico	116
Tabla 4.12	Resumen de resultados obtenidos luego de someter al sistema al Caso 1 de Perturbación	117
Tabla 4.13	Resumen de resultados obtenidos luego de someter al sistema al Caso 2 de Perturbación	118
Tabla 4.14	Resumen de resultados obtenidos luego de someter al sistema al Caso 3 de Perturbación	119
Tabla 4.15	Resumen de resultados obtenidos luego de someter al sistema al Caso 4 de Perturbación	120
Tabla 4.16	Resumen de resultados obtenidos luego de someter al sistema al Caso 5 de Perturbación	124
Tabla 4.17	Resumen de resultados obtenidos luego de someter al sistema al Caso 1 de Ruido	128
Tabla 4.18	Resumen de resultados obtenidos luego de someter al sistema al Caso 2 de Ruido	129
Tabla 4.19	Resumen de resultados obtenidos luego de someter al sistema al Caso 3 de Ruido	130
Tabla 4.20	Resumen de resultados obtenidos luego de someter al sistema a Perturbación y Ruido	134
Tabla 4.21.	Resumen del análisis de los controladores	148

INTRODUCCION

En los últimos años el concepto de automatización ha ido evolucionando rápidamente debido a que con ella se puede mejorar las operaciones de un proceso productivo, además de la calidad de los bienes producidos, garantizando a las empresas lograr sus objetivos con un desempeño óptimo.

Dado que existen una serie de lazos de control, los cuales debido a su dificultad (procesos con múltiples variables que interaccionan, no linealidades, retardos, dinámica compleja, etc.) o debido a la calidad del control exigida, se requerirá de técnicas de control más avanzadas. Estas aplicaciones tienden a aumentar debido a una serie de factores: exigencias crecientes de calidad, ahorro de energía, seguridad, flexibilidad en la producción, necesidad de integrar decisiones económicas y sistemas de control, diseño integrado de plantas y sistemas de control, etc.

Actualmente han adquirido una amplia aplicación industrial las estrategias de control avanzado en la automatización de procesos que presentan un comportamiento dinámico complejo. Entre estas estrategias se destacan los Neurocontroladores Dinámicos, por su elevada efectividad en el control de procesos caracterizados por presentar un comportamiento dinámico complejo, y sus propiedades de ajustarse a diversas condiciones iniciales, mediante algoritmos matemáticos que hacen uso de un modelo del comportamiento dinámico del proceso.

La automatización de los reactores químicos CSTR permite poder mejorar el proceso, teniendo como resultado mejor uniformidad en el producto y mayor flexibilidad en las variaciones de recetas, de esta manera se mejora el producto final, obteniendo uniformidad en la realización de mezclas. Esta Tesis presenta como objetivo el diseño de un sistema de control basado en redes neuronales aplicado a un reactor químico continuo (CSTR), en el cual se desarrolla una reacción exotérmica (saponificación de acetato de etilo con hidróxido de sodio).

La presente Tesis se compone de cuatro capítulos: En el primer capítulo se plantea los objetivos de la esta investigación y se realiza una recopilación de información referente a investigaciones relacionadas con el control y la automatización de reactores químicos CSTR. En el segundo capítulo realiza una introducción teórica sobre el reactor tanque agitado continuo, así mismo se desarrolla el modelo matemático de un reactor químico de este tipo, el cual servirá para la simulación del sistema a controlar. En el tercer capítulo se lleva a cabo el desarrollo de los criterios de diseño y parámetros de sintonización de los diversos controladores implementados para aplicarlos al reactor. En el cuarto capítulo se presentan las simulaciones del sistema sometido a la acción de control de los diversos controladores, para luego elaborar un análisis de la performance de cada uno, y finalmente establecer la superioridad del neurocontrolador dinámico frente a otros controladores.

Capítulo 1

ESTADO DEL ARTE DE LA AUTOMATIZACIÓN DE REACTORES CSTR

1.1. INTRODUCCIÓN A LA AUTOMATIZACIÓN DE CSTR

En muchos procesos industriales la función de control es realizada por un operario (ser humano), este operario es el que decide cuando y como manipular las variables de modo tal que se obtenga una cadena productiva continua y eficiente.

La eficiencia productiva implica el constante aumento de los niveles de producción de la maquinaria instalada, el mejoramiento de la calidad del producto final, la disminución de los costos de producción y la seguridad tanto para el personal como para los equipos. Para lograr esto es necesario que los procesos productivos se realicen a la mayor velocidad posible y que las variables a controlar estén dentro de valores deseados.

Existen métodos y estrategias para realizar la acción de control, los métodos de control (clásico, moderno, y avanzado) permiten al controlador reaccionar mandando una señal correctiva del error; mientras que las estrategias de control hacen más eficiente a la labor de control ahorrando recursos y tiempo.

Debido a estas exigencias, la industria ha necesitado de la utilización de nuevos y más complejos procesos, que muchas veces el operario no puede controlar debido a la velocidad y exactitud requerida, además muchas veces las condiciones del espacio donde se lleva a cabo la tarea no son las más adecuadas para el desempeño del ser humano.

Frente a este panorama, surge la automatización y los sistemas de control como una solución que va a permitir llevar la producción a estándares de calidad mucho mejores. La automatización consiste de un sistema de control automático, por el cual el sistema verifica su propio funcionamiento, efectuando mediciones y correcciones sin la interferencia del ser humano. Un sistema de automatización es el conjunto de equipos, sistemas de información, y procedimientos que van a permitir asegurar un desempeño independiente del proceso, a través de operaciones de control y supervisión.

La automatización solo es viable cuando los beneficios económicos y sociales de las mejoras que se podrían obtener al automatizar, son mayores a los costos de operación y mantenimiento del sistema.

En los sistemas automatizados la inteligencia del proceso esta dado no por el ser humano, sino que es gobernada por una unidad de control. La tecnología usada ha adoptado diferentes formas desde automatismos mecánicos hasta los actuales automatismos con inteligencia artificial.

La automatización de los reactores químicos CSTR permite poder mejorar el proceso, teniendo como resultado una mejor uniformidad en el producto y mayor flexibilidad en las variaciones de recetas, de esta manera se mejora en el producto final, obteniendo uniformidad en realización de mezclas. También permite una mayor producción, es decir se reducen pérdidas de tiempo durante el proceso.

Permite el acceso y manejo de base de datos. Facilita la supervisión y control mediante una interfase gráfica y animada, con el usuario.

La automatización debe contemplar todos los posibles estados en que se pueden encontrar las máquinas y los equipos. Se debe considerar prioritario que el sistema este preparado para afrontar los diversos procesos, para ello el programa del autómatas deberá prever que hacer frente a posibles problemas, a fin de reducir el tiempo de parada al máximo y permitir un proceso de re-arranque simple.

1.2. ESTADO DEL ARTE DE LA AUTOMATIZACIÓN DE REACTORES QUÍMICOS

1.2.1. PRINCIPALES INVESTIGACIONES Y LOGROS

A continuación se presentan algunos de los principales aportes e investigaciones desarrolladas en el campo del control y automatización de reactores químicos, más específicamente aplicaciones sobre reactores tanque agitado continuo (CSTR), tomadas del ámbito local e internacional.

- En el trabajo de S.K. Brown, C.C. Baum, P.S. Bowling, K.L. Buescher, V.M. Hanagandi, R.F. Hinde, Jr., R.D. Jones, W.J. Parkinsonc, "Adaptive, Predictive Controller for Optimal Process Control", se trata como el control

predictivo (CPBM) puede fallar cuando se asume ciertos parámetros en cuanto al modelo del sistema, y con más razón cuando no se consideran no linealidades que son fundamentales en el sistema, algunos autores sugieren utilizar redes neuronales para corregir este defecto, lamentablemente un buen entrenamiento requiere que la data experimental transmita todas las situaciones dinámicas posibles en el sistema, además de requerir de un largo tiempo para el procesamiento de dicho entrenamiento. En este trabajo se aporta un modelo de red neuronal que no requiere muchos datos para entrenarse, y que asegura la convergencia y rapidez en dicho entrenamiento. Este modelo de red neuronal es fusionado con el CPBM. El resultado de esta investigación muestra una forma de conseguir un modelo apropiado del sistema a partir de datos experimentales y que además se puede adaptar a posibles cambios de la planta. Por tanto lo más rescatable es la forma como el CPBM adapta su modelo matemático a los cambios en las condiciones de trabajo que se producen en el sistema real. La desventaja de este aporte, radica en la relativa complejidad para implementar la red neuronal planteada, lo cual no justificaría su aplicación en CSTR que trabajan bien con el CPBM normal.

- En el trabajo de De Prada, Assandri, y Martínez, “*Control predictivo no lineal de orden reducido*”, se desarrolla un controlador predictivo no lineal de orden reducido aplicado a un reactor CSTR con camisa refrigerante. Se ha evaluado el sistema para distintas condiciones iniciales y con presencia de perturbaciones, el controlador no tiene acción integral por lo que se usa un

estimador de estado para eliminar los errores en estado estacionario; el controlador ha respondido bien siendo su principal ventaja que no es necesario resintonizarlo ante cambios significativos en el valor de referencia, la sintonización utiliza únicamente dos parámetros. La desventaja radica en la necesidad de contar con un modelo aproximado de la planta, ya que técnicas de identificación utilizadas con el MPC no son aplicables. En esta investigación no se trata el caso de sistemas multivariados, ni tampoco se compara el controlador hallado con otro diferente para evaluar su performance.

- En el trabajo de Cloutier, J.R., y Stansbery, D.T. (1999), "Control of a Continuously Stirred Tank Reactor Using an Asymmetric Solution of the State-Dependent Riccati Equation", se presenta un método basado en la ecuación de Riccati (SDRE), el cual se usa para controlar las no linealidades dinámicas de un CSTR, la ventaja de usar este método se centra en que puede ser aplicado directamente sobre la fase no-mínima, así mismo pueden imponerse límites en la actividad de control. El problema fue analizado en simulación, encontrándose que se requiere hallar una matriz de pesos para los estados-dependientes, usándose una matriz asimétrica en lugar de una solución simétrica definida positiva. En este paper se analiza como llegar a dicha solución asimétrica, consiguiéndose una respuesta asintóticamente estable en lazo cerrado, además de un comportamiento robusto ante cambios en los parámetros de concentración de material de entrada.

- En el trabajo de Trierweiler, J., y Engell, S., "Controllability analysis via the Robust Performance Number for a CSTR with Van de Vusse Reaction", se plantea un análisis de la controlabilidad y performance de un CSTR con reacción Van de Vusse, mediante la técnica del número de performance robusta (RPN) y número de performance robusta de un set de planta (RPPN). Dicho análisis se realizó para tres puntos de operación, se demostró como las condiciones de trabajo influyen en la controlabilidad de la planta, también se demostró como la elección del punto de operación dependerá de la posibilidad de recuperar material deseado desde el material no deseado. En esta investigación se demuestra la importancia del uso del RPN y RPPN para el análisis de controlabilidad y también para el diseño de un buen controlador.
- En el trabajo de Pham, Q.T., "Dynamic Optimization of Chemical Engineering Processes by Evolutionary Method", se propone un método evolutivo para la optimización de un proceso químico. Este método hace uso de nuevos operadores reproductivos, que considera entre otros factores, una adaptación de la tasa de mutación. Se realizó el control primero para un tanque CSTR, luego para una serie de tres tanques, y finalmente para un arreglo serial de diez tanques, el problema fue resuelto en simulación y considerando modelos que no tienen en cuenta dinámicas no lineales importantes en cuanto a la temperatura. Aplicando este método se puede observar la convergencia y la estabilidad para los tres casos, el objetivo principal se centra básicamente en lograr una rápida respuesta, desde una condición inicial hacia una referencia, observándose como la adaptabilidad

del controlador mejora dicha respuesta a manera que evoluciona, sin embargo no considera la respuesta del sistema frente a perturbaciones

- En el trabajo de Abdul Aziz y Mohamed Azlan, (2002), "Effect of valve characteristics to the controllability of pH in a continuous stirred tank reactor", se hace una investigación referente al efecto que provocan las características de las válvulas sobre el control del pH en un CSTR, para ello se realizó una simulación de diversos casos, aplicando un controlador PI. En esta investigación se demuestra que una válvula porcentual se comporta mejor en el arranque del sistema, mientras que una válvula lineal se comporta mejor cuando se requiere corregir perturbaciones y realizar cambios de set-point. No es aceptable instalar dos tipos de válvula para un mismo lazo de control, por ello se presenta como solución la utilización de una válvula lineal sumada a una función matemática que permite emular características de la válvula proporcional. Cabe resaltar que los resultados obtenidos fueron hallados en base a simulación, por tanto no se tomaron datos de una válvula real.
- En el trabajo de Lopez Cruz, Van Willigenburg, y Van Straten (2000), "Evolutionary algorithms for optimal control of chemical processes", se resuelve problemas de control en la industria química aplicando algoritmos evolutivos para hallar las ganancias en un controlador optimal. Los resultados ofrecidos permiten concluir que el uso de este método es factible cuando se

enfrenta casos de sistemas no lineales, multi-dimensionales, y con dinámicas complejas.

- En el trabajo de Janos Abonyi, Janos Madar, y Ferenc Szeifert, "Combining first principles models and neural networks for generic model control", se hace un estudio y aplicación del control genético (GMC), este tipo de control emplea el modelo híbrido del sistema, por un lado se conoce ciertas dinámicas del sistema, pero también ciertas dinámicas no son conocidas, la parte desconocida es representada por una caja negra o por una red neuronal. La parte conocida del modelo es usada directamente para conformar el controlador, mientras que la parte desconocida se asume como perturbación, de modo tal que el controlador se ajustará para ambas partes. Este método fue aplicado en la simulación de un CSTR, en un primer caso cuando se conocía el modelo completo, y luego cuando se conocía el modelo híbrido; se logró una pequeña diferencia en la respuesta del controlador lo cual válida la efectividad de éste método.
- En el trabajo de Jesús Acosta y Lenin Becerra, "Aplicación de las redes neuronales para la identificación de un sistema de reacción continuo", se analizaron tres modelos, el modelo matemático del reactor basado en el balance de masas y energía, un modelo neuronal basado en redes perceptrónicas multicapas (RPM) donde se hace uso del algoritmo Levenberg Marquardt como método de aprendizaje, y otro modelo neuronal de base radial con arquitectura feedforward. Estos modelos fueron

comparados con el proceso real, encontrándose que los modelos neuronales se asemejan mejor al sistema real, el algoritmo RPM no mostró ventajas sobre el modelo de la red de base radial, el cual aproximaba mejor la dinámica del sistema.

- En el trabajo de R. Antonelli, y A. Astol (2003), "Continuous stirred tank reactors: easy to stabilise?", se hace uso de metodologías y herramientas basadas en la teoría de Lyapunov para diseñar leyes de control que permitan la estabilización de la temperatura en un CSTR de tipo Van Der Vusse. El controlador utilizado es el output feedback. También se analiza la capacidad de diseñar controladores aplicados a modelos matemáticos no lineales con incertidumbres. Se demuestra que no es necesario tener un conocimiento preciso de los parámetros del sistema para poder lograr una estabilidad asintóticamente global.
- En el trabajo de Srinivas Palanki y Soumitri Kolavennu, (2003), "Simulation of Control of a CSTR Process", se desarrolló un software que permite correr la simulación del sistema tanque CSTR vía Internet, este software es desarrollado en el simulink de Matlab. La ventaja de este desarrollo radica en la facilidad que brinda para que un usuario cambie parámetros como condiciones iniciales, tiempo final, parámetros del controlador, etc., permitiendo de este modo observar como varía la dinámica del sistema. Este tipo de desarrollo brinda una ayuda a nivel educativo y elimina costos en la

implementación de módulos reales, sin embargo no puede reemplazar las ventajas educativas que implican controlar una planta real.

- En el trabajo de Tian, Z., Hoo, K.A.(2002), "Transition Control Using Multiple Adaptive Models and an H-Infinity Controller Design", se propone y desarrolla un controlador inteligente por aproximación de múltiples modelos que se adapta simultáneamente los parámetros tanto del modelo como del controlador H infinito. Este método fue aplicado a un reactor químico, los resultados en esta investigación son satisfactorias tanto en el modelamiento y ante perturbaciones. El problema fue resuelto con un modelo idealizado, pero para acercarlo más a una planta real, se probó la efectividad y robustez del controlador agregando problemas de incertidumbre paramétrica al modelo. Por tanto este controlador ha demostrado su efectividad en el control de un sistema no lineal con dinámica complicada.
- En el trabajo de Hagan, Demuth, y De Jesús, "An Introduction to the use of neural networks in control systems", se brinda una explicación acerca de como se puede utilizar las redes neuronales en el control, se utiliza el algoritmo de backpropagation y un arreglo multicapas de redes. Este paper también presenta tres arquitecturas de control: control adaptivo por modelo de referencia, control predictivo basado en modelo, control por feedback linearization. La implementación práctica de estos controladores fue aplicado a un CSTR y también a un brazo robótico y a un sistema de levitación magnética. La dinámica en el modelamiento del sistema CSTR, considera las

variaciones de altura, y las variaciones de concentración de productos. El resultado brindado por este controlador (según la simulación) es casi perfecto puesto que las variaciones de referencia son alcanzadas casi instantáneamente, sin embargo la señal de control presenta una característica oscilante y un chattering muy pronunciado a lo largo de toda la respuesta en el tiempo del sistema, para llevar dicha señal de control a un modelo real se sugiere aplicarle filtros, sin embargo no se presentan dichos resultados, por lo cual no se puede determinar de eficiencia de usar este método en un reactor real.

- En el trabajo de Nilolau y Hanagandi , "Control of Nonlinear Dynamical Systems Modelled by Recurrent Neural Networks", se muestra como se puede modelar la dinámica de un sistema cuya estructura interna no esta bien definida, para ello se hace uso de redes neuronales recurrentes que empleen data del sistema. Este método fue aplicado a un CSTR, este sistema fue representado por sus ecuaciones físicas donde interviene la dinámica de temperatura y la dinámica de concentración, por tanto el reactor modelado por ecuaciones físicas se convierte en el sistema real a identificar siendo el encargado de generar data. Las redes neuronales fueron empleadas para modelar y controlar el sistema, la performance de dicho controlador fue comparada con un controlador linear optimally tuned.
- En el trabajo de Solovyev y Lewin, "A Steady-state process resiliency index for non-linear processes", se trata el índice de costo por perturbación

(disturbance cost) y como afecta a los sistemas no lineales, el caso estudiado se aplica a un reactor CSTR. El costo producido por las perturbaciones que afectan el control de un sistema es cuantificado económicamente, es decir, el costo generado por una mala o deficiente producción a raíz de fallas en el control; por cuanto se muestra la metodología y las formulas matemáticas necesarias para llevar a cabo dicho análisis en forma general, ofreciendo resultados aproximados a manera de ejemplo para el caso particular del reactor químico.

- En el trabajo de Mehmet Önder, "Variable structure systems theory in training of radial basis function neurocontrollers", se presenta algunas aplicaciones ilustrativas de sistemas con estructura variable, entre ellos se cuenta con procesos bioquímicos, sistemas mecánicos, sistemas oscilantes y caóticos, en ellos se aplica un método de control por ajuste de parámetros a través de neuro-controladores. Cabe destacar el análisis de un reactor CSTR, en el cual se busca controlar la concentración y la temperatura, el resultado de las simulaciones muestran buenos resultados en el comportamiento de los estados del sistema.
- En el trabajo de Silva y Kwong (1999), "Nonlinear model predictive control of chemical processes", se presenta un algoritmo de control predictivo que utiliza una estrategia de solución y optimización simultánea, además usa una discretización por colocación equidistante que permite ecuaciones más sencillas y menor tiempo de cálculo empleado por la computadora. La

aplicación desarrollada para un tanque CSTR muestra resultados satisfactorios para la respuesta en el tiempo de los estados y para la señal de control, evaluado para varias condiciones iniciales.

- En el trabajo de Vega, Lima, y Pinto, (2000), "Control of a loop polymerization reactor using neural networks", se aplica un modelo neuronal híbrido para un reactor químico continuo de tipo tubular, el cual será controlado con un controlador predictivo multivariable no lineal, la performance de este controlador fue evaluada en relación a un control predictivo basado en modelo no lineal. Los resultados obtenidos muestran resultados satisfactorios, siendo estos mejores para algunas condiciones iniciales y deficiente para otras.
- En el trabajo de Kittisupakorn y Azlan Hussain (2000), "Comparison of optimisation based control techniques for the control of a CSTR", se presenta una aplicación de optimización basada en técnicas de control optimal de lazo abierto y control por horizonte retrocedido, aplicado a un reactor CSTR con reacción exotérmica. El controlador cuenta con una función objetivo. Los resultados obtenidos con el control optimal demuestran que el controlador funciona bien solamente cuando todos los parámetros del modelo son conocidos exactamente. Los resultados obtenidos con el control por horizonte retrocedido brinda mejores cuando existen incertidumbres paramétricas dentro de cierto rango, además de brindar mucha mayor robustez.

- En el trabajo de Zhang, Ge, y Hand, "Adaptive output feedback control for general nonlinear systems", se investigó el problema del control adaptivo output feedback utilizando redes neuronales, aplicado a un reactor CSTR. El controlador es desarrollado basado en un observador de alta-ganancia el cual es utilizado para estimar las derivadas del sistema con respecto al tiempo. También se analiza la estabilidad de Lyapunov y el error de convergencia cuando se hace tracking.
- En el trabajo de Maner, Doyle, Agunnaike, y Pearson, "Nonlinear Model Predictive Control of a Simulated Multivariable Polymerization Reactor Using Second-order Volterra Models", se presenta dos formulaciones de control predictivo basado en modelo no lineal, la primera formulación la acción de control utilizando sustituciones sucesivas, la segunda formulación resuelve directamente el problema de manera on-line. Se aplica a un sistema consistente en un reactor CSTR, los parámetros del modelo se obtuvieron de la discretización bilinear de series de Taylor. Los resultados obtenidos muestran en la mayoría de los casos examinados que la referencia deseada es seguida por los estados muy de cerca.
- En el trabajo de Shouche, Genceli, Vuthandam, y Nikolaou, (1998), "Simultaneous constrained model predictive control and identification of darx processes", una aplicación de control e identificación de una planta (reactor químico) mediante algoritmos predictivos basados en modelo (MPCI), estos procesos se describen mediante "darx models". Las ventajas de este método

son que las constantes de entrada y salida del proceso pueden ser manejadas explícitamente, además el deterioro de la salida regulada es mantenido a un mínimo nivel mientras la identificación en lazo cerrado es mejorada.

1.3. OBJETIVOS DE LA TESIS

Esta tesis presenta como objetivo el diseño y análisis de varios sistemas de control aplicados a un reactor químico continuo (CSTR), en el cual se desarrolla una reacción química (saponificación de acetato de etilo con hidróxido de sodio).

Otro objetivo fijado para esta tesis es brindar conocimientos básicos acerca del estado actual de la automatización de reactores químicos, específicamente reactores CSTR, y así determinar la importancia que tendría esta investigación en el ámbito industrial y empresarial; para ello se recopilará y evaluará las recientes investigaciones desarrolladas en torno a dichas aplicaciones, tanto en el ámbito nacional como internacional.

También se determinará, mediante las técnicas de modelación matemática, el modelo matemático de un reactor químico continuo, el cual servirá para llevar a cabo el desarrollo, simulación y validación de los sistemas de control.

En la presente tesis se diseñará e implementará mediante simulación, varios sistemas de control, para controlar el proceso de variación de la concentración en un reactor

así como la temperatura en el interior del reactor. Se validará la performance y robustez de los controladores mediante simulación utilizando el software Matlab y Labview.

Para demostrar la efectividad del método planteado, se realizarán comparaciones entre el sistema controlado mediante el Neurocontrolador DBP y el sistema controlado mediante: un algoritmo PID discreto, aplicando un controlador optimal y también se evaluará frente al neurocontrolador estático.

Del mismo modo se busca proponer un trabajo de investigación acerca del diseño de un tipo de controlador cuyo diseño se base netamente en algoritmos de redes neuronales, con la finalidad de analizar con mayor detenimiento las ventajas e inconvenientes de esta estrategia de control avanzado, su fundamentación, implementación y aplicación a un caso particular de dinámica no lineal y multivariable, así como la facilidad de entrenamiento, performance y robustez.

Capítulo 2

**MODELAMIENTO MATEMÁTICO DEL
REACTOR CSTR**

2.1. INTRODUCCIÓN A LOS REACTORES QUÍMICOS

2.1.1. CONCEPTOS GENERALES

Definición de Reacción Química.

Según Denbigh, K.G., Turner, J.C.R. (1990), se conoce como reacción química a aquella operación unitaria que tiene por objeto distribuir de forma distinta los átomos de ciertas moléculas (compuestos reaccionantes o reactantes) para formar otras nuevas (productos). El lugar físico donde se llevan a cabo las reacciones químicas se denominan REACTOR QUÍMICO.

Según Fogler, S. (1992), los factores que hay que tener en cuenta a la hora de llevar a cabo o desarrollar una reacción química son:

- Condiciones de presión, temperatura, y composición necesarias para que los materiales entren en estado de reacción.
- Las características termodinámicas y cinéticas de la reacción
- Las fases (sólido, líquido, gaseoso) que se encuentran presentes en la reacción

Formas de cambios químicos:

- *Descomposición*, consiste en que una molécula se divide en moléculas más pequeñas, átomos o radicales.

- *Combinación*, ésta se realiza cuando una molécula o átomo se une con otra especie para formar un compuesto nuevo.
- *Isomerización*, en este caso la molécula no efectúa ninguna descomposición externa o adición a otra, es simplemente un cambio de configuración estructural interna.

Clases de Reacciones Químicas.

A continuación se muestra la clasificación de las reacciones químicas según Levenspiel, O. (1998):

- *Reacciones Homogéneas*: Cuando se afecta solamente una fase, ya sea gaseosa, sólida, o líquida.
- *Reacciones Heterogéneas*: Cuando se requiere la presencia de al menos dos fases para que tenga lugar la reacción a una velocidad deseada.
- *Reacciones Enzimáticas*: Utilizan catalizadores biológicos (proteínas con alto peso molecular, con entros activos, y que trabajan a bajas temperaturas)
- *Reacciones Catalíticas*: Son aquellas reacciones que requieren de una sustancia adicional (que no aparece en el balance global) para modificar la velocidad de reacción; esta sustancia por su mera presencia provoca la reacción química, reacción que de otro modo no ocurriría.
- *Reacciones No Catalíticas*: Los materiales reactantes no necesitan ninguna sustancia adicional para dar lugar a la reacción química

- *Reacciones Autocatalíticas:* En esta reacción, uno de los productos formados actúa como catalizador, participando en otra etapa del proceso donde velocidad de reacción es más rápido que en la primera.
- *Reacciones Endotérmicas:* Son aquellas que adsorben calor del exterior.
- *Reacciones Exotérmicas:* Son aquellas que liberan calor hacia el exterior.

Definición de Reactor Químico.

Según Denbigh (1968), un reactor químico es una unidad procesadora diseñada para que en su interior se lleve a cabo una o varias reacciones químicas. Dicha unidad procesadora esta constituida por un recipiente cerrado, el cual cuenta con líneas de entrada y salida para sustancias químicas, y esta gobernado por un algoritmo de control.

Los reactores químicos tienen como funciones principales:

- Asegurar el tipo de contacto o modo de fluir de los reactantes en el interior del tanque, para conseguir una mezcla deseada con los materiales reactantes.
- Proporcionar el tiempo suficiente de contacto entre las sustancias y con el catalizador, para conseguir la extensión deseada de la reacción.
- Permitir condiciones de presión, temperatura y composición de modo que la reacción tenga lugar en el grado y a la velocidad deseada, atendiendo a los aspectos termodinámicos y cinéticos de la reacción.

Ecuación de Rendimiento.

Según Froment y Bischoff (1990), es aquella expresión matemática que relaciona la salida con la entrada en un reactor químico, para diversas cinéticas y diferentes modelos de contacto.

- Modelo de Contacto: Está referido a como los materiales circulan a través del reactor y se contactan unos con otros dentro de este, además del tiempo que necesitan para mezclarse, y las condiciones y características de la incorporación de material.
- Cinética: Está referido a cuan rápido ocurren las reacciones, el equilibrio dentro del reactor, y la velocidad de la reacción química; estas factores están condicionados por la transferencia (balance) de materia y energía.

El balance de masas esta dado por la relación:

$$\text{ENTRA} - \text{SALE} + \text{GENERA} - \text{DESAPARECE} = \text{ACUMULA}$$

El balance de energía esta dado por la relación:

$$\text{ENTRA} - \text{SALE} \pm \text{GENERA} \pm \text{TRANSMITE} = \text{ACUMULA}$$

2.1.2. TIPOS DE REACTORES QUÍMICOS

Según Kent (1987), existen infinidad de tipos de reactores químicos, y cada uno responde a las necesidades de una situación en particular, entre los tipos más importantes, más conocidos, y mayormente utilizados en la industria se puede mencionar los siguientes:

- a)* REACTOR DISCONTINUO. Es aquel en donde no entra ni sale material durante la reacción, sino mas bien, al inicio del proceso se introducen los materiales, se lleva a las condiciones de presión y temperatura requeridas, y se deja reaccionar por un tiempo preestablecido, luego se descargan los productos de la reacción y los reactantes no convertidos. También es conocido como reactor tipo Batch.
- b)* REACTOR CONTINUO. Mientras tiene lugar la reacción química al interior del reactor, éste se alimenta constantemente de material reactante, y también se retira ininterrumpidamente los productos de la reacción.
- c)* REACTOR SEMICONTINUO: Es aquel en el cual inicialmente se carga de material todo el reactor, y a medida que tiene lugar la reacción, se va retirando productos y también incorporando más material de manera casi continua.
- d)* REACTOR TUBULAR. En general es cualquier reactor de operación continua, con movimiento constante de uno o todos los reactivos en una dirección espacial seleccionada, y en el cual no se hace ningún intento por inducir al mezclado. Tienen forma de tubos, los reactivos entran por un extremo y salen por el otro.
- e)* TANQUE CON AGITACIÓN CONTINUA. Este reactor consiste en un tanque donde hay un flujo continuo de material reaccionante y desde el cual

sale continuamente el material que ha reaccionado. La agitación del contenido es esencial, debido a que el flujo interior debe estar en constante circulación y así producir una mezcla uniforme.

- f)* REACTOR DE LECHO FLUIDIZADO. Se utiliza para reacciones donde intervengan un sólido y un fluido (generalmente un gas). En estos reactores la corriente de gas se hace pasar a través de las partículas sólidas, a una velocidad suficiente para suspenderlas, con el movimiento rápido de partículas se obtiene un alto grado de uniformidad en la temperatura evitando la formación de zonas calientes.
- g)* REACTOR DE LECHO FIJO. Los reactores de lecho fijo consisten en uno o más tubos empacados con partículas de catalizador, que operan en posición vertical. Las partículas catalíticas pueden variar de tamaño y forma: granulares, cilíndricas, esféricas, etc. En algunos casos, especialmente con catalizadores metálicos como el platino, no se emplean partículas de metal, sino que éste se presenta en forma de mallas de alambre. El lecho está constituido por un conjunto de capas de este material. Estas mallas catalíticas se emplean en procesos comerciales como por ejemplo para la oxidación de amoníaco y para la oxidación del acetaldehídico a ácido acético.
- h)* REACTOR DE LECHO CON ESCURRIMIENTO. En estos reactores el catalizador sólido está presente como en el lecho fijo. Los reactivos se hacen pasar en corrientes paralelas o a contracorriente a través del lecho.

- i)* REACTOR DE LECHO DE CARGA MÓVIL. Una fase fluida pasa hacia arriba a través de un lecho formado por sólidos. El sólido se alimenta por la parte superior del lecho, se mueve hacia debajo de la columna y se saca por la parte inferior.
- j)* REACTOR DE BURBUJAS. Permiten hacer burbujear un reactivo gaseoso a través de un líquido con el que puede reaccionar, porque el líquido contiene un catalizador disuelto, no volátil u otro reactivo. El producto se puede sacar del reactor en la corriente gaseosa.
- k)* REACTOR CON COMBUSTIBLE EN SUSPENSIÓN. Son similares a los reactores de burbujeo, pero la fase “líquida” esta formada por una suspensión de líquidos y partículas finas del catalizador sólido.
- l)* REACTOR DE MEZCLA PERFECTA. En este reactor las propiedades no se modifican ni con el tiempo ni con la posición, ya que suponemos que estamos trabajando en estado de flujo estacionario y la mezcla de reacción es completamente uniforme. El tiempo de mezcla tiene que ser muy pequeño en comparación con el tiempo de permanencia en el reactor. En la práctica se puede llevar a cabo siempre que la mezcla fluida sea poco viscosa y esté bien agitada
- m)* REACTORES DE RECIRCULACIÓN. Pueden ser CON DISPOSITIVO SEPARADOR, cuando se toma parte de la corriente de salida y se llevan

directamente a la entrada del reactor. SIN DISPOSITIVO SEPARADOR, cuando en la salida del reactor colocamos un dispositivo separador que hace que se separen reactivos y productos, luego los reactivos se recirculan de nuevo al reactor.

- n)* REACTORES DE MEMBRANA. Son aquellos que combinan la reacción y la separación en una sola unidad; la membrana selectivamente remueve una (o más) de las especies reactantes o productos. Estos reactores han sido comúnmente usados para aplicaciones en las cuales los rendimientos de la reacción están limitados por el equilibrio. También han sido propuestos y usados para otras aplicaciones; para incrementar el rendimiento y la selectividad de reacciones enzimáticas y catalíticas influyendo a través de la membrana sobre la concentración de una (o más) especies intermedias, removiéndolas selectivamente (o ayudando a mantenerlas en una concentración baja), y para proveer una interfase controlada entre dos o más reactantes.
- o)* FERMENTADORES. Este tipo de reactores utilizan hongos, los cuales forman un cultivo, el cual a su vez se transforma en una “sopa” espesa que contiene crecimientos filamentosos. Un ejemplo se encuentra en la fabricación de antibióticos como la penicilina.
- p)* REACTOR TRICKLE BED. Este tipo de reactor supone la existencia de un flujo continuo de gas y otro de líquido hacia abajo sobre un lecho fijo de

partículas sólidas catalíticas, las características de las partículas sólidas y de su empaquetamiento, junto con los caudales y propiedades de las dos corrientes de fluidos determinarán el régimen de flujo del reactor y también sus propiedades fluido-dinámicas.

También se pueden mencionar los reactores ISOTÉRMICOS, que son aquellos que trabajan u operan a una misma *temperatura constante*; y también los reactores ISOBÁRICOS, que son aquellos que trabajan u operan a una misma *presión constante*.

A continuación se muestra una lista que incluye el tipo de reactor que se utiliza para desarrollar determinado tipo de reacción, así como algunos ejemplos de aplicaciones en la industria química (desarrollado en base a la clasificación de Westerterp y Wijngaarden, 1992).

Tipo de Reactor

Ejemplos de Aplicaciones

Reacción: FASE GAS

Catalítico de lecho fijo (RCLF)	Reformado, hidrotratamiento, isomerización, conversión de CO, afinación de metanol, producción de anilina
RCLF flujo radial	Síntesis de amoniaco, deshidrogenación de etilbenceno
RCLF multitubular	Oxidación de etileno, reacciones hidro y oxiclорación
De lecho móvil	Deshidrogenación de butano

De lecho fluidizado	Craqueo, hidrocraqueo, producción de clorometil silanos
De lecho arrastrado	Síntesis Fischer-Tropsch

Reacción: FASE GAS (Exotérmica)

De llama	Combustión de H ₂ S, producción de negro de humo
Tubular	Cloración de metano, butadieno, reacciones de clorolisis
De lecho fluidizado	Cloración de metano, reacciones de clorolisis

Reacción: FASE GAS (Endotérmica)

De llama	Proceso Sachsse-Bartholome
Reformador	Craqueo de naftas con vapor, reacciones de pirólisis
De lecho fluidizado	Craqueo en lecho fluidizado de arena

Reacción: FASE LÍQUIDA (una o más fases)

Tubular	Polimerización, hidrólisis, polimerizaciones
Reformador	Coquización retardada, gasificación de crudos pesados
Recirculación externa	Descomposición de hidroperóxido de cumeno
Recirculación interna	Polimerización, producción de melamina
Tanque agitado (dis-continuo y semicontinuo)	Producción de nitrocompuestos aromáticos, síntesis de productos farmacéuticos, reacciones de polimerización
Tanq agitado continuo	Saponificaciones, esterificaciones, nitraciones, ciclación

Columna de destilación	Condensaciones aldólicas, descomposiciones diversas
De lecho fluidizado	Coque a partir de residuos pesados
Cinta transportadora	Películas de poliisobutileno, poliuretano
De spray	Descomposición de H_2SO_4 , producción de MgO

Reacción: GAS – LÍQUIDO

Tubular	Producción de adiponitrilo, de nitroanilina
Columna de burbujeo	Oxidaciones diversas (etileno, butano, cumeno)
Recirculación externa	Oxidación de hidrocarburos líquidos con aire
Tanq agitado con burbujeo	Hidrogenación de grasas, producción de SO_2
Columna de destilación	Producción de ácidos sulfónicos, de sulfatos de alquilo
De spray	Producción de anhídrido acético, de ácido fosfórico
De película descendente	Sulfonaciones diversas (ácidos grasos, olefinas)
Horno rotatorio	Reacciones de sólidos fundidos con gases

Reacción: CATALIZADAS: Fase Líquida, Gas-Líquido

Reactor Trickle Bed	Desulfuración y refinado de productos petrolíferos
De burbujeo	Aminación de alcoholes, hidrogenaciones
De lecho fluidizado	Hidrocrqueo y desulfuración de fracciones pesadas

Reacción: NO CATALIZADAS : Gas – Sólido, Fase Sólida

De eje vertical	Gasificación aut térmica de carbón, producción de CS_2
De lecho móvil	Desulfuración de gases, carbonización y coquización
De horno rotatorio	Producción de cemento, de cianamida cálcica, de ZnO
De lecho fluidizado y/o lecho arrastrado	Producción, combustión y gasificación de carbón, calcinación y cloración de menas metálicas

Reacción: NO CATALIZADAS : Líquido – Sólido

Tanque agitado	Producción de ácido salicílico, de cianamida, de BF_3
Amasado / tornillo sin fin	Producción de nitrocelulosa, de acetado, de celuloide

Reacción: ELECTROTÉRMICAS

Hornos de arco eléctrico, de resistencia eléctrica, Reactor Fluohm, Antorcha de plasma	Producción de acetileno, de etileno, de cianuro de hidrógeno, de carburo cálcico, de ferroaleaciones, descomposición de corindón, reducción de óxidos metálicos, cloración de óxidos
--	--

Reacción: ELECTROQUÍMICAS

Celdas electrolíticas, celdas de combustible, celdas de membrana	Electrólisis cloro-alkali, producción de metales por electrolisis de sales fundidas, refinado de metales, electrolisis del agua, producción de fluor, de ozono
--	--

Reacción: BIOQUÍMICAS, ANAERÓBICAS

Tanques de fermentación Producción de ácido láctico, de alcohol, fermentaciones

Reacción: BIOQUÍMICAS, AERÓBICAS (catalizador disuelto o suspendido)

De tanque agitado Producción de antibióticos, de aminoácidos, de levaduras

De circulación normal Tratamiento de aguas residuales, producción de biomasa

De circulación forzada Fermentación de desperdicios, producción de levaduras

Reacción: BIOQUÍMICAS, AERÓBICAS / ANAERÓBICAS (catalizador inmovilizado)

De lecho fijo Producción de aminoácidos, tratamiento de aguas

De lecho fluidizado Producción de enzimas, tratamiento de aguas

De membrana Producción de enzimas, de aminoácidos

Reacción: FOTOQUÍMICAS

Tubular, de columna de burbujas, tanque agitado, de película descendente, de cinta transportadora Cloración de benceno, de metano, de aromáticos, sulfocloraciones diversas, producción de dodecanotiol, de provitamina D₃, de vitamina D₂, polimerización para obtener poliacrilonitrilo y poliacrilato

2.1.3. REACTOR TANQUE AGITADO CONTINUO (CSTR)

Según Levenspiel (1986), este tipo de reactor consta de un tanque con una agitación casi perfecta, en el que hay un flujo continuo de material reaccionante y desde el cual sale continuamente el material que ha reaccionado (material producido). La condición de agitación no es tan difícil de alcanzar siempre y cuando la fase líquida no sea demasiada viscosa.

El propósito de lograr una buena agitación es lograr que en el interior del tanque se produzca una buena mezcla de los materiales, con el fin de asegurar que todo el volumen del recipiente se utilice para llevar a cabo la reacción, y que no existan o queden espacios muertos.

Se puede considerar que la mezcla es buena o casi perfecta, si el tiempo de circulación de un elemento reactante dentro del tanque es alrededor de una centésima del tiempo promedio que le toma al mismo elemento para entrar y salir del reactor.

Este reactor también es conocido por sus siglas en inglés CSTR que significa Continuous Stirred Tank Reactor.

Es ventajoso disponer de varios tanques en serie y que la corriente de material del proceso fluya de uno hacia el siguiente, esto da como resultado un cambio de composición escalonada entre los tanques sucesivos. Si hubiera sólo un tanque,

habría pérdidas apreciables de material sin reaccionar, aunque el material que no ha reaccionado puede recircular y volver a ingresar al tanque

Los elementos de fluido en la corriente de entrada al reactor tienen una probabilidad P_1 de permanecer en el reactor durante un tiempo T_1 , una probabilidad P_2 de permanecer un tiempo T_2 , y así sucesivamente; esto da origen a una distribución de tiempos de residencia, que tiene una influencia directa en la conversión y selectividad obtenidas en un reactor.

Las partes principales de este tipo de reactor son:

- El sistema de agitación
- Las tuberías de alimentación de reactantes
- Las tuberías de descarga de productos
- El recipiente o tanque
- La camisa de enfriamiento y/o calentamiento

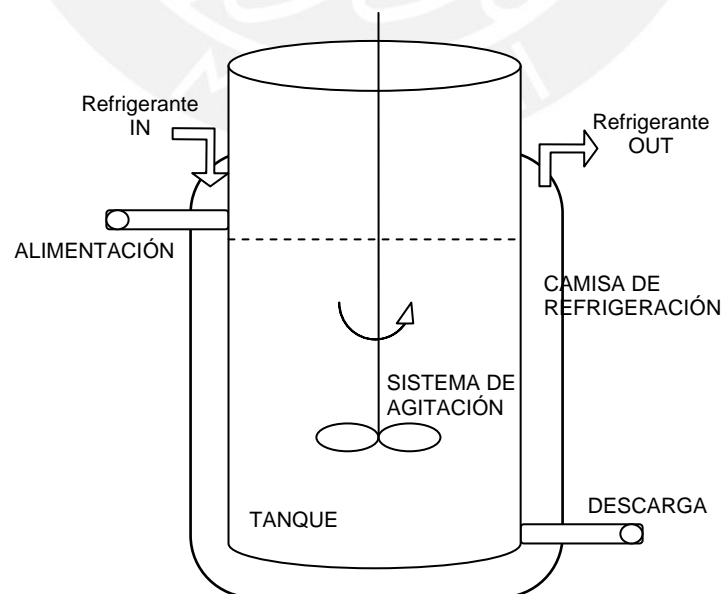


Figura 2.1: Esquema de un reactor tanque agitado continuo

Las suposiciones principales que se hacen respecto a este tipo de reactor son las siguientes:

- La mezcla reaccionante tiene las mismas propiedades en todos los puntos del reactor
- El flujo de salida tiene las mismas propiedades que la mezcla reaccionante en el interior del reactor
- El flujo de alimentación alcanza instantáneamente las propiedades de la mezcla reaccionante

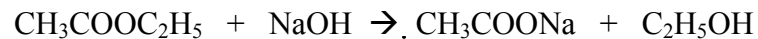
Estas suposiciones implican que la alimentación se mezcle con el contenido del reactor en un intervalo de tiempo mucho más corto que el tiempo promedio de residencia dentro del reactor del flujo que pasa a través de este.

2.2. MODELACIÓN MATEMÁTICA DE UN REACTOR QUÍMICO CONTINUO

2.2.1. DESCRIPCIÓN DE LA REACCIÓN QUÍMICA

En el interior del reactor químico se desarrollará una reacción de saponificación, de acetato de etilo ($\text{CH}_3\text{COOC}_2\text{H}_5$) con hidróxido de sodio (NaOH), la cual produce acetato de sodio (CH_3COONa) y etanol ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$). Esta reacción es ligeramente exotérmica. Para que la reacción transcurra normalmente, se debe procurar mantener

la temperatura dentro del reactor alrededor de 23°C y 40°C (296 a 313 °K), y también mantener el nivel de pH dentro del reactor alrededor de 11.5 y 12.5. Cada químico saliente tendrá una concentración estimada de 0.25 mol. Estos valores dependen de la receta utilizada, conforme a la calidad de producto requerido.



Según Levenspiel (1998), la saponificación consiste en una hidrólisis alcalina de la preparación lipídica (con KOH o NaOH). Los lípidos derivados de ácidos grasos (ácidos monocarboxílicos de cadena larga) dan lugar a sales alcalinas (jabones) y alcohol, que son fácilmente extraíbles en medio acuoso.

En otras palabras, consiste en la hidrólisis, es decir, el desdoblamiento de un compuesto químico por la acción del agua, de las grasas y los aceites. Los jabones no son sino sales alcalinas de los ácidos grasos, producidos por un proceso de saponificación. Todos los jabones están producidos por el proceso bioquímico que sufre una grasa (ácido graso + glicerina) ante la presencia de un álcali (hidróxido sódico o hidróxido potásico). El hidróxido rompe la molécula de grasa liberando la glicerina y reaccionando con los ácidos grasos, quedando como producto final las sales sódicas o potásicas de estos ácidos grasos, que es lo que conocemos como jabón independientemente de los aditivos (colorantes, perfumes, etc.) que se le pueda añadir.

En el caso de que la saponificación se efectúe con sosa (NaOH), se obtendrán los jabones de sodio, que son sólidos y ampliamente usados en el hogar. En caso de hacerlo con potasa (KOH), se obtendrán jabones de potasio, que tienen consistencia líquida. El jabón recién hecho tiene que reposar unas semanas para que consiga su textura ideal, y pueda ser envasado y comercializado.

El proceso inverso a la saponificación se conoce como ESTERIFICACIÓN, que consiste en unir un ácido graso con un alcohol mediante un enlace covalente, formando un éster y liberándose una molécula de agua.

INDICE DE SAPONIFICACION: Este parámetro nos dirá exactamente que cantidad de éster (acetato) necesitamos para saponificar una mol de lejía o álcali (KOH o NaOH) que se este utilizando, pues si se intenta saponificar con mayor cantidad de éster, que el que es necesario, provoca que el producto no tenga las características que en los objetivos se planten.

2.2.2. DESCRIPCIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LA PLANTA

Componentes de la planta:

- Reactor: Es un reactor tipo tanque agitado continuo, el cual cuenta con dos ductos de entrada de material y un ducto de salida de material. Además cuenta con un sistema de control que le permite mantener una agitación uniforme y casi perfecta; también cuenta con un sistema de control que abre

una válvula de drenaje cuando detecta que el nivel del tanque es superior al deseado.

- Camisa de Refrigeración: Es un sistema de enfriamiento basado en tubos para intercambiar calor. Cuenta con un tanque para almacenar el líquido refrigerante y una bomba para hacerlo circular. El líquido refrigerante a usar será el agua.
- Tanques de almacenamiento: Estos tanques permiten almacenar los materiales que entran al reactor, dicho material es impulsado mediante electrobombas. También se cuenta con un tanque para almacenar el material producido.

La siguiente figura ilustra estos componentes

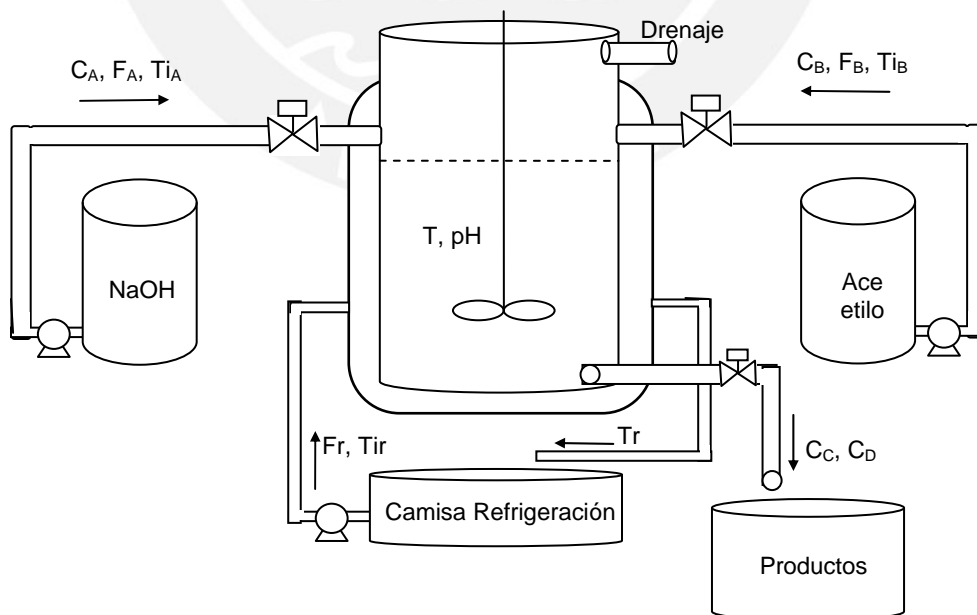


Figura 2.2: Esquema de la Planta

Características:

- El objetivo principal del sistema de control, es controlar la concentración de los materiales que salen del reactor (acetato de sodio y etanol).
- Para realizar dicho control es necesario variar las concentraciones de entrada de los materiales reactantes (acetato de etilo y hidróxido de sodio). Los actuadores para variar las concentraciones de entrada son válvulas proporcionales que permiten combinar y disolver el reactante en agua.
- Otra variable a controlar es la temperatura dentro del reactor químico, esta debe mantenerse en un rango de operación, esto se conseguirá variando la temperatura de la camisa de refrigeración.
- Por tanto también se debe controlar la temperatura en la camisa de refrigeración, para esto la acción de control recae sobre la temperatura de entrada del refrigerante que recorre la superficie del reactor.
- También se busca controlar el nivel de pH de la reacción, este parámetro se mantiene constante, sólo varía cuando se presentan complicaciones en el control la mezcla de reactantes. será afectado actuando sobre los flujos de material en la entrada.

Variables sensadas:

- Flujo de los materiales reactantes que entran al reactor (F_A , F_B)
- Temperatura de los materiales que entran al reactor (T_{iA} , T_{iB})
- Concentración de los materiales que entran al reactor (C_A , C_B)
- Concentración de los materiales que salen del reactor (C_C , C_D)
- Temperatura en el interior del reactor (T)
- Nivel de pH en el interior del reactor (pH)
- Flujo del líquido refrigerante (F_r)
- Temperatura del refrigerante en la entrada de la camisa (T_{ir})
- Temperatura del líquido refrigerante en la salida (T_r)

Variables manipuladas (actuadores)

- Concentración en la entrada, de los materiales C y D (C_{iA} , C_{iB})
- Temperatura en la entrada, a la camisa de refrigeración (T_{ir})

Se pueden presentar perturbaciones en:

- Temperatura de los materiales que entran al reactor (T_{iA} , T_{iB})
- Flujo de los materiales reactantes que entran al reactor (F_{iA} , F_{iB})
- Flujo del líquido refrigerante (F_r)

2.2.3. MODELO MATEMÁTICO DEL CSTR

Existe formas y métodos por medio de los cuales los sistemas de control pueden ser representados por medio de funciones matemáticas, esta representación recibe el nombre de **Modelamiento Matemático**, este modelo describirá las características

dinámicas del sistema a través de ecuaciones diferenciales. El modelamiento puede ser:

- *Analítico* : Cuando se aplica las leyes físicas y químicas correspondientes a cada componente del sistema, que en conjunto forman una estructura o función matemática.
- *Experimental* : Consiste en la identificación de los parámetros, mediante el análisis de datos de entrada y salida, estimando valores posibles que se ajusten al sistema

El modelo matemático del presente reactor químico agitado continuo, se basa en los balances de masa y energía del proceso, los cuales han sido llevados a ecuaciones diferenciales, (basado en el trabajo de Hernández y Borregales, 2001, así como en el libro “Process modeling, simulation, and control for chemical engineers” de Luyben, W.L., 1990).

Con la finalidad de simplificar el modelo se han hecho algunas suposiciones:

- Se asume que la agitación es perfecta, por tanto la concentración, presión, y temperatura son iguales en cualquier punto del tanque, así como en la corriente de salida
- Se asume que el volumen del reactor es constante
- Se asume que las propiedades de los compuestos no varían con la temperatura
- Se asume que no hay pérdidas de calor hacia el ambiente

- No se considera como objeto de control el sistema de agitación, ni el sistema de control de nivel del tanque.
- La concentración y temperatura de los materiales al interior del reactor son las mismas a las de los productos que están saliendo del reactor.
- El flujo de salida de productos es igual al flujo de entrada de material reactante.
- No se ha considerado las dinámicas no lineales de los sensores y actuadores.

Debido a que los comportamientos antes mencionados pueden afectar el desempeño de un sistema real, se ha considerado simular estos efectos a través de perturbaciones y ruido.

A continuación se presentan los balances de masa y energía:

BALANCE DE MASAS

La expresión general del balance de masas para un material X es la siguiente:

$$V * \frac{dC_X}{dt} = F_{i_X} * C_{i_A} - F * C_X \pm G \quad (1)$$

Donde:

V	Volumen del tanque	[m ³]
C _{i_X}	Concentración de material X a la entrada	[mol]
C _X	Concentración de material X a la salida	[mol]
F _{i_X}	Velocidad de flujo molar de X a la entrada	[lit/seg]

F	Velocidad de flujo molar a la salida	[lit/seg]
G_X	Velocidad de generación o transformación	[mol/seg]

Si la temperatura, actividad catalítica, concentración, y demás parámetros asumidos son válidos y uniformes, entonces se cumplirá que:

$$G_X = r_X * V \quad (2)$$

La velocidad de reacción (r_X) se define como la velocidad de formación o de desaparición de moles del material X, transformados por cada unidad de tiempo y por cada una unidad de volumen.

Para este caso, la reacción sigue la ecuación de segundo orden, por tanto:

$$-r_X = K * C_X \quad (3)$$

Ecuación de Arrhenius:

$$K = p * z * e^{\frac{-E_x}{R*T}} \quad (4)$$

La cual se resolverá según Henry y Simancas (1996): $K = 63380 * e^{\frac{-2407.2}{T}}$ (5)

Donde:

r_x	Velocidad de reacción	[mol/(seg*m ³)]
K	Constante de velocidad	[mol ³ /(seg*m ³)]
p	Factor estérico	[mol ⁿ⁺¹ /m ³]
Z	Frecuencia de colisiones	[1/(seg*mol)]
Ex	Energía de activación	[°K*kJ/(Kg*mol)]
R	Constante de Botzmann	[°K*kJ/(Kg*mol)]
T	Temperatura	[°K]

Se sabe que el volumen de la masa reaccionante al interior del tanque es constante, entonces tanto el flujo de entrada como el flujo de salida serán iguales, por lo que el balance global de las masas será:

$$2 * F = Fi_A + Fi_B \quad (6)$$

El balance de masas para el hidróxido de sodio (A) es el siguiente:

$$V * \frac{dC_A}{dt} = Fi_A * Ci_A - F * C_A - K * C_A * C_B * V \quad (7)$$

El balance de masas para el acetato de etilo (B) es el siguiente:

$$V * \frac{dC_B}{dt} = Fi_B * Ci_B - F * C_B - K * C_A * C_B * V \quad (8)$$

El balance de masas para el acetato de sodio (C) es el siguiente:

$$V * \frac{dC_C}{dt} = -F * C_C + K * C_A * C_B * V \quad (9)$$

El balance de masas para el etanol (D) es el siguiente:

$$V * \frac{dC_D}{dt} = -F * C_D + K * C_A * C_B * V \quad (10)$$

BALANCE DE ENERGÍA

Según Fogler (1992), el balance de energía en un reactor CSTR de volumen constante esta dado por la siguiente expresión:

$$Q + \sum (F_{i_X} * C_{i_X} * H_{i_X}) - \sum (F * C_X * H_X) = \sum (C_X * V * C_{p_X}) * \frac{dT}{dt} + \sum (H_X * V) * \frac{dC_X}{dt} \quad (11)$$

Subdividiendo cada término:

$$\sum (F_{i_X} * C_{i_X} * H_{i_X}) = F_{i_A} C_{i_A} H_{i_A} + F_{i_B} C_{i_B} H_{i_B} + F_{i_A} C_r H_r + F_{i_B} C_r H_r \quad (12)$$

$$\sum (F * C_X * H_X) = F C_A H_A + F C_B H_B + F C_C H_C + F C_D H_D + F C_r H_r \quad (13)$$

$$\sum (C_X * V * C_{p_X}) * \frac{dT}{dt} = V (C_A C_{p_A} + C_B C_{p_B} + C_C C_{p_C} + C_D C_{p_D} + C_r C_{p_r}) * \frac{dT}{dt} \quad (14)$$

$$\sum (H_X * V) * \frac{dC_X}{dt} = V \left(H_A \frac{dC_A}{dt} + H_B \frac{dC_B}{dt} + H_C \frac{dC_C}{dt} + H_D \frac{dC_D}{dt} + H_r \frac{dC_r}{dt} \right) \quad (15)$$

Los términos correspondientes a $\frac{dC_X}{dt}$ se obtienen de las ecuaciones (7) (8) (9) y (10)

$$\text{El término } Q \text{ se desarrolla de la siguiente manera: } Q = UA(Tr - T) \quad (16)$$

Donde U es el coeficiente global de transferencia de calor, y según Hernández y Borregales (2001) se puede asumir constante:

$$U = \frac{19.19}{A} \quad (17)$$

Operando algebraicamente y simplificando se obtiene que el balance de energía, que expresa el comportamiento dinámico de la temperatura dentro del reactor, queda reducido a la siguiente expresión:

$$VCp \frac{dT}{dt} = \frac{UA(Tr - T)}{V\rho_L} - Fi_A Ci_A Cp_A (T - Ti_A) - Fi_B Ci_B Cp_B (T - Ti_B) + \Delta H (KC_A C_B) V \quad (18)$$

Capacidad calorífica:

$$Cp = C_A Cp_A + C_B Cp_B + C_C Cp_C + C_D Cp_D \quad (19)$$

Generalizando la Capacidad Calorífica del material X se encuentra a partir de la siguiente ecuación, los coeficientes para cada material, fueron obtenidos a partir de la bibliografía Perry (1992).

$$Cp_X = \alpha_{X1} T^3 + \alpha_{X2} T^2 + \alpha_{X3} T + \alpha_{X4} \quad (20)$$

Las entalpías se agrupan en un solo término:

$$\Delta H = hr(Tref) + \int_{Tref}^T (Cp_C + Cp_D - Cp_A - Cp_B) dt \quad (21)$$

El coeficiente $hr(T_{ref})$ representa la parte de la integral que es constante, es decir la sumatoria de las capacidades caloríficas para una temperatura de referencia (T_{ref}).

Donde:

U	Coeficiente de transferencia de calor	$[J/({}^{\circ}K \cdot \text{seg} \cdot \text{m}^2)]$
A	Superficie o área para la transferencia de calor	$[\text{m}^2]$
T	Temperatura en el reactor a la salida	$[{}^{\circ}K]$
T_{iA}	Temperatura del material A en la entrada	$[{}^{\circ}K]$
T_{iB}	Temperatura del material B en la entrada	$[{}^{\circ}K]$
T_r	Temperatura en el refrigerante a la salida	$[{}^{\circ}K]$
C_p	Capacidad calorífica general	$[\text{kJ}/(\text{Kg} \cdot {}^{\circ}C)]$
C_{p_x}	Capacidad calorífica del material X	$[\text{kJ}/(\text{Kg} \cdot {}^{\circ}C)]$
ρ_L	Densidad del líquido en el tanque	$[\text{Kg}/\text{m}^3]$
H_x	Entalpías de formación del material X	$[\text{kJ}/C]$
ΔH	Calor desarrollado en la reacción	$[\text{kJ}/C]$

El comportamiento dinámico para la temperatura de la camisa de refrigeración (según referencia <http://isaw.isa.cie.uva.es/ecosimjava/reactor.htm>) esta dado por la expresión:

$$\frac{dT_r}{dt} = \frac{Fr\rho_r C_{p_r}(T_{ir} - T_r) + UA(T - T_r)}{Vr\rho_r C_{p_r}} \quad (22)$$

Donde:

T_r	Temperatura del refrigerante a la salida	$[{}^{\circ}K]$
T_{ir}	Temperatura del refrigerante a la entrada	$[{}^{\circ}K]$

F_r	Flujo del líquido refrigerante	[lit/seg]
C_p	Calor específico del refrigerante	[kJ/(°K*Kg)]
V_r	Volumen de la camisa de refrigeración	[m ³]
ρ_r	Densidad del refrigerante	[Kg/m ³]

También es necesario conocer el valor del P_H , este valor puede ser medido experimentalmente por un sensor, pero en este caso de simulación, se hará una aproximación mediante la expresión:

$$\dot{P}h = \frac{(F_{i_A} * pH_A + F_{i_B} * pH_B - 2F * Ph - K * C_A * C_B)}{V} \quad (23)$$

$$pH = 11 + \log_{10}(Ph) \quad (24)$$

Donde:

pH	Valor de pH dentro del reactor
pH _A	Valor de pH del material A
pH _B	Valor de pH del material B
Ph	Variable auxiliar para determinar el pH

Las Ecuaciones del Modelo Matemático del Reactor quedan resumidas de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
 \dot{C}_A &= \frac{Fi_A * Ci_A - F * C_A - K * C_A * C_B * V}{V} \\
 \dot{C}_B &= \frac{Fi_B * Ci_B - F * C_B - K * C_A * C_B * V}{V} \\
 \dot{C}_C &= \frac{-F * C_C + K * C_A * C_B * V}{V} \\
 \dot{C}_D &= \frac{-F * C_D + K * C_A * C_B * V}{V} \\
 \dot{T} &= \frac{\frac{UA(Tr - T)}{V\rho_L} - Fi_A Ci_A Cp_A (T - Ti_A) - Fi_B Ci_B Cp_B (T - Ti_B) + \Delta H (K C_A C_B) V}{VCp} \\
 \dot{T}_r &= \frac{Fr\rho_r Cp_r (Tir - Tr) + UA(T - Tr)}{Vr\rho_r Cp_r} \\
 \dot{p}h &= \frac{(Fi_A * pH_A + Fi_B * pH_B - 2F * Ph - K * C_A * C_B)}{V}
 \end{aligned}
 \tag{25}$$

El modelo matemático anterior se encuentra expresado en tiempo continuo, pero debido a que este debe ser simulado mediante una computadora (utilizando Matlab), se necesitará de un algoritmo que permita leer los datos uno por uno en intervalos periódicos de tiempo, y al mismo tiempo vaya integrando dichos datos a fin de representar el sistema en tiempo continuo.

La integración del sistema se realizará mediante Euler:

$$\text{Por ejemplo dado el sistema: } \dot{x} = A \cdot x + B \cdot u$$

Se simularía mediante Matlab de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
 X_p &= A * X(k) + B * u(k); \\
 X(k+1) &= X(k) + X_p * dt
 \end{aligned}$$

Donde:

“k” es el instante de tiempo actual, y “dt” es el intervalo de tiempo periódico

Cuando se quiere trabajar con un modelo discretizado, según las recomendaciones internacionales (Åström-1997), el intervalo de muestreo varía entre 1 y 3 seg. cuando la variable es flujo, y entre 10 y 20 seg. cuando la variable es temperatura; aunque controladores digitales comerciales puedan trabajar con periodos de muestreo de fracciones de segundo.

Para la simulación del presente sistema, se ha considerado un intervalo “dt” muy pequeño en comparación a los recomendados, con finalidad de garantizar una equivalencia con el tiempo continuo, el cual será de 0.1 seg.

El modelo matemático puede representarse de la siguiente manera cuando se requiera simular el sistema:

$$\begin{aligned}
 C_A(k+1) &= C_A(k) + \frac{Fi_A * Ci_A(k) - F * C_A(k) - K * C_A(k) * C_B(k) * V}{V} * dt \\
 C_B(k+1) &= C_B(k) + \frac{Fi_B * Ci_B(k) - F * C_B(k) - K * C_A(k) * C_B(k) * V}{V} * dt \\
 C_C(k+1) &= C_C(k) + \frac{-F * C_C(k) + K * C_A(k) * C_B(k) * V}{V} * dt \\
 C_D(k+1) &= C_D(k) + \frac{-F * C_D(k) + K * C_A(k) * C_B(k) * V}{V} * dt \\
 T(k+1) &= T(k) + \frac{\frac{UA * (Tr(k) - T(k))}{V\rho_L} - Fi_A Ci_A Cp_A * (T(k) - Ti_A) - Fi_B Ci_B Cp_B * (T(k) - Ti_B) + \Delta H * (K C_A(k) C_B(k)) * V}{VCp}} * dt \\
 Tr(k+1) &= Tr(k) + \frac{Fr\rho_r Cp_r * (Tir(k) - Tr(k)) + UA * (T(k) - Tr(k))}{Vr\rho_r Cp_r} * dt \\
 Ph(k+1) &= Ph(k) + \frac{Fi_A * pH_A + Fi_B * pH_B - 2F * Ph(k) - K * C_A(k) * C_B(k)}{V} * dt
 \end{aligned}
 \tag{26}$$

2.3. VALIDACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO

2.3.1. SIMULACIÓN DEL MODELO

La simulación del sistema hace uso del conjunto de ecuaciones que representan el modelo matemático del reactor (26), así como las ecuaciones adicionales: (5), (6), (17), (19), (20), (21) y (24).

Las características físicas del reactor, condiciones iniciales de simulación y perturbaciones, son similares a las del reactor utilizado por Hernández y Borregales (2001). Los coeficientes de las constantes químicas (tales como capacidad calorífica, densidad, etc.) han sido tomadas de "Tablas y gráficas para: Termodinámica I, Termodinámica II, y Termodinámica general" (PUCP-1986), y de "Perry manual del ingeniero químico" (Perry-1992).

A continuación se muestran los datos con que fue simulado el sistema:

CONSTANTES

```

Ex = 2407.2;      %Energía activación y Const. Botzmann
Ko = 63380;      %Fact.Esterico * Frec.Colisiones      [mol^n/(seg*m^3)]
V = 7.9;         %Volumen del tanque                [m^3]
Vr = 8;          %Volumen de la camisa de refrigeración [m^3]
A = 24;          %Superficie o área para la transferencia de calor [m^2]
Cpr = 4.19;      %Calor especifico del refrigerante (agua) [kJ/(Kg*°K)]
dr = 1000;      %Densidad del refrigerante (agua)      [Kg/m3]
  
```

dL = 76;	%Densidad del liquido en el tanque	[Kg/m3]
pHA = 13.3;	%Valor de pH del material A	
pHB = 7.10;	%Valor de pH del material B	
CpA = 3.26;	%Capacidad calorífica del material A	[kJ/(Kg*°K)]
CpB = 2.02;	%Capacidad calorífica del material B	[kJ/(Kg*°K)]
CpC = 2.51;	%Capacidad calorífica del material C	[kJ/(Kg*°K)]
CpD = 3.76;	%Capacidad calorífica del material D	[kJ/(Kg*°K)]

PERTURBACIONES

FiA = 0.01268;	%Velocidad de flujo molar de A a la entrada	[lit/seg]
FiB = 0.01037;	%Velocidad de flujo molar de B a la entrada	[lit/seg]
TiA = 300;	%Temperatura del material A en la entrada	[°K]
TiB = 300;	%Temperatura del material B en la entrada	[°K]
Fr = 0.4768;	%Flujo del líquido refrigerante	[lit/seg]

INICIALIZACION DE VARIABLES

CA = 0.08;	%Concentración de material A a la salida	[mol]
CB = 0.08;	%Concentración de material B a la salida	[mol]
CC = 0.09;	%Concentración de material C a la salida	[mol]
CD = 0.15;	%Concentración de material D a la salida	[mol]
T = 306;	%Temperatura en el reactor a la salida	[°K]
Tr = 300;	%Temperatura en el refrigerante a la salida	[°K]
Ph = 0.01;	%Variable auxiliar para determinar el pH	
CiA = 0.2;	%Concentración de material A a la entrada	[mol]
CiB = 0.2;	%Concentración de material B a la entrada	[mol]
Tir = 306;	%Temperatura del refrigerante a la entrada	[°K]

Las Curvas de Respuesta en el Tiempo se muestran a continuación:

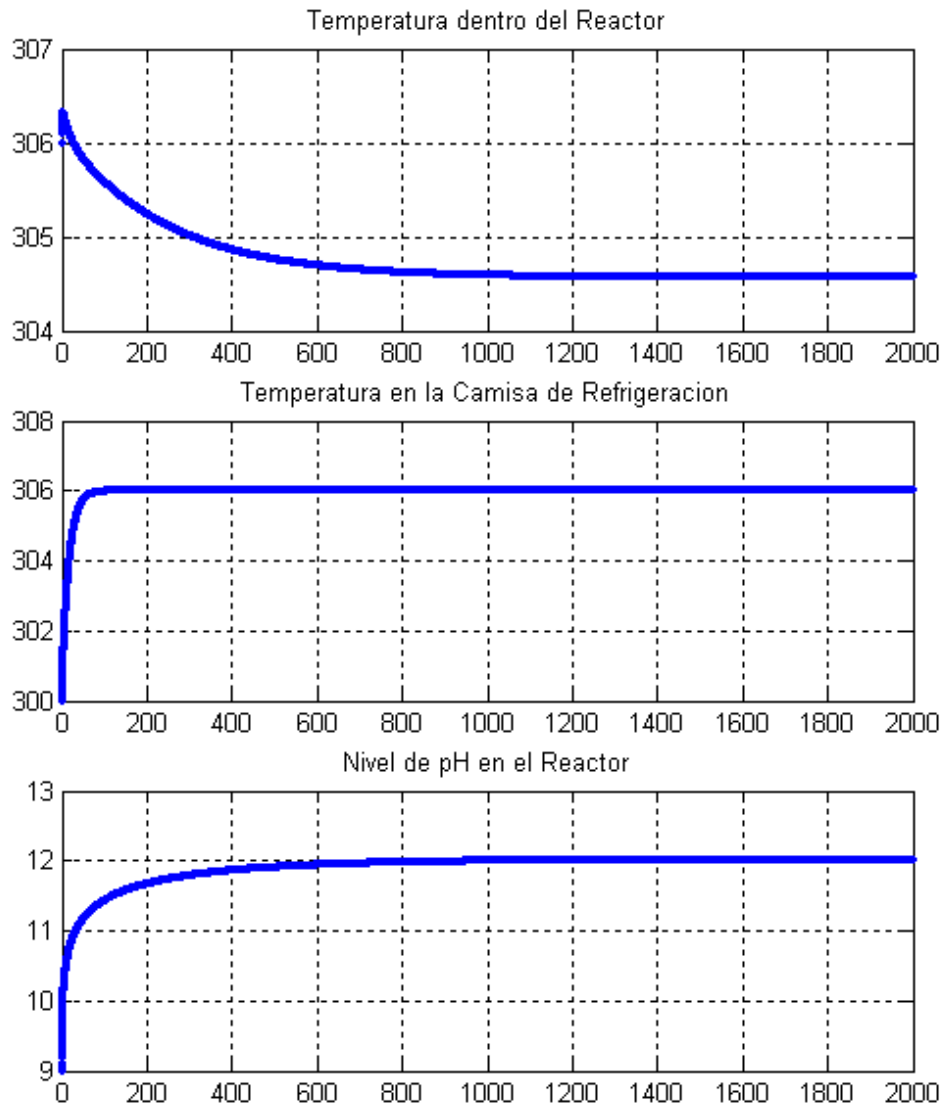


Figura 2.3: Respuesta en el tiempo de la Temperatura en el Reactor, Temperatura en la Camisa de Refrigeración, y Nivel de pH

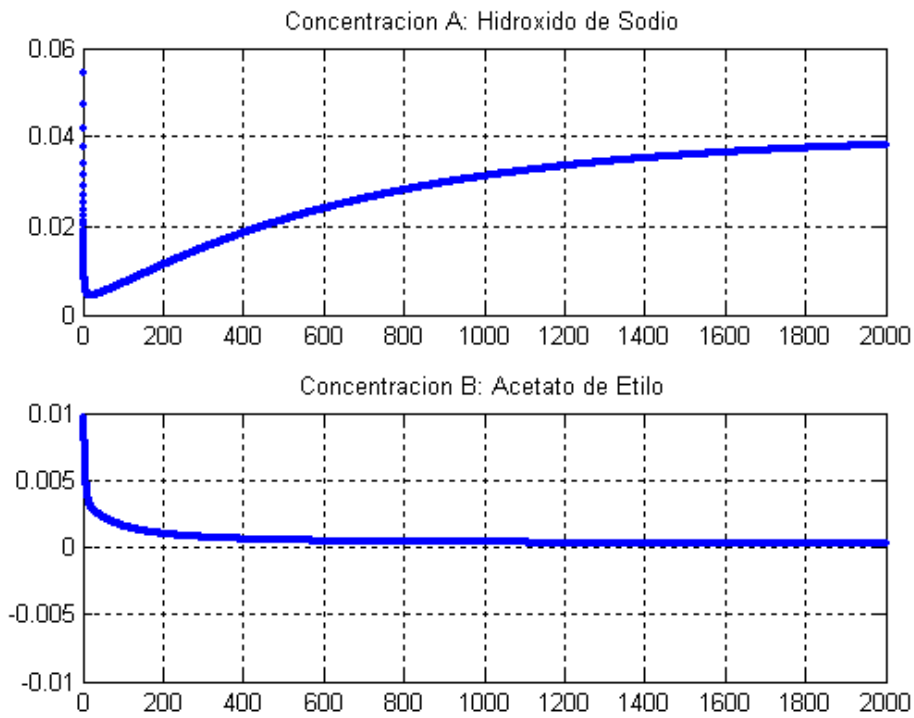
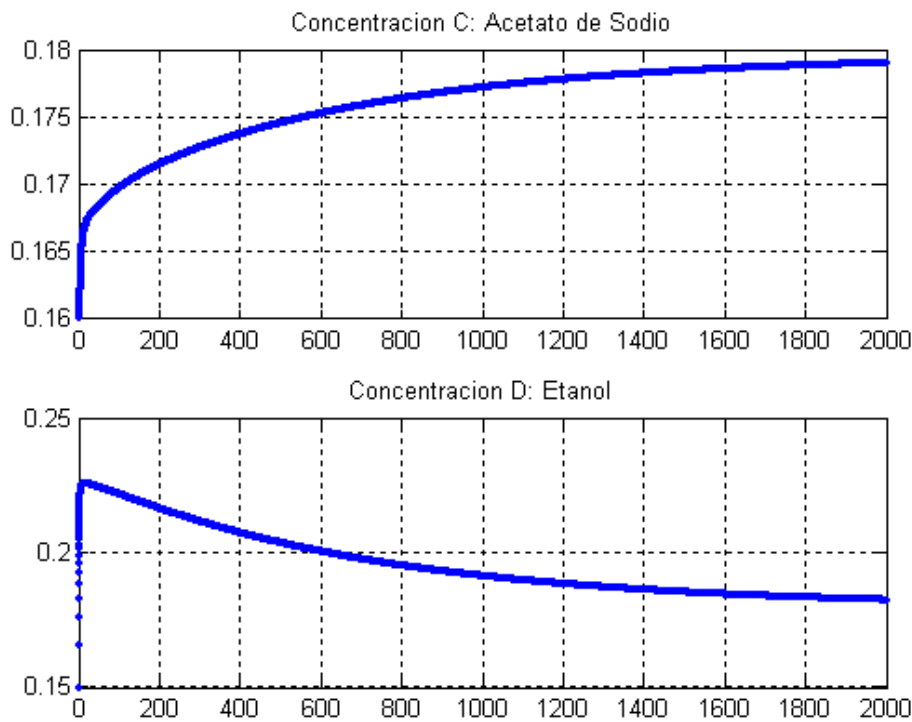


Figura 2.4: Respuesta en el tiempo de la concentración de Hidróxido de Sodio y Acetato de Etilo



2.3.2. VALIDACIÓN DEL MODELO

Se validará el modelo según la curva de Respuesta en el Tiempo de la Temperatura dentro del reactor químico.

A continuación se muestra el resultado obtenido en la simulación del presente modelo matemático, para la temperatura

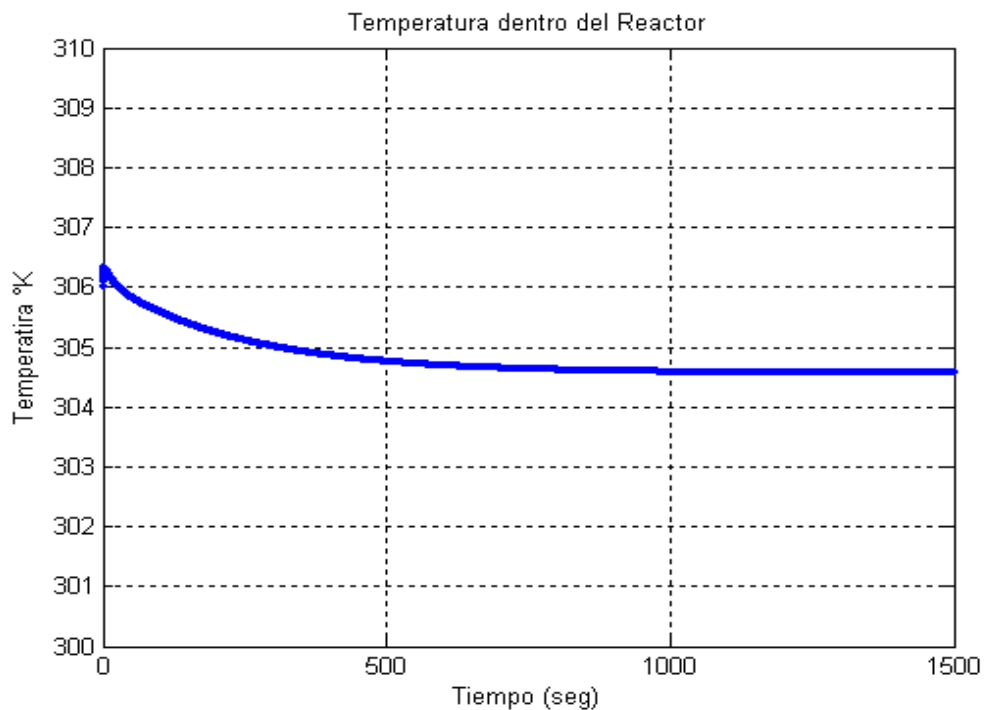


Figura 2.6: Validación de Respuesta en el tiempo de la Temperatura en el Reactor

Para comparar y validar dicha respuesta se hace uso de las curvas elaboradas en el trabajo de Hernández y Borregales (2001), las cuales han sido generadas bajo las mismas condiciones. Se tiene dos curvas, una corresponde a un reactor químico real, la cual se ha denominada “Experimental”, y la segunda corresponde a un modelo simulado denominada “Simulación UA final”

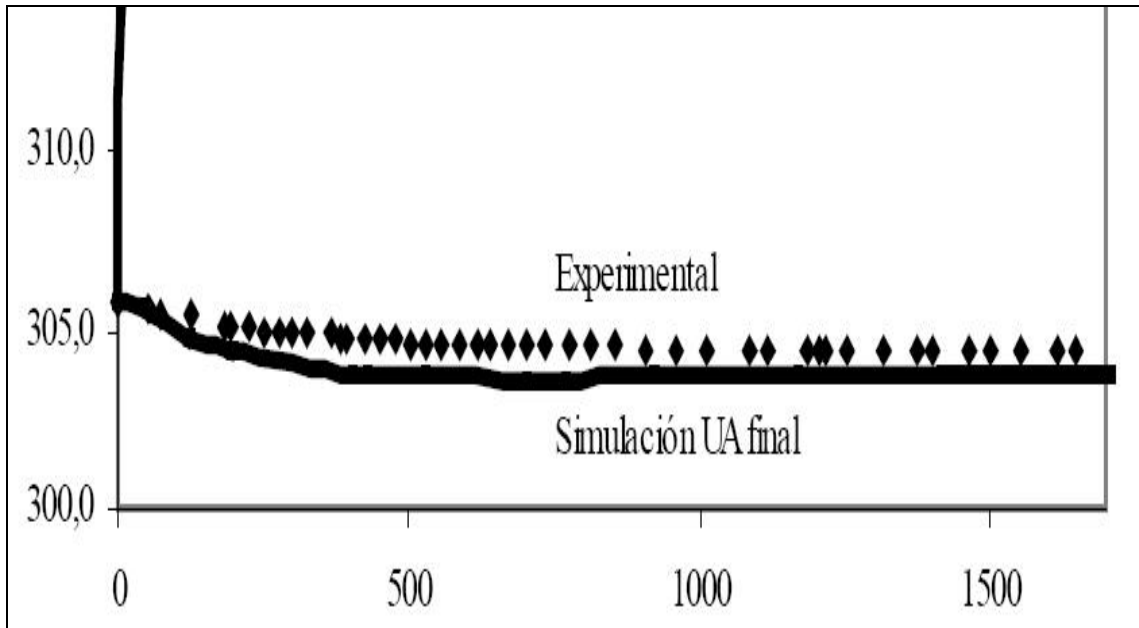


Figura 2.7: Respuesta en el tiempo de la Temperatura en el Reactor, según Hernández y Borregales.

La siguiente tabla muestra una comparación entre las características de las curvas presentadas:

Curva	Tiempo de establecimiento (seg)	Valor de establecimiento final (°K)
Modelo actual	1000	304.6
Experimental	950	304.5
Simulación UAfinal	900	304

Tabla 2.1: Comparación de curvar en validación de modelo matemático

Como se puede apreciar, la curva del modelo actual (modelo matemático planteado en esta tesis) es muy similar a la curva experimental, y también parecida a la simulación UAfinal. Dadas estas similitudes se puede considerar que el modelo matemático planteado recoge las dinámicas de un sistema real, y por tanto es válido utilizarlo para diseñar los sistemas de control.

2.4. ESTABILIDAD DEL SISTEMA

Se demostrará la estabilidad del modelo matemático hallado, mediante la evaluación de la estabilidad en los puntos de equilibrio del sistema, aplicando el Teorema de Hartman-Grobman (Lawrence-1991).

Utilizando los mismos datos que se utilizaron para validar el sistema (coeficientes, constantes, perturbaciones, señal de control), se consigue reemplazar los parámetros del modelo, para expresarlo en forma numérica. Luego las derivadas se igualaron a cero, dando como resultado las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned}
 0.00506-0.0253*CA-63380*\exp(-2407.2/T)*CA*CB &= 0 \\
 0.00506-0.0253*CB-63380*\exp(-2407.2/T)*CA*CB &= 0 \\
 0.0253*CC+63380*\exp(-2407.2/T)*CA*CB &= 0 \\
 -0.0253*CD+63380*\exp(-2407.2/T)*CA*CB &= 0 \\
 (0.032*Tr-0.2432*T+63.36+500702*(-296+0.99*T)*\exp(-2407.2/T)*CA*CB) \\
 / (25.754*CA+15.958*CB+19.829*CC+29.7*CD) &= 0 \\
 15-0.0506*Tr+0.00057*T &= 0 \\
 0.5165-0.0506*Ph-8022.78*\exp(-2407.2/T)*CA*CB &= 0
 \end{aligned}$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones, se logró encontrar los siguientes puntos de equilibrio:

$$\begin{aligned}
 CA &= -1.03541310897 \\
 CB &= -1.03541310897 \\
 CC &= 1.23541310897 \\
 CD &= 1.23541310897 \\
 T &= 10.1218092969 \\
 Tr &= 164.973890287 \\
 Ph &= 298.471468658
 \end{aligned}$$

Luego se linealizó el modelo continuo por medio del Jacobiano, quedando la matriz A expresada de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
 \text{MatrizA}(1,1) &= (-1/2*FiA-1/2*FiB-Ko*\exp(-Ex/T)*CB*V)/V; \\
 \text{MatrizA}(1,2) &= -Ko*\exp(-Ex/T)*CA; \\
 \text{MatrizA}(1,3) &= 0; \\
 \text{MatrizA}(1,4) &= 0; \\
 \text{MatrizA}(1,5) &= -Ko*Ex/T^2*\exp(-Ex/T)*CA*CB; \\
 \text{MatrizA}(1,6) &= 0; \\
 \text{MatrizA}(1,7) &= 0; \\
 \text{MatrizA}(2,1) &= -Ko*\exp(-Ex/T)*CB; \\
 \text{MatrizA}(2,2) &= (-1/2*FiA-1/2*FiB-Ko*\exp(-Ex/T)*CA*V)/V; \\
 \text{MatrizA}(2,3) &= 0; \\
 \text{MatrizA}(2,4) &= 0; \\
 \text{MatrizA}(2,5) &= -Ko*Ex/T^2*\exp(-Ex/T)*CA*CB; \\
 \text{MatrizA}(2,6) &= 0; \\
 \text{MatrizA}(2,7) &= 0; \\
 \text{MatrizA}(3,1) &= Ko*\exp(-Ex/T)*CB; \\
 \text{MatrizA}(3,2) &= Ko*\exp(-Ex/T)*CA; \\
 \text{MatrizA}(3,3) &= (-1/2*FiA-1/2*FiB)/V; \\
 \text{MatrizA}(3,4) &= 0; \\
 \text{MatrizA}(3,5) &= Ko*Ex/T^2*\exp(-Ex/T)*CA*CB; \\
 \text{MatrizA}(3,6) &= 0; \\
 \text{MatrizA}(3,7) &= 0; \\
 \text{MatrizA}(4,1) &= Ko*\exp(-Ex/T)*CB; \\
 \text{MatrizA}(4,2) &= Ko*\exp(-Ex/T)*CA; \\
 \text{MatrizA}(4,3) &= 0; \\
 \text{MatrizA}(4,4) &= (-1/2*FiA-1/2*FiB)/V; \\
 \text{MatrizA}(4,5) &= Ko*Ex/T^2*\exp(-Ex/T)*CA*CB;
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{MatrizA}(4,6) &= 0; \\
 \text{MatrizA}(4,7) &= 0; \\
 \text{MatrizA}(5,1) &= (\text{hr}+(\text{CpC}+\text{CpD}-\text{CpA}-\text{CpB})*(\text{T}-\text{Tref}))*\text{Ko}*\exp(-\text{Ex}/\text{T})*\text{CB}/(\text{CA}*\text{CpA}+\text{CB}*\text{CpB}+\text{CC}*\text{CpC}+\text{CD}*\text{CpD})- \\
 & \quad ((1919/100*\text{Tr}-1919/100*\text{T})/\text{dL}-\text{FiA}*\text{CiA}*\text{CpA}*(\text{T}-\text{TiA})-\text{FiB}*\text{CiB}*\text{CpB}*(\text{T}-\text{TiB})+(\text{hr}+(\text{CpC}+\text{CpD}-\text{CpA}-\text{CpB})*(\text{T}- \\
 & \quad \text{Tref}))*\text{Ko}*\exp(-\text{Ex}/\text{T})*\text{CA}*\text{CB}*\text{V})/\text{V}/(\text{CA}*\text{CpA}+\text{CB}*\text{CpB}+\text{CC}*\text{CpC}+\text{CD}*\text{CpD})^2*\text{CpA}; \\
 \text{MatrizA}(5,2) &= (\text{hr}+(\text{CpC}+\text{CpD}-\text{CpA}-\text{CpB})*(\text{T}-\text{Tref}))*\text{Ko}*\exp(-\text{Ex}/\text{T})*\text{CA}/(\text{CA}*\text{CpA}+\text{CB}*\text{CpB}+\text{CC}*\text{CpC}+\text{CD}*\text{CpD})- \\
 & \quad ((1919/100*\text{Tr}-1919/100*\text{T})/\text{dL}-\text{FiA}*\text{CiA}*\text{CpA}*(\text{T}-\text{TiA})-\text{FiB}*\text{CiB}*\text{CpB}*(\text{T}-\text{TiB})+(\text{hr}+(\text{CpC}+\text{CpD}-\text{CpA}-\text{CpB})*(\text{T}- \\
 & \quad \text{Tref}))*\text{Ko}*\exp(-\text{Ex}/\text{T})*\text{CA}*\text{CB}*\text{V})/\text{V}/(\text{CA}*\text{CpA}+\text{CB}*\text{CpB}+\text{CC}*\text{CpC}+\text{CD}*\text{CpD})^2*\text{CpB}; \\
 \text{MatrizA}(5,3) &= -((1919/100*\text{Tr}-1919/100*\text{T})/\text{dL}-\text{FiA}*\text{CiA}*\text{CpA}*(\text{T}-\text{TiA})-\text{FiB}*\text{CiB}*\text{CpB}*(\text{T}-\text{TiB})+(\text{hr}+(\text{CpC}+\text{CpD}-\text{CpA}- \\
 & \quad \text{CpB})*(\text{T}-\text{Tref}))*\text{Ko}*\exp(-\text{Ex}/\text{T})*\text{CA}*\text{CB}*\text{V})/\text{V}/(\text{CA}*\text{CpA}+\text{CB}*\text{CpB}+\text{CC}*\text{CpC}+\text{CD}*\text{CpD})^2*\text{CpC}; \\
 \text{MatrizA}(5,4) &= -((1919/100*\text{Tr}-1919/100*\text{T})/\text{dL}-\text{FiA}*\text{CiA}*\text{CpA}*(\text{T}-\text{TiA})-\text{FiB}*\text{CiB}*\text{CpB}*(\text{T}-\text{TiB})+(\text{hr}+(\text{CpC}+\text{CpD}-\text{CpA}- \\
 & \quad \text{CpB})*(\text{T}-\text{Tref}))*\text{Ko}*\exp(-\text{Ex}/\text{T})*\text{CA}*\text{CB}*\text{V})/\text{V}/(\text{CA}*\text{CpA}+\text{CB}*\text{CpB}+\text{CC}*\text{CpC}+\text{CD}*\text{CpD})^2*\text{CpD}; \\
 \text{MatrizA}(5,5) &= (-1919/100/\text{dL}-\text{FiA}*\text{CiA}*\text{CpA}-\text{FiB}*\text{CiB}*\text{CpB}+(\text{CpC}+\text{CpD}-\text{CpA}-\text{CpB}))*\text{Ko}*\exp(- \\
 & \quad \text{Ex}/\text{T})*\text{CA}*\text{CB}*\text{V}+(\text{hr}+(\text{CpC}+\text{CpD}-\text{CpA}-\text{CpB})*(\text{T}-\text{Tref}))*\text{Ko}*\text{Ex}/\text{T}^2*\exp(- \\
 & \quad \text{Ex}/\text{T})*\text{CA}*\text{CB}*\text{V})/\text{V}/(\text{CA}*\text{CpA}+\text{CB}*\text{CpB}+\text{CC}*\text{CpC}+\text{CD}*\text{CpD}); \\
 \text{MatrizA}(5,6) &= 1919/100/\text{V}^2/\text{dL}/(\text{CA}*\text{CpA}+\text{CB}*\text{CpB}+\text{CC}*\text{CpC}+\text{CD}*\text{CpD}); \\
 \text{MatrizA}(5,7) &= 0; \\
 \text{MatrizA}(6,1) &= 0; \\
 \text{MatrizA}(6,2) &= 0; \\
 \text{MatrizA}(6,3) &= 0; \\
 \text{MatrizA}(6,4) &= 0; \\
 \text{MatrizA}(6,5) &= 1919/100/\text{Vr}/\text{dr}/\text{Cpr}; \\
 \text{MatrizA}(6,6) &= (-\text{Fr}*\text{dr}*\text{Cpr}-1919/100)/\text{Vr}/\text{dr}/\text{Cpr}; \\
 \text{MatrizA}(6,7) &= 0; \\
 \text{MatrizA}(7,1) &= -\text{Ko}*\exp(-\text{Ex}/\text{T})*\text{CB}/\text{V}; \\
 \text{MatrizA}(7,2) &= -\text{Ko}*\exp(-\text{Ex}/\text{T})*\text{CA}/\text{V}; \\
 \text{MatrizA}(7,3) &= 0; \\
 \text{MatrizA}(7,4) &= 0; \\
 \text{MatrizA}(7,5) &= -\text{Ko}*\text{Ex}/\text{T}^2*\exp(-\text{Ex}/\text{T})*\text{CA}*\text{CB}/\text{V}; \\
 \text{MatrizA}(7,6) &= 0; \\
 \text{MatrizA}(7,7) &= (-\text{FiA}-\text{FiB})/\text{V};
 \end{aligned}$$

Evaluando dicha matriz en el punto de equilibrio, se obtiene la matriz A linealizada, la cual de manera simplificada se puede expresar así:

$$A = \begin{bmatrix} -0.0253 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.0253 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0.0253 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0.0253 & 0 & 0 & 0 \\ -5.2571 & -3.2575 & -4.0477 & -6.0635 & -0.1350 & -0.0018 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.0006 & 0.0506 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.0506 \end{bmatrix}$$

Los autovalores de la matriz A linealizada (tomando dicha matriz sin redondear decimales) son los siguientes:

$$\begin{bmatrix} -0.050633 \\ -0.025316 \\ -0.013478 \\ -0.050599 \\ -0.025316 \\ -0.025316 \\ -0.025316 \end{bmatrix}$$

Como se puede apreciar, los autovalores son reales negativos, por tanto el punto evaluado es asintóticamente estable, de acuerdo con el teorema de Hartman-Grobman, cuando se evalúa la matriz A en el punto de equilibrio y esta resulta ser tipo Hurwitz (todos los autovalores negativos) existe una equivalencia tal que las características de estabilidad del punto de equilibrio se pueden trasladar a todo el sistema. Además dado que los autovalores no presentan parte imaginaria se puede desprestigiar la presencia de oscilaciones y armónicos. Por lo tanto se puede considerar que el modelo matemático hallado pertenece a un sistema estable.

Capítulo 3

**DESARROLLO DE LOS CONTROLADORES
APLICADOS AL REACTOR CSTR**

3.1. INTRODUCCIÓN A LAS REDES NEURONALES

3.1.1. TEORÍA BÁSICA SOBRE REDES NEURONALES

Según Fausett (1994), las redes neuronales artificiales (RNA) son básicamente sistemas de procesamiento de información, surgen por la necesidad de construir sistemas con cierta “inteligencia”, capaces de aprender autónomamente, haciendo una analogía con la neurobiología. Entre los pioneros en el modelado de neuronas se encuentra Warren McCulloch y Walter Pitts. Estos dos investigadores propusieron un modelo matemático de neurona. En este modelo cada neurona estaba dotada de un conjunto de entradas y salidas.

Según Harvey (1994), son sistemas en donde existen entradas X y salidas Y , integradas por un número finito de unidades de procesamiento, las cuales operan en paralelo y su arreglo es a modo de estratos semejando a las redes neuronales biológicas. Las unidades de procesamiento son conectados una con otra mediante conectores de pesos ajustables V y W . Si los pesos de dichos conectores cambian, la salida de la red cambia, logrando así alcanzar una salida deseada.

Según Haykin, (1994), las redes neuronales son definidas como redes interconectadas masivamente en paralelo por elementos matemáticos simples y adaptativos, con organización jerárquica, y que intentan interactuar con los objetivos del mundo real tal como el sistema nervioso biológico.

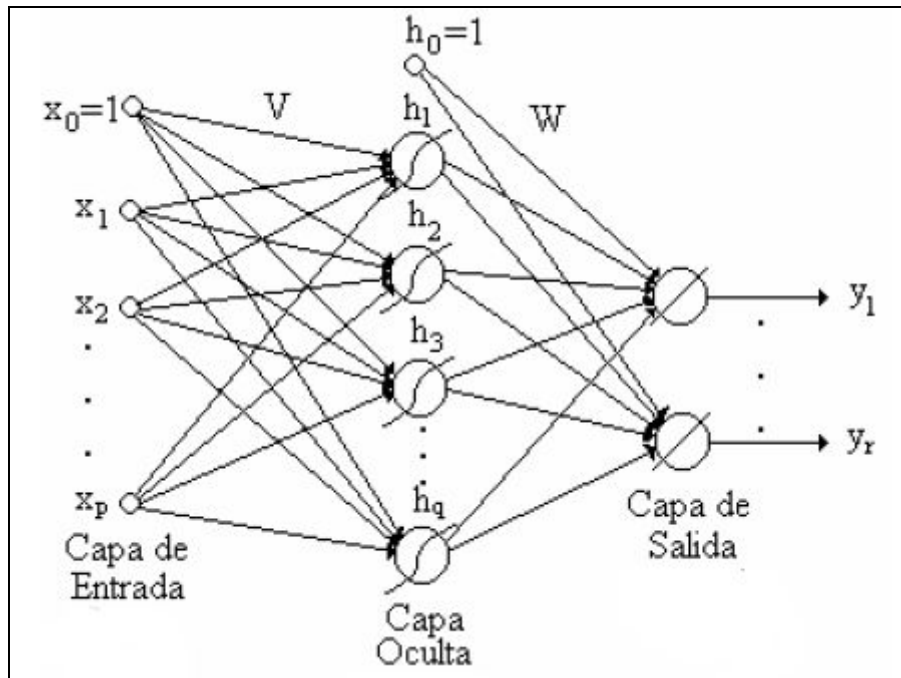


Figura 3.1: Modelo de Red Neuronal

La idea central en los sistemas neuronales artificiales es que para abordar el tipo de problemas que en cerebro resuelve con eficiencia, puede resultar conveniente construir sistemas que “copien” en cierto modo la estructura de las redes neuronales biológicas con el fin de alcanzar una funcionalidad similar.

La teoría de las RNA está inspirada en la estructura y funcionamiento del sistema nervioso, donde el elemento básico es la neurona, las cuales emplean señales eléctricas y químicas para comunicarse entre sí.

Existen 3 tipos de neuronas en las RNA:

- Neuronas de Entrada: Son aquellas que reciben los estímulos o señales externas.

- Neuronas Ocultas: Tienen contacto directo con las neuronas de entrada y salida, mas no con las señales de entrada y salida.
- Neuronas de Salida: Transmiten las respuestas del sistema

Modelo de Neurona Artificial

Una neurona estándar consta de:

- Un conjunto de entradas $X_j(t)$ y pesos sinápticos W_{ij}
- Una regla de propagación $h_i(t) = \sigma(W_{ij}, X_j(t)) = \sum(W_{ij} * X_j)$
- Una función de activación $Y_i(t) = f_i(h_i(t))$, que también representa la salida de la red.

Con frecuencia se añade al conjunto de pesos de la neurona, un parámetro adicional θ_i , denominado umbral, dando como resultado que la función de activación quede resumida como: $\sum(W_{ij} * X_j - \theta_i)$

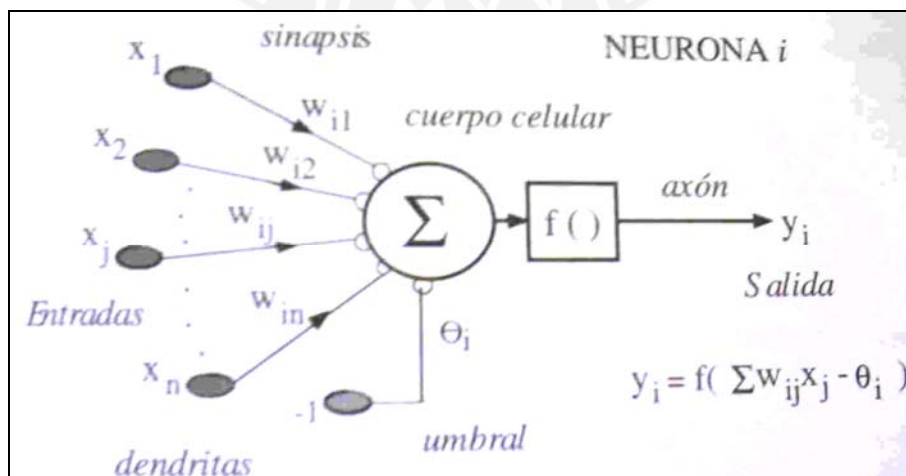


Figura 3.2: Modelo de Neurona Artificial estándar

Estructura de un Sistema Neuronal Artificial

En la realización de un sistema neuronal artificial puede establecerse una estructura jerárquica similar a las redes biológicas, el elemento esencial de partida será la neurona artificial, la cual se organiza en capas, varias capas constituirán una red neuronal, y por último una o varias redes se asociarán a interfaces de entrada y salida para constituir un sistema neuronal.

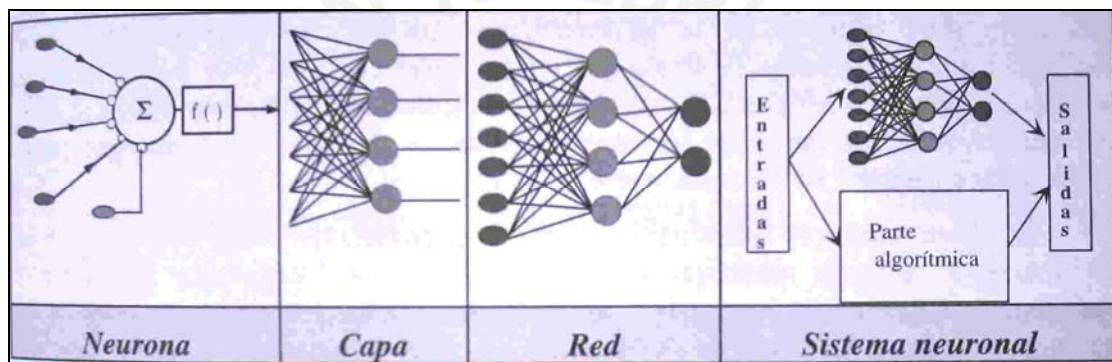


Figura 3.3: Estructura jerárquica de un Sistema Neuronal

Topología de las Redes Neuronales:

La estructura de la red está definida por la conectividad y la dirección de flujo de las señales de entrada y salida, considerando factores como la retroalimentación de dichas señales.

Por su topología las RNA pueden ser de 2 tipos:

- **Monocapa:** Se caracterizan por tener conexiones laterales entre las neuronas de la única capa, también puede haber conexiones auto recurrentes. Algunas

modalidades: Brain State in a box, Hopfield, Máquina de Boltzmann, Máquina de Cauchy.

- ♦ Multicapa: Se caracterizan por tener 2 ó más capas con conexiones entre ellas, estas a su vez pueden ser:
 - Feedforward: Las señales se propagan ya sea hacia delante o hacia atrás, de una capa hacia otra. Modalidades: Perceptrón, Adaline, Linear adaptive memory, Backpropagation.
 - Feedforward/Feedback: La información circula tanto hacia delante como hacia atrás, durante su funcionamiento, inclusive hacia las conexiones laterales. Modalidades: Adaptive resonante theory, Bidirectional associative memory.

Entrenamiento de la Red Neuronal:

Consiste en el proceso sistemático que permite el ajuste de los pesos de las conexiones entre unidades de procesamiento. El número de neuronas de la capa intermedia interviene directamente en la eficiencia del aprendizaje, la mejor forma de determinar este valor es probando varias cantidades de neuronas y tomar los mejores resultados. Se debe tomar en consideración el número de iteraciones, el error que se puede alcanzar, y el menor tiempo de procesamiento.

Cuando la red ya esta entrenada, y se desea validar o verificar los pesos logrados, se puede correr una única iteración con un ratio de aprendizaje cero.

Escalamiento y Normalización de Datos:

Dado que las funciones de activación que conforman las unidades de procesamiento tienen un límite de saturación, se debe tener cuidado de que los valores de entrada y salida sean llevados proporcionalmente al rango de trabajo de la red y de esta forma aprovechar las capacidades de la red al máximo.

3.1.2. APRENDIZAJE DE LA RED NEURONAL

Según Chen (1996), en cada iteración del sistema, se incorporan señales de entrada que pasan a través de la red cruzando todas las capas de esta, la salida de la red es utilizada para compararla con una salida deseada, produciéndose un error. Una función de costo que busca minimizar dicho error es la encargada de modificar los pesos actuales incrementándolos o decrementándolos a razón de un ratio de aprendizaje.

El aprendizaje de una red neuronal se realiza mediante el ajuste de los pesos que conectan sus neuronas. Por la forma de aprendizaje se clasifican según sea la modalidad de dicho aprendizaje: supervisado o no supervisado:

- ♦ Red con Aprendizaje Supervisado: Su entrenamiento se realiza mediante la dirección de un agente externo (supervisor) que determina la respuesta que

debe producir la red a partir de una condición de entrada determinada. Puede ser:

- Sistema con corrección de error: Los pesos se ajustan en función al error entre la salida real y la salida deseada.
 - Sistema por refuerzo: El agente supervisor indica mediante una señal de refuerzo, si la salida obtenida se ajusta a la deseada o no, los pesos son ajustados mediante un mecanismo basado en probabilidades
 - Estocástico: Consiste en hacer cambios aleatorios de los valores de la red y determinar si la energía de la red es menor después de realizado dicho cambio, quedando así aceptado dicho cambio, la energía de la red se calcula usando Lyapunov
- ♦ Red con Aprendizaje No Supervisado: También llamado autosupervisado, no requiere de influencia externa para cambiar sus parámetros, sus pesos se ajustan automáticamente. Pueden ser:
- Hebbiano: Consiste en el ajuste de pesos de acuerdo con la correlación de los valores de activación de dos neuronas conectadas.
 - Competitiva y Cooperativa: Las neuronas compiten y cooperan unas con otras de forma tal que solo una salida se activa, tratando de clasificar los datos que son introducidos.

Las redes neuronales según la modalidad de actualización de pesos pueden tener un aprendizaje tipo batch, o un aprendizaje tipo patrón:

- Batch: Cuando se usa todos los datos para actualizar los pesos, es necesario esperar un ciclo completo de iteraciones para recién ajustar los pesos.
- Patrón: Cuando se usa el dato presente para actualizar los pesos, por cada nuevo dato calculado se va ajustando los pesos.

Proceso de actualización de Pesos:

Según Kartalopoulos (1996) y Vemuri (1992), dada la siguiente red neuronal, se busca minimizar una función de costo J , tal que el error entre la salida de la red Y y la salida deseada Y_d sea el menor posible.

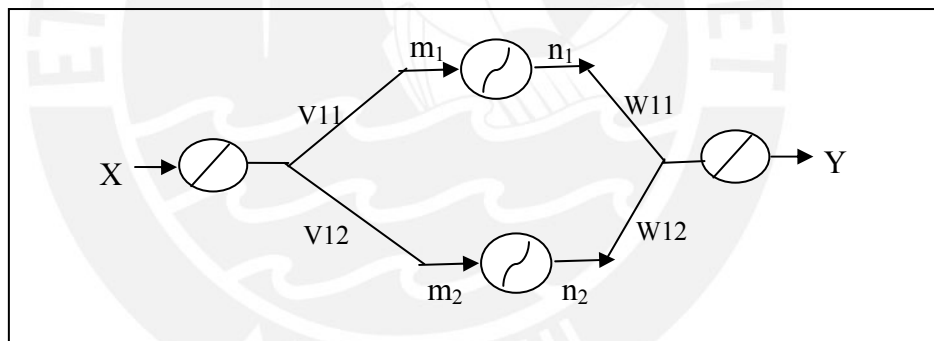


Figura 3.4: Actualización de pesos en Neuronas

Sea X la entrada a la red, V_{ij} y W_{ij} los pesos de las conexiones, n_j y m_j la función de activación, tenemos:

La salida de la red es: $Y = n_1 V_{11} + n_2 V_{12}$

La función de costo a minimizar es:

$$J = \frac{1}{2}(Y_1 - Yd_1)^2 + \frac{1}{2}(Y_2 - Yd_2)^2 + \frac{1}{2}(Y_3 - Yd_3)^2 + \dots + \frac{1}{2}(Y_k - Yd_k)^2$$

La actualización de los pesos esta dado por:

$$V_{ij} = V_{ij} - \eta \frac{\partial J}{\partial V_{ij}} \quad W_{ij} = W_{ij} - \eta \frac{\partial J}{\partial W_{ij}}$$

Donde η es la tasa de aprendizaje de la red

Las derivadas de la función de costo respecto a los pesos esta dado por:

$$\frac{\partial J}{\partial V_{ij}} = (Y_1 - Yd_1) \frac{\partial Y_1}{\partial V_{ij}} + (Y_2 - Yd_2) \frac{\partial Y_2}{\partial V_{ij}} + (Y_3 - Yd_3) \frac{\partial Y_3}{\partial V_{ij}} + \dots + (Y_k - Yd_k) \frac{\partial Y_k}{\partial V_{ij}}$$

$$\frac{\partial J}{\partial W_{ij}} = (Y_1 - Yd_1) \frac{\partial Y_1}{\partial W_{ij}} + (Y_2 - Yd_2) \frac{\partial Y_2}{\partial W_{ij}} + (Y_3 - Yd_3) \frac{\partial Y_3}{\partial W_{ij}} + \dots + (Y_k - Yd_k) \frac{\partial Y_k}{\partial W_{ij}}$$

Red Neuronal con Aprendizaje BackPropagation:

Es una red neuronal multicapa, con aprendizaje supervisado, conocido como algoritmo de retropropagación de errores. Posee la capacidad de autoadaptar los pesos que conectan las neuronas de las capas intermedias.

Este algoritmo es de naturaleza estocástica, es decir, que encuentra el camino hacia un mínimo local o global de manera zigzagueante, por lo cual tiene una convergencia lenta, lo que implica un mayor número de iteraciones para lograr reducir el error.

Si se tiene una red con 2 entradas y 2 salidas, tal como se muestra en la figura, se desea calcular los errores retropropagados E_1 y E_2 , estos serán dados en función a los errores en las salidas e_1 y e_2 .

$$E_1 = (e_1 * a + e_2 * b) \cdot \frac{\partial n_1}{\partial m_1} \quad E_2 = (e_1 * c + e_2 * d) \cdot \frac{\partial n_2}{\partial m_2}$$

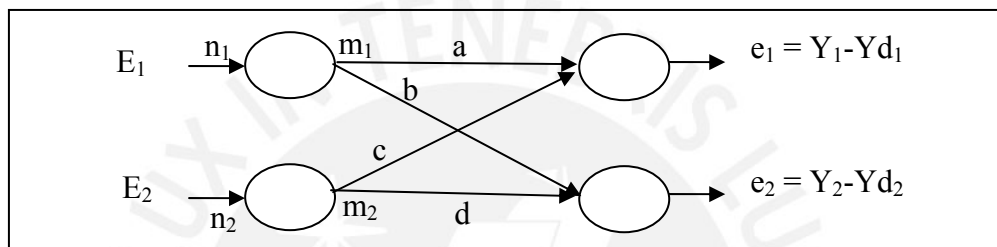


Figura 3.5: Neuronas con Error Retropropagado

Si se tiene una red con “i” entradas, “j” neuronas en la capa intermedia, “k” salidas, tal como se muestra en la siguiente figura, la forma como se actualizarán los pesos usando la retropropagación de errores es tal como se indica a continuación.

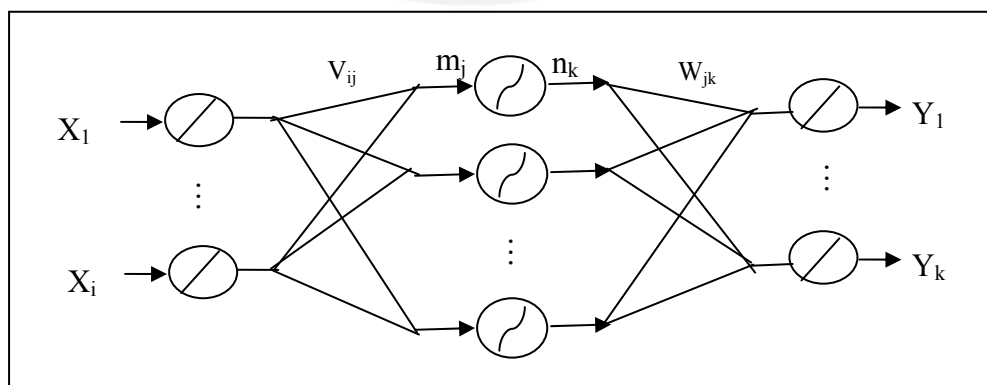


Figura 3.6: Red Neuronal con Error Retropropagado

$$\frac{\partial J}{\partial W_{jk}} = e_k * n_j$$

$$\frac{\partial J}{\partial V_{ij}} = (e_1 * W_{j1} + e_2 * W_{j2} + \dots + e_k * W_{jk}) \left(\frac{\partial n_j}{\partial m_j} \right) (X_i)$$

3.1.3. DISEÑO DE NEUROCONTROLADORES

El neuro-control es una de las alternativas que ofrece el control inteligente para resolver el problema de controlar un sistema con niveles de “inteligencia”, inherentes a las propiedades de las Redes Neuronales Artificiales, que emulan ciertas características propias del cerebro humano.

Las redes neuronales pueden ser utilizadas para el diseño de controladores, el controlador debe poder ser capaz de cumplir tres tareas:

- Estabilización: Dado un estado inicial X_0 , se halla una señal de control $u(t)$, tal que el estado $X(t)$ converja en cero.
- Regulación: En este caso se busca que el estado $X(t)$ converja en un valor o referencia constante
- Tracking: En este caso se busca que el estado $X(t)$ siga una referencia variable en el tiempo

En general las RNA cuando se utilizan para el control, se clasifican desde dos puntos de vista.:

- RNA como ayuda para un controlador existente (sintonizando o corrigiendo un controlador convencional): Consiste en realizar una replica o identificación de un controlador ya existente y correctamente sintonizado, basándose en los datos de entrada y salida de dicho controlador
- RNA actuando como controlador propiamente dicho (Control Neuronal Directo): En este caso mediante los pesos de la red neuronal se consigue obtener una señal de control que permita regular el sistema.

Neurocontroladores Estáticos:

Un neurocontrolador estático puede ser entrenado de 2 formas: siguiendo un modelo de referencia, y también tomando el error de tracking tanto como entrada y como salida de la red.

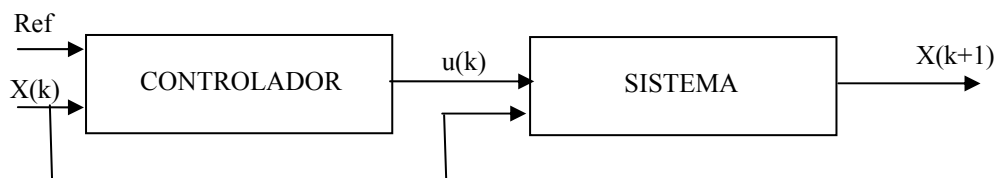
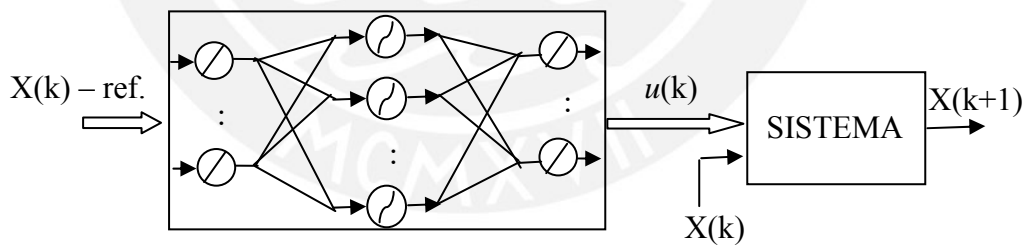


Figura 3.7: Neurocontrolador Estático

El entrenamiento por modelo de referencia supone la creación de un vector de datos que indiquen la forma como se deben de comportar los estados del sistema que se busca controlar.

Dado el modelo de referencia $X(k+1) = A * X(k)$, de define la matriz A de modo tal que el estado X converja hacia el valor deseado. Los valores para X en cada instante de tiempo k es almacenado (X_r)

Se evalúa la condición inicial del estado X, y se ingresa al neurocontrolador, el cual produce una señal de control, esta señal de control conjuntamente con los valores de X(k) son ingresados al sistema, para luego producir un estado X(k+1), este valor generado es comparado con el valor de $X_r(k+1)$ almacenado de la data producida por el modelo de referencia, el error obtenido es retropropagado permitiendo calcular las variaciones de los pesos del neurocontrolador.

Entrada al neurocontrolador: $X(k)$

Salida del neurocontrolador: $u(k)$

Entrada al sistema: $X(k), u(k)$

Salida del sistema: $X(k+1)$

Error para retropropagación: $X(k+1) - X_r(k+1)$

La otra modalidad de entrenamiento no necesita hacer uso de datos guardados, sino que dada una condición inicial para los estados X estos son comparados con una referencia produciendo una señal de error, la cual ingresa al neurocontrolador, la red

produce una señal de control que conjuntamente con los estados es ingresada al sistema.

Dicha señal de error también es empleada como el error de la red, el cual sirve para la retropropagación de errores y la posterior actualización de los pesos.

Entrada al neurocontrolador: $X(k)$ - referencia

Salida del neurocontrolador: $u(k)$

Entrada al sistema: $X(k), u(k)$

Salida del sistema: $X(k+1)$

Error para retropropagación: $X(k)$ – referencia

Dependiendo del tipo de entrenamiento ya sea patrón o batch, va a depender el momento en que se actualizan los pesos.

Neurocontroladores Dinámicos:

Existen 2 técnicas de implementación de redes neuronales dinámicas: BPTT (Back Propagation Through Time) y DBP (Dynamic Back Propagation).

Cuando se emplea la técnica BPTT el sistema tiene que estar en forma de red neuronal, mientras que cuando se emplea la técnica DBP el sistema puede estar en ecuaciones o en matrices de espacio-estado.

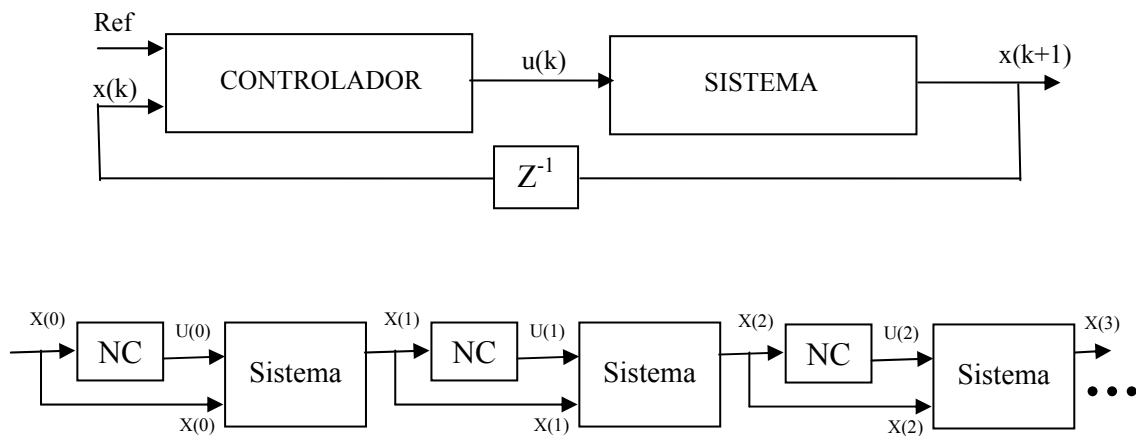


Figura 3.8: Neurocontrolador Dinámico DBP

Dado un sistema: $X_{(k+1)} = f(X_k , u_k)$, el cual es conocido, se busca controlar el sistema, para lo cual se desea minimizar una función de costo J:

$$J = \sum_{k=0}^{N-1} \frac{1}{2} (X_{(k+1)}^2 + \xi \cdot u_{(k)}^2)$$

Donde los estados del sistema son representados por : $X_{(k+1)} = \varphi(X_k , u_k)$

Así mismo la señal de control se representa por : $u_{(k)} = \psi(X_k)$

Los pesos del neurocontrolador son representados por “V” y “W” :

$$w = w - \eta \frac{\partial J}{\partial w} \quad v = v - \eta \frac{\partial J}{\partial v}$$

Donde, η representa la tasa de aprendizaje de los pesos

La actualización de los pesos responde a la siguiente derivada total:

$$\frac{\partial J}{\partial w} = X_{(1)} \frac{\partial X_{(1)}}{\partial w} + \xi \cdot u_{(0)} \frac{\partial u_{(0)}}{\partial w} + X_{(2)} \frac{\partial X_{(2)}}{\partial w} + \xi \cdot u_{(1)} \frac{\partial u_{(1)}}{\partial w} + X_{(3)} \frac{\partial X_{(3)}}{\partial w} + \xi \cdot u_{(2)} \frac{\partial u_{(2)}}{\partial w} + \dots$$

Las derivadas totales de X respecto a los pesos W , se expresan de la siguiente forma:

$$\frac{\overline{\partial X_{(k+1)}}}{\overline{\partial w}} = \frac{\partial X_{(k+1)}}{\partial u_{(k)}} \cdot \frac{\partial u_{(k)}}{\partial w} + \left(\frac{\partial X_{(k+1)}}{\partial X_{(k)}} + \frac{\partial X_{(k+1)}}{\partial u_{(k)}} \cdot \frac{\partial u_{(k)}}{\partial X_{(k)}} \right) \cdot \frac{\overline{\partial X_{(k)}}}{\overline{\partial w}}$$

Las derivadas totales de u respecto a los pesos W , se expresan de la siguiente forma:

$$\frac{\overline{\partial u_{(k)}}}{\overline{\partial w}} = \frac{\partial u_{(k)}}{\partial w} + \frac{\partial u_{(k)}}{\partial X_{(k)}} \cdot \frac{\overline{\partial X_{(k)}}}{\overline{\partial w}}$$

3.2. DESARROLLO DE LOS SISTEMAS DE CONTROL APLICADOS AL REACTOR

Los controladores han sido implementados vía software para ser simulados, utilizando los programas Matlab 6.5 y Labview 6.1, dichas implementaciones se encuentran escritas en el anexo 1 de la presente tesis.

Para el diseño de todos los controladores, se consideró el caso para una única condición inicial, y posteriormente el caso para múltiples condiciones iniciales, además se asumió que no existían perturbaciones ni ruido en la planta. Así mismo las referencias y condiciones iniciales son las mismas para todos los controladores.

Las condiciones iniciales utilizadas por todos los controladores, están detalladas en el programa de Matlab: “ReactorCondicionesIniciales.m”

Otra consideración importante en el diseño de todos los controladores fue la saturación en los actuadores:

- Concentración en entrada de material A (C_{iA}), de 0 a 0.5 mol
- Concentración en entrada de material B (C_{iB}), de 0 a 0.5 mol
- Temperatura en entrada del líquido refrigerante (T_{ir}), de 275° a 350°K

La implementación de los controladores, fue hecha en base al modelo discretizado del reactor químico (ecuaciones en diferencias), así mismo las ecuaciones diferenciales fueron integradas utilizando el método de Euler, con un diferencial de tiempo (dt) de 0.1 segundo.

A continuación se detallan los fundamentos matemáticos y pasos seguidos para el diseño y desarrollo de los diversos controladores que son aplicados al mismo reactor CSTR.

3.2.1. DESARROLLO DE UN CONTROLADOR PID DISCRETO

Un primer controlador clásico seleccionado para hacer un análisis comparativo con el controlador planteado en la presente tesis es el algoritmo PID. Este controlador es el más completo y complejo dentro de la gama de controladores clásicos, tiene una respuesta más rápida y estable siempre que este bien sintonizado.

El PID se puede sintonizar mediante 3 parámetros:

- Ganancia Proporcional (Gain)
- Ganancia Integral (Reset)
- Ganancia Derivativa (Rate)

Resumiendo se puede decir que:

- El control proporcional actúa sobre el tamaño del error.
- El control integral rige el tiempo para corregir el error
- El control derivativo le brinda la rapidez a la actuación.

Función de Transferencia

$$Kp + \frac{1}{sTi} + sTd$$

La formula teórica de este controlador esta descrita por la siguiente expresión:

$$u(t) = Kp \cdot e(t) + Ki \cdot \int_0^t e(t)dt + Kd \frac{de(t)}{dt}$$

En la presente tesis se empleará un algoritmo PID más complejo, el cual emplean los controladores comerciales en la industria, tales como Allen Bradley, Fisher, Foxboro, Honeywell, Toshiba, Nacional Instruments, Texas Instruments, Bailey, entre otros, este está expresado en su forma serial (Goodwin-2001, Åström-1994).

$$U(s) = K \cdot \left(1 + \frac{1}{Ti}\right) \cdot \left(1 + \frac{sTd}{1 + sTd/N}\right) \cdot E(s)$$

Donde:

- K es la ganancia proporcional, a su vez $K_p = K$
- T_i es el tiempo integral, a su vez $K_i = K/T_i$
- T_d es el tiempo derivativo, a su vez $K_d = K \cdot T_d$
- $U(s)$ es la señal de control, y $E(s)$ es la señal de error
- N es la ganancia límite para altas frecuencias (esta en el rango de 3 a 20)

Factorizando y simplificando la expresión anterior se obtiene:

$$U(s) = \frac{(K_p + K_i) \cdot (N \cdot K_p + s \cdot K_d + s \cdot N \cdot K_d)}{(N \cdot K_p + s \cdot K_d)} * E(s)$$

La implementación de este controlador mediante simulación en una computadora, implica su discretización. Empleando la aproximación de Tustin : $s = \frac{2}{h} \cdot \frac{z-1}{z+1}$

(donde h es el tiempo de muestreo), se consigue la siguiente expresión:

$$U(z) = \frac{(K_p N h z + K_p N h + 2 K_d z - 2 K_d + 2 K_d N z - 2 K_d N) \cdot (K_p + K_i)}{K_p N h z - K_p N h + 2 K_d z + 2 K_d} * E(z)$$

Luego se puede expresar la señal de control en la forma Z^{-1} de la siguiente manera:

$$\frac{U(z)}{E(z)} = \frac{(K_p + K_i) \cdot (K_p N h + 2 K_d) + Z^{-1} \cdot (K_p + K_i) \cdot (K_p N h - 2 K_d - 2 K_d N)}{(K_p N h + 2 K_d) - Z^{-1} \cdot (K_p N h - 2 K_d)}$$

Factorizando y simplificando la expresión anterior se consigue llegar al algoritmo de control en su forma de intervalos de tiempo, tal como se muestra a continuación:

$$U(k) = U(k-1) \left[\frac{(K_p N h - 2K_d)}{K_p N h + 2K_d} \right] + E(k-1) \left[\frac{(K_p + K_i) \cdot (K_p N h - 2K_d - 2K_d N)}{K_p N h + 2K_d} \right] + E(k) [K_p + K_i]$$

El controlador fue sintonizado empezando en una condición inicial cercana a la referencia, y luego se sintonizó para varias condiciones iniciales. La sintonización se realizó según la metodología empírica o experimentalmente, (siguiendo las recomendaciones propuestas por Goodwin, Graebe y Salgado - 2001), considerando buscar una mejor respuesta que se adecue correctamente para el caso de múltiples condiciones iniciales y diversas referencias. Experimentalmente también se pudo determinar el mejor valor para N.

Dado que en la planta existen 3 lazos de control: concentración de salida C, concentración de salida D, y temperatura en el reactor, el controlador debe tener no un valor para cada ganancia sino 3 valores, del mismo modo el error y la señal de control son vectores de orden (3x1). Los parámetros de sintonización son los siguientes:

$$K_p = \begin{bmatrix} 3.2 \\ 2.8 \\ 8.5 \end{bmatrix} \quad K_d = \begin{bmatrix} 0.05 \\ 0.05 \\ 0.01 \end{bmatrix} \quad K_i = \begin{bmatrix} 0.1 \\ 0.1 \\ 0.8 \end{bmatrix} \quad N = \begin{bmatrix} 10 \\ 10 \\ 15 \end{bmatrix}$$

3.2.2. DESARROLLO DE UN CONTROLADOR OPTIMAL

Un controlador optimal es aquel que busca obtener una señal de control que permita minimizar una función de costo (J):

$$J = \frac{1}{2} \cdot X_f^T \cdot P_f \cdot X_f + \int_{T_0}^{T_f} \left(\frac{1}{2} \cdot X^T \cdot Q \cdot X + \frac{1}{2} \cdot u^T \cdot R \cdot u \right) dt$$

Donde:

- X Es el vector de estados del sistema
- X_f Es el vector de estados X en el tiempo final
- U Es la señal de control que minimiza la función de costo
- Q, R Son matrices de pesos que buscan la minimización
- J Es la función de costo del sistema

La función de costo también se puede generalizar de la siguiente manera:

$$J = \phi(X_f) + \int_{T_0}^{T_f} L(x, u) dt$$

Así mismo:

- ϕ Representa una función de X_f, tal que $\dot{x} = f(x, u)$
- L Es la Función de Lagrange: $L = \phi(X_f) + \int_{T_0}^{T_f} (L + \lambda^T (f(x, u) - \dot{x})) dt$
- H Es la Función Hamiltoniano: $H = L + \lambda^T \cdot f(x, u)$

La respuesta a la ecuación de la función de costo debe tener en cuenta las condiciones de Optimalidad o problema de valor de frontera entre 2 puntos:

$$1^{\circ}) \frac{\partial \lambda}{\partial t} = - \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right)^T$$

$$2^{\circ}) \frac{\partial H}{\partial u} = 0$$

$$3^{\circ}) \lambda_f = \left[\frac{\partial \phi}{\partial x} \Big|_{x_f} \right]^T$$

Cumpliendo con el desarrollo de las condiciones de Optimalidad, se obtiene la siguiente ecuación, conocida como Ecuación de Ricatti:

$$A^T P + PA - PBR^{-1}B^T P + Q = 0$$

Donde:

P y Q son simétricos, semidefinidos positivos

R es simétrica, positiva, e invertible

La ecuación de Ricatti puede ser resuelta utilizando Matlab:

$$P = \text{are}(A, B * R^{-1} * B^T, Q)$$

Luego la ganancia para realimentación de estados esta dada por: $K = R^{-1} \cdot B^T \cdot P$

La señal de control esta dada por: $u = -K \cdot X$ o por $u = -K \cdot (X - X_{deseado})$ cuando se desea alcanzar o seguir una referencia.

Como se observa la forma de este controlador se aplica a matrices, es decir a un sistema expresado en espacio-estado, debido a que esta forma de representación es propia de los sistemas lineales, se ha procedido a linealizar el modelo matemático del reactor químico, en torno a un punto de equilibrio que mejor respondía para el caso de múltiples condiciones iniciales. Este es: $CA = 0.30$; $CB = 0.05$; $CC = 0.25$; $CD = 0.25$; $T = 305$; $Tr = 350$; $Ph = 10.184$;

La linealización se llevó a cabo mediante el uso del Jacobiano:

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial \dot{X}_1}{\partial X_1} & \frac{\partial \dot{X}_1}{\partial X_2} & \dots & \frac{\partial \dot{X}_1}{\partial X_n} \\ \frac{\partial \dot{X}_2}{\partial X_1} & \frac{\partial \dot{X}_2}{\partial X_2} & \dots & \frac{\partial \dot{X}_2}{\partial X_n} \\ \frac{\partial \dot{X}_3}{\partial X_1} & \frac{\partial \dot{X}_3}{\partial X_2} & \dots & \frac{\partial \dot{X}_3}{\partial X_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial \dot{X}_n}{\partial X_1} & \frac{\partial \dot{X}_n}{\partial X_2} & \dots & \frac{\partial \dot{X}_n}{\partial X_n} \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} \frac{\partial u_1}{\partial X_1} & \frac{\partial u_1}{\partial X_2} & \dots & \frac{\partial u_1}{\partial X_m} \\ \frac{\partial u_2}{\partial X_1} & \frac{\partial u_2}{\partial X_2} & \dots & \frac{\partial u_2}{\partial X_m} \\ \frac{\partial u_3}{\partial X_1} & \frac{\partial u_3}{\partial X_2} & \dots & \frac{\partial u_3}{\partial X_m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial u_m}{\partial X_1} & \frac{\partial u_m}{\partial X_2} & \dots & \frac{\partial u_m}{\partial X_m} \end{bmatrix}$$

Los resultados de esta linealización de la MatrizA se muestran en el capítulo 2, cuando se trata el tema de estabilidad del sistema, los resultados de la linealización de la MatrizB se muestran a continuación:

$$\begin{aligned} \text{MatrizB}(1,1) &= FiA/V; \\ \text{MatrizB}(1,2) &= 0; \\ \text{MatrizB}(1,3) &= 0; \\ \text{MatrizB}(2,1) &= 0; \\ \text{MatrizB}(2,2) &= FiB/V; \\ \text{MatrizB}(2,3) &= 0; \\ \text{MatrizB}(3,1) &= 0; \\ \text{MatrizB}(3,2) &= 0; \\ \text{MatrizB}(3,3) &= 0; \\ \text{MatrizB}(4,1) &= 0; \\ \text{MatrizB}(4,2) &= 0; \\ \text{MatrizB}(4,3) &= 0; \\ \text{MatrizB}(5,1) &= -FiA*CpA*(T-TiA)/V/(CA*CpA+CB*CpB+CC*CpC+CD*CpD); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{MatrizB}(5,2) &= -F_i B^* C_p B^* (T - T_i B) / V / (C A^* C_p A + C B^* C_p B + C C^* C_p C + C D^* C_p D); \\ \text{MatrizB}(5,3) &= 0; \\ \text{MatrizB}(6,1) &= 0; \\ \text{MatrizB}(6,2) &= 0; \\ \text{MatrizB}(6,3) &= F_r / V_r; \\ \text{MatrizB}(7,1) &= 0; \\ \text{MatrizB}(7,2) &= 0; \\ \text{MatrizB}(7,3) &= 0; \end{aligned}$$

Como se requiere que el sistema converja a una referencia, se agrego un nuevo estado, un integrador, cambiando el orden del sistema a 8. La Matriz Q utilizada es cero en todos sus valores, a excepción del valor Q(8,8) que vale 250. En base al sistema con integrador se resolvió la ecuación de Ricatti utilizando la función “are” de Matlab.

La matriz de ganancias obtenida es la siguiente:

$$K = \begin{bmatrix} 21.9796 & -15.8802 & 2.2941 & 3.4365 & -0.4576 & -0.0039 & -0.0000 & 11.6415 \\ -16.9375 & 20.9543 & 2.5315 & 3.7922 & -0.4552 & -0.0043 & -0.0000 & -10.6993 \\ -0.0029 & -0.0055 & -0.0041 & -0.0061 & 0.0008 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0006 \end{bmatrix}$$

3.2.3. DESARROLLO DE UN NEUROCONTROLADOR ESTÁTICO

El diseño del neurocontrolador estático utiliza entrenamiento tipo patrón es decir que a medida que van ingresando muestras de entrada y salida al sistema, se van a ir actualizando los pesos de la red. Se encontró que este tipo de entrenamiento resulta más eficiente puesto que cuando se pretendió implementar un entrenamiento de tipo batch (los pesos se actualizan luego de ingresados todos los datos) se encontró que el

entrenamiento no convergía y no permitía minimizar el error, al parecer debido a que el error era muy grande luego de ingresados todos los datos.

La siguiente tabla muestra el comportamiento del sistema cuando se entrena para diferentes cantidades de neuronas en la capa intermedia:

N° Neuronas	Comportamiento del sistema
≤ 2	Entrena y controla, pero no controla cuando se cambia la referencia
3	Entrena y controla para varias condiciones iniciales y referencias
5	Entrena, pero el control mantiene un error en estado estable
7	Entrena, pero no logra controlar correctamente el sistema
10	Entrena lentamente, y no logra controlar el sistema
15	Entrena muy lentamente, y luego se estanca
≥ 20	No entrena y se estanca rápidamente

Tabla 3.1: Red estática, comportamiento del sistema para N neuronas

Se puede notar que el sistema trabaja bien únicamente cuando existen muy pocas neuronas en la capa intermedia, y más eficientemente cuando se utilizan 3 neuronas.

Se ha escogido el error de tracking como entrada para la red, es decir, los datos de los estados que se desea controlar menos la referencia que se desea lograr son ingresados a la red neuronal. Para ingresar dichos datos se ha hecho un escalonamiento a la entrada de la red (± 1). Así mismo dicho error es considerado como el error para la retropropagación del error.

La salida de la red se convierte en la señal de control que se conecta a los actuadores, la cual también ha sido desescalada (± 0.9).

El entrenamiento comenzó con pesos aleatorios con distribución gauseana, luego de aproximadamente 5 000 iteraciones se consiguió llegar a resultados aceptables, la tasa de aprendizaje fluctuó entre 0.001 y 0.000001.

La función utilizada en la capa intermedia fue la función sigmoidea, así mismo también se consideró la variación de centros y amplitudes de esta, para lo cual se uso un ratio de aprendizaje entre 0.000001 y 0.000000001.

Función sigmoidea: $n = \frac{2}{1 + e^{-\frac{(m-c)}{a}}} - 1$, donde “c” es el centro, y “a” es la amplitud

Debido a que cuando el error tiende a cero, también la señal de control tiende a cero, se ha utilizado un acumulador de la señal de control anterior con un factor de 10%, lo cual le permite al neurocontrolador no tender a cero sino hacia la referencia deseada. Este mismo criterio fue implementado en los tres neurocontroladores.

La actualización de los pesos V y W esta dado por:

$$V_{ij} = V_{ij} - \eta \frac{\partial J}{\partial V_{ij}} \quad W_{ij} = W_{ij} - \eta \frac{\partial J}{\partial W_{ij}}$$

En donde:

$$\frac{\partial J}{\partial W_{jk}} = e_k * n_j$$

$$\frac{\partial J}{\partial V_{ij}} = (e_1 * W_{j1} + e_2 * W_{j2} + \dots + e_k * W_{jk}) \left(\frac{\partial n_j}{\partial m_j} \right) (X_i)$$

La actualización de los centros y amplitud esta dado por:

$$c_{ij} = c_{ij} - \eta \frac{\partial J}{\partial c_{ij}} \quad a_{ij} = a_{ij} - \eta \frac{\partial J}{\partial a_{ij}}$$

$$\frac{\partial J}{\partial c} = (W * e) * \frac{\partial n}{\partial c} \quad \frac{\partial J}{\partial a} = (W * e) * \frac{\partial n}{\partial a}$$

Utilizando la función sigmoidea se obtiene las siguientes derivadas:

$$\frac{\partial n}{\partial m} = \frac{2}{\left(1 + e^{\frac{(m-c)}{a}}\right)^2} * e^{-\frac{(m-c)}{a}}$$

$$\frac{\partial n}{\partial a} = \frac{2 * (-m + c)}{\left(1 + e^{\frac{(m-c)}{a}}\right)^2} * e^{-\frac{(m-c)}{a}}$$

$$\frac{\partial n}{\partial c} = \frac{-2}{\left(1 + e^{\frac{(m-c)}{a}}\right)^2} * e^{-\frac{(m-c)}{a}}$$

Los pesos obtenidos cuando se realizó el entrenamiento para el caso de múltiples condiciones iniciales, se muestran a continuación:

$$w = \begin{bmatrix} -7.4164 & 21.4456 & 11.3446 \\ -5.5382 & -1.3170 & 14.2518 \\ -7.5764 & -25.6541 & 1.9555 \end{bmatrix} \quad v = \begin{bmatrix} 3.6366 & 3.4182 & 2.8737 \\ -6.5283 & 0.3802 & 8.1184 \\ -2.4654 & -2.0299 & -0.7541 \end{bmatrix}$$

$$a = \begin{bmatrix} 0.9892 \\ 0.9970 \\ 0.9885 \end{bmatrix} \quad c = \begin{bmatrix} 0.0109 \\ 0.0038 \\ -0.0048 \end{bmatrix}$$

3.2.4. DESARROLLO DE UN NEUROCONTROLADOR ESTÁTICO MODIFICADO

En este caso el neurocontrolador estático utiliza entrenamiento tipo patrón igual que en el caso anterior, con la diferencia que hace uso de más entradas, las entradas adicionales consisten en el error de tracking en instantes de tiempo anterior.

Por tanto las entradas consideradas para la red neuronal son las siguientes:

$$Inred = \begin{bmatrix} Error(k) \\ Error(k-1) \\ Error(k-2) \end{bmatrix}$$

Donde:

$$Error = \begin{bmatrix} CC - refCC \\ CD - refCD \\ T - refT \end{bmatrix}$$

Para ingresar dichos datos se ha hecho un escalonamiento a la entrada de la red (± 1). El error de retropropagación está dado por el Error en el instante de tiempo actual. La salida de la red se convierte en la señal de control que se conecta a los actuadores, la cual también ha sido desescalada (± 0.9).

La siguiente tabla muestra el comportamiento del sistema cuando se entrena para diferentes cantidades de neuronas en la capa intermedia:

N° Neuronas	Comportamiento del sistema
3	Entrena y controla, pero señal de control presenta chattering
6	Entrena lentamente y controla deficientemente otras referencias
9	Entrena y controla para varias condiciones iniciales y referencias
12	Entrena, pero no logra controlar correctamente el sistema
15	Entrena lentamente, y no logra controlar el sistema
≥ 20	No entrena, tiende a estancarse

Tabla 3.2: Red estática modificada, comportamiento del sistema para N neuronas

Se ha encontrado que el sistema entrena más rápidamente y controla con mayor eficiencia para 9 neuronas.

El entrenamiento comenzó con pesos aleatorios con distribución gauseana, luego de aproximadamente 5 000 iteraciones se consiguió llegar a resultados aceptables, el ratio de aprendizaje fluctuó entre 0.001 y 0.000001.

La función utilizada en la capa intermedia fue la función sigmoidea, así mismo también se consideró la variación de centros y amplitudes de esta, para lo cual se uso un ratio de aprendizaje entre 0.000001 y 0.000000001.

El sistema no presenta mayores diferencias en relación al neurocontrolador anterior, es decir que hace uso de las misma ecuaciones para calcular los pesos del controlador.

Los pesos obtenidos cuando se realizo el entrenamiento para el caso de múltiples condiciones iniciales, se muestran a continuación:

$$w = \begin{bmatrix} -4.9072 & 1.3798 & -4.6918 \\ -2.8210 & 1.0514 & 0.4999 \\ 1.2324 & -6.7525 & -10.8400 \\ -5.4881 & -8.5537 & 0.0350 \\ -2.1615 & 10.1319 & -4.2561 \\ 4.5223 & -1.4441 & 5.2265 \\ -0.9405 & 12.8495 & -4.2270 \\ -5.3074 & 3.4345 & -9.5001 \\ 1.8155 & 10.6446 & -10.1606 \end{bmatrix}$$

$$v = \begin{bmatrix} 0.5225 & 0.1162 & -0.2083 & 0.1453 & 0.0600 & -0.0956 & 0.0270 & 0.0702 & -0.1548 \\ -0.0224 & -0.0424 & 0.1357 & 0.0997 & -0.1232 & 0.0206 & -0.1469 & -0.0308 & -0.0899 \\ -0.0427 & -0.0555 & 0.1210 & -0.0294 & -0.0514 & 0.0374 & -0.0447 & -0.0272 & 0.0434 \\ 0.1064 & 0.1158 & -0.2074 & 0.1452 & 0.0593 & -0.0952 & 0.0262 & 0.0699 & -0.1548 \\ -0.0221 & -0.0422 & 0.1352 & 0.0997 & -0.1227 & 0.0203 & -0.1463 & -0.0305 & -0.0897 \\ -0.0426 & -0.0553 & 0.1206 & -0.0295 & -0.0510 & 0.0372 & -0.0442 & -0.0270 & 0.0435 \\ 0.1061 & 0.1156 & -0.2067 & 0.1451 & 0.0588 & -0.0950 & 0.0257 & 0.0696 & -0.1548 \\ -0.0219 & -0.0421 & 0.1349 & 0.0997 & -0.1223 & 0.0201 & -0.1459 & -0.0302 & -0.0895 \\ -0.0425 & -0.0552 & 0.1203 & -0.0296 & -0.0507 & 0.0371 & -0.0439 & -0.0268 & 0.0436 \end{bmatrix}$$

$$a = \begin{bmatrix} 0.9931 \\ 0.9957 \\ 0.9705 \\ 0.9889 \\ 0.9784 \\ 0.9979 \\ 0.9740 \\ 0.9949 \\ 0.9803 \end{bmatrix} \quad c = \begin{bmatrix} 0.0050 \\ 0.0073 \\ -0.0270 \\ -0.0002 \\ 0.0089 \\ -0.0029 \\ 0.0089 \\ -0.0027 \\ -0.0082 \end{bmatrix}$$

3.2.5. DESARROLLO DE UN NEUROCONTROLADOR DINÁMICO

El diseño del neurocontrolador dinámico utiliza entrenamiento tipo dynamic back propagation (DBP).

La siguiente tabla muestra el comportamiento del sistema cuando se entrena para diferentes cantidades de neuronas en la capa intermedia:

N° Neuronas	Comportamiento del sistema
≤ 2	Entrena y controla, pero no controla cuando se cambia la referencia
3	Entrena y controla para varias condiciones iniciales y referencias
5	Entrena, pero se mantiene un error en estado estable
7	Entrena, pero no se logra controlar todas las condiciones iniciales
10	Entrena lentamente, y no logra controlar el sistema
15	Entrena muy lentamente, y luego se estanca
≥ 18	No entrena, se estanca fácilmente

Tabla 3.3: Red dinámica, comportamiento del sistema para N neuronas

Al igual que el caso estático se puede notar que el sistema trabaja bien únicamente cuando existen pocas neuronas en la capa intermedia, y más eficientemente cuando se utilizan 3 neuronas.

La entrada a la red es el error entre los estados a controlar y sus respectivas referencias, estos errores han sido llevados a un escalamiento de ± 3 . Se busca que este error sea cero por lo cual también se convierte en el error del sistema

La salida de la red se convierte en la señal de control que se conecta a los actuadores, la cual también ha sido desescalada (± 0.9).

El entrenamiento comenzó con pesos aleatorios con distribución gauseana, luego de aproximadamente 15 000 iteraciones se consiguió llegar a resultados aceptables, el ratio de aprendizaje fluctuó entre 0.00001 y 0.0000001.

La función utilizada en la capa intermedia fue la función sigmoidea, así mismo también se consideró la variación de centros y amplitudes de esta, para lo cual se uso un ratio de aprendizaje entre 0.0001 y 0.00001 para los centros, y entre 0.0000001 y 0.00000001 para las amplitudes.

La actualización de los pesos se consigue luego de resolver la siguiente ecuación, donde “w” representa al peso que se desea actualizar.

$$\frac{\partial X_{(k+1)}}{\partial w} = \frac{\partial X_{(k+1)}}{\partial u_{(k)}} \cdot \frac{\partial u_{(k)}}{\partial w} + \left(\frac{\partial X_{(k+1)}}{\partial X_{(k)}} + \frac{\partial X_{(k+1)}}{\partial u_{(k)}} \cdot \frac{\partial u_{(k)}}{\partial X_{(k)}} \right) \cdot \frac{\partial X_{(k)}}{\partial w}$$

De donde se tiene que desarrollar por partes cada término, así tenemos:

$$\frac{\partial X_{(k+1)}}{\partial X_{(k)}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial C_{C(k+1)}}{\partial C_{C(k)}} & \frac{\partial C_{C(k+1)}}{\partial C_{D(k)}} & \frac{\partial C_{C(k+1)}}{\partial T_{(k)}} \\ \frac{\partial C_{D(k+1)}}{\partial C_{C(k)}} & \frac{\partial C_{D(k+1)}}{\partial C_{D(k)}} & \frac{\partial C_{D(k+1)}}{\partial T_{(k)}} \\ \frac{\partial T_{(k+1)}}{\partial C_{C(k)}} & \frac{\partial T_{(k+1)}}{\partial C_{D(k)}} & \frac{\partial T_{(k+1)}}{\partial T_{(k)}} \end{bmatrix}$$

Desarrollando cada término se llega a las siguientes expresiones:

$$\frac{\partial C_{C(k+1)}}{\partial C_{C(k)}} = 1 - F/V$$

$$\frac{\partial C_{C(k+1)}}{\partial C_{D(k)}} = 0$$

$$\frac{\partial C_{C(k+1)}}{\partial T_{(k)}} = K_o * E_x / T^2 * \exp(-E_x / T) * C_A * C_B$$

$$\frac{\partial C_{D(k+1)}}{\partial C_{C(k)}} = 0$$

$$\frac{\partial C_{D(k+1)}}{\partial C_{D(k)}} = 1 - F/V$$

$$\frac{\partial C_{D(k+1)}}{\partial T_{(k)}} = K_o * E_x / T^2 * \exp(-E_x / T) * C_A * C_B$$

$$\frac{\partial T_{(k+1)}}{\partial C_{C(k)}} = - (U * A * (T_r - T) / V / dL - F_i A * C_i A * C_p A * (T - T_i A) - F_i B * C_i B * C_p B * (T - T_i B) + (h_r + (C_p C + C_p D - C_p A - C_p B) * (T - T_{ref})) * K_o * \exp(-E_x / T) * C_A * C_B * V) / V / (C_A * C_p A + C_B * C_p B + C_C * C_p C + C_D * C_p D)^2 * C_p C$$

$$\frac{\partial T_{(k+1)}}{\partial C_{D(k)}} = - (U * A * (T_r - T) / V / dL - F_i A * C_i A * C_p A * (T - T_i A) - F_i B * C_i B * C_p B * (T - T_i B) + (h_r + (C_p C + C_p D - C_p A - C_p B) * (T - T_{ref})) * K_o * \exp(-E_x / T) * C_A * C_B * V) / V / (C_A * C_p A + C_B * C_p B + C_C * C_p C + C_D * C_p D)^2 * C_p D$$

$$\frac{\partial T_{(k+1)}}{\partial T_{(k)}} = 1 + (-U * A / V / dL - F_i A * C_i A * C_p A - F_i B * C_i B * C_p B + (C_p C + C_p D - C_p A - C_p B) * K_o * \exp(-E_x / T) * C_A * C_B * V + (h_r + (C_p C + C_p D - C_p A - C_p B) * (T - T_{ref})) * K_o * E_x / T^2 * \exp(-E_x / T) * C_A * C_B * V) / V / (C_A * C_p A + C_B * C_p B + C_C * C_p C + C_D * C_p D)$$

A continuación se procede a resolver la derivada de los estados con respecto a la señal de control, así tenemos:

$$\frac{\partial X_{(k+1)}}{\partial u_{(k)}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial C_{C(k+1)}}{\partial CiA_{(k)}} & \frac{\partial C_{C(k+1)}}{\partial CiB_{(k)}} & \frac{\partial C_{C(k+1)}}{\partial Tir_{(k)}} \\ \frac{\partial C_{D(k+1)}}{\partial CiA_{(k)}} & \frac{\partial C_{D(k+1)}}{\partial CiB_{(k)}} & \frac{\partial C_{D(k+1)}}{\partial Tir_{(k)}} \\ \frac{\partial T_{(k+1)}}{\partial CiA_{(k)}} & \frac{\partial T_{(k+1)}}{\partial CiB_{(k)}} & \frac{\partial T_{(k+1)}}{\partial Tir_{(k)}} \end{bmatrix}$$

Desarrollando cada término se llega a las siguientes expresiones:

$$\frac{\partial C_{C(k+1)}}{\partial CiA_{(k)}} = \frac{\partial C_{C(k+1)}}{\partial CiB_{(k)}} = \frac{\partial C_{C(k+1)}}{\partial Tir_{(k)}} = \frac{\partial C_{D(k+1)}}{\partial CiA_{(k)}} = \frac{\partial C_{D(k+1)}}{\partial CiB_{(k)}} = \frac{\partial C_{D(k+1)}}{\partial Tir_{(k)}} = \frac{\partial T_{(k+1)}}{\partial Tir_{(k)}} =$$

0

$$\frac{\partial T_{(k+1)}}{\partial CiA_{(k)}} = -FiA * CpA * (T - TiA) / V / (CA * CpA + CB * CpB + CC * CpC + CD * CpD)$$

$$\frac{\partial T_{(k+1)}}{\partial CiB_{(k)}} = -FiB * CpB * (T - TiB) / V / (CA * CpA + CB * CpB + CC * CpC + CD * CpD)$$

Debido a que la red neuronal hace uso de la función SIGMOIDEA para su entrenamiento:

$$n = \frac{2}{1 + e^{-\frac{(m-c)}{a}}} - 1$$

De esta se obtiene las siguientes derivadas:

$$\frac{\partial n}{\partial m} = \frac{2}{\left(1 + e^{-\frac{(m-c)}{a}}\right)^2} * e^{-\frac{(m-c)}{a}}$$

$$\frac{\partial n}{\partial a} = \frac{2 * (-m + c)}{\left(1 + e^{-\frac{(m-c)}{a}}\right)^2} * e^{-\frac{(m-c)}{a}}$$

$$\frac{\partial n}{\partial c} = \frac{-2}{\left(1 + e^{-\frac{(m-c)}{a}}\right)^2} * e^{-\frac{(m-c)}{a}}$$

A continuación la derivada de la señal de control con respecto a los estados se resuelve de la forma:

$$\frac{\partial u_{(k)}}{\partial X_{(k)}} = (w) \cdot \left(\frac{\partial n}{\partial m}\right) \cdot (v)$$

Finalmente las derivadas de la señal de control con respecto a los pesos se resuelven de la forma:

$$\frac{\partial u}{\partial w} = \left[\frac{\partial C_C}{\partial w} \quad \frac{\partial C_D}{\partial w} \quad \frac{\partial T}{\partial w} \right] = [n \quad n \quad n]$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial v} = (X - ref) * (w_i) * \left[\frac{\partial n}{\partial m} \right]$$

$$\frac{\partial u}{\partial c} = (w) * \left[\frac{\partial n}{\partial c} \right]$$

$$\frac{\partial u}{\partial a} = (w) * \left(\frac{\partial n}{\partial a} \right)$$

Los pesos obtenidos cuando se realizó el entrenamiento para el caso de múltiples condiciones iniciales, se muestran a continuación:

$$w = \begin{bmatrix} -7.9222 & -1.6126 & 3.6309 \\ -6.1172 & 3.6871 & 8.4769 \\ 2.8156 & 2.2750 & 2.3466 \end{bmatrix}$$

$$v = \begin{bmatrix} 3.0158 & -2.0010 & -3.0011 \\ 0.0020 & -0.0055 & -0.0113 \\ -0.0501 & 0.0001 & -0.4101 \end{bmatrix}$$

$$a = \begin{bmatrix} 0.3969 \\ 0.9991 \\ 0.9986 \end{bmatrix} \quad c = \begin{bmatrix} -0.0062 \\ 0.0532 \\ 0.0518 \end{bmatrix}$$

Capítulo 4

VALIDACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL APLICADO AL REACTOR CSTR

4.1. INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se busca realizar un análisis de la efectividad del neurocontrolador dinámico planteado en la presente tesis. Para ello se evaluará el desempeño de cada uno de los controladores mediante simulación, utilizando el software Matlab.

Si bien es cierto un controlador clásico puede funcionar óptimamente para determinado rango de trabajo, lo ideal es que el controlador funcione y responda óptimamente ante cualquier condición inicial tratando de aprovechar todo el rango de trabajo de la planta.

La evaluación de los controladores comprende la respuesta en el tiempo, para diversas condiciones iniciales, y para diversas referencias planteadas. Así mismo se someterán los controladores a diversas combinaciones de perturbaciones, y a ruido tanto en la señal de control como en los sensores.

Luego se presentará un análisis donde se compararán los resultados obtenidos con los diversos controladores y para los diversos casos planteados.

SIMULACION DEL SISTEMA.

El proceso de producción de jabón sigue varias etapas y requiere de la incorporación de agentes químicos, colorantes y perfumes, dependiendo del producto final que se desea obtener. El presente reactor químico se empleará en la etapa inicial del proceso y

permitirá obtener jabón base sólido (acetato de sodio), y como producto adicional se obtendrá etanol.

Dado que el sistema debe ser versátil, el controlador debe permitir la elaboración de cualquier tipo de receta, es decir el controlador debe permitir alcanzar una referencia deseada que permita garantizar la concentración deseada del producto final que se desea producir en el reactor.

Se han considerado alguna referencias basadas en recomendaciones hechas por los libros de procesos industriales tales como: “Procesos industriales” (Leidinger-1997), “Ingeniería de los procesos industriales” (Williams-1971), “Jabones elaborados de forma artesanal” (Morris-2002).

Las referencias utilizadas son las siguientes:

Referencia	Concentraciones y Temperatura
Primera Referencia	CC = 0.12 , CD = 0.12 , T = 307
Segunda Referencia	CC = 0.17 , CD = 0.17 , T = 306
Tercera Referencia	CC = 0.22 , CD = 0.22 , T = 305
Cuarta Referencia	CC = 0.25 , CD = 0.25 , T = 304
Quinta Referencia	CC = 0.35 , CD = 0.35 , T = 302

Tabla 4.1. Referencias que se desean alcanzar por los controladores

Las condiciones iniciales utilizadas por todos los controladores, están detalladas en el programa de Matlab: “ReactorCondicionesIniciales.m”, y se muestran en el siguiente tabla:

Cond. Inicial	CA (mol)	CB (mol)	CC (mol)	CD (mol)	T (°K)	Tr (°K)	Ph
1	0.50	0.00	0.50	0.00	313	350	0.01
2	0.45	0.05	0.45	0.05	311	348	0.1
3	0.40	0.10	0.40	0.10	309	344	1
4	0.35	0.15	0.35	0.15	307	340	100
5	0.30	0.20	0.30	0.20	305	336	1000
6	0.20	0.30	0.20	0.30	304	332	0.01
7	0.15	0.35	0.15	0.35	302	328	0.1
8	0.10	0.40	0.10	0.40	300	324	1
9	0.05	0.45	0.05	0.45	298	320	100
10	0.00	0.50	0.00	0.50	296	316	1000
11	0.50	0.00	0.50	0.00	296	275	0.01
12	0.45	0.05	0.45	0.05	298	280	0.1
13	0.40	0.10	0.40	0.10	300	284	1
14	0.35	0.15	0.35	0.15	302	288	100
15	0.30	0.20	0.30	0.20	304	292	1000
16	0.20	0.30	0.20	0.30	305	296	0.01
17	0.15	0.35	0.15	0.35	307	300	0.1
18	0.10	0.40	0.10	0.40	309	304	1

19	0.05	0.45	0.05	0.45	311	308	100
20	0.00	0.50	0.00	0.50	313	312	1000

Tabla 4.2. Condiciones Iniciales para la simulación del sistema

Cuando se simule el sistema se realizará un análisis en base al tiempo de establecimiento y el error en estado estacionario luego del 300 segundos, se ha evaluado el sistema para las diversas condiciones iniciales indicadas anteriormente, pero para obtener una visión más general de la performance de los controladores se establecerá un rango en el cual las diversas condiciones iniciales llegan a un punto de establecimiento sobre la referencia deseada. Así mismo el error es calculado en base al máximo error en estado estacionario, debido a que para los diversos casos presentados se observa que se establecen en valores cercanos a la referencia deseada.

PERTURBACIONES Y RUIDO

En el modelo matemático hallado, se han asumido ciertos parámetros como constantes, mientras que otros simplemente no se han considerado, así mismo no se han contemplado ciertas dinámicas que influyen directamente en el sistema, tales como la no-linealidad de las válvulas, retardo en actuadores, descalibramiento en sensores, entre otras; debido a estas imprecisiones en el modelo matemático se ha considerado necesario simular estas dinámicas representadas a través de ruidos y perturbaciones.

Los controladores serán sometidos a diversas perturbaciones, estas pueden ser tanto de temperatura como de flujo de los reactantes a la entrada del reactor, y también el flujo del refrigerante a la entrada de la camisa de refrigeración. Las perturbaciones fluctuarán dentro de un margen predefinido, las cuales se especifican en la siguiente tabla:

Perturbación	Valor Normal	Variación Porcentual	Variación Nominal
Flujo de Material A a la Entada (FiA)	0,2 lit/seg	$\pm 50 \%$	0,1 a 0,3 lit/seg
Flujo de Material B a la Entada (FiB)	0,2 lit/seg	$\pm 50 \%$	0,1 a 0,3 lit/seg
Temperatura Material A Entrada (TiA)	300 °K	$\pm 2 \%$	294 a 306 °K
Temperatura Material B Entrada (TiB)	300 °K	$\pm 2 \%$	294 a 306 °K
Flujo del Líquido Refrigerante (Fr)	0,4 lit/seg	$\pm 50 \%$	0,2 a 0,6 lit/seg

Tabla 4.3. Variación de las Perturbaciones aplicadas al sistema

El sistema también se ha sometido a ruido en la señal de los actuadores y a ruido en la señal sensada, el cual ha sido generado aleatoriamente con una intensidad de hasta 20% para los actuadores y hasta 1% en las señales sensadas.

El análisis empleado para analizar los casos de perturbación y ruido hacen uso de un promedio en el tiempo de establecimiento de las diversas condiciones iniciales, pese a que en muchas ocasiones no se llega a una convergencia puesto que la respuesta del sistema se mantiene fluctuante en torno a un valor. También se ha considerado el error en estado estacionario como otro parámetro para medir la performance de los controladores.

4.2. SIMULACIÓN UTILIZANDO LEY DE CONTROL PID APLICADO AL REACTOR QUÍMICO

Mediante la siguiente tabla se hace un resumen de los resultados obtenidos, utilizando las diversas condiciones iniciales.

Variable	Referencia	Tiempo de Establecimiento	Valor de Establecimiento
CC (mol)	0.12	Entre 220 y 240 seg	0.1180
CD (mol)	0.12	Entre 230 y 250 seg	0.1182
T (°K)	307	Entre 230 y 300 seg	Entre 306.5 y 307.1
CC (mol)	0.17	Entre 250 y 280 seg	0.1672
CD (mol)	0.17	Entre 200 y 220 seg	0.1675
T (°K)	306	Entre 290 y 300 seg	Entre 305.4 y 306.1
CC (mol)	0.22	Entre 180 y 225 seg	0.2165
CD (mol)	0.22	Entre 180 y 220 seg	0.2168
T (°K)	305	Entre 290 y 300 seg	Entre 304.5 y 305
CC (mol)	0.25	Entre 180 y 220 seg	0.2460
CD (mol)	0.25	Entre 180 y 220 seg	0.2462
T (°K)	304	Entre 200 y 230 seg	Entre 303.6 y 304
CC (mol)	0.35	Entre 150 y 200 seg	0.3445
CD (mol)	0.35	Entre 140 y 200 seg	0.3448
T (°K)	302	Entre 130 y 150 seg	Entre 301.7 y 302.1

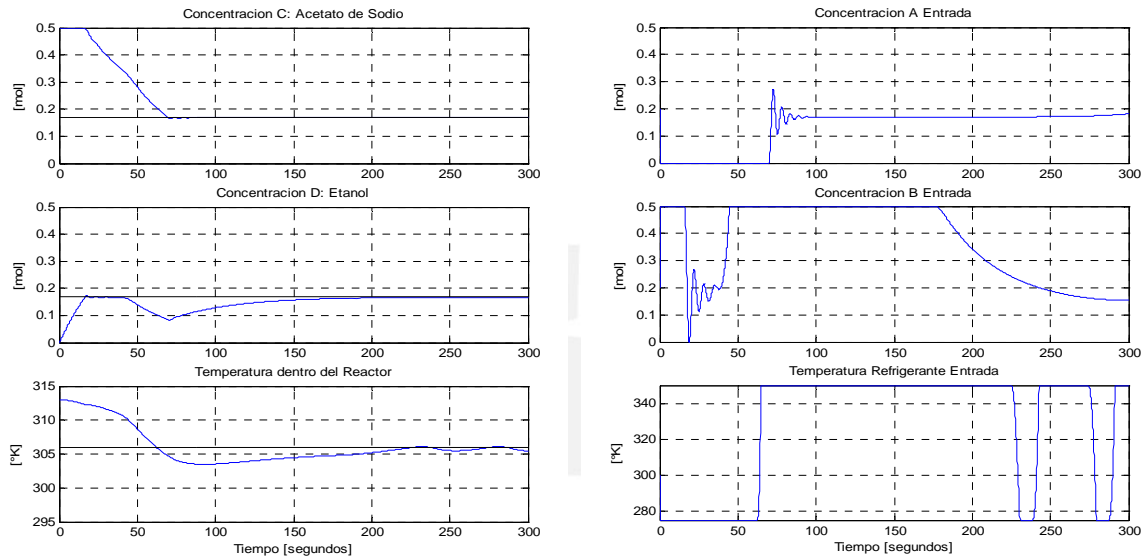
Tabla 4.4. Resumen de resultados obtenidos para el controlador PID

Las siguientes figuras muestran los resultados obtenidos para la condición inicial:
 $CA=0.50, CB=0.00, CC=0.50, CD=0.00, T=313, Tr=350, Ph=0.01$

Referencia Deseada : $CC = 0.17, CD = 0.17, T = 306$

Respuesta en el tiempo de los Estados

Señal de Control



*Figura 4.1. Controlador PID, Respuesta de los Estados y Señal de Control
 ($CC = 0.17, CD = 0.17, T = 306$)*

Referencia Deseada : $CC = 0.25, CD = 0.25, T = 304$

Respuesta en el tiempo de los Estados

Señal de Control

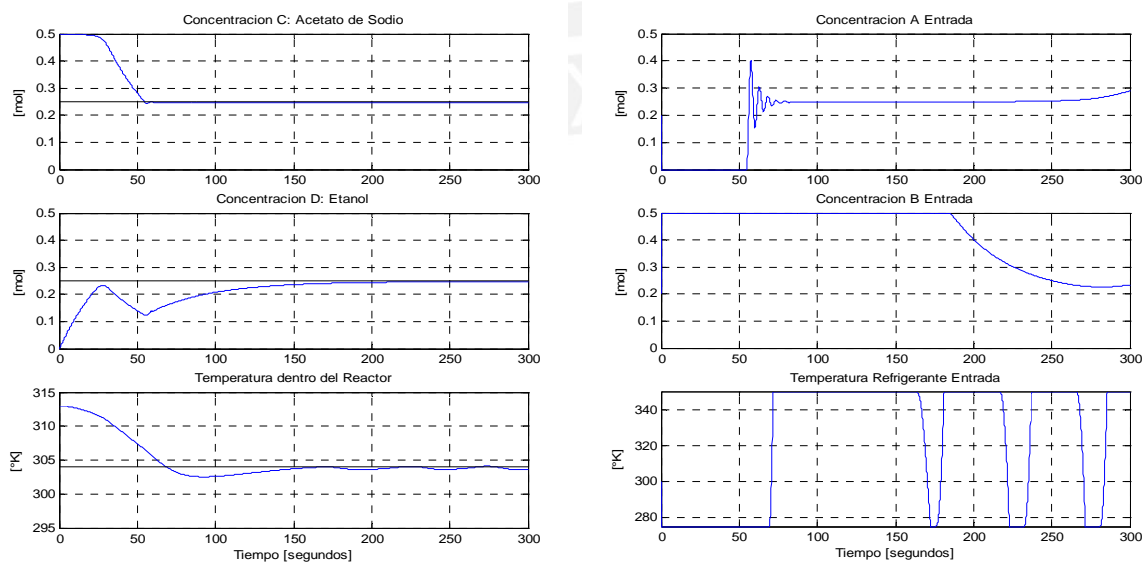


Figura 4.2. Controlador PID, Respuesta de los Estados y Señal de Control

$$(CC = 0.25, CD = 0.25, T = 304)$$

4.3. SIMULACIÓN UTILIZANDO UN CONTROLADOR OPTIMAL APLICADO AL REACTOR QUÍMICO

Mediante la siguiente tabla se hace un resumen de los resultados obtenidos, utilizando las diversas condiciones iniciales.

Variable	Referencia	Tiempo de Establecimiento	Valor de Establecimiento
CC (mol)	0.12	Entre 230 y 300 seg	Entre 0.12 y 0.122
CD (mol)	0.12	Entre 230 y 300 seg	Entre 0.12 y 0.124
T (°K)	307	Entre 280 y 300 seg	Entre 305.5 y 305.6
CC (mol)	0.17	Entre 230 y 255 seg	0.17
CD (mol)	0.17	Entre 220 y 250 seg	0.17
T (°K)	306	Entre 250 y 300 seg	Entre 305.1 y 305.2
CC (mol)	0.22	Entre 190 y 240 seg	0.22
CD (mol)	0.22	Entre 200 y 260 seg	0.22
T (°K)	305	Entre 290 y 300 seg	Entre 304.6 y 304.9
CC (mol)	0.25	Entre 170 y 250 seg	0.25
CD (mol)	0.25	Entre 180 y 240 seg	0.25
T (°K)	304	Entre 290 y 300 seg	Entre 304.3 y 304.7
CC (mol)	0.35	Entre 200 y 300 seg	Entre 0.33 y 0.352
CD (mol)	0.35	Entre 200 y 300 seg	Entre 0.33 y 0.352
T (°K)	302	Entre 295 y 300 seg	Entre 300 y 304

Tabla 4.5. Resumen de resultados obtenidos para el controlador Optimal

Las siguientes figuras muestran los resultados obtenidos para la condición inicial:
 $CA=0.50$, $CB=0.00$, $CC=0.50$, $CD=0.00$, $T=313$, $T_r=350$, $Ph=0.01$

Referencia Deseada : $CC = 0.17$, $CD = 0.17$, $T = 306$

Respuesta en el tiempo de los Estados

Señal de Control

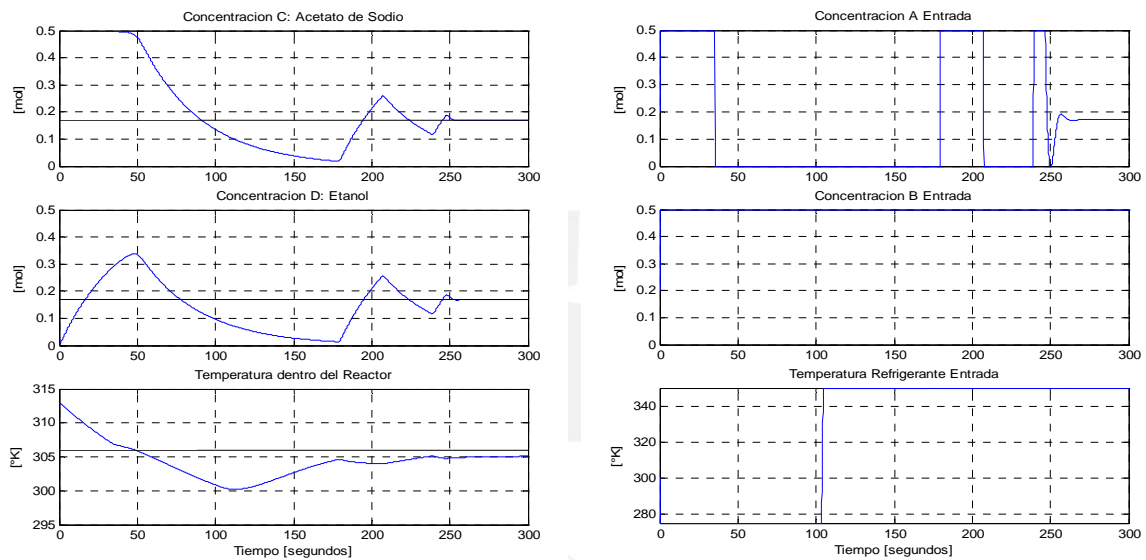


Figura 4.3. Controlador OPTIMAL, Respuesta de los Estados y Señal de Control
 ($CC = 0.17$, $CD = 0.17$, $T = 306$)

Referencia Deseada : $CC = 0.25$, $CD = 0.25$, $T = 304$

Respuesta en el tiempo de los Estados

Señal de Control

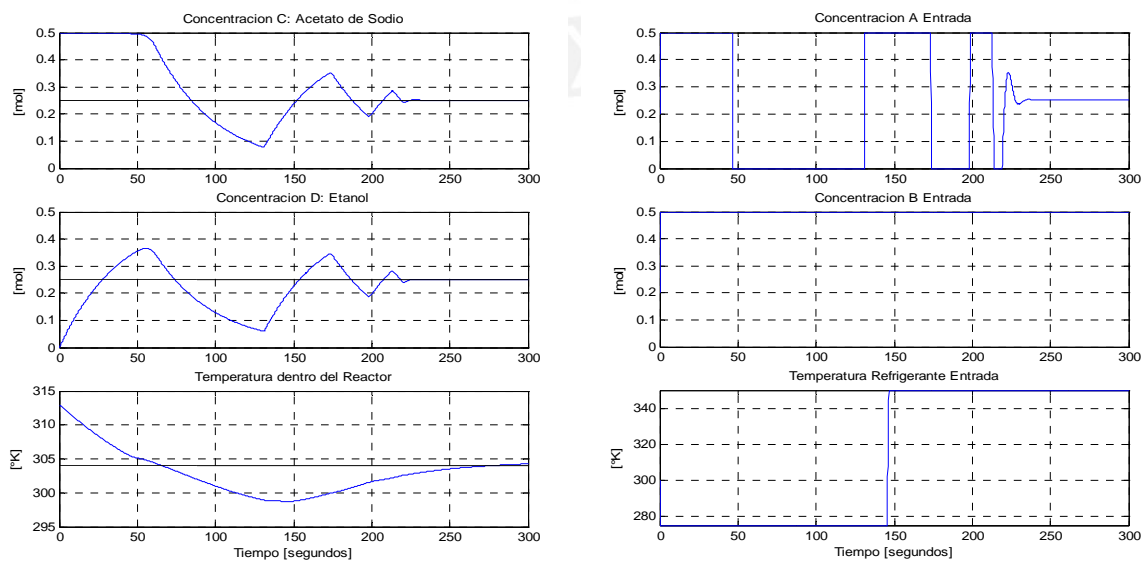


Figura 4.4. Controlador OPTIMAL, Respuesta de los Estados y Señal de Control
($CC = 0.25$, $CD = 0.25$, $T = 304$)

4.4. SIMULACIÓN DEL NEUROCONTROLADOR ESTÁTICO APLICADO AL REACTOR QUÍMICO

Mediante la siguiente tabla se hace un resumen de los resultados obtenidos, utilizando las diversas condiciones iniciales.

Variable	Referencia	Tiempo de Establecimiento	Valor de Establecimiento
CC (mol)	0.12	Entre 170 y 240 seg	Entre 0.115 y 0.121
CD (mol)	0.12	Entre 170 y 260 seg	Entre 0.116 y 0.121
T (°K)	307	Entre 250 y 270 seg	Entre 305.5 y 307
CC (mol)	0.17	Entre 190 y 230 seg	0.168
CD (mol)	0.17	Entre 180 y 235 seg	0.168
T (°K)	306	Entre 230 y 240 seg	Entre 305.1 y 305.2
CC (mol)	0.22	Entre 250 y 275 seg	0.22
CD (mol)	0.22	Entre 250 y 275 seg	0.22
T (°K)	305	Entre 250 y 280 seg	Entre 304.9 y 305.1
CC (mol)	0.25	Entre 180 y 210 seg	0.25
CD (mol)	0.25	Entre 160 y 180 seg	0.25
T (°K)	304	Entre 210 y 230 seg	Entre 304 y 304.2
CC (mol)	0.35	Entre 170 y 230 seg	0.349
CD (mol)	0.35	Entre 130 y 170 seg	0.349
T (°K)	302	Entre 225 y 250 seg	Entre 302.2 y 302.3

Tabla 4.6. Resumen de resultados obtenidos para el Neurocontrolador Estático

Las siguientes figuras muestran los resultados obtenidos para la condición inicial:
 $CA=0.50$, $CB=0.00$, $CC=0.50$, $CD=0.00$, $T=313$, $Tr=350$, $Ph=0.01$

Referencia Deseada : $CC = 0.17$, $CD = 0.17$, $T = 306$

Respuesta en el tiempo de los Estados

Señal de Control

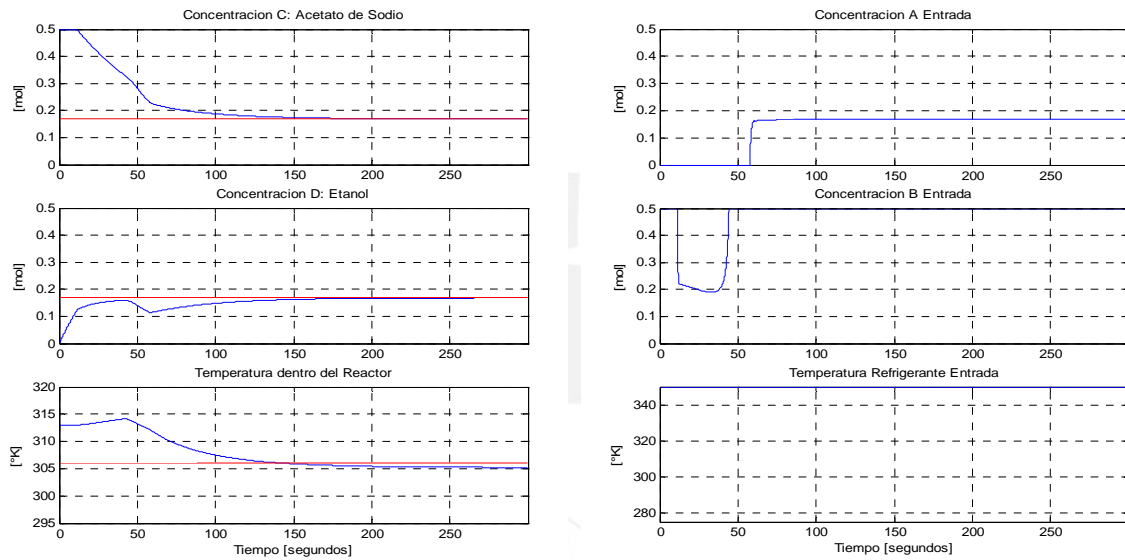


Figura 4.5. Neurocontrolador ESTATICO, Respuesta de los Estados y Señal de Control
 ($CC = 0.17$, $CD = 0.17$, $T = 306$)

Referencia Deseada : $CC = 0.25$, $CD = 0.25$, $T = 304$

Respuesta en el tiempo de los Estados

Señal de Control

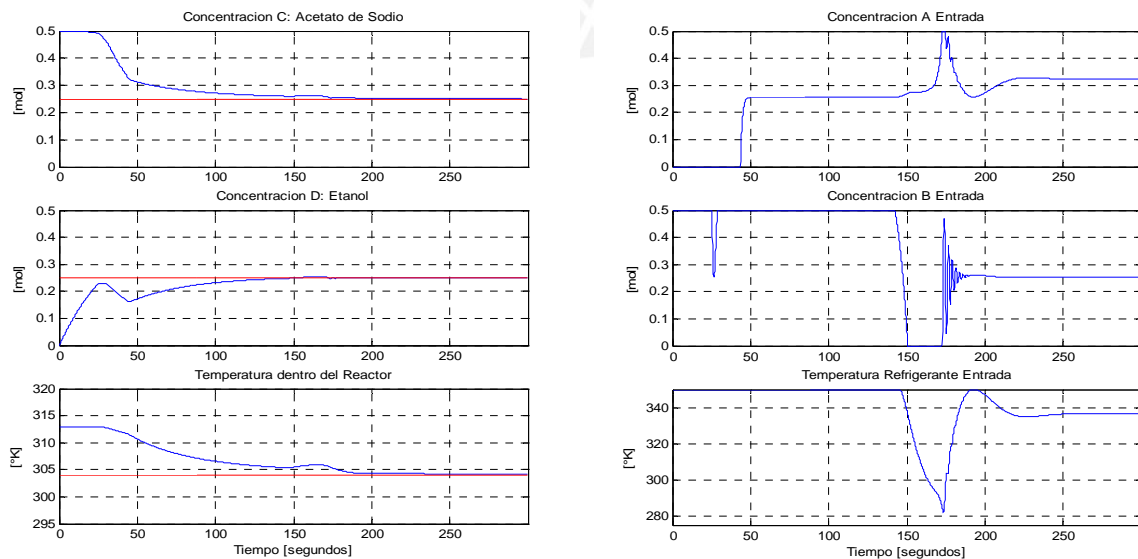


Figura 4.6. Neurocontrolador ESTÁTICO, Respuesta de los Estados y Señal de Control
($CC = 0.25$, $CD = 0.25$, $T = 304$)

4.5. SIMULACIÓN DEL NEUROCONTROLADOR ESTÁTICO MODIFICADO APLICADO AL REACTOR QUÍMICO

Mediante la siguiente tabla se hace un resumen de los resultados obtenidos, utilizando las diversas condiciones iniciales.

Variable	Referencia	Tiempo de Establecimiento	Valor de Establecimiento
CC (mol)	0.12	Entre 205 y 245 seg	0.129
CD (mol)	0.12	Entre 210 y 270 seg	0.129
T (°K)	307	Entre 210 y 240 seg	Entre 306.9 y 307
CC (mol)	0.17	Entre 200 y 225 seg	0.175
CD (mol)	0.17	Entre 220 y 240 seg	0.175
T (°K)	306	Entre 240 y 270 seg	305.9
CC (mol)	0.22	Entre 200 y 240 seg	0.2205
CD (mol)	0.22	Entre 200 y 240 seg	0.2205
T (°K)	305	Entre 250 y 275 seg	Entre 304.9 y 305.1
CC (mol)	0.25	Entre 180 y 230 seg	0.247
CD (mol)	0.25	Entre 180 y 225 seg	0.247
T (°K)	304	Entre 250 y 300 seg	Entre 304.2 y 304.3
CC (mol)	0.35	Entre 180 y 255 seg	0.337
CD (mol)	0.35	Entre 170 y 240 seg	0.337
T (°K)	302	Entre 230 y 245 seg	Entre 302.7 y 302.8

Tabla 4.7. Resumen de resultados obtenidos para el Neurocontrolador Estático Modificado

Las siguientes figuras muestran los resultados obtenidos para la condición inicial:
 $CA=0.50$, $CB=0.00$, $CC=0.50$, $CD=0.00$, $T=313$, $Tr=350$, $Ph=0.01$

Referencia Deseada : $CC = 0.17$, $CD = 0.17$, $T = 306$

Respuesta en el tiempo de los Estados

Señal de Control

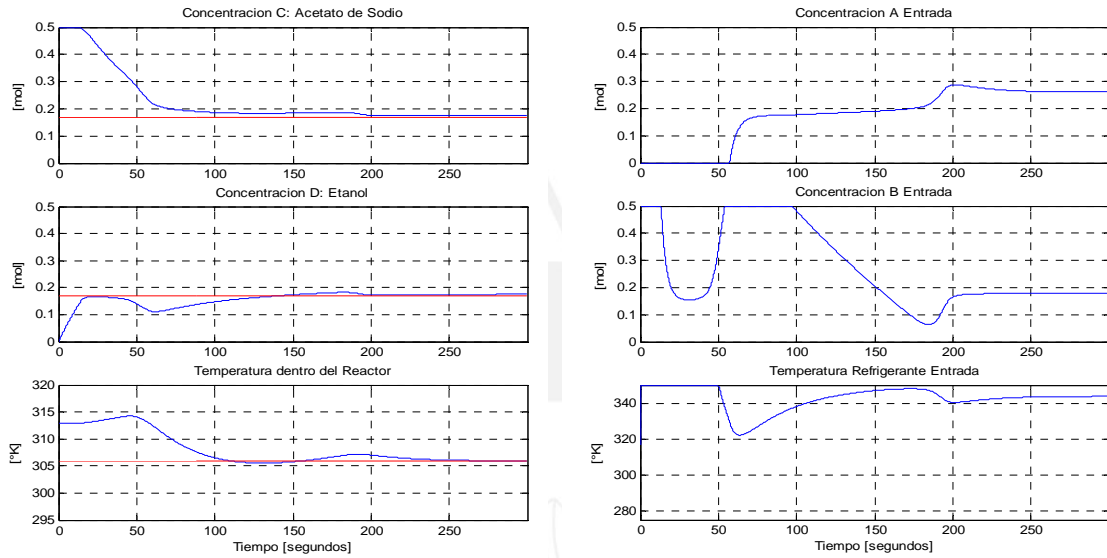


Figura 4.7. Neurocontrolador ESTATICO Modificado, Respuesta de los Estados y Señal de Control ($CC = 0.17$, $CD = 0.17$, $T = 306$)

Referencia Deseada : $CC = 0.25$, $CD = 0.25$, $T = 304$

Respuesta en el tiempo de los Estados

Señal de Control

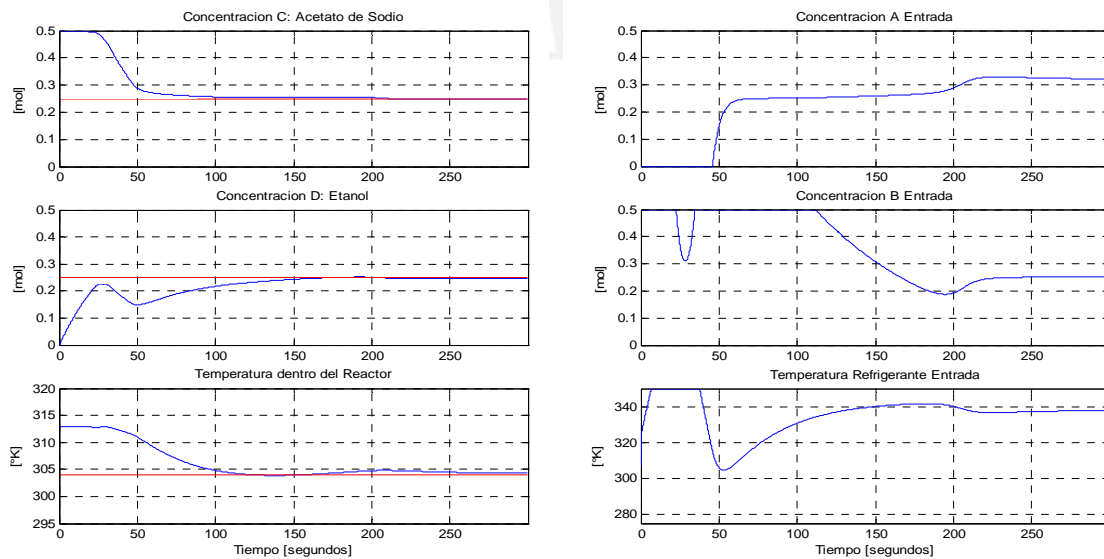


Figura 4.8. Neurocontrolador ESTATICO Modificado, Respuesta de los Estados y Señal de Control ($CC = 0.25$, $CD = 0.25$, $T = 304$)

4.6. SIMULACIÓN DEL NEUROCONTROLADOR DINÁMICO

DBP APLICADO AL REACTOR QUÍMICO

Mediante la siguiente tabla se hace un resumen de los resultados obtenidos, utilizando las diversas condiciones iniciales.

Variable	Referencia	Tiempo de Establecimiento	Valor de Establecimiento
CC (mol)	0.12	Entre 5 y 55 seg	0.1215
CD (mol)	0.12	Entre 190 y 210 seg	0.1215
T (°K)	307	Entre 160 y 240 seg	307.5
CC (mol)	0.17	Entre 7 y 50 seg	0.171
CD (mol)	0.17	Entre 185 y 210 seg	0.171
T (°K)	306	Entre 130 y 195 seg	306
CC (mol)	0.22	Entre 4 y 50 seg	0.22
CD (mol)	0.22	Entre 180 y 210 seg	0.22
T (°K)	305	Entre 150 y 175 seg	304.7
CC (mol)	0.25	Entre 7 y 30 seg	0.2495
CD (mol)	0.25	Entre 200 y 235 seg	0.2495
T (°K)	304	Entre 120 y 130 seg	303.8
CC (mol)	0.35	Entre 5 y 50 seg	0.3505
CD (mol)	0.35	Entre 180 y 200 seg	0.352
T (°K)	302	Entre 170 y 190 seg	302.4

Tabla 4.8. Resumen de resultados obtenidos para el Neurocontrolador Dinámico

Las siguientes figuras muestran los resultados obtenidos para la condición inicial:
 $CA=0.50$, $CB=0.00$, $CC=0.50$, $CD=0.00$, $T=313$, $Tr=350$, $Ph=0.01$

Referencia Deseada : $CC = 0.17$, $CD = 0.17$, $T = 306$

Respuesta en el tiempo de los Estados

Señal de Control

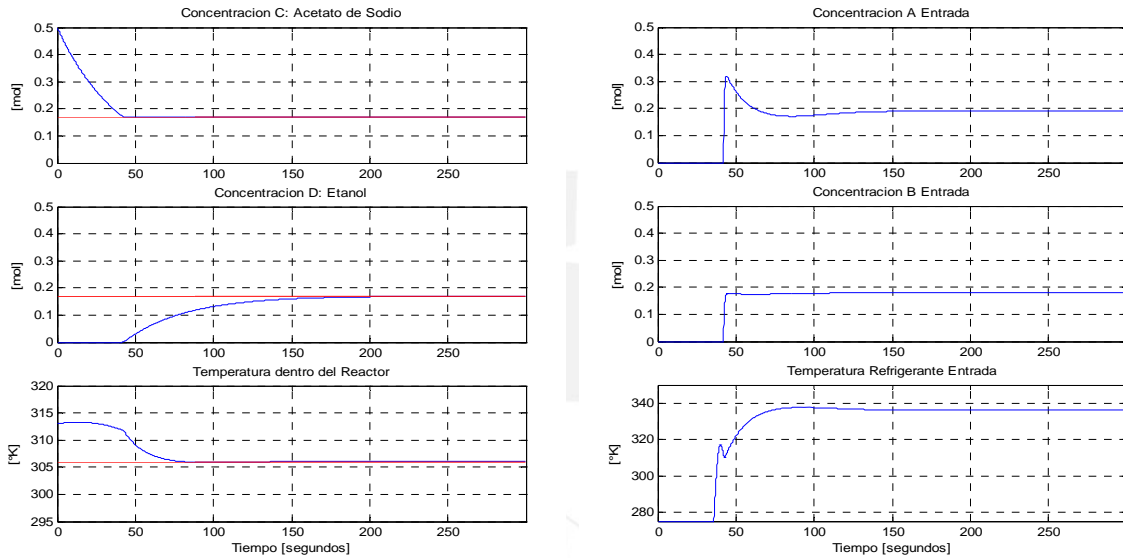


Figura 4.9. Neurocontrolador DINAMICO DBP, Respuesta de los Estados y Señal de Control ($CC = 0.17$, $CD = 0.17$, $T = 306$)

Referencia Deseada : $CC = 0.25$, $CD = 0.25$, $T = 304$

Respuesta en el tiempo de los Estados

Señal de Control

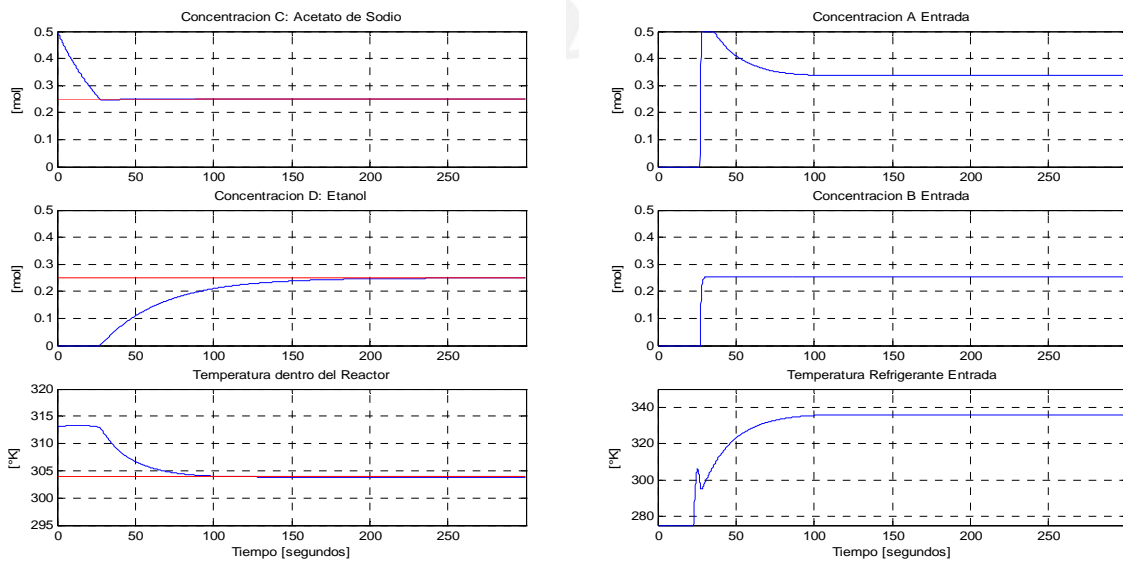


Figura 4.10. Neurocontrolador DINAMICO DBP, Respuesta de los Estados y Señal de Control ($CC = 0.25$, $CD = 0.25$, $T = 304$)



A continuación se muestra un resumen que promedia el desempeño de los diversos controladores aplicados anteriormente a las cinco referencias utilizadas para el análisis, luego de ser sometidas a las diversas condiciones iniciales. Para la elaboración de la siguiente tabla se ha considerado las cinco tablas que le preceden.

El parámetro tiempo se refiere al promedio de los tiempos de establecimiento correspondiente a cada referencia y a cada controlador, eliminando de esta manera los rangos que se mostraban en las tablas anteriores.

El parámetro Error se refiere al promedio de los errores en estado estacionario, para lo cual se ha restado la referencia menos el valor de establecimiento mostrado anteriormente.

		PID		Optimal		Estático		Estático Modificado		Dinámico	
Variable	Set-Point	Tiempo	Error	Tiempo	Error	Tiempo	Error	Tiempo	Error	Tiempo	Error
CC	0.12	230	0.0020	265	0.002	205	0.005	225	0.009	30	0.0015
CD	0.12	240	0.0018	265	0.004	215	0.004	240	0.009	200	0.0015
T	307	265	0.5	290	1.5	260	1.5	225	0.1	200	0.5

CC	0.17	245	0.0028	243	0	210	0.002	213	0.005	29	0.001
CD	0.17	225	0.0025	235	0	208	0.002	230	0.005	198	0.001
T	306	295	0.6	275	0.9	235	0.9	255	0.1	163	0
CC	0.22	265	0.0035	215	0	263	0	220	0.0005	23	0
CD	0.22	210	0.0032	230	0	263	0	220	0.0005	195	0
T	305	295	0.5	295	0.4	265	0.1	263	0.1	163	0.3
CC	0.25	200	0.0040	210	0	195	0	205	0.003	19	0.0005
CD	0.25	200	0.0038	210	0	170	0	203	0.003	218	0.0005
T	304	215	0.4	295	0.7	220	0.2	275	0.8	125	0.2
CC	0.35	175	0.0055	250	0.02	200	0.001	218	0.013	28	0.0005
CD	0.35	170	0.0052	250	0.02	150	0.001	205	0.013	190	0.002
T	302	140	0.3	298	2.0	238	0.3	238	0.8	180	0.4

Tabla 4.9. Resumen de resultados obtenidos aplicando los controladores a diversas referencias

A continuación se ha promediado los tiempos y error correspondientes a cada controlador, entre las diversas referencias. La siguiente tabla muestra dichos resultados, lo que permite comparar de mejor forma el comportamiento de los controladores aplicados al reactor.

Variable	PID		Optimal		Estático		Estático Modificado		Dinámico	
	Tiempo	Error	Tiempo	Error	Tiempo	Error	Tiempo	Error	Tiempo	Error
CC	223	0.0036	237	0.0044	215	0.0016	216	0.0007	26	0.0007
CD	209	0.0033	238	0.0048	201	0.0014	220	0.0007	200	0.0010
T	242	0.46	291	1.1	244	0.6	251	0.38	166	0.28

Tabla 4.10. Resumen de resultados obtenidos para evaluar la performance de los controladores

Como se puede observar el neurocontrolador Dinámico responde de manera superior frente a los demás controladores, tanto en tiempo de establecimiento como en error en estado estable.

4.7. RESPUESTA DE LOS CONTROLADORES FRENTE A PERTURBACIONES Y RUIDO

Como se ha podido apreciar en las simulaciones anteriores los controladores responden bien frente a determinadas referencias, si se aprecia con detenimiento las respuestas para todos los controladores pueden considerarse aceptables para las referencias 1, 3 y 4, por tanto se hará uso de estas referencias, y se someterá al sistema a diversas perturbaciones y ruido.

4.7.1. RESPUESTA FRENTE A PERTURBACIONES

Las simulaciones se llevarán a cabo en 5 etapas, para cada uno de estos casos se someterá al sistema a perturbaciones, utilizando uno por uno los controladores diseñados.

- En un primer caso las perturbaciones serán únicamente en el flujo a la entrada de ambos materiales.
- En un segundo caso las perturbaciones serán únicamente en la temperatura de entrada de ambos materiales.
- En un tercer caso las perturbaciones serán únicamente en el flujo del líquido refrigerante a la entrada de la camisa de refrigeración.
- En un cuarto caso las perturbaciones comprenderán todos los casos anteriores, es decir que se presentarán perturbaciones en flujo y temperatura de materiales, así como en el flujo del refrigerante.

- En un quinto caso las perturbaciones también comprenderán los tres primeros casos, pero con una combinación de valores diferentes a la del cuarto caso.

Las perturbaciones que serán aplicadas corresponden a los máximos posibles dentro de los límites detallados en la tabla 4.3. A continuación se muestran los diversos casos de combinación de perturbaciones para los cuales se simulará el sistema.

Caso 1	Perturbación en Flujos del material a la entrada del reactor: $F_{iA} = F_{iA} - 50\%$, $F_{iB} = F_{iB} + 50\%$
Caso 2	Perturbación en Temperaturas del material a la entrada del reactor: $T_{iA} = T_{iA} + 2\%$, $T_{iB} = T_{iB} - 2\%$
Caso 3	Perturbación en Flujo del Refrigerante: $F_r = F_r + 50\%$
Caso 4	Perturbación en Temperatura y Flujo: $F_r = F_r - 50\%$ $F_{iA} = F_{iA} - 50\%$, $F_{iB} = F_{iB} + 50\%$, $T_{iA} = T_{iA} + 2\%$, $T_{iB} = T_{iB} - 2\%$
Caso 5	Perturbación en Temperatura y Flujo: $F_r = F_r + 50\%$ $F_{iA} = F_{iA} - 50\%$, $F_{iB} = F_{iB} + 50\%$, $T_{iA} = T_{iA} - 2\%$, $T_{iB} = T_{iB} + 2\%$

Tabla 4.11. Casos de combinación de perturbaciones aplicadas al reactor químico

A continuación se muestran los resultados obtenidos, el parámetro “Tiempo” corresponde al promedio del tiempo de establecimiento (en segundos) de las diversas condiciones iniciales. En el caso de que el sistema no converja en un valor fijo, o se mantenga oscilando, o fluctúe desordenadamente en torno de un valor, se expresará con el término NEVF (No se Establece en un Valor Fijo). El parámetro “Error” corresponde al máximo error en estado estable de entre las diversas condiciones iniciales.

CASO I: Perturbación en Flujos del material a la entrada del reactor:
 $F_{iA} = F_{iA} - 50\%$, $F_{iB} = F_{iB} + 50\%$

Mediante la siguiente tabla se hace un resumen de los resultados obtenidos, utilizando las diversas condiciones iniciales.

		PID		Optimal		Estático		Estático Modificado		Dinámico	
Variable	Set-Point	Tiempo	Error	Tiempo	Error	Tiempo	Error	Tiempo	Error	Tiempo	Error
CC	0.12	200	0.0026	NEVF	0.0290	230	0.0137	260	0.0078	53	0.0005
CD	0.12	230	0.0029	NEVF	0.0245	232	0.0236	265	0.0078	188	0.0007
T	307	NEVF	1.0	300	3.0	240	2.8	300	2.4	156	1.0
CC	0.22	260	0.0050	300	0.0295	250	0.0096	205	0.0063	45	0.0014
CD	0.22	260	0.0050	300	0.0294	245	0.0095	230	0.0065	185	0.0018
T	305	300	0.6	285	1.5	270	1.2	298	2.7	150	1.0
CC	0.25	200	0.0055	280	0.0031	290	0.0065	230	0.0314	80	0.0020
CD	0.25	205	0.0055	265	0.0033	280	0.0063	270	0.0316	180	0.0020
T	304	250	0.5	300	1.4	290	0.4	295	2.1	170	0.6

Tabla 4.12. Resumen de resultados obtenidos luego de someter al sistema al Caso 1 de Perturbación

CASO II: Perturbación en Temperaturas del material a la entrada del reactor:

$T_{iA} = T_{iA} + 2\%$, $T_{iB} = T_{iB} - 2\%$

Mediante la siguiente tabla se hace un resumen de los resultados obtenidos, utilizando las diversas condiciones iniciales.

		PID		Optimal		Estático		Estático Modificado		Dinámico	
Variable	Set-Point	Tiempo	Error	Tiempo	Error	Tiempo	Error	Tiempo	Error	Tiempo	Error
CC	0.12	200	0.0020	NEVF	0.0440	230	0.0187	255	0.0050	30	0.0015
CD	0.12	200	0.0018	NEVF	0.0440	235	0.0188	253	0.0049	190	0.0017
T	307	NEVF	0.6	300	4.4	240	4.2	300	1.7	190	1.1
CC	0.22	250	0.0045	240	0.0002	240	0.0055	260	0.0040	34	0.0003
CD	0.22	240	0.0043	240	0.0005	235	0.0055	258	0.0043	200	0.0005
T	305	NEVF	0.4	300	1.5	270	1.3	292	1.6	173	1.0
CC	0.25	200	0.0040	250	0.0005	280	0.0008	255	0.0074	28	0.0010
CD	0.25	205	0.0037	250	0.0008	270	0.0008	245	0.0075	185	0.0012
T	304	NEVF	0.3	295	0.6	300	0.5	260	1.9	152	1.4

Tabla 4.13. Resumen de resultados obtenidos luego de someter al sistema al Caso 2 de Perturbación

CASO III: Perturbación en Flujo del Refrigerante: $Fr = Fr + 50\%$

Mediante la siguiente tabla se hace un resumen de los resultados obtenidos, utilizando las diversas condiciones iniciales.

		PID		Optimal		Estático		Estático Modificado		Dinámico	
Variable	Set-Point	Tiempo	Error	Tiempo	Error	Tiempo	Error	Tiempo	Error	Tiempo	Error
CC	0.12	200	0.0021	300	0.0033	205	0.0041	215	0.0092	42	0.0015
CD	0.12	210	0.0019	300	0.0023	210	0.0043	220	0.0092	200	0.0018
T	307	NEVF	0.7	290	1.5	230	1.4	240	0.1	136	0.5
CC	0.22	220	0.0035	215	0.0001	250	0.0002	248	0.0007	34	0.0001
CD	0.22	210	0.0035	210	0.0004	250	0.0001	246	0.0006	196	0.0004
T	305	NEVF	0.5	250	0.3	290	0.1	259	0.1	172	0.3
CC	0.25	205	0.0040	215	0.0037	210	0.0005	220	0.0030	22	0.0005
CD	0.25	215	0.0037	210	0.0036	205	0.0003	225	0.0030	191	0.0008
T	304	NEVF	0.5	300	1.5	285	0.1	290	0.3	117	0.1

Tabla 4.14. Resumen de resultados obtenidos luego de someter al sistema al Caso 3 de Perturbación

***CASO IV: Perturbación en Temperatura y Flujo: $F_r = F_r - 50\%$
 $F_{iA} = F_{iA} - 50\%$, $F_{iB} = F_{iB} + 50\%$, $T_{iA} = T_{iA} + 2\%$, $T_{iB} = T_{iB} - 2\%$***

Mediante la siguiente tabla se hace un resumen de los resultados obtenidos, utilizando las diversas condiciones iniciales.

		PID		Optimal		Estático		Estático Modificado		Dinámico	
Variable	Set-Point	Tiempo	Error	Tiempo	Error	Tiempo	Error	Tiempo	Error	Tiempo	Error
CC	0.12	200	0.0027	NEVF	0.0202	235	0.0348	190	0.0166	40	0.0005
CD	0.12	220	0.0029	NEVF	0.0204	190	0.0346	240	0.0165	189	0.0008
T	307	NEVF	2.2	NEVF	6.7	280	6.9	255	6.9	285	1.2
CC	0.22	250	0.0048	300	0.0295	275	0.0236	257	0.0350	40	0.0014
CD	0.22	260	0.0050	300	0.0295	260	0.0235	265	0.0352	188	0.0017
T	305	300	2.2	295	3.6	295	3.9	300	5.3	230	1.8
CC	0.25	210	0.0055	295	0.02101	270	0.0182	290	0.0391	102	0.0012
CD	0.25	210	0.0055	290	0.2101	250	0.0180	290	0.0393	220	0.0022
T	304	300	1.5	290	7.3	295	2.7	298	4.5	245	1.2

Tabla 4.15. Resumen de resultados obtenidos luego de someter al sistema al Caso 4 de Perturbación

Las siguientes figuras muestran las gráficas obtenidas para la condición inicial:
 $CA=0.50, CB=0.00, CC=0.50, CD=0.00, T=313, Tr=350, Ph=0.01$

Caso IV : Controlador PID

Referencia: $CC=0.22, CD=0.22, T=305$

Referencia: $CC=0.25, CD=0.25, T=304$

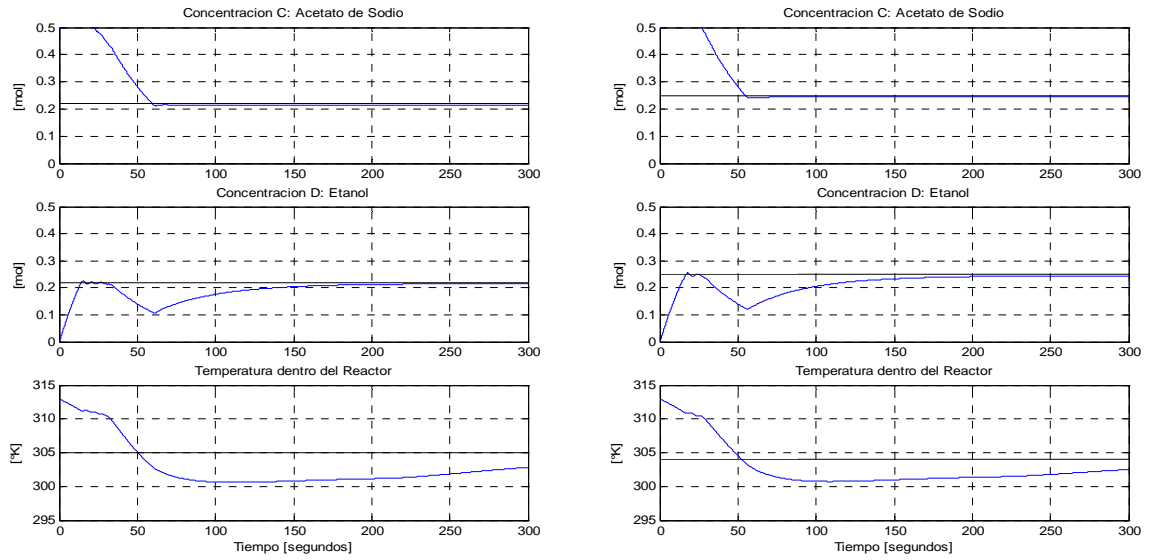


Figura 4.11. Respuesta frente a Perturbaciones (Caso 4) – Controlador PID

Caso IV : Controlador Optimal

Referencia: $CC=0.22, CD=0.22, T=305$

Referencia: $CC=0.25, CD=0.25, T=304$

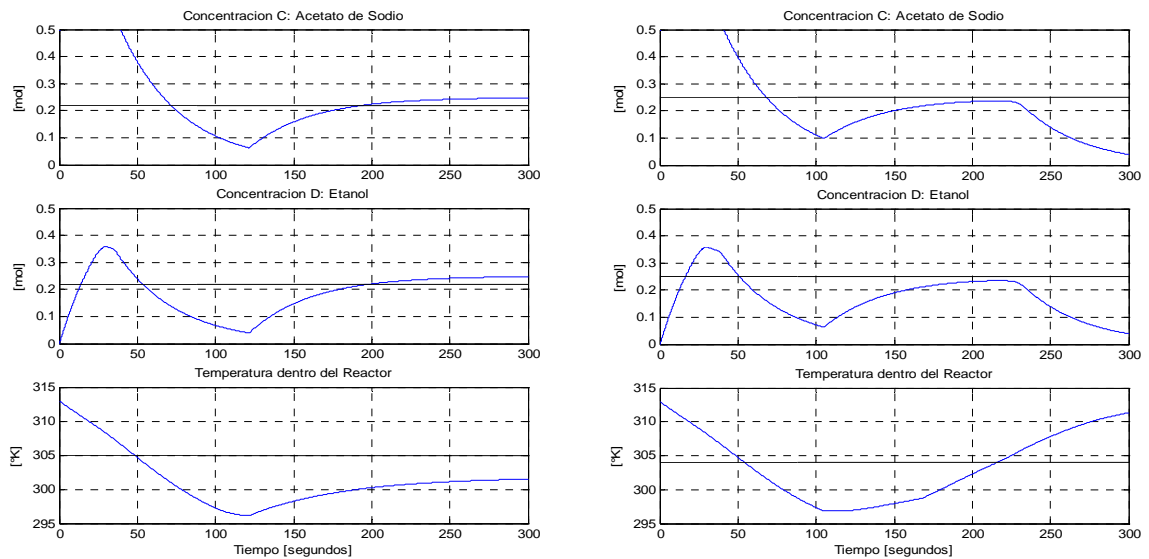


Figura 4.12. Respuesta frente a Perturbaciones (Caso 4) – Controlador Optimal

Caso IV : Neurocontrolador Estático

Referencia: $CC=0.22$, $CD=0.22$, $T=305$

Referencia: $CC=0.25$, $CD=0.25$, $T=304$

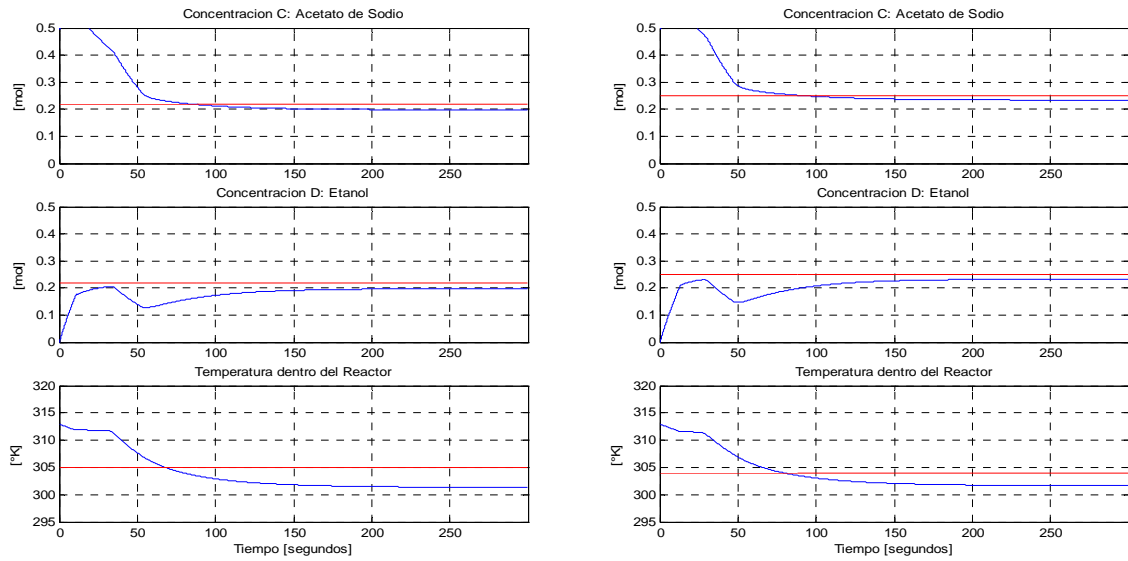


Figura 4.13. Respuesta frente a Perturbaciones (Caso 4) – Neurocontrolador Estático

Caso IV : Neurocontrolador Estático Modificado

Referencia: $CC=0.22$, $CD=0.22$, $T=305$

Referencia: $CC=0.25$, $CD=0.25$, $T=304$

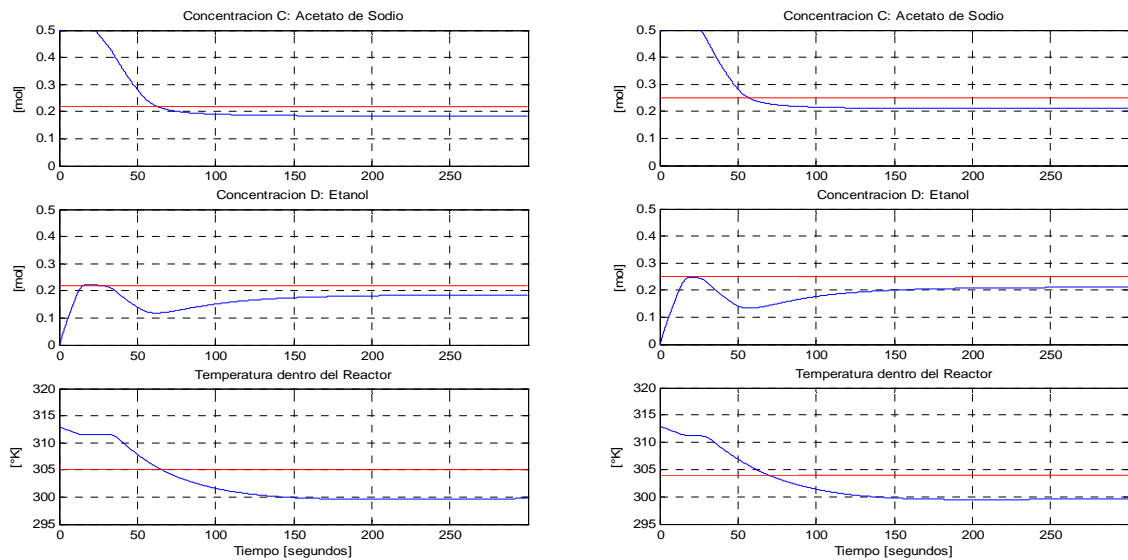


Figura 4.14. Respuesta frente a Perturbaciones (Caso 4) – Neurocontrolador Estático Modificado

Caso IV : Neurocontrolador Dinámico DBP

Referencia: $CC=0.22$, $CD=0.22$, $T=305$

Referencia: $CC=0.25$, $CD=0.25$, $T=304$

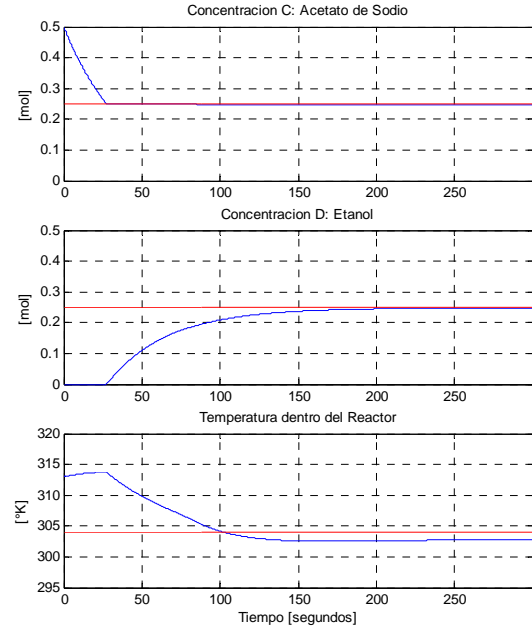
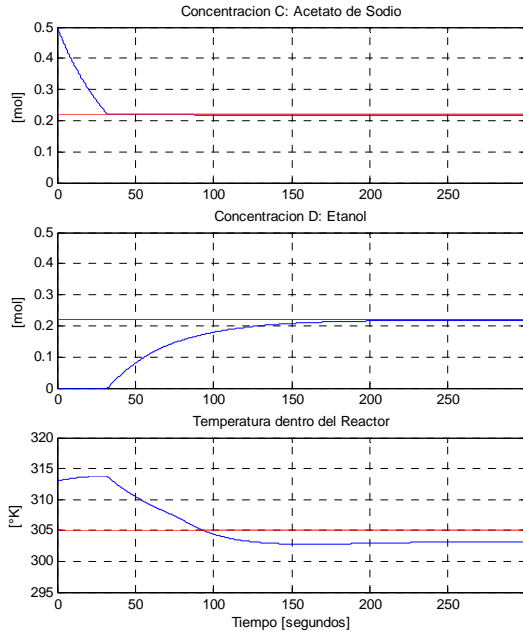


Figura 4.15. Respuesta frente a Perturbaciones (Caso 4) – Neurocontrolador Dinámico DBP

CASO V: Perturbación en Temperatura y Flujo: $Fr = Fr + 50\%$
 $FiA = FiA - 50\%$, $FiB = FiB + 50\%$, $TiA = TiA - 2\%$, $TiB = TiB + 2\%$

Mediante la siguiente tabla se hace un resumen de los resultados obtenidos, utilizando las diversas condiciones iniciales.

		PID		Optimal		Estático		Estático Modificado		Dinámico	
Variable	Set-Point	Tiempo	Error	Tiempo	Error	Tiempo	Error	Tiempo	Error	Tiempo	Error
CC	0.12	200	0.0028	NEVF	0.0296	230	0.0008	220	0.0091	43	0.0004
CD	0.12	230	0.0030	NEVF	0.0311	210	0.0006	225	0.0089	193	0.0007
T	307	NEVF	0.7	NEVF	1.0	260	0.1	290	1.0	148	0.1
CC	0.22	240	0.0050	300	0.0295	198	0.0034	152	0.0186	50	0.0014
CD	0.22	260	0.0050	300	0.0294	210	0.0032	238	0.0188	195	0.0017
T	305	NEVF	0.5	300	0.9	280	0.1	245	0.5	170	0.5
CC	0.25	210	0.0055	270	0.0022	280	0.0042	220	0.0243	105	0.0020
CD	0.25	230	0.0055	280	0.0025	260	0.0040	230	0.0246	180	0.0033
T	304	NEVF	0.4	NEVF	3.2	290	0.1	195	0.1	182	0.1

Tabla 4.16. Resumen de resultados obtenidos luego de someter al sistema al Caso 5 de Perturbación

Las siguientes figuras muestran las gráficas obtenidas para la condición inicial:
 $CA=0.50, CB=0.00, CC=0.50, CD=0.00, T=313, Tr=350, Ph=0.01$

Caso V : Controlador PID

Referencia: $CC=0.22, CD=0.22, T=305$

Referencia: $CC=0.25, CD=0.25, T=304$

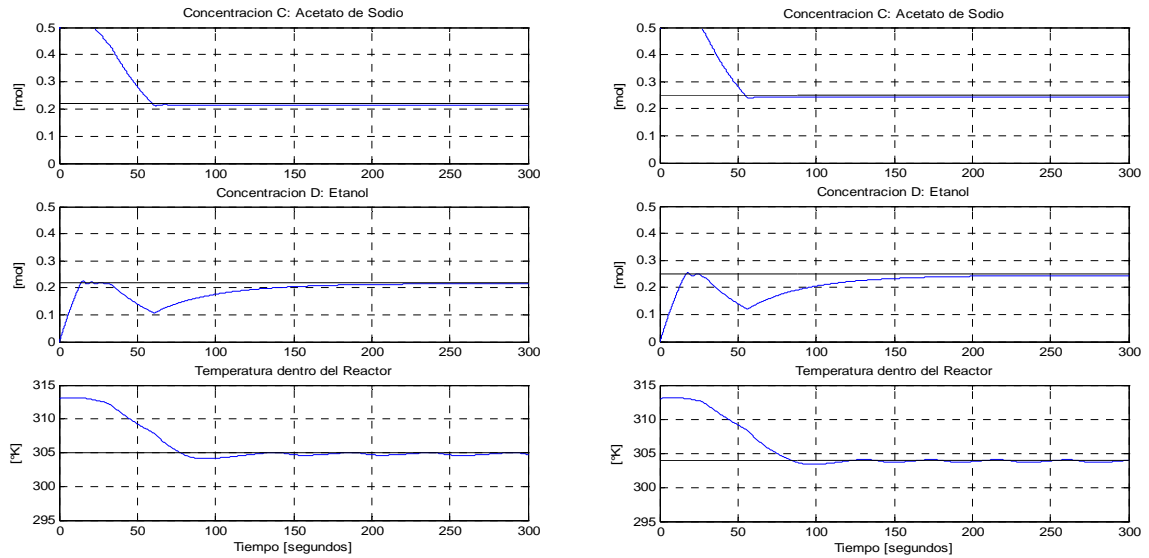


Figura 4.16. Respuesta frente a Perturbaciones (Caso 5) – Controlador PID

Caso V : Controlador Optimal

Referencia: $CC=0.22, CD=0.22, T=305$

Referencia: $CC=0.25, CD=0.25, T=304$

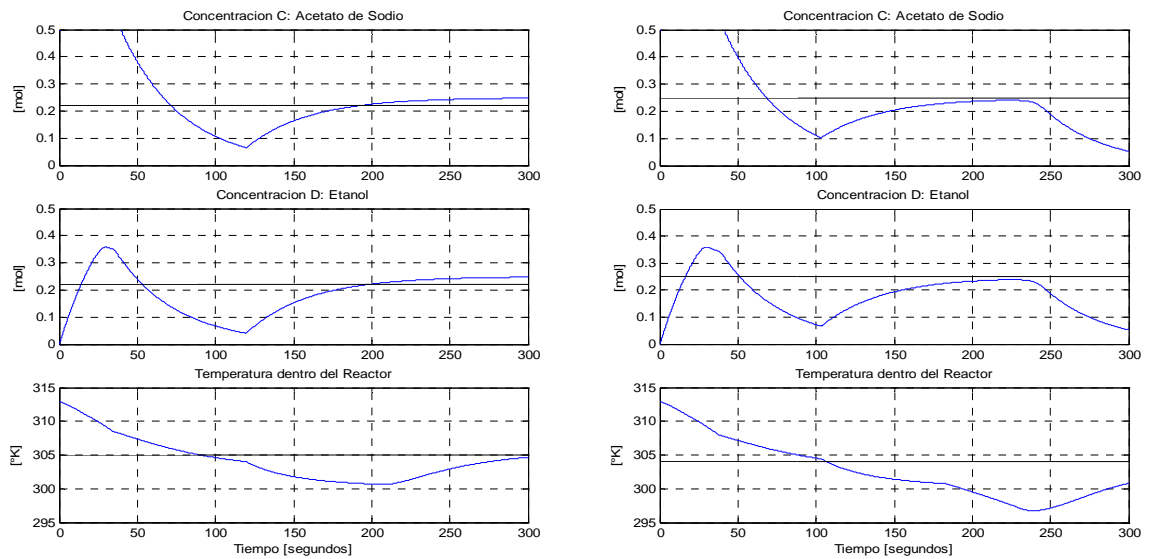


Figura 4.17. Respuesta frente a Perturbaciones (Caso 5) – Controlador Optimal

Caso V : Neurocontrolador Estático

Referencia: $CC=0.22$, $CD=0.22$, $T=305$

Referencia: $CC=0.25$, $CD=0.25$, $T=304$

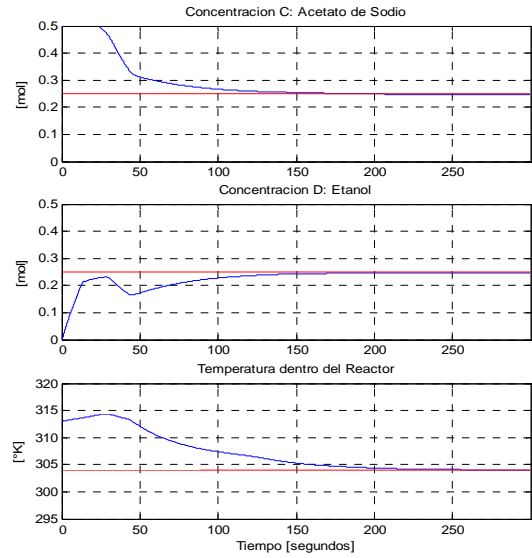
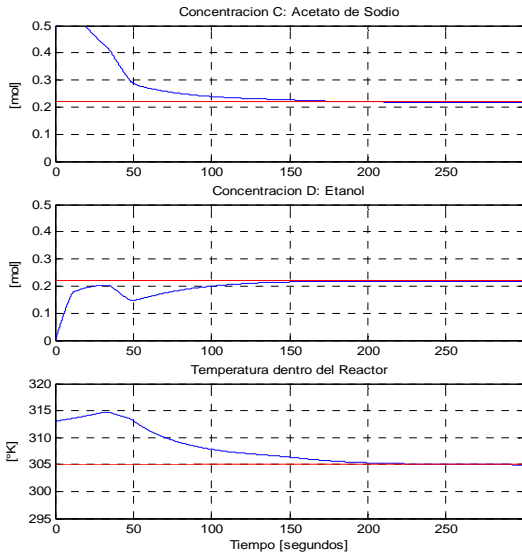


Figura 4.18. Respuesta frente a Perturbaciones (Caso 5) – Neurocontrolador Estático

Caso V : Neurocontrolador Estático Modificado

Referencia: $CC=0.22$, $CD=0.22$, $T=305$

Referencia: $CC=0.25$, $CD=0.25$, $T=304$

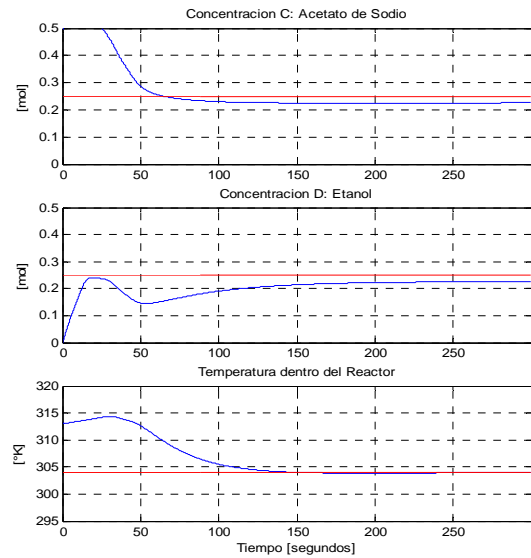
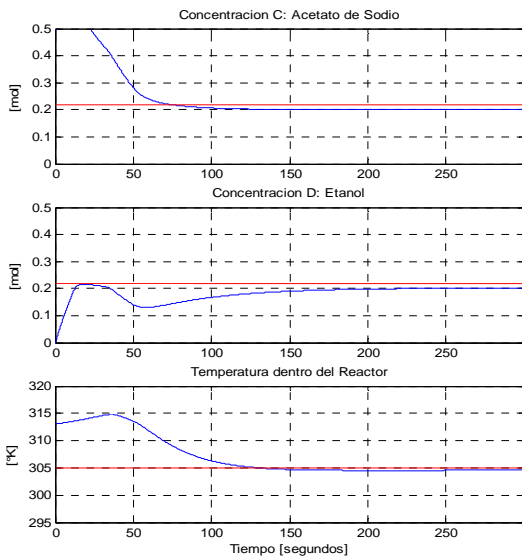


Figura 4.19. Respuesta frente a Perturbaciones (Caso 5) – Neurocontrolador Estático Modificado

Caso V : Neurocontrolador Dinámico DBP

Referencia: $CC=0.22$, $CD=0.22$, $T=305$

Referencia: $CC=0.25$, $CD=0.25$, $T=304$

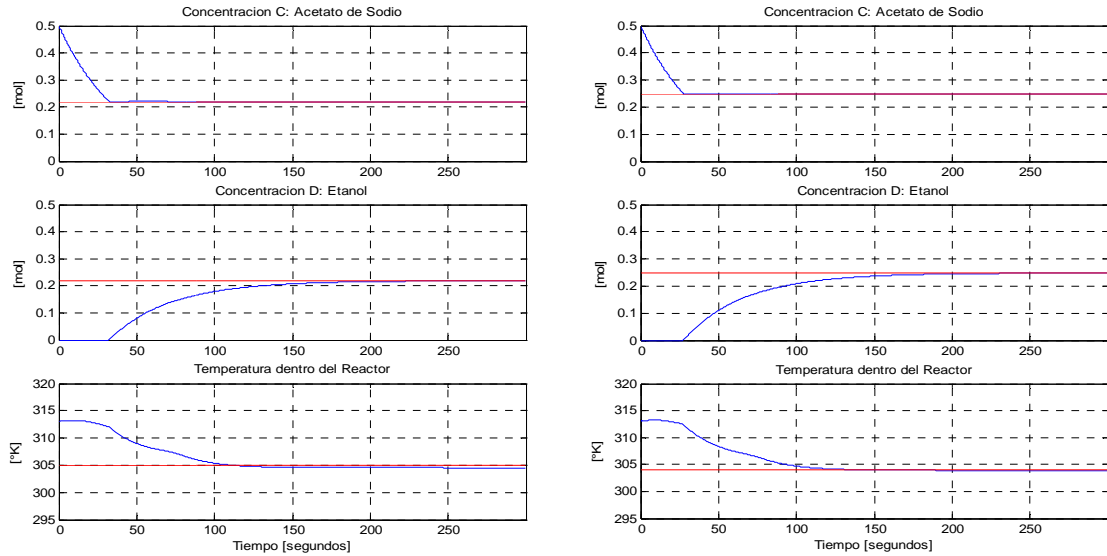


Figura 4.20. Respuesta frente a Perturbaciones (Caso 5) – Neurocontrolador Dinámico DBP

4.7.2. RESPUESTA FRENTE A RUIDO

Las simulaciones se llevarán a cabo en 3 etapas, para cada uno de estos casos se someterá al sistema a ruido, utilizando uno por uno los controladores diseñados.

- En un primer caso el ruido se aplicará sobre la señal de los actuadores (luego de las saturaciones), teniendo una amplitud máxima de hasta $\pm 20\%$ el valor de la señal de control.
- En un segundo caso el ruido se aplicará sobre la señal proveniente de los sensores, teniendo una amplitud máxima de hasta $\pm 1\%$ el valor de dicha señal.
- En un tercer caso el ruido se aplicará tanto sobre la señal de control como sobre la señal del sensor, es decir se combinará los dos casos anteriores.

CASO I: Ruido sobre la Señal de Control ($\pm 20\%$)

Mediante la siguiente tabla se hace un resumen de los resultados obtenidos, utilizando las diversas condiciones iniciales.

		PID		Optimal		Estático		Estático Modificado		Dinámico	
Variable	Set-Point	Tiempo	Error	Tiempo	Error	Tiempo	Error	Tiempo	Error	Tiempo	Error
CC	0.12	NEVF	0.0055	300	0.0035	230	0.0046	252	0.0093	48	0.0016
CD	0.12	210	0.0055	300	0.0032	232	0.0045	257	0.0093	265	0.0017
T	307	NEVF	1.0	280	1.6	253	1.5	262	0.1	240	0.6
CC	0.22	NEVF	0.0070	220	0.0003	280	0.0004	267	0.0007	47	0.0002
CD	0.22	NEVF	0.0065	225	0.0003	250	0.0001	265	0.0007	260	0.0004
T	305	NEVF	1.6	290	0.3	290	0.2	290	0.1	205	0.4
CC	0.25	NEVF	0.0090	220	0.0005	230	0.0005	NEVF	0.0032	30	0.0006
CD	0.25	NEVF	0.0080	218	0.0006	210	0.0003	NEVF	0.0032	250	0.0007
T	304	NEVF	0.4	245	0.8	240	0.1	290	0.4	170	0.2

Tabla 4.17. Resumen de resultados obtenidos luego de someter al sistema al Caso 1 de Ruido

CASO II: Ruido sobre la Señal Sensada ($\pm 1\%$)

Mediante la siguiente tabla se hace un resumen de los resultados obtenidos, utilizando las diversas condiciones iniciales.

		PID		Optimal		Estático		Estático Modificado		Dinámico	
Variable	Set-Point	Tiempo	Error	Tiempo	Error	Tiempo	Error	Tiempo	Error	Tiempo	Error
CC	0.12	NEVF	0.0050	300	0.0065	NEVF	0.0113	NEVF	0.0117	40	0.0016
CD	0.12	NEVF	0.0050	300	0.0070	NEVF	0.0107	NEVF	0.0120	270	0.0026
T	307	NEVF	3.5	NEVF	2.9	NEVF	1.7	NEVF	1.4	NEVF	1.6
CC	0.22	NEVF	0.0090	NEVF	0.0075	NEVF	0.0067	NEVF	0.0042	70	0.0003
CD	0.22	NEVF	0.0090	NEVF	0.0076	NEVF	0.0056	NEVF	0.0043	250	0.0031
T	305	NEVF	2.5	NEVF	2.1	NEVF	2.0	NEVF	1.9	NEVF	2.3
CC	0.25	NEVF	0.0100	NEVF	0.0030	NEVF	0.0068	NEVF	0.0080	25	0.0008
CD	0.25	NEVF	0.0100	NEVF	0.0039	NEVF	0.0065	NEVF	0.0070	230	0.0031
T	304	NEVF	3.0	NEVF	2.5	NEVF	1.5	NEVF	1.2	NEVF	1.4

Tabla 4.18. Resumen de resultados obtenidos luego de someter al sistema al Caso 2 de Ruido

CASO III: Ruido sobre la Señal de Control ($\pm 20\%$) y sobre la Señal Sensada ($\pm 1\%$)

Mediante la siguiente tabla se hace un resumen de los resultados obtenidos, utilizando las diversas condiciones iniciales.

		PID		Optimal		Estático		Estático Modificado		Dinámico	
Variable	Set-Point	Tiempo	Error	Tiempo	Error	Tiempo	Error	Tiempo	Error	Tiempo	Error
CC	0.12	NEVF	0.0050	300	0.0096	NEVF	0.0105	292	0.0108	48	0.0017
CD	0.12	NEVF	0.0055	300	0.0098	NEVF	0.0102	290	0.0116	270	0.0022
T	307	NEVF	2.5	NEVF	3.3	NEVF	2.7	NEVF	1.7	NEVF	1.6
CC	0.22	NEVF	0.0065	NEVF	0.0105	NEVF	0.0078	290	0.0035	85	0.0007
CD	0.22	NEVF	0.0075	NEVF	0.0078	NEVF	0.0092	290	0.0033	255	0.0015
T	305	NEVF	3.0	NEVF	1.2	NEVF	1.1	NEVF	1.3	NEVF	1.3
CC	0.25	NEVF	0.0090	NEVF	0.0076	NEVF	0.0079	NEVF	0.0078	39	0.0012
CD	0.25	NEVF	0.0100	NEVF	0.0074	NEVF	0.0090	NEVF	0.0056	245	0.0023
T	304	NEVF	2.2	NEVF	2.5	NEVF	1.0	NEVF	1.8	NEVF	1.0

Tabla 4.19. Resumen de resultados obtenidos luego de someter al sistema al Caso 3 de Ruido

Las siguientes figuras muestran las gráficas obtenidas para la condición inicial:
 $CA=0.50, CB=0.00, CC=0.50, CD=0.00, T=313, Tr=350, Ph=0.01$

Caso III : Controlador PID

Referencia: $CC=0.22, CD=0.22, T=305$

Referencia: $CC=0.25, CD=0.25, T=304$

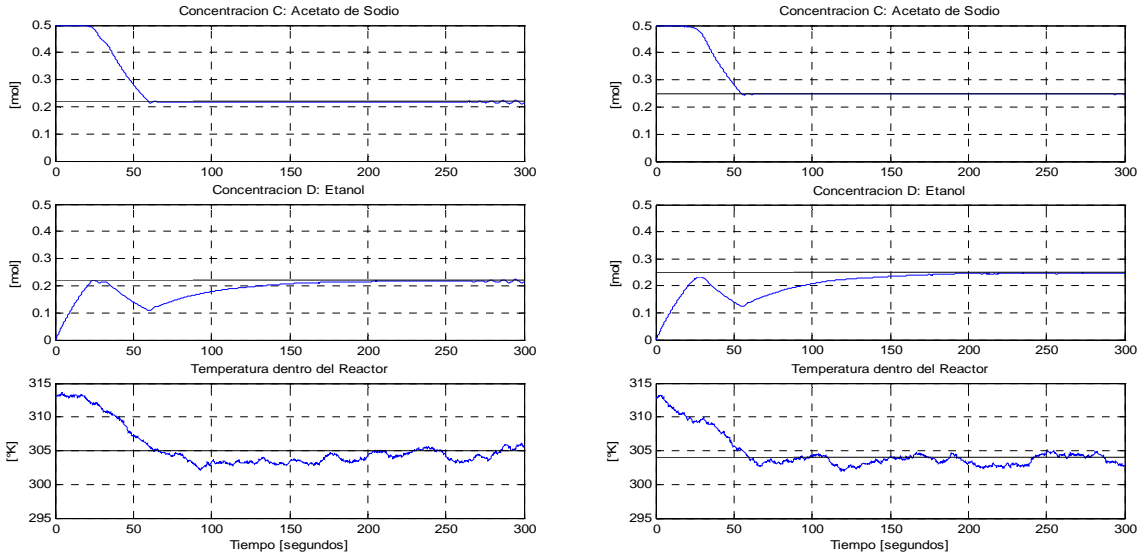


Figura 4.21. Respuesta frente a Ruido (Caso 3) – Controlador PID

Caso III : Controlador Optimal

Referencia: $CC=0.22, CD=0.22, T=305$

Referencia: $CC=0.25, CD=0.25, T=304$

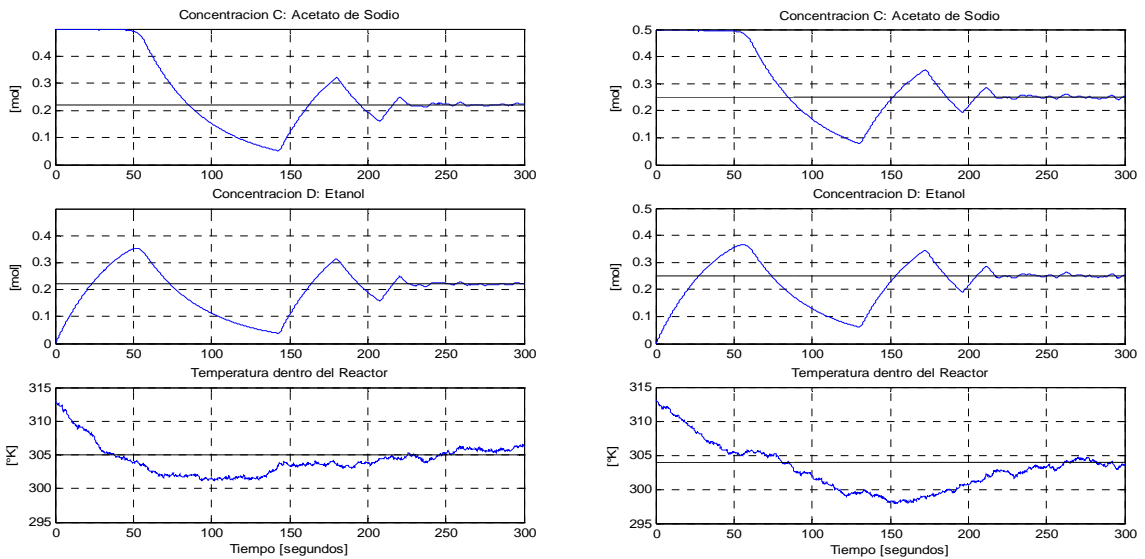


Figura 4.22. Respuesta frente a Ruido (Caso 3) – Controlador Optimal

Caso III : Neurocontrolador Estático

Referencia: $CC=0.22$, $CD=0.22$, $T=305$

Referencia: $CC=0.25$, $CD=0.25$, $T=304$

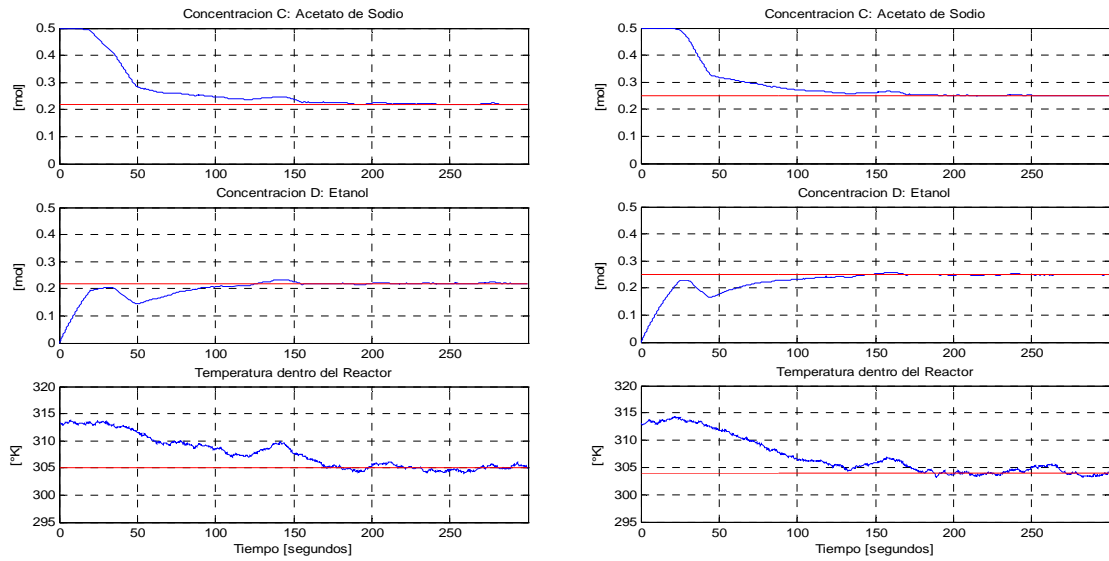


Figura 4.23. Respuesta frente a Ruido (Caso 3) – Neurocontrolador Estático

Caso III : Neurocontrolador Estático Modificado

Referencia: $CC=0.22$, $CD=0.22$, $T=305$

Referencia: $CC=0.25$, $CD=0.25$, $T=304$

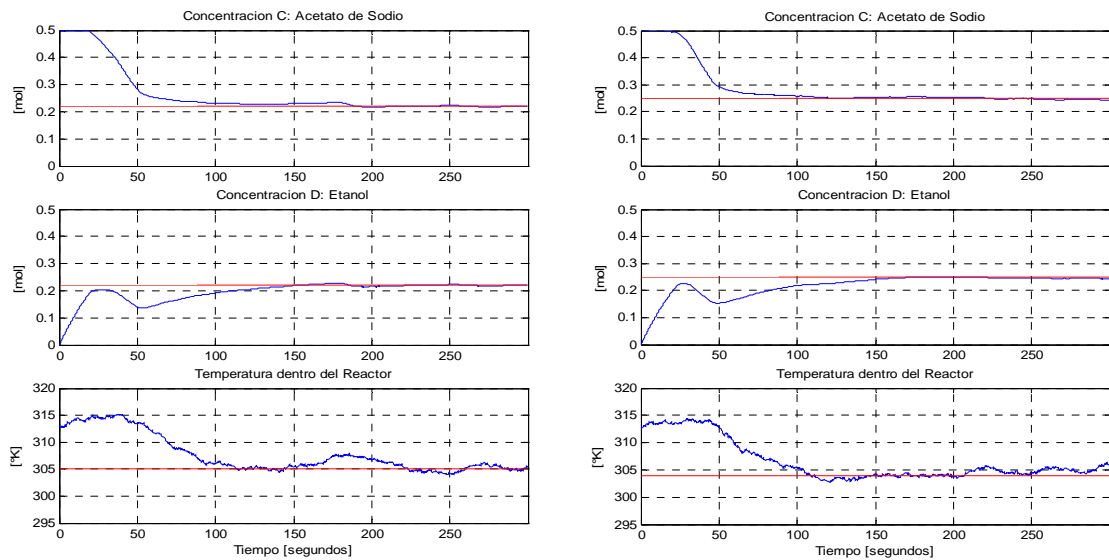


Figura 4.24. Respuesta frente a Ruido (Caso 3) – Neurocontrolador Estático Modificado

Caso III : Neurocontrolador Dinámico DBP

Referencia: $CC=0.22$, $CD=0.22$, $T=305$

Referencia: $CC=0.25$, $CD=0.25$, $T=304$

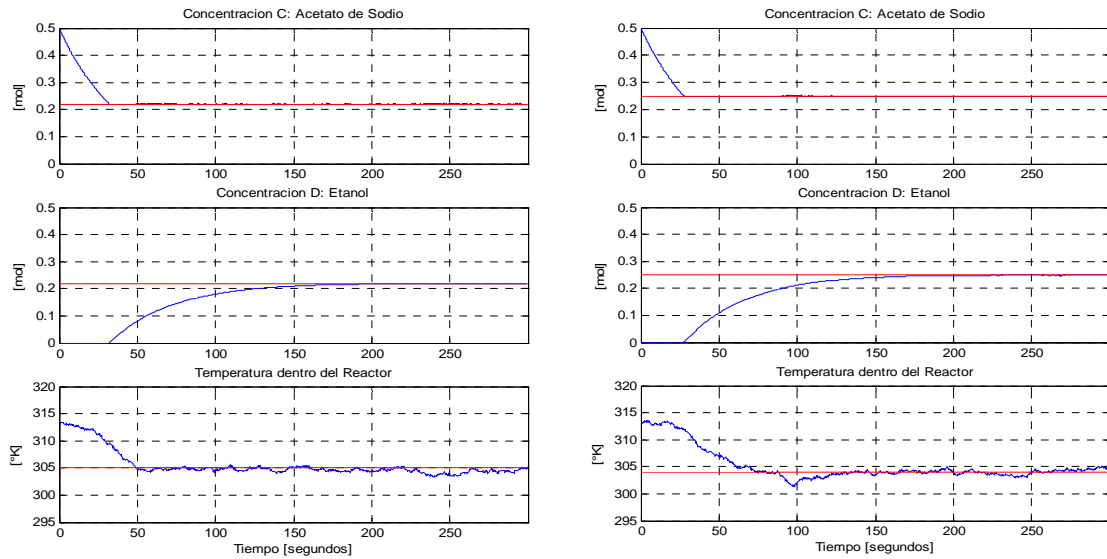


Figura 4.25. Respuesta frente a Ruido (Caso 3) – Neurocontrolador Dinámico DBP

4.7.3. RESPUESTA FRENTE A PERTURBACIONES Y RUIDO

La simulación se llevará a cabo sobre las mismas referencias de los casos anteriores, para cada uno de estos casos se someterá al sistema a perturbaciones y ruido, para ello se utilizará cada uno de los controladores diseñados. Así tenemos:

- Perturbación en Flujo del material A : $F_{iA} - 50\%$
- Perturbación en Flujo del material B : $F_{iA} + 50\%$
- Perturbación en Temperatura en material A : $T_{iA} - 2\%$
- Perturbación en Temperatura en material B : $T_{iB} + 2\%$
- Perturbación en Flujo del refrigerante: $F_r - 50\%$
- Ruido en Señal de Control ($\pm 20\%$)
- Ruido en Señal Sensada ($\pm 1\%$)

Mediante la siguiente tabla se hace un resumen de los resultados obtenidos, utilizando las diversas condiciones iniciales.

		PID		Optimal		Estático		Estático Modificado		Dinámico	
Variable	Set-Point	Tiempo	Error	Tiempo	Error	Tiempo	Error	Tiempo	Error	Tiempo	Error
CC	0.12	NEVF	0.0050	NEVF	0.0220	NEVF	0.0062	NEVF	0.0099	38	0.0005
CD	0.12	NEVF	0.0044	NEVF	0.0206	NEVF	0.0057	NEVF	0.0102	240	0.0019
T	307	NEVF	3.0	NEVF	1.9	NEVF	1.5	NEVF	1.0	NEVF	1.4
CC	0.22	NEVF	0.0050	300	0.0058	NEVF	0.0105	NEVF	0.0250	55	0.0017
CD	0.22	NEVF	0.0060	300	0.0060	NEVF	0.0106	NEVF	0.0245	250	0.0033
T	305	NEVF	2.2	NEVF	3.1	NEVF	1.3	NEVF	2.5	NEVF	1.8
CC	0.25	240	0.0056	300	0.0023	300	0.0112	NEVF	0.0270	160	0.0044
CD	0.25	220	0.0067	300	0.0026	300	0.0123	NEVF	0.0278	200	0.0053
T	304	NEVF	2.2	NEVF	5.8	NEVF	1.6	NEVF	2.1	NEVF	1.1

Tabla 4.20. Resumen de resultados obtenidos luego de someter al sistema a Perturbación y Ruido

Las siguientes figuras muestran las gráficas obtenidas para la condición inicial:
 $CA=0.50$, $CB=0.00$, $CC=0.50$, $CD=0.00$, $T=313$, $T_r=350$, $Ph=0.01$

Perturbación y Ruido : Controlador PID

Referencia: $CC=0.22$, $CD=0.22$, $T=305$

Referencia: $CC=0.25$, $CD=0.25$, $T=304$

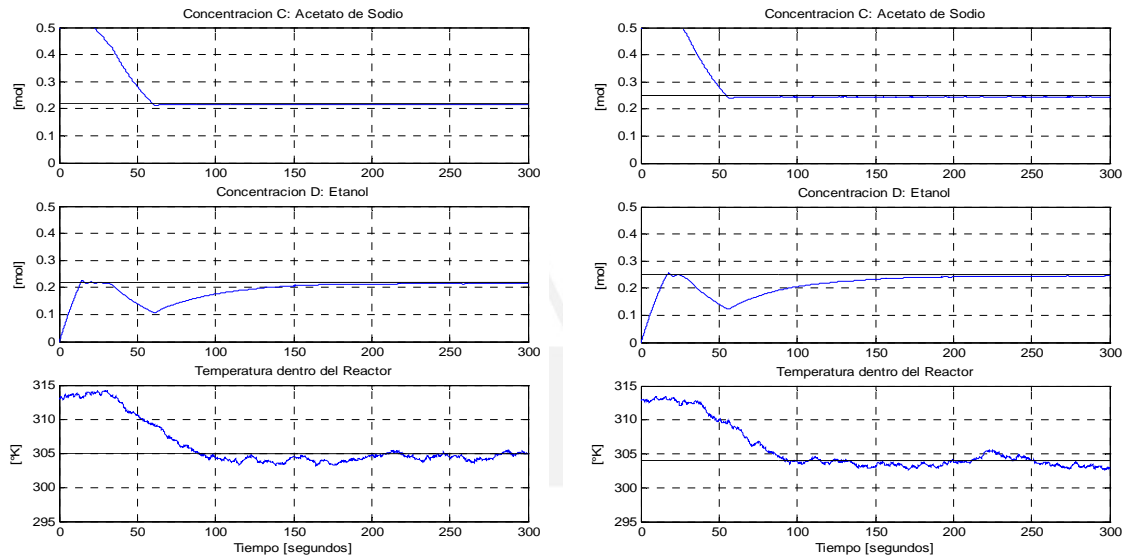


Figura 4.26. Respuesta frente a Perturbación y Ruido – Controlador PID

Perturbación y Ruido : Controlador Optimal

Referencia: $CC=0.22$, $CD=0.22$, $T=305$

Referencia: $CC=0.25$, $CD=0.25$, $T=304$

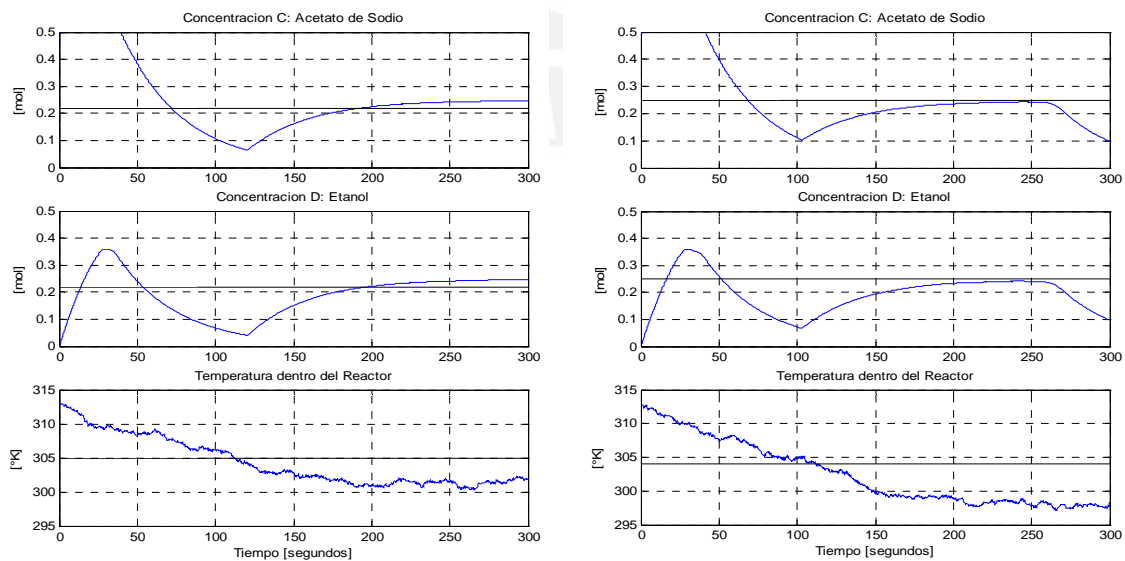


Figura 4.27. Respuesta frente a Perturbación y Ruido – Controlador Optimal

Perturbación y Ruido : Neurocontrolador Estático

Referencia: $CC=0.22$, $CD=0.22$, $T=305$

Referencia: $CC=0.25$, $CD=0.25$, $T=304$

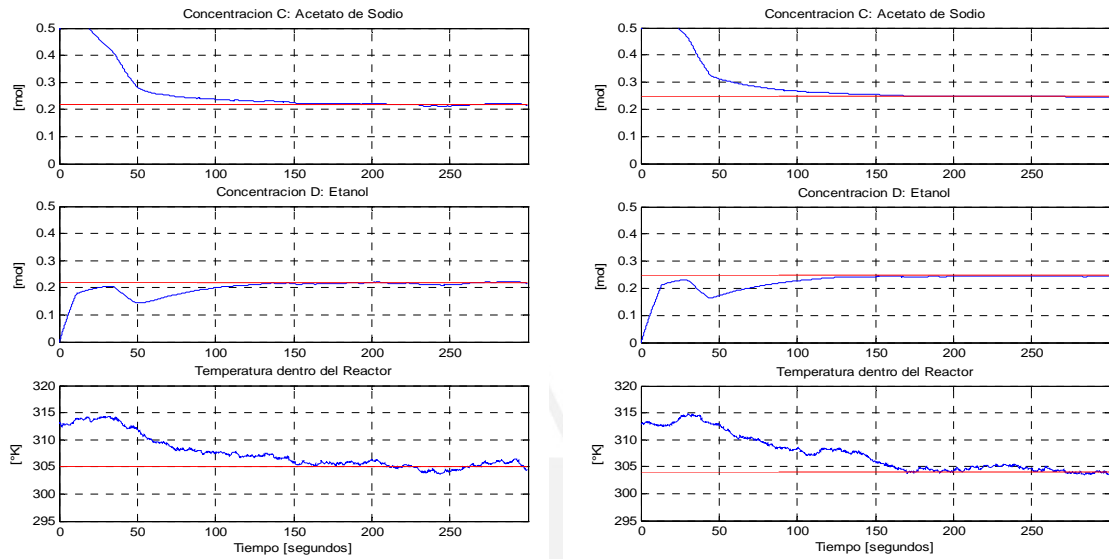


Figura 4.28. Respuesta frente a Perturbación y Ruido – Neurocontrolador Estático

Perturbación y Ruido : Neurocontrolador Estático Modificado

Referencia: $CC=0.22$, $CD=0.22$, $T=305$

Referencia: $CC=0.25$, $CD=0.25$, $T=304$

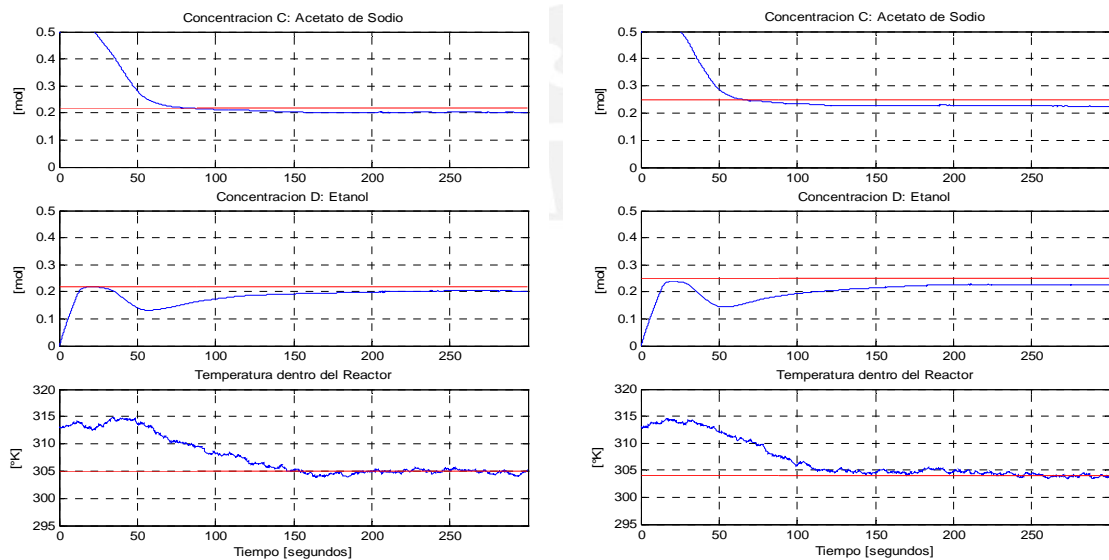


Figura 4.29. Respuesta frente a Perturbación y Ruido – Neurocontrolador Estático Modificado

Perturbación y Ruido : Neurocontrolador Dinámico DBP

Referencia: $CC=0.22$, $CD=0.22$, $T=305$

Referencia: $CC=0.25$, $CD=0.25$, $T=304$

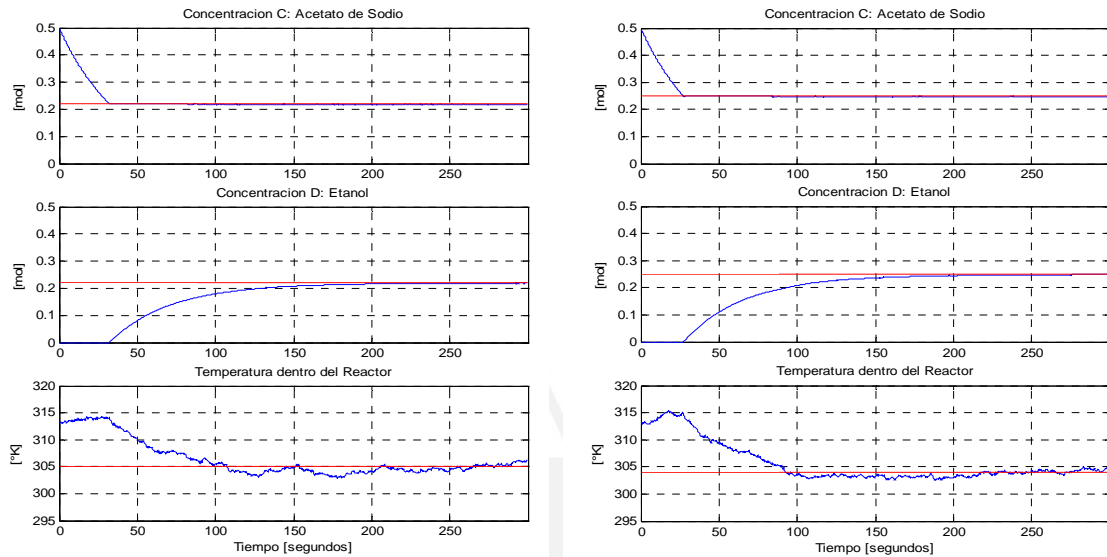


Figura 4.30. Respuesta frente a Perturbación y Ruido – Neurocontrolador Dinámico DBP

4.8. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

Utilizando varios tipos de controlador, se busco llevar el sistema de reactor químico hacia referencias deseadas diferentes, pero partiendo desde diversos puntos o condiciones iniciales.

Después de simular el sistema se graficó los estados que se desean controlar, así como las señales de control conectadas a los actuadores, a continuación se brinda un análisis de dichos resultados para cada uno de los controladores utilizados:

- ♦ Controlador PID Discreto:
 - Como se pudo observar, el controlador PID responde adecuadamente para algunas situaciones, en otras brinda una respuesta que puede ser satisfactoria dependiendo de las exigencias de control, pero también en otros casos no responde adecuadamente, mostrando un error en estado estable poco aceptable, especialmente en la temperatura.
 - Se sabe que la efectividad del controlador PID depende de la sintonización de sus parámetros, en todo caso si se utiliza este tipo de control es recomendable contar con un arreglo de parámetros de sintonización previamente definidos y probados para las diversas condiciones iniciales que pudieran presentarse, de modo tal que el PID se ajuste de antemano para diversos rangos de trabajo. Este ajuste tendría que ser realizado manualmente por un operador, el cual también tendría que estar pendiente del comportamiento de la planta, para setear adecuadamente al controlador.
 - Otra desventaja observada para este controlador es la forma de llegar a la referencia deseada, se puede observar como se generan ciertas oscilaciones antes de poder estabilizarse en la posición solicitada. También se pudo observar que la señal de control es oscilante.
 - Pese a esta desventaja se puede considerar que el tiempo de respuesta es bastante bueno, y también la manera como ha respondido ha ciertas

referencias. Se puede observar que es común que llegue a estabilizarse para todos los casos, para el caso de las concentraciones presenta un marcado error en estado estable.

- ♦ Controlador Optimal

- La respuesta de este controlador es muy pobre, tiene muy marcadas oscilaciones que lo hacen no adecuado para conseguir un producto de calidad, sin embargo pese a ser un controlador lineal se comporta con eficiencia para un sistema no lineal puesto que cumple con las exigencias de control desde cualquier condición inicial.
- Pese a mostrar oscilaciones bruscas en las concentraciones controladas, se puede observar que el sistema tiende a la estabilidad, teniendo como inconveniente adicional el largo tiempo de establecimiento requerido para llegar a este punto de estabilidad.
- También se pudo observar que para ciertos casos presenta un considerable error en estado estacionario, especialmente en la variable temperatura.
- La señal de control parece irse a los extremos de saturación, esto le brinda rapidez pero a la vez genera oscilaciones que no le permiten convergen en la referencia deseada. Se puede observar también que una de las concentraciones

esta saturada permanentemente en todos los casos, lo cual puede sugerir que no existe un trabajo en el controlador de este actuador.

- ♦ Neurocontrolador Estático
 - Muestra un mejor comportamiento que los casos anteriores, consiguiendo llegar a su destino en un tiempo menor a sus predecesores, sin embargo el control no es perfecto puesto que presenta un ligero error en estado estacionario especialmente en la temperatura
 - Se puede observar respuestas suaves y subamortiguadas, carentes de oscilaciones bruscas y picos de sobreimpulso muy pronunciados. Este comportamiento puede garantizar que el producto final del proceso sea más uniforme. Esta observación indica que no existe simetría en la respuesta del sistema bajo condiciones iniciales simétricas.
 - Cabe resaltar que existe una fase inicial donde se acerca rápidamente a la referencia, luego de entrar dentro de un margen o rango, el comportamiento cambia y la convergencia se torna más lenta, pero sin oscilaciones, para finalmente estabilizarse en un único punto coincidiendo con la referencia.
 - La señal de control es desordenada y se puede apreciar que para cada condición inicial se sigue un comportamiento distinto, llegando a la misma posición únicamente cuando la respuesta del sistema esta estable. Cabe resaltar que

presenta indicios de chattering, lo cual significa un ligero sobreentrenamiento de la red; pese a ello, la señal de control sigue siendo posible y manejable para actuadores reales.

- ♦ Neurocontrolador Estático Modificado
 - El comportamiento tiene mucha similitud con el neurocontrolador estático simple, y en algunos casos se observa que el margen o rango de la fase inicial tiene menor amplitud, sin embargo la respuesta del sistema llega a estabilizarse con un tiempo similar al caso anterior.
 - Igual que en el caso anterior, las observaciones indican que no hay simetría en la respuesta del sistema bajo condiciones iniciales simétricas. Pese a ello se puede observar cierta simetría en la fase de convergencia lenta.
 - La señal de control muestra un comportamiento similar para todas las condiciones iniciales, es decir que se puede apreciar la misma forma de onda para todos los casos, con la diferencia de estar desfasadas unas de otras, pero finalmente convergen en un mismo punto.
 - El controlador muestra una respuesta aceptable en el tiempo y debido a que la señal de control no presenta indicios de chattering, lo cual lo hace más aplicable en el caso de conectarse a un actuador real, se puede considerar que su performance es superior al neurocontrolador estático simple. Pero como se

explicará más adelante este controlador no responde eficazmente cuando se somete el sistema a perturbaciones.

- Neurocontrolador Dinámico

- Se puede observar claramente que la respuesta del sistema es superior en todos los niveles en comparación a los controladores precedentes. El tiempo de establecimiento es mucho menor tanto para las concentraciones como para la temperatura. Así mismo el controlador responde espléndidamente para todas las referencias deseadas
- Se puede observar que existe una mayor simetría en la respuesta del sistema bajo condiciones iniciales simétricas en comparación con los casos anteriores. Del mismo modo la respuesta del sistema es suave y sin alteraciones bruscas.
- Cabe resaltar que existe un pequeño error en estado estable en la variable temperatura, pese a ello se puede observar que dicha variable converge en su referencia deseada en un tiempo mucho menor al de los casos anteriores, y a la vez dicho error es mucho menor al de los casos anteriores.
- La señal de control es brusca en un inicio, esto es para llegar a un punto común al que todas las señales de control convergen, esta característica le permite tener mayor rapidez al sistema. También se observa cierta simetría en la señal de control.

- Un punto en común que presentan los controladores, es la dificultad para hacer converger perfectamente a la variable temperatura, pese a la efectividad de uno u otro controlador, siempre existirá un error en estado estable mínimo en dicha variable, lo cual no se observa con las variables concentración, los cuales en la mayoría de casos llegan a un error cero.
- Otro punto común que se pudo observar es que las condiciones iniciales que se encuentran más alejadas de la referencia final son aquellas que le causan mayor complicación al controlador, demorando la respuesta global del sistema.
- El neurocontrolador dinámico ha demostrado tener la mejor performance de entre todos los controladores debido a que el error en estado estable es menor, el tiempo de establecimiento es menor, la señal de control es aplicable a actuadores reales, y la respuesta del sistema no presenta alteraciones bruscas que dañen el producto final del material producido.

A continuación se sometió al sistema a perturbaciones, para ello se hizo uso de todos los controladores antes mencionados, y utilizando dos de las referencias para las cuales todos estos controladores habían respondido aceptablemente. Se pudo apreciar lo siguiente:

- Cuando solo hay perturbaciones en los flujos de entrada, el controlador PID oscila ligeramente entorno a la referencia pero llega a estabilizarse. El controlador Optimal mejora sus oscilaciones abruptas llegando al sus destino

con una respuesta mejor, pese a ello para ciertas condiciones iniciales el sistema tiende a puntos alejados de la referencia. El Neurocontrolador Estático no es afectado en las concentraciones pero si presenta un marcado error en la temperatura. El Neurocontrolador Estático Modificado no respondió bien para ninguna de las variables de concentración y temperatura, debido a presentar un marcado error en estado estable. El Neurocontrolador Dinámico no se vio afectado por la perturbación, en el peor de los casos el tiempo de establecimiento fue ligeramente incrementado.

- Cuando solo hay perturbaciones en las temperaturas de entrada, el controlador PID no se ve afectado considerablemente. El controlador Optimal sufre de oscilaciones muy abruptas y error en estado estable en la temperatura. El Neurocontrolador Estático presenta oscilaciones en las concentraciones y temperatura, así como error en estado estable en la temperatura. El Neurocontrolador Estático Modificado presenta un muy marcado error en estado estable en la temperatura. El Neurocontrolador Dinámico también se vio afectado con un ligero error en la temperatura, aunque las concentraciones permanecieron inalterables.
- Cuando solo se perturba el flujo de refrigerante, se pudo observar que se incrementan ligeramente las oscilaciones en las concentraciones y el error en la temperatura para todos los controladores, excepto para el neurocontrolador dinámico el cual permaneció inalterable.

- En un primer caso cuando se incorporaron modificaciones en todas las perturbaciones posibles se pudo observar que se incrementaron las oscilaciones de las concentraciones en torno a la referencia, así también se puede apreciar un ligero aumento en el error en estado estable de dichas concentraciones. Pero lo más considerable fue que el error en estado estable de la temperatura se incrementó notablemente y en algunos casos como en el controlador PID y Optimal las respuestas tendían a estabilizarse en puntos independientes unos de otros. El Neurocontrolador Dinámico no se vio afectado en las variables de concentración, pero si en la variable temperatura, la cual presenta un error en estado estable mayor al caso de perturbación únicamente en la temperatura de entrada.
- En el segundo caso de combinaciones de perturbación, las perturbaciones no afectaron tanto al sistema como en el caso anterior, el controlador más afectado fue el Optimal que respondió peor que al caso anterior, pero los demás no sufrieron más que un ligero incremento en las oscilaciones y en el error en las variables concentración y temperatura. El Neurocontrolador Dinámico se vio afectado únicamente en el error en la temperatura.
- Como se observó, cuando existen pequeñas variaciones o perturbaciones en la temperatura, estos cambios originan un marcado error en el control de los estados del sistema, en cambio cuando se varía los flujos de entrada y flujo en el refrigerante, estos no afectan considerablemente.

El sistema también fue sometido a la acción de ruido, como se explica a continuación:

- Para el caso en que solo se aplicaba ruido a la señal de control se observó que la respuesta de todos los controladores era similar al caso en que dicho ruido no existía, presentándose algunas oscilaciones aisladas para algunas condiciones iniciales, pero las cuales no afectan la respuesta global del sistema.
- En cambio cuando se aplicó el ruido a la señal del sensor se pudo observar como se generaron ligeras oscilaciones en la concentración, pero muy marcadas oscilaciones en la temperatura, lo cual hace que el sistema no converja en un valor de temperatura deseada.
- Cuando se agregó ruido en la señal de control y en la señal sensada se observó la misma respuesta del sistema correspondiente a cada controlador, pero con oscilaciones mayores al caso de solo ruido en la señal sensada.
- El Neurocontrolador Dinámico presentó una mejor performance y robustez frente al ruido, debido a que las oscilaciones generadas fueron inferiores a las producidas por los demás controladores. Además la respuesta del sistema original es mucho mejor a la de los otros controladores, por tanto pese a las oscilaciones los estados del sistema convergen entorno a la referencia en un tiempo menor al de los otros controladores.

A continuación se sometió al sistema a la afección de un set completo de perturbaciones y ruido en la señal de control y señal sensada, el resultado obtenido afectó a todos los controladores, pero en una escala menor al Neurocontrolador Dinámico tal como muestran las figuras

Cabe hacer una observación, las combinaciones de perturbación presentadas anteriormente pueden tener una respuesta diferente a otra combinación diferente, puede que el sistema no converja en el valor deseado, esto puede deberse a que la saturación de los actuadores lo impide. Según lo observado se puede deducir que el neurocontrolador dinámico pese a no compensar completamente las perturbaciones y ruido, este responderá mejor que cualquier otro de los controladores, obteniéndose un error menor que el que se podría obtener con un controlador diferente.

La siguiente tabla muestra un resumen del análisis presentado anteriormente:

CONTROLADOR	CARACTERÍSTICAS
PID	<p>Responde bien solo para algunas situaciones</p> <p>Tiene un comportamiento oscilante antes de estabilizarse</p> <p>La señal de control es oscilante</p> <p>La temperatura es la variable más difícil de controlar</p>
Optimal	<p>Marcadas oscilaciones y un pobre desempeño</p> <p>Se estabiliza después de un largo tiempo</p> <p>La señal de control se va a los extremos de saturación</p> <p>Presenta un marcado error especialmente en la temperatura</p>

<p>Estático</p>	<p>Se estabiliza rápido pero mantiene un error en estado estacionario</p> <p>Tiene una respuesta suave y subamortiguada. La respuesta carece de simetría.</p> <p>La señal de control es desordenada</p>
<p>Estático Modificado</p>	<p>Se estabiliza en un tiempo similar al caso anterior, pero presenta un menor error estacionario</p> <p>No presenta simetría, excepto en la fase cercana a la convergencia</p> <p>La señal de control muestra un comportamiento similar (pero desfasado), para las diversas condiciones iniciales</p>
<p>Dinámico</p>	<p>El tiempo de establecimiento es mucho menor en comparación a los casos anteriores</p> <p>Tiene una respuesta subamortiguada y cuasi-simétrica</p> <p>Presenta un ligero error estacionario, pero menor a los casos anteriores</p> <p>La señal de control es brusca al inicio</p>
<p>PERTURBACIONES</p>	
<p>Cuando existen perturbaciones en la temperatura, estas causan que el sistema responda de manera oscilante, así como también el error crece. Cuando se perturba los flujos, el sistema responde aumentando el tiempo de establecimiento. El neurocontrolador dinámico se vio menos afectado que los demás controladores.</p>	
<p>RUIDO</p>	
<p>Cuando se agrega ruido a los actuadores, no afecta mayormente, pero cuando se agrega ruido a la señal sensada, se genera oscilaciones y el error crece. El neurocontrolador dinámico DBP muestra mayor robustez que los demás controladores.</p>	

Tabla 4.21. Resumen del análisis de los controladores

CONCLUSIONES GENERALES

Mediante el desarrollo de la presente investigación se ha podido llegar a las siguientes conclusiones:

- Mediante las técnicas de modelamiento matemático se ha realizado el balance de masas y balance de energía, cuyas ecuaciones han permitido llegar a un modelo matemático del sistema que se desea controlar. Este modelo ha sido simulado y controlado mediante cinco controladores diferentes.
- Por medio del diseño de un controlador PID discreto se ha podido demostrar su facilidad de sintonización, así como su facilidad de implementación puesto que no requiere el modelo del sistema; del mismo modo el diseño de un controlador Optimal ha permitido demostrar que pese a ser un controlador propio de sistemas lineales también puede ser utilizado para controlar sistemas no lineales multivariables, aunque su diseño requiere tener conocimiento del modelo del sistema.
- El diseño del neurocontrolador dinámico ha resultado ser más complicado que el diseño del neurocontrolador estático, del mismo modo el entrenamiento de la red es más complicado y requiere mayor número de iteraciones. Una diferencia importante es el hecho de que el dinámico requiere el conocimiento del modelo del sistema. Pese a la marcada complejidad de diseño y entrenamiento del neurocontrolador dinámico, los

resultados obtenidos son mucho más eficientes que los ofrecidos por el neurocontrolador estático, por tanto es justificable que para el eficaz control de un sistema complejo se requiera de un controlador de mayor calidad y más perfeccionado.

- El análisis de los resultados muestra una similitud presentada por los controladores, esta es la dificultad para que la variable temperatura converja perfectamente en su valor deseado. Mediante la incorporación de perturbaciones se pudo observar que cuando existen pequeñas variaciones o perturbaciones en la temperatura, estos cambios originan un marcado error en el control de los estados del sistema, en cambio cuando se varía los flujos de entrada y flujo en el refrigerante, estos no afectan considerablemente. Así mismo la incorporación de ruido permitió determinar que la temperatura es la variable más susceptible de ser afectada.
- El análisis permitió determinar que el neurocontrolador dinámico brinda una mejor performance y robustez frente al ruido, debido a que las oscilaciones generadas fueron inferiores a las producidas por los demás controladores. Además la respuesta del sistema original es mucho mejor a la de los otros controladores, por tanto pese a las oscilaciones los estados del sistema convergen entorno a la referencia en un tiempo menor al de los otros controladores.

- Finalmente se puede concluir que el neurocontrolador dinámico ha demostrado ser la mejor opción de entre todos los controladores planteados, debido a que el error en estado estable es menor, el tiempo de establecimiento es menor, la señal de control es aplicable a actuadores reales, y la respuesta del sistema no presenta alteraciones bruscas que dañen el producto final del material producido. Cabe resaltar que cuando se sometió al sistema a la afección de un juego completo de perturbaciones y ruido, el resultado obtenido afectó a todos los controladores, pero en una escala menor al neurocontrolador dinámico.



BIBLIOGRAFIA

Referencias Bibliográficas

1. Antonelli,R., Astol,A. (2003). “*Continuous stirred tank reactors: easy to stabilise?*”. Department of Electrical and Electronic Engineering, Imperial College, Londres, Inglaterra. Dipartimento di Elettronica e Informazione, Politecnico di Milano, Milan, Italia
2. Åström, K.J., Hagglund, T., (1994). “*PID Controllers*”. North Carolina
3. Åström, K.J., Wittenmark, B. (1997). “*Computer-Controlled systems: Theory and design*”. Prentice Hall. New Jersey.
4. Chen, C. H. (1996). “*Fuzzy logic and neural network handbook*”. McGraw-Hill. New York
5. Cloutier, J.R., Stansbery, D.T. (1999). “*Control of a Continuously Stirred Tank Reactor Using an Asymmetric Solution of the State-Dependent Riccati Equation*”. Air Force Res. Lab CACI/TEAS Group, Control of Chemical Processes, IEEE CCA/CACSD

6. Creus Solé, Antonio (1988). “*Control de procesos industriales : criterios de implantación*”. Marcombo. Barcelona
7. De Prada,C., Assandri,A., Martínez,E. “*Control predictivo no lineal de orden reducido*”. Universidad de Valladolid. España
8. Denbigh,K.G., Turner,J.C.R (1990). “*Introducción a la teoría de los reactores químicos*”. Limusa. México.
9. Denbigh,K.G (1968). “*Teoría del reactor químico*”. Alambra. Madrid.
10. Fausett, Laurence. (1994). “*Fundamentals of neural networks : architectures, algorithms, and applications*”. Prentice-Hall. Englewood Cliffs
11. Fogler,S. (1992). “*Elements of chemical reaction engineering*”. Prentice Hall. New Jersey
12. Freeman, James A., Skapura, David M. (1993). “*Redes neuronales : algoritmos, aplicaciones y técnicas de programación*”. Addison-Wesley Iberoamericana
13. Froment,G.F., Bischoff, K.B. (1990). “*Chemical reactor analysis and design*”. Wiley. New York

14. Goodwin,G., Graebe,S., Salgado,M.(2001), “*Classical PID control*”. Prentice Hall, National Instrument, US
15. Grace, A., Laub, Alan J. , Little, Jonh N. , (1992). “*Control System Toolbox : For Use with MATLAB*”. Math Works
16. Haga,M., Demth,B., De Jesús, O. “*An Introduction to the use of neural networks in control systems*”, School of Electrical & Computer Engineering, Oklahoma State University, Stillwater, Oklahoma, USA, Electrical & Computer Engineering Department, University of Colorado, Boulder, Colorado, USA
17. Harvey, Robert L. (1994). “*Neural network principles*”. Prentice-Hall. Englewood Cliffs
18. Haykin, Simon S. (1994). “*Neural networks : a comprehensive foundation*”. Macmillan. New York
19. Henry,C., Simancas,D. (1996) “*Modelaje y simulación de un reactor químico*”. Proyecto de Grado. Universidad Simón Bolívar. Venezuela.
20. Hernández,A.,Borregales,E. (2001). “*Montaje, instrumentación y modelaje de un reactor de laboratorio*”.

21. Irwin, G. W., Warwick, K., Hunt, K. J. (1995). “*Neural network applications in control*”. Institution of Electrical Engineers. IEE control engineering series; 53.London
22. Janos Abonyi, Janos Madar, Ferenc Szeifert. “*Combining first principles models and neural networks for generic model control*”. Department of Process Engineering. University of Veszprém. Hungría
23. Kartalopoulos, Stamatios V. (1996). “*Understanding neural networks and fuzzy logic : basic concepts and applications*”. IEEE Press. New York
24. Kent, James A. (1987). “*Biblioteca Riegel de química industrial*”. CECSA. México
25. Kittisupakorn,P., Azlan Hussain,M. (2000), “*Comparison of optimisation based control techniques for the control of a CSTR*”, International Journal of Computer Applications in Technology, Vol 13 - Issue 3/4/5
26. Lawrence Perko (1991). “*Differential equations and dynamical systems*”. Springer-Verlag, New York
27. Leidinger, Otto (1997). “*Procesos industriales*”. PUCP. Lima

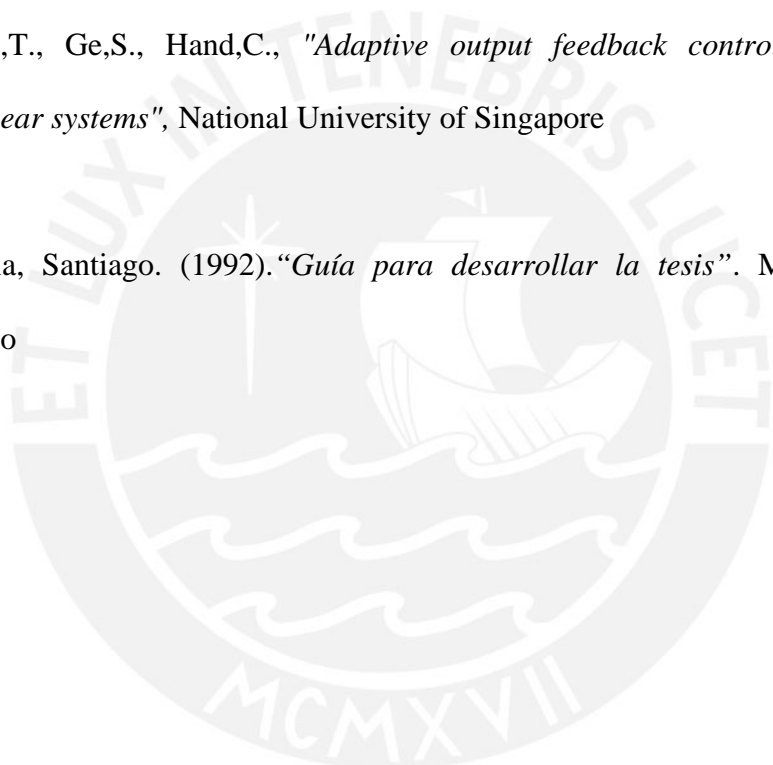
28. Levenspiel, O. (1998). *“Ingeniería de las reacciones químicas”*. Reverté. México.
29. Levenspiel, O. (1986). *“El omnilibro de los reactores químicos”*. Reverté. Barcelona.
30. Lopez Cruz, Van Willigenburg, Van Straten. (2000). *“Evolutionary algorithms for optimal control of chemical processes”*. Proceedings of the IASTED. International Conference Control and Applications, pp.155-161. México
31. Luyben, W.L. (1990). *“Process modeling, simulation, and control for chemical engineers”*. McGraw-Hill. New York
32. Maner, B., Doyle, F., Agunnaik, B., y Pearson, R., *“Nonlinear Model Predictive Control of a Simulated Multivariable Polymerization Reactor Using Second-order Volterra Models”*, School of Chemical Engineering, Purdue University
33. MathWorks, Inc. (2001). *“Control system toolbox : for use with MATLAB : getting started”*. MathWorks
34. MathWorks, Inc. (2001). *“Symbolic math toolbox : for use with MATLAB : user's guide”*. MathWorks

35. Mehmet Önder, "*Variable structure systems theory in training of radial basis function neurocontrollers*", Carnegie Mellon University, Electrical and Computer Engineering Department, Pittsburgh-USA
36. Mendiburu, Henry. (2004). "*Energy-saving with the "hidden reference" tracking method*". XI Congreso Latinoamericano de Control Automático. Cuba
37. Morris, Jamita. (2002). "*Jabones elaborados de forma artesanal*". Parramón. Barcelona
38. Muñoz Razo, Carlos. (1998). "*Cómo elaborar y asesorar una investigación de tesis*". Prentice Hall. México, D.F.
39. National Instruments (2000). "*LabVIEW : getting started with labVIEW*". National Instruments. Texas
40. National Instruments (2000). "*LabVIEW : user manual*". National Instruments. Texas
41. Nikolaou, M., Hanagandi, V. "*Control of Nonlinear Dynamical Systems Modelled by Recurrent Neural Networks*", Department of Chemical Engineering, Texas A&M University, USA

42. Perry,H., Green,D., Maloney,J., (1992). *"Perry manual del ingeniero químico"*. McGraw-Hill. Mexico
43. Pham, Q.T. *"Dynamic Optimization of Chemical Engineering Processes by Evolutionary Method"*. School of Chemical Engineering and Industrial Chemistry, Sydney, Australia.
44. Pontificia Universidad Católica del Perú. (1986). *"Tablas y gráficas para: Termodinámica I, Termodinámica II, y Termodinámica general"*. PUCP-Ingeniería Mecánica. Perú
45. Shouche, Genceli, Vuthandam,y Nikolaou, (1998), *"Simultaneous constrained model predictive control and identification of dx processes"* , Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Houston, USA, Departamento de Ingeniería Química, Universidad A & M de Texas, USA
46. Silva,R., Kwong,W., (1999), *"Nonlinear model predictive control of chemical processes"*, Brazilian Journal of Chemical Engineering, vol 16, nun 1, Universidad Federal de San Carlos, Departamento de Ingeniería Química, Brazil
47. Solovyev,B., Lewin,D., *"A Steady-state process resiliency index for non-linear processes"*, PSE Research Group, Wolfson Department of Chemical Engineering, Israel

48. Srinivas Palanki, Soumitri Kolavennu, (2003). “*Simulation of Control of a CSTR Process*”. The International Journal of Engineering Education Volume 19, Number 3, pag 398-402
49. Tian, Z., Hoo, K.A. (2002). “*Transition Control Using Multiple Adaptive Models and an H-Infinity Controller Design*”. Department of Chemical Engineering, Texas Tech University. American Control Conference
50. Trierweiler, J., Engell, S. “*Controllability analysis via the Robust Performance Number for a CSTR with Van de Vusse Reaction*”. Process Control Group, Department of Chemical Engineering, Universidad de Dortmund, Alemania
51. Vega, M., Lima, E., Pinto, J. (2000), “*Control of a loop polymerization reactor using neural networks*”, Brazilian Journal of Chemical Engineering, vol 17, nun 4-7, Universidad de Río de Janeiro, Programa de Ingeniería Química, Brazil
52. Vemuri, V. Rao (1992). “*Artificial neural networks : concepts and control applications*”. IEEE Computer Society Press tutorial. California
53. Wells, Lisa K. (1994). “*The LabVIEW student edition : user's guide*”. Prentice Hall. Englewood Cliffs, NJ

54. Westerterp, K.R., Wijngaarden, R.J. (1992). "*Principles of Chemical Reaction Engineering*". Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. Vol. B4.VCH. Weinheim.
55. Williams, Theodore J. (1971). "*Ingeniería de los procesos industriales*". Alambra. Madrid
56. Zhang, T., Ge, S., Hand, C., "*Adaptive output feedback control for general nonlinear systems*", National University of Singapore
57. Zorrilla, Santiago. (1992). "*Guía para desarrollar la tesis*". Mc Graw-Hill, México



Referencias de Internet

http://cap.ee.imperial.ac.uk/~astolfi/Pub/PS/Journals/Automatica/Automatica_03_Rita.pdf

<http://cienega.cuci.udg.mx/alumnos/Laboratorios/deptobasicas/HTML/Cursos.htm>

<http://ctl-predictivo.upv.es/redtematica/comunicaciones.htm>

<http://eee.ucc.ie/research/control/files/bibtex/BibTeX.htm>

<http://fourier.che.udel.edu/publications/PDF/man96.pdf>

<http://isaw.isa.cie.uva.es/ecosimjava/reactor.htm>

<http://tamarugo.cec.uchile.cl/~acca/temas/pag2.html>

http://www.abo.fi/fak/ktf/rt/reports/rep97_1.pdf

<http://www.che.ttu.edu/pcoc/pubs/pubs/transcontrol/acc2002.pdf>

<http://www.chemeng.ca/halifax2001/Program/00000144.htm>

<http://www.ciencia-ficcion.com/glosario/g/grasas.htm>

<http://www.contactopyme.gob.mx/tecnologias/maquinaria.asp?cveramo=5&cveproceso=5>

<http://www.eeng.may.ie/~sdoherty/skdThesisFull.pdf>

<http://www.ehu.es/biomoleculas/LIP/LIPID3.htm>

<http://www.eng.upm.edu.my/~samsul/phd.html>

<http://www.engin.umich.edu/~cre/09chap/html/>

http://www.eq.uc.pt/biblioteca/deq-biblioteca_seminario89.php

http://www.fmt.vein.hu/softcomp/book/References_Abonyi.pdf

http://www.isa.org/Content/ContentGroups/ISA_Transactions1/2001_Second_Issue.htm

<http://www.sc.ehu.es/iawfemaf/archivos/materia/teoria.htm>

<http://www.tf.usb.ve/miqusb/voli/indexi2.shtml>

<http://www.uow.edu.au/~mnelson/review.dir/cstr.html#ray1977>

<http://www.ciberconta.unizar.es/LECCION/REDES/>

<http://www.une.edu.ve/electronica/neurona.htm>

<http://www.geocities.com/ResearchTriangle/Lab/5196/redesn.html>

<http://www.cs.cmu.edu/groups>

<http://www.it.uom.gr/pdf/digital.htm>

<http://www.msm.ele.tue.nl/research/neural>

<http://www.ewh.ieee.org/tc/nnc>

<http://atc.ugr.es/~bprieto/srig/ieee.html>

<http://www.emsl.pnl.gov:2080/proj/neuron/neural>

<http://www.cis.hut.fi/research/>

<http://www.particle.kth.se/~lindsey/hardwarennwcourse/home.html>

<http://www.cotec.es/cas/index.html>

<http://www.mbfys.kun.nl/snn/research/siena>

<http://www.kcl.ac.uk/neuronet>

<http://www.nd.com>

Anexo 1

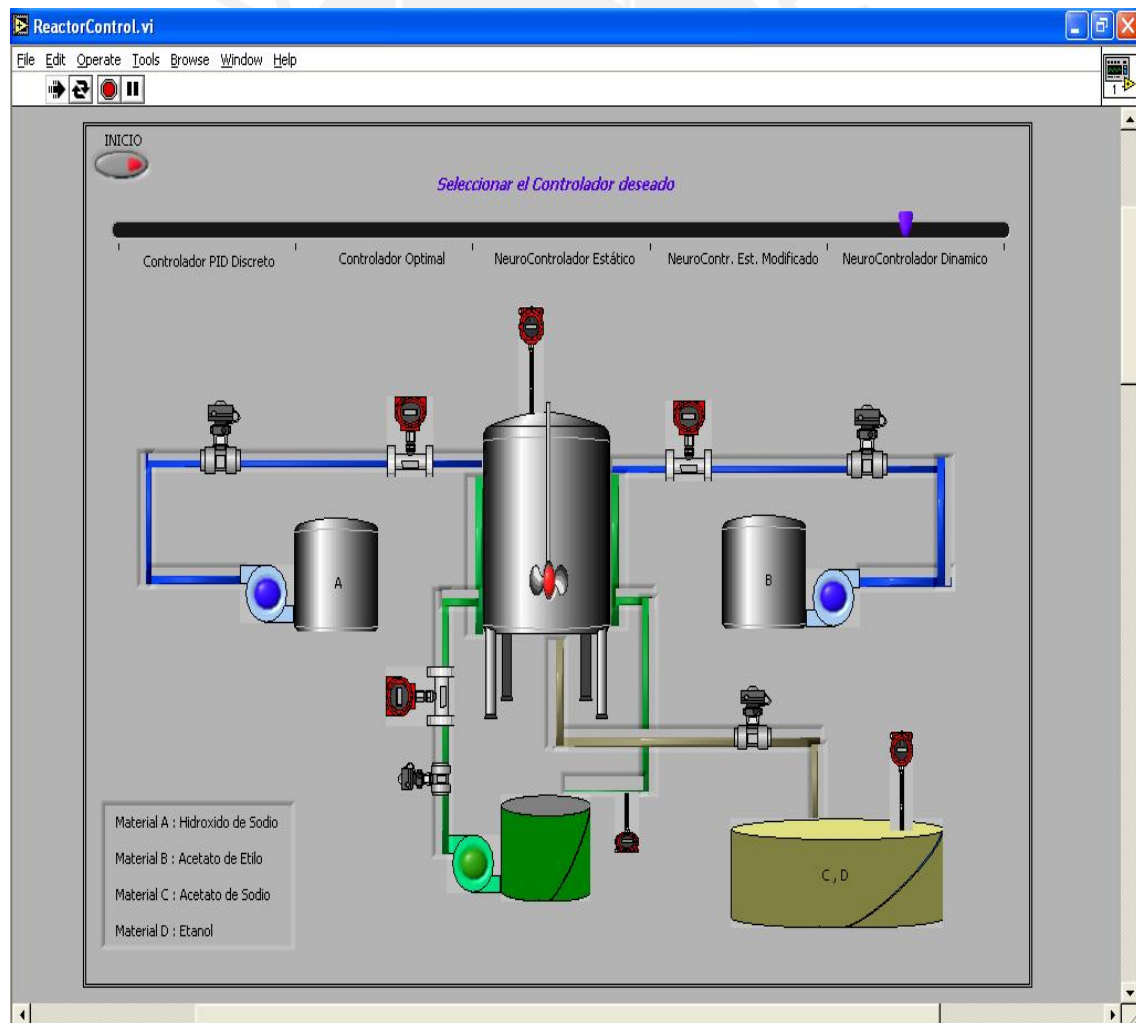
**SIMULACIÓN DEL SISTEMA
UTILIZANDO LABVIEW**

En el presente Anexo se muestra el programa que fue implementado para simular el sistema de reactor químico con los respectivos controladores desarrollados en la presente tesis. Así mismo se brinda una descripción general de las funcionalidades del programa implementado y del modo de funcionamiento

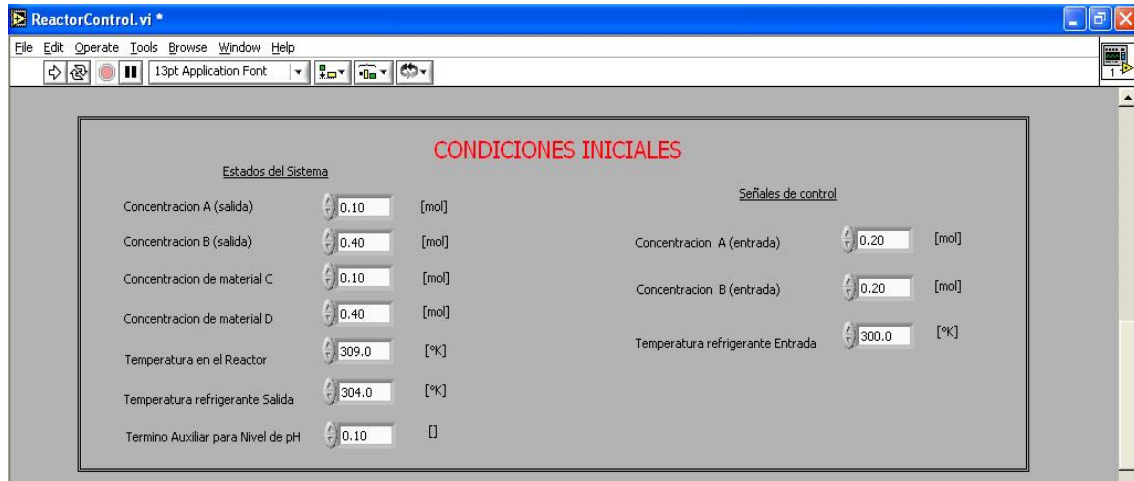
El software utilizado para este caso fue: LABVIEW 6.1

DESCRIPCIÓN DEL PANEL GRAFICO

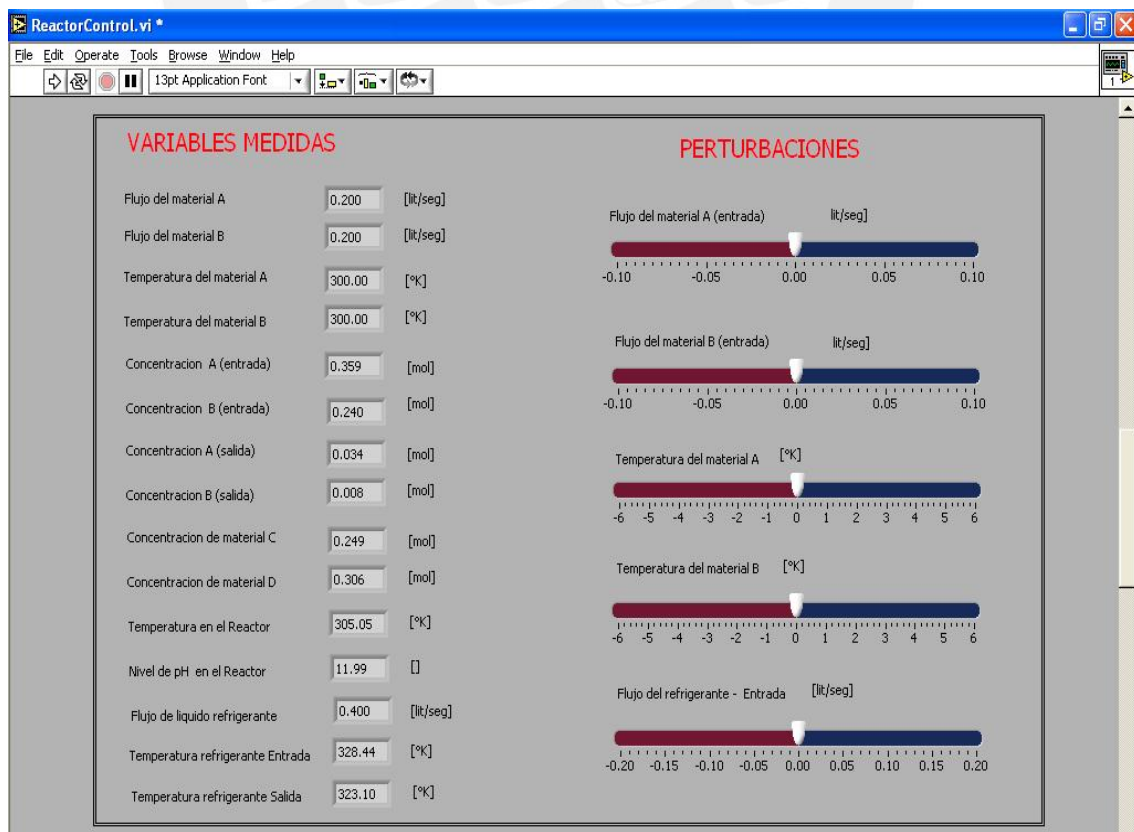
En la siguiente imagen se puede ver detalladamente la planta, conformada por el reactor químico, los tanques de reserva auxiliares para extraer material y para depositar material, así como todo el conjunto de tuberías, válvulas, bombas, sensores, etc. En este panel también existe un elemento que permite seleccionar el tipo de controlador que se va a aplicar al sistema, pudiéndose conmutar entre controladores de forma manual. Una característica gráfica adicional es que las tuberías permiten mostrar la cantidad de flujo que recorre por su interior, y también se puede visualizar indicadores luminosos cuando se enciende el sistema.



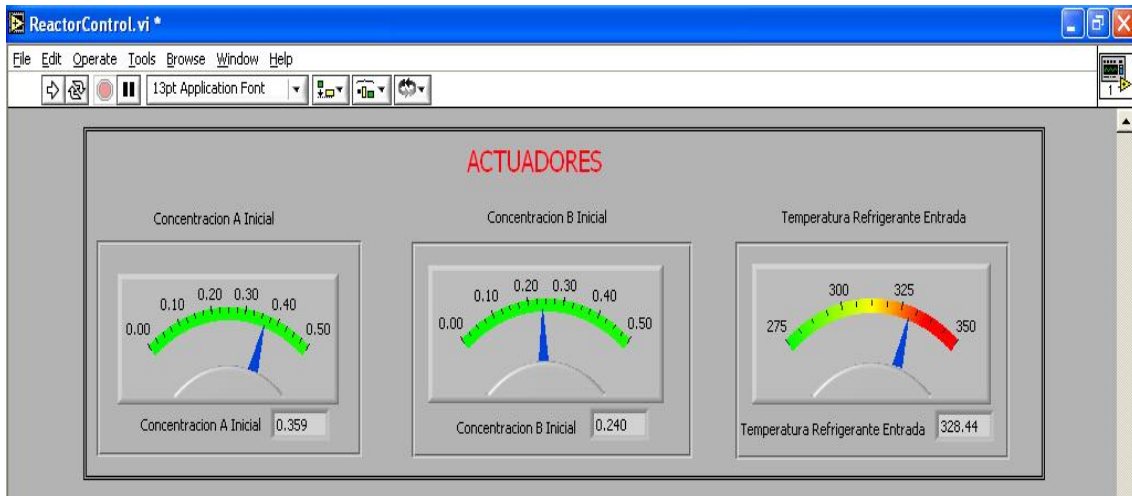
En la siguiente parte del panel se muestran entradas que se pueden modificar manualmente por el operador, las cuales permiten ingresar las condiciones iniciales del sistema, esto incluye las condiciones iniciales de los estados (concentración, temperatura) del sistema y también el estado inicial de los actuadores.



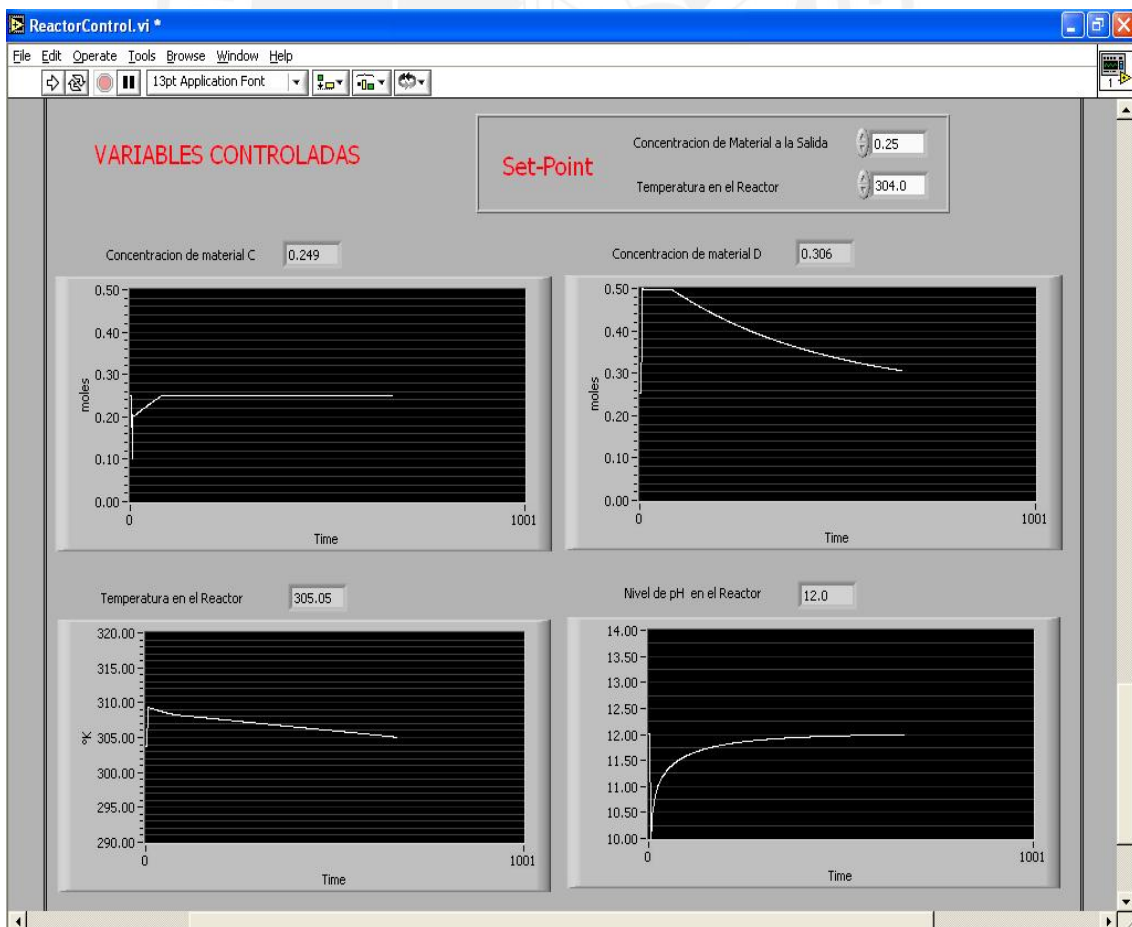
En la siguiente parte del panel, se puede visualizar todas las variables del sistema, ya sean variables medidas o no medidas, y también los actuadores. Así mismo también se podrá modificar ciertas variables a manera de crear perturbaciones al sistema, estas perturbaciones están dentro de un rango y se pueden modificar independientemente unas de otras.



En la siguiente parte del panel, se muestran 3 indicadores correspondientes a las señales de los actuadores, en este caso el comportamiento de las agujas le darán una idea al operador de cómo están moviéndose los actuadores.



Finalmente la última parte muestra cuatro gráficos, correspondiente a las variables que se desea controlar. También existen unos controles que le permiten al operador que le permiten ingresar los valores de set-point deseados.

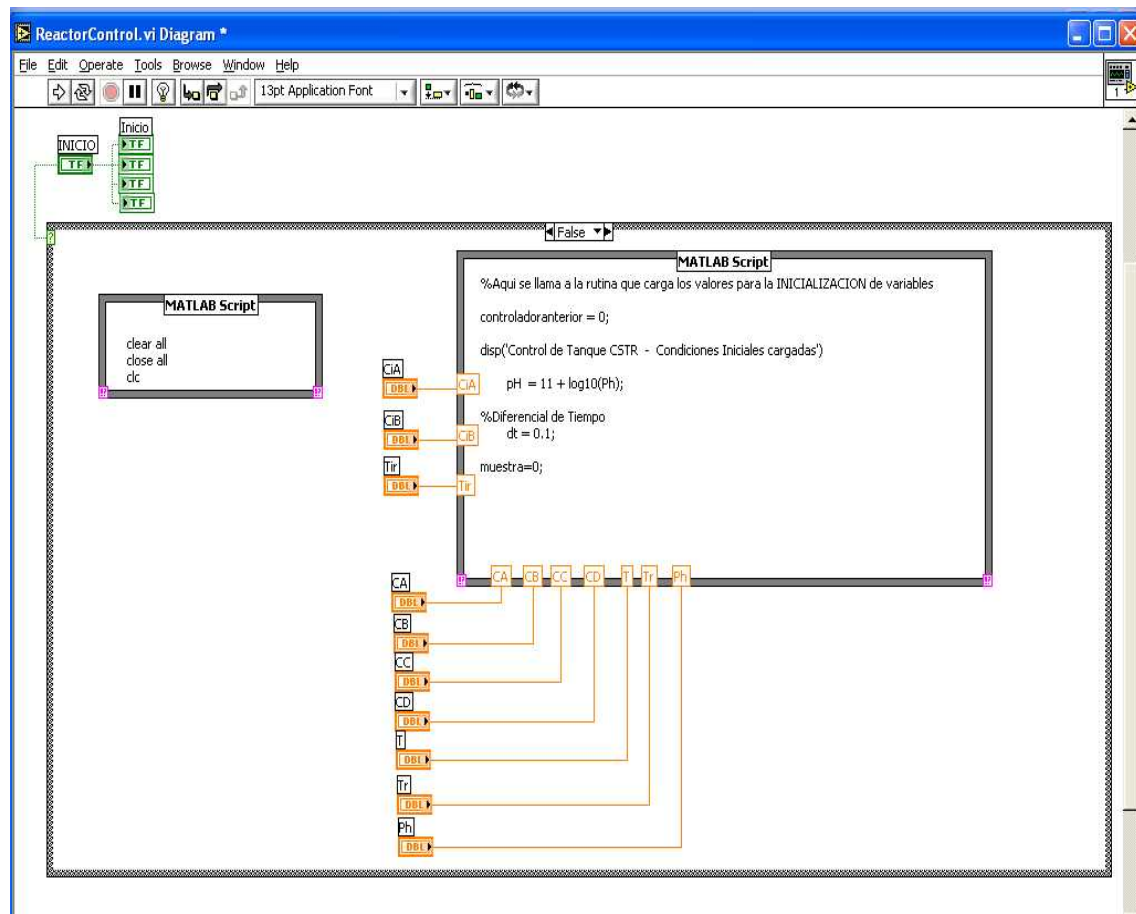


DESCRIPCIÓN DEL DIAGRAMA

El diagrama permite enlazar con Matlab, por lo tanto los cálculos de integración del sistema son calculados desde programas escritos en código M.

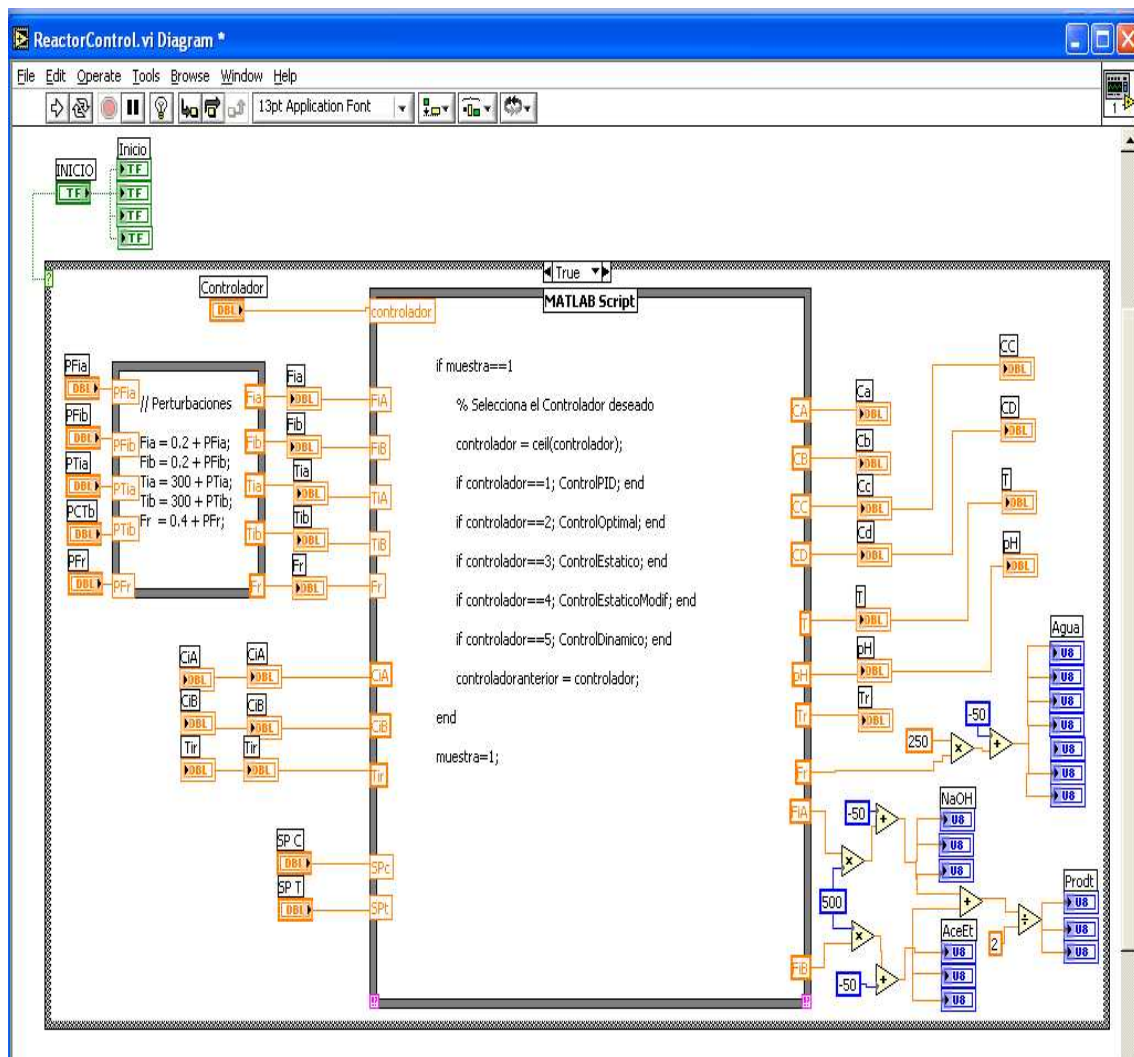
Existe un interruptor general del programa que le dice al sistema cuando iniciar y cuando parar (botón de Inicio). Este control permite controlar un switch True/False

En una primera etapa cuando el lazo esta en “False” (Inicio en OFF), se inicializan las condiciones iniciales y ciertas variables auxiliares que Matlab necesita.



En una segunda etapa, cuando el lazo esta “True” (Inicio en ON), mediante un cuadro de código C se suman las perturbaciones ingresadas por el operador, luego todas las variables de estado y las referencias entran a un bloque que enlaza al Matlab, y luego que se hacen las iteraciones del sistema las variables se pasan a los indicadores y a los bloques que grafican las señales.

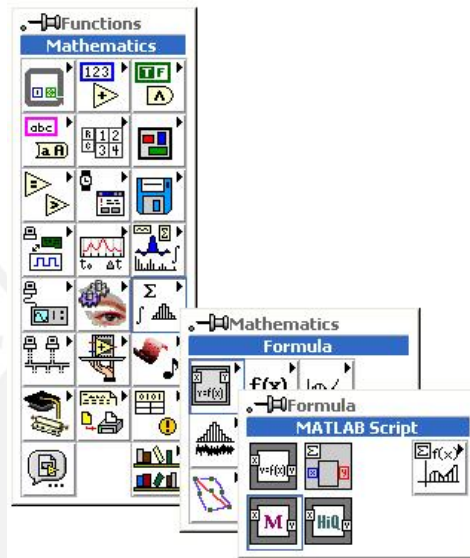
El bloque de Matlab permite seleccionar entre los cinco controladores predeterminados y llamar al programa correspondiente.



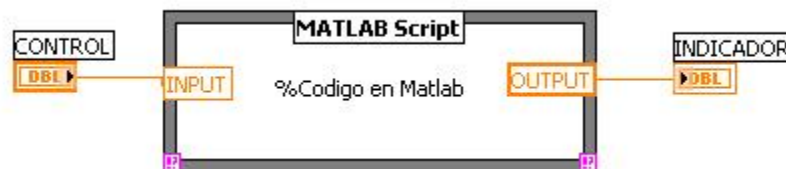
MATLAB SCRIPT PARA LABVIEW

Esta función incorporada en Labview, permite ingresar código escrito para Matlab, es necesario que el Matlab este instalado en la misma computadora, puesto que este será invocado cada vez que se compile el programa

Esta función se puede hallar desde el Panel de Diagrama, en el menú de funciones, matemáticas, formula, matlab script.



Una vez insertado el bloque en el panel, se pueden agregar entradas las cuales serán variables que pueden enlazarse gráficamente a controles, permitiendo de esta manera dar valores iniciales que el Matlab leerá; del mismo modo se pueden agregar salidas las cuales serán variables que pueden enlazarse gráficamente a indicadores, permitiendo de esta manera visualizar los resultados generados por Matlab.



Para mayor información se puede consultar la bibliografía siguiente: “LabVIEW : getting started with labVIEW” (NI-2000), “LabVIEW : user manual” (NI-2000), “The LabVIEW student edition : user's guide” (Well-1994), entre otros.

Anexo 2

**SIMULACIÓN DEL SISTEMA UTILIZANDO
MATLAB**

En el presente anexo se incorporan los programas desarrollados en Matlab 6.5 aplicados al reactor químico. A continuación se muestra la lista de programas utilizados así como una breve descripción de su finalidad:

Nombre del Programa	Descripción o Finalidad del Programa
ControlPID.m	Programa llamado por Labview para desarrollar el Controlador PID discreto
ControlOptimal.m	Programa llamado por Labview para desarrollar el Controlador Optimal
ControlEstatico.m	Programa llamado por Labview para desarrollar el Neurocontrolador Estático
ControlEstaticoModif.m	Programa llamado por Labview para desarrollar el Neurocontrolador Estático Modificado
ControlDinamico.m	Programa llamado por Labview para desarrollar el Neurocontrolador Dinámico DBP
ReactorModeloPID1.m	Implementa un controlador PID aplicado al modelo del reactor para una condición inicial
ReactorModeloOPTIMAL1.m	Implementa un controlador Optimal aplicado al modelo del reactor para una condición inicial
NC_Estatico_Patron1.m	Implementa un Neurocontrolador Estático aplicado al modelo del reactor para una condición inicial
NC_Estatico_Modificado1.m	Implementa un Neurocontrolador Estático Modificado aplicado al modelo del reactor para una condición inicial
NC_Dinamico_DBP1.m	Implementa un Neurocontrolador Dinámico aplicado al modelo del reactor para una condición inicial
ReactorModeloPID2.m	Implementa un controlador PID aplicado al modelo del reactor para varias condiciones iniciales
ReactorModeloOPTIMAL2.m	Implementa un controlador Optimal aplicado al modelo del reactor para varias condiciones iniciales
NC_Estatico_Patron2.m	Implementa un Neurocontrolador Estático aplicado al

	modelo del reactor para varias condiciones iniciales
NC_Estatico_Modificado2.m	Implementa un Neurocontrolador Estático Modificado aplicado al modelo del reactor para varias condiciones iniciales
NC_Dinamico_DBP2.m	Implementa un Neurocontrolador Dinámico aplicado al modelo del reactor para varias condiciones iniciales
ReactorModeloPID3.m	Implementa un controlador PID aplicado al modelo del reactor para varias condiciones iniciales, además permite incorporar perturbaciones y ruido
ReactorModeloOPTIMAL3.m	Implementa un controlador Optimal aplicado al modelo del reactor para varias condiciones iniciales, además permite incorporar perturbaciones y ruido
NC_Estatico_Patron3.m	Implementa un Neurocontrolador Estático aplicado al modelo del reactor para varias condiciones iniciales, además permite incorporar perturbaciones y ruido
NC_Estatico_Modificado3.m	Implementa un Neurocontrolador Estático Modificado aplicado al modelo del reactor para varias condiciones iniciales, además permite incorporar perturbaciones y ruido
NC_Dinamico_DBP3.m	Implementa un Neurocontrolador Dinámico aplicado al modelo del reactor para varias condiciones iniciales, además permite incorporar perturbaciones y ruido
NC_Inicializacion.m	Este programa permite la inicialización de constantes y variables que son llamadas por los neurocontroladores
ReactorCondicionesIniciales.m	Contiene 20 condiciones iniciales que son llamadas por los diversos controladores
ReactorModelo.m	Contiene el modelo matemático del reactor químico

El código de cada programa se encuentra en formato electrónico, anexado a la presente tesis.

Anexo 3

**SIMULACIÓN DEL SISTEMA UTILIZANDO
MATLAB**

En el presente anexo se incorporan los programas desarrollados en Matlab 6.5 aplicados al reactor químico. A continuación se muestra la lista de programas utilizados así como una breve descripción de su finalidad:

Nombre del Programa	Descripción o Finalidad del Programa
ControlPID.m	Programa llamado por Labview para desarrollar el Controlador PID discreto
ControlOptimal.m	Programa llamado por Labview para desarrollar el Controlador Optimal
ControlEstatico.m	Programa llamado por Labview para desarrollar el Neurocontrolador Estático
ControlEstaticoModif.m	Programa llamado por Labview para desarrollar el Neurocontrolador Estático Modificado
ControlDinamico.m	Programa llamado por Labview para desarrollar el Neurocontrolador Dinámico DBP
ReactorModeloPID1.m	Implementa un controlador PID aplicado al modelo del reactor para una condición inicial
ReactorModeloOPTIMAL1.m	Implementa un controlador Optimal aplicado al modelo del reactor para una condición inicial
NC_Estatico_Patron1.m	Implementa un Neurocontrolador Estático aplicado al modelo del reactor para una condición inicial
NC_Estatico_Modificado1.m	Implementa un Neurocontrolador Estático Modificado aplicado al modelo del reactor para una condición inicial
NC_Dinamico_DBP1.m	Implementa un Neurocontrolador Dinámico aplicado al modelo del reactor para una condición inicial
ReactorModeloPID2.m	Implementa un controlador PID aplicado al modelo del reactor para varias condiciones iniciales
ReactorModeloOPTIMAL2.m	Implementa un controlador Optimal aplicado al modelo del reactor para varias condiciones iniciales
NC_Estatico_Patron2.m	Implementa un Neurocontrolador Estático aplicado al

	modelo del reactor para varias condiciones iniciales
NC_Estatico_Modificado2.m	Implementa un Neurocontrolador Estático Modificado aplicado al modelo del reactor para varias condiciones iniciales
NC_Dinamico_DBP2.m	Implementa un Neurocontrolador Dinámico aplicado al modelo del reactor para varias condiciones iniciales
ReactorModeloPID3.m	Implementa un controlador PID aplicado al modelo del reactor para varias condiciones iniciales, además permite incorporar perturbaciones y ruido
ReactorModeloOPTIMAL3.m	Implementa un controlador Optimal aplicado al modelo del reactor para varias condiciones iniciales, además permite incorporar perturbaciones y ruido
NC_Estatico_Patron3.m	Implementa un Neurocontrolador Estático aplicado al modelo del reactor para varias condiciones iniciales, además permite incorporar perturbaciones y ruido
NC_Estatico_Modificado3.m	Implementa un Neurocontrolador Estático Modificado aplicado al modelo del reactor para varias condiciones iniciales, además permite incorporar perturbaciones y ruido
NC_Dinamico_DBP3.m	Implementa un Neurocontrolador Dinámico aplicado al modelo del reactor para varias condiciones iniciales, además permite incorporar perturbaciones y ruido
NC_Inicializacion.m	Este programa permite la inicialización de constantes y variables que son llamadas por los neurocontroladores
ReactorCondicionesIniciales.m	Contiene 20 condiciones iniciales que son llamadas por los diversos controladores
ReactorModelo.m	Contiene el modelo matemático del reactor químico

ControlPID.m

```

-----
%
%   CONTROLADOR PID DISCRETO DE UN REACTOR QUIMICO CONTINUO
%
%Luego de declarar las condiciones iniciales se llama a este
%programa para realizar la SIMULACION DE LA INTEGRACION DEL SISTEMA
%
%   Este programa es llamado desde LABVIEW (ReactorControl.vi)
%
-----

%Declaracion de Constantes
Ex = 2407.2; %Energía activación y Const. Botzmann
Ko = 63380; %Fact.Esterico * Frec.Colisiones [mol^n/(seg*m^3)]
V = 7.9; %Volumen del tanque [m^3]
Vr = 8; %Volumen de la camisa de refrigeración [m^3]
A = 24; %Superficie o área para la transferencia de calor [m^2]
Cpr = 4.19; %Calor especifico del refrigerante (agua) [kJ/(Kg*°K)]
dr = 1000; %Densidad del refrigerante(agua) [Kg/m3]
dL = 76; %Densidad del liquido en el tanque [Kg/m3]
pHA = 13.3; %Valor de pH del material A
pHB = 7.10; %Valor de pH del material B
CpA = 3.26; %Capacidad calorífica del material A [kJ/(Kg*°K)]
CpB = 2.02; %Capacidad calorífica del material B [kJ/(Kg*°K)]
CpC = 2.51; %Capacidad calorífica del material C [kJ/(Kg*°K)]
CpD = 3.76; %Capacidad calorífica del material D [kJ/(Kg*°K)]
%Calculo de Entalpia referencial (hr)
Tref = 300;
hr = (CpC + CpD - CpA - CpB);

%=====
%
%   CONTROLADOR PID
%
-----

if controladoranterior ~= 1
    %CONDICIONES INICIALES del Controlador PID
    uCa=0; uCb=0; uTir=0; %Señal de control
    ECa=0; ECb=0; ETir=0; %Error E(k)
    E1Ca=0; E1Cb=0; E1Tir=0; %Error E(k-1)
    E2Ca=0; E2Cb=0; E2Tir=0; %Error E(k-2)
end

% PARAMETROS del Controlador PID
Kp1 = 2; Kd1 = 0.05;Ki1 = 0.9; % PID Concentracion C
Kp2 = 2; Kd2 = 0.05;Ki2 = 0.9; % PID Concentracion D
Kp3 = 3; Kd3 = 0.15;Ki3 = 0.8; % PID Temperatura

%SIMULACION DEL SISTEMA

%Terminos auxiliares
K = Ko * exp(-Ex/T);
F = FiA + FiB; %flujo total
F = F/2; %flujo promedio
pH = 11 + log10(Ph);
U = 19.19/A;
Cp = CA*CpA + CB*CpB + CC*CpC + CD*CpD;
dH = hr + (CpC + CpD - CpA - CpB)*(T-Tref);

%Calcular las derivadas
CAp = (FiA*CiA - F*CA - K*CA*CB*V) / V;
CBp = (FiB*CiB - F*CB - K*CA*CB*V) / V;
CCp = (-F*CC + K*CA*CB*V) / V;
CDp = (-F*CD + K*CA*CB*V) / V;
Tp = (U*A*(Tr-T)/(V*dL) - FiA*CiA*CpA*(T-TiA) - FiB*CiB*CpB*(T-TiB) + dH*K*CA*CB*V)
/ (V*Cp);
Trp = (Fr*dr*Cpr*(Tir-Tr) + U*A*(T-Tr)) / (Vr*dr*Cpr);
Php = (FiA*pHA + FiB*pHB - 2*F*Ph - K*CA*CB) / V;

%Integrar por Euler
CA = CA + CAp*dt;
CB = CB + CBp*dt;

```

```

CC = CC + CCp*dt;
CD = CD + CDp*dt;
T = T + Tp*dt;
Tr = Tr + Trp*dt;
Ph = Ph + Php*dt;

```

%

PID

```

%Controlador PID DISCRETO para CONCENTRACION INICIAL A
E2Ca = E1Ca;
E1Ca = ECa;
ECa = SPC - CC;
uCa = uCa + (Kp1+Ki1+Kd1)*ECa - (Kp1+2*Kd1)*E1Ca - Kd1*E2Ca;

%Controlador PID DISCRETO para CONCENTRACION INICIAL B
E2Cb = E1Cb;
E1Cb = ECb;
ECb = SPC - CD;
uCb = uCb + (Kp2+Ki2+Kd2)*ECb - (Kp2+2*Kd2)*E1Cb - Kd2*E2Cb;

%Controlador PID DISCRETO para TEMPERATURA INICIAL REFRIG
E2Tir = E1Tir;
E1Tir = ETir;
ETir = SPT - T;
uTir = uTir + (Kp3+Ki3+Kd3)*ETir - (Kp3+2*Kd3)*E1Tir - Kd3*E2Tir;

% Saturacion del Actuador
if uCa<0
    uCa=0;
end
if uCa>0.5
    uCa=0.5;
end
if uCb<0
    uCb=0;
end
if uCb>0.5
    uCb=0.5;
end
if uTir<275
    uTir=275;
end
if uTir>350
    uTir=350;
end
CiA = uCa;
CiB = uCb;
Tir = uTir;

```

ControlOptimal.m

```

%-----
%          CONTROLADOR OPTIMAL DISCRETO DE UN REACTOR QUIMICO CONTINUO
%-----
%Luego de declarar las condiciones iniciales se llama a este
%programa para realizar la SIMULACION DE LA INTEGRACION DEL SISTEMA
%-----
% Este programa es llamado desde LABVIEW (ReactorControl.vi)
%-----

%Declaracion de Constantes
Ex = 2407.2; %Energía activación y Const. Botzmann
Ko = 63380; %Fact.Esterico * Frec.Colociones [mol^n/(seg*m^3)]
V = 7.9; %Volumen del tanque [m^3]
Vr = 8; %Volumen de la camisa de refrigeración [m^3]
A = 24; %Superficie o área para la transferencia de calor [m^2]
Cpr = 4.19; %Calor especifico del refrigerante (agua) [kJ/(Kg*°K)]
dr = 1000; %Densidad del refrigerante (agua) [Kg/m3]
dL = 76; %Densidad del liquido en el tanque [Kg/m3]
pHA = 13.3; %Valor de pH del material A
pHB = 7.10; %Valor de pH del material B
CpA = 3.26; %Capacidad calorífica del material A [kJ/(Kg*°K)]

```

```

CpB = 2.02;    %Capacidad calorífica del material B [kJ/(Kg*°K)]
CpC = 2.51;    %Capacidad calorífica del material C [kJ/(Kg*°K)]
CpD = 3.76;    %Capacidad calorífica del material D [kJ/(Kg*°K)]

%Calculo de Entalpia referencial (hr)
Tref = 300;
hr = (CpC + CpD - CpA - CpB);

if controladoranterior ~= 2
    %Integral del error
    interr1=0; interr2=0; interr3=0;
end

%=====
%                               CONTROLADOR OPTIMAL
%-----

% PARAMETROS del Controlador Optimal
KK = [ 21.9796  -15.8802  2.2941  3.4365  -0.4576  -0.0039  -0.0000  11.6415
      -16.9375  20.9543  2.5315  3.7922  -0.4552  -0.0043  -0.0000  -10.6993
      -0.0029  -0.0055  -0.0041  -0.0061  0.0008  0.0000  0.0000  0.0006
    ];

%SIMULACION DEL SISTEMA

    %Terminos auxiliares
    K = Ko * exp(-Ex/T);
    F = FiA + FiB; %flujo total
    F = F/2; %flujo promedio
    pH = 11 + log10(Ph);
    U = 19.19/A;
    Cp = CA*CpA + CB*CpB + CC*CpC + CD*CpD;
    dH = hr + (CpC + CpD - CpA - CpB)*(T-Tref);

    %Calcular las derivadas
    CAp = (FiA*CiA - F*CA - K*CA*CB*V) / V;
    CBp = (FiB*CiB - F*CB - K*CA*CB*V) / V;
    CCp = (-F*CC + K*CA*CB*V) / V;
    CDp = (-F*CD + K*CA*CB*V) / V;
    Tp = (U*A*(Tr-T)/(V*dL) - FiA*CiA*CpA*(T-TiA) - FiB*CiB*CpB*(T-TiB) + dH*K*CA*CB*V)
    / (V*Cp);
    Trp = (Fr*dr*Cpr*(Tir-Tr) + U*A*(T-Tr)) / (Vr*dr*Cpr);
    Php = (FiA*pHA + FiB*pHB - 2*F*Ph - K*CA*CB) / V;

    %Integrar por Euler
    CA = CA + CAp*dt;
    CB = CB + CBp*dt;
    CC = CC + CCp*dt;
    CD = CD + CDp*dt;
    T = T + Tp*dt;
    Tr = Tr + Trp*dt;
    Ph = Ph + Php*dt;

% CONTROLADOR OPTIMAL

X = [CA CB CC CD T Tr Ph]';
interr1 = interr1 + (CC-SPc)*dt;
interr2 = interr2 + (CD-SPc)*dt;
interr3 = interr3 + (T-SPt)*dt;
uCiA = -KK(1,:) * [X; interr1];
uCiB = -KK(2,:) * [X; interr2];
uTir = -KK(1,:) * [X; interr3];

%Saturacion del Actuador
if uCiA<0
    uCiA=0;
end
if uCiA>0.5
    uCiA=0.5;
end
if uCiB<0
    uCiB=0;

```

```

end
if uCiB>0.5
    uCiB=0.5;
end
if uTir<275
    uTir=275;
end
if uTir>350
    uTir=350;
end
CiA = uCiA;
CiB = uCiB;
Tir = uTir;

```

ControlEstatico.m

```

%-----
% NEUROCONTROLADOR ESTATICO DE UN REACTOR QUIMICO CONTINUO
%-----
%Luego de declarar las condiciones iniciales se llama a este
%programa para realizar la SIMULACION DE LA INTEGRACION DEL SISTEMA
%-----
% Este programa es llamado desde LABVIEW (ReactorControl.vi)
%-----

% ESCALAMIENTO y DEESCALAMIENTO:
% (Y = escM * X + escB) en funcion al rango de saturacion
%Escalar el Error
escM1 = 2/(0.25-(-0.25)); escB1 = 1-0.25*escM1; % (Cc-refCc), (Cd-refCd)
escM2 = 2/(20-(-20)); escB2 = 1-20*escM2; % (T-refT)
%Salida hacia actuador
escM7 = (0.5-(0))/1.8; escB7 = 0.5-0.9*escM7; %CiA, CiB
escM8 = (350-275)/1.8; escB8 = 350-0.9*escM8; %Tir

%Neuronas
ne = 3; %Entradas
nm = 3; %Neuronas
ns = 3; %Salidas
%Pesos
load pesosNCEP2.mat

ref = [SPc; SPc; SPT];

%Declaracion de Constantes
Ex = 2407.2; %Energía activación y Const. Botzmann
Ko = 63380; %Fact.Esterico * Frec.Colisiones [mol^n/(seg*m^3)]
V = 7.9; %Volumen del tanque [m^3]
Vr = 8; %Volumen de la camisa de refrigeración [m^3]
A = 24; %Superficie o área para la transferencia de calor [m^2]
Cpr = 4.19; %Calor especifico del refrigerante (agua) [kJ/(Kg*°K)]
dr = 1000; %Densidad del refrigerante (agua) [Kg/m3]
dL = 76; %Densidad del liquido en el tanque [Kg/m3]
pHA = 13.3; %Valor de pH del material A
pHB = 7.10; %Valor de pH del material B
CpA = 3.26; %Capacidad calorífica del material A [kJ/(Kg*°K)]
CpB = 2.02; %Capacidad calorífica del material B [kJ/(Kg*°K)]
CpC = 2.51; %Capacidad calorífica del material C [kJ/(Kg*°K)]
CpD = 3.76; %Capacidad calorífica del material D [kJ/(Kg*°K)]

%Calculo de Entalpia referencial (hr)
Tref = 300;
hr = (CpC + CpD - CpA - CpB);

%Diferencial de Tiempo
if controladoranterior ~= 3
    control = [0;0;0];
    controlK_1 = [CiA;CiB;Tir];
end

%----- RED NEURONAL -----

Err(1,1) = escM1*(CC-ref(1))+escB1; %CC

```

```

Err(2,1) = escM1*(CD-ref(2))+escB1;      %CD
Err(3,1) = escM2*(T-ref(3))+escB2;      %T

x = [Err(1); Err(2); Err(3)];           %Nuevo X para el Neurocontrolador

%ENTRADA a la Red : Error Escalado
in_red = x;

%Red Neuronal
m = v'*in_red;
n = 2.0./(1 + exp(-(m-c)./a)) - 1;      %Sigmoidea
% n = exp(-(m-c).^2)./a);              %Gauseana
out_red = w'*n;

%SALIDA: Desescalamiento y Saturacion
control = [escM7*out_red(1)+escB7; escM7*out_red(2)+escB7;
escM8*out_red(3)+escB8];
control = 0.1*controlK_1 + control;
if control(1)>0.5; control(1) = 0.5; end
if control(1)<0; control(1) = 0; end
if control(2)>0.5; control(2) = 0.5; end
if control(2)<0; control(2) = 0; end
if control(3)>350; control(3) = 350; end
if control(3)<275; control(3) = 275; end
controlK_1 = control;

CiA = control(1); CiB = control(2); Tir = control(3);

%SIMULACION DEL SISTEMA

%Terminos auxiliares
K = Ko * exp(-Ex/T);
F = FiA + FiB; %flujo total
F = F/2; %flujo promedio
pH = 11 + log10(Ph);
U = 19.19/A;
Cp = CA*CpA + CB*CpB + CC*CpC + CD*CpD;
dH = hr + (CpC + CpD - CpA - CpB)*(T-Tref);

%Calcular las derivadas
CAp = (FiA*CiA - F*CA - K*CA*CB*V) / V;
CBp = (FiB*CiB - F*CB - K*CA*CB*V) / V;
CCp = (-F*CC + K*CA*CB*V) / V;
CDp = (-F*CD + K*CA*CB*V) / V;
Tp = (U*A*(Tr-T)/(V*dL) - FiA*CiA*CpA*(T-TiA) - FiB*CiB*CpB*(T-TiB) + dH*K*CA*CB*V)
/ (V*Cp);
Trp = (Fr*dr*Cpr*(Tir-Tr) + U*A*(T-Tr)) / (Vr*dr*Cpr);
Php = (FiA*pHA + FiB*pHB - 2*F*Ph - K*CA*CB) / V;

%Integrar por Euler
CA = CA + CAp*dt;
CB = CB + CBp*dt;
CC = CC + CCp*dt;
CD = CD + CDp*dt;
T = T + Tp*dt;
Tr = Tr + Trp*dt;
Ph = Ph + Php*dt;

```

ControlEstaticoModif.m

```

%-----
% NEUROCONTROLADOR ESTATICO MODIFICADO DE UN REACTOR QUIMICO CONTINUO
%-----
%Luego de declarar las condiciones iniciales se llama a este
%programa para realizar la SIMULACION DE LA INTEGRACION DEL SISTEMA
%-----
% Este programa es llamado desde LABVIEW (ReactorControl.vi)
%-----

```

```

% ESCALAMIENTO y DESESCALAMIENTO:
% (Y = escM * X + escB) en funcion al rango de saturacion
%Escalar el Error
escM1 = 2/(0.25-(-0.25)); escB1 = 1-0.25*escM1;      %(Cc-refCc),(Cd-refCd)
escM2 = 2/(20-(-20));   escB2 = 1-20*escM2;        %(T-refT)
%Salida hacia actuador
escM7 = (0.5-(0))/1.8; escB7 = 0.5-0.9*escM7;      %CiA, CiB
escM8 = (350-275)/1.8; escB8 = 350-0.9*escM8;      %Tir

%Neuronas
ne = 9;          %Entradas
nm = 9;          %Neuronas
ns = 3;          %Salidas
%Pesos
load pesosNCM2.mat

ref = [SPc; SPc; SPT];

%Declaracion de Constantes
Ex = 2407.2;    %Energía activación y Const. Botzmann
Ko = 63380;    %Fact.Esterico * Frec.Colisiones [mol^n/(seg*m^3)]
V = 7.9;       %Volumen del tanque [m^3]
Vr = 8;        %Volumen de la camisa de refrigeración [m^3]
A = 24;        %Superficie o área para la transferencia de calor [m^2]
Cpr = 4.19;    %Calor especifico del refrigerante (agua) [kJ/(Kg*°K)]
dr = 1000;     %Densidad del refrigerante(agua) [Kg/m3]
dL = 76;       %Densidad del liquido en el tanque [Kg/m3]
pHA = 13.3;    %Valor de pH del material A
pHB = 7.10;    %Valor de pH del material B
CpA = 3.26;    %Capacidad calorífica del material A [kJ/(Kg*°K)]
CpB = 2.02;    %Capacidad calorífica del material B [kJ/(Kg*°K)]
CpC = 2.51;    %Capacidad calorífica del material C [kJ/(Kg*°K)]
CpD = 3.76;    %Capacidad calorífica del material D [kJ/(Kg*°K)]
%Calculo de Entalpia referencial (hr)
Tref = 300;
hr = (CpC + CpD - CpA - CpB);

%Diferencial de Tiempo
if controladoranterior ~= 4
    control = [0;0;0];
    controlK_1 = [CiA;CiB;Tir];
    Ek_0=[0;0;0]; Ek_1=[0;0;0]; Ek_2=[0;0;0]; %Error en Tiempos Anteriores
end

%----- RED NEURONAL -----

Err(1,1) = escM1*(CC-ref(1))+escB1;      %CC
Err(2,1) = escM1*(CD-ref(2))+escB1;      %CD
Err(3,1) = escM2*(T-ref(3))+escB2;      %T

Ek_2 = Ek_1;
Ek_1 = Ek_0;
Ek_0 = Err;
Ek = [Ek_0; Ek_1; Ek_2];

    x = [Ek];      %Nuevo X para el Neurocontrolador

%ENTRADA a la Red : Error Escalado
in_red(1,1) = Ek(1);
in_red(2,1) = Ek(2);
in_red(3,1) = Ek(3);
in_red(4,1) = Ek(4);
in_red(5,1) = Ek(5);
in_red(6,1) = Ek(6);
in_red(7,1) = Ek(7);
in_red(8,1) = Ek(8);
in_red(9,1) = Ek(9);

%Red Neuronal
m = v'*in_red;
n = 2.0./(1 + exp(-(m-c)./a)) - 1;      %Sigmoidea
%n = exp((-m-c).^2)./a;                  %Gauseana
out_red = w'*n;
%SALIDA: Desescalamiento y Saturacion

```

```

    control = [escM7*out_red(1)+escB7; escM7*out_red(2)+escB7;
escM8*out_red(3)+escB8];
    control = 0.1*controlK_1 + control;
    if control(1)>0.5; control(1) = 0.5; end
    if control(1)<0; control(1) = 0; end
    if control(2)>0.5; control(2) = 0.5; end
    if control(2)<0; control(2) = 0; end
    if control(3)>350; control(3) = 350; end
    if control(3)<275; control(3) = 275; end
    controlK_1 = control;

    CiA = control(1); CiB = control(2); Tir = control(3);

%SIMULACION DEL SISTEMA

    %Terminos auxiliares
    K = Ko * exp(-Ex/T);
    F = FiA + FiB; %flujo total
    F = F/2; %flujo promedio
    pH = 11 + log10(Ph);
    U = 19.19/A;
    Cp = CA*CpA + CB*CpB + CC*CpC + CD*CpD;
    dH = hr + (CpC + CpD - CpA - CpB)*(T-Tref);

    %Calcular las derivadas
    CAp = (FiA*CiA - F*CA - K*CA*CB*V) / V;
    CBp = (FiB*CiB - F*CB - K*CA*CB*V) / V;
    CCp = (-F*CC + K*CA*CB*V) / V;
    CDp = (-F*CD + K*CA*CB*V) / V;
    Tp = (U*A*(Tr-T)/(V*dL) - FiA*CiA*CpA*(T-TiA) - FiB*CiB*CpB*(T-TiB) + dH*K*CA*CB*V)
/ (V*Cp);
    Trp = (Fr*dr*Cpr*(Tir-Tr) + U*A*(T-Tr)) / (Vr*dr*Cpr);
    Php = (FiA*pHA + FiB*pHB - 2*F*Ph - K*CA*CB) / V;

    %Integrar por Euler
    CA = CA + CAp*dt;
    CB = CB + CBp*dt;
    CC = CC + CCp*dt;
    CD = CD + CDp*dt;
    T = T + Tp*dt;
    Tr = Tr + Trp*dt;
    Ph = Ph + Php*dt;

```

ControlDinamico.m

```

%-----
%      NEUROCONTROLADOR DINAMICO DE UN REACTOR QUIMICO CONTINUO
%-----
%Luego de declarar las condiciones iniciales se llama a este
%programa para realizar la SIMULACION DE LA INTEGRACION DEL SISTEMA
%-----
% Este programa es llamado desde LABVIEW (ReactorControl.vi)
%-----

% ESCALAMIENTO y DESESCALAMIENTO:
% (Y = escM * X + escB) en funcion al rango de saturacion
escM1 = 6/(0.25-(-0.25)); escB1 = 3-0.25*escM1; % (Cc-refCc), (Cd-refCd)
escM2 = 6/(20-(-20)); escB2 = 3-20*escM2; % (T-refT)
%Salida hacia actuador
escM7 = (0.5-(0))/1.8; escB7 = 0.5-0.9*escM7; %CiA, CiB
escM8 = (350-275)/1.8; escB8 = 350-0.9*escM8; %Tir

%Neuronas
ne = 3; %Entradas
nm = 3; %Neuronas
ns = 3; %Salidas

%Pesos
load pesosDBP2.mat

```

```

ref = [SPc; SPc; SPt];

%Declaracion de Constantes
Ex = 2407.2; %Energía activación y Const. Botzmann
Ko = 63380; %Fact.Esterico * Frec.Coliciones [mol^n/(seg*m^3)]
V = 7.9; %Volumen del tanque [m^3]
Vr = 8; %Volumen de la camisa de refrigeración [m^3]
A = 24; %Superficie o área para la transferencia de calor [m^2]
Cpr = 4.19; %Calor especifico del refrigerante (agua) [kJ/(Kg*°K)]
dr = 1000; %Densidad del refrigerante(agua) [Kg/m3]
dL = 76; %Densidad del liquido en el tanque [Kg/m3]
pHA = 13.3; %Valor de pH del material A
pHB = 7.10; %Valor de pH del material B
CpA = 3.26; %Capacidad calorífica del material A [kJ/(Kg*°K)]
CpB = 2.02; %Capacidad calorífica del material B [kJ/(Kg*°K)]
CpC = 2.51; %Capacidad calorífica del material C [kJ/(Kg*°K)]
CpD = 3.76; %Capacidad calorífica del material D [kJ/(Kg*°K)]

%Calculo de Entalpia referencial (hr)
Tref = 300;
hr = (CpC + CpD - CpA - CpB);

%Diferencial de Tiempo
if controladoranterior ~= 5
    control = [0;0;0];
    controlK_1 = [CiA;CiB;Tir];
end

%----- RED NEURONAL -----

Err(1,1) = escM1*(CC-ref(1))+escB1; %CC
Err(2,1) = escM1*(CD-ref(2))+escB1; %CD
Err(3,1) = escM2*(T-ref(3))+escB2; %T

x = [Err(1); Err(2); Err(3)]; %Nuevo X para el Neurocontrolador

%ENTRADA a la Red : Error Escalado
in_red = x;

%Red Neuronal
m = v'*in_red;
n = 2.0./(1 + exp(-(m-c)./a)) - 1; %Sigmoidea
% n = exp(-((m-c).^2)./a); %Gauseana
out_red = w'*n;

%SALIDA: Desescalamiento y Saturacion
control = [escM7*out_red(1)+escB7; escM7*out_red(2)+escB7;
escM8*out_red(3)+escB8];
control = 0.1*controlK_1 + control;
if control(1)>0.5; control(1) = 0.5; end
if control(1)<0; control(1) = 0; end
if control(2)>0.5; control(2) = 0.5; end
if control(2)<0; control(2) = 0; end
if control(3)>350; control(3) = 350; end
if control(3)<275; control(3) = 275; end
controlK_1 = control;

CiA = control(1); CiB = control(2); Tir = control(3);

%SIMULACION DEL SISTEMA

%Terminos auxiliares
K = Ko * exp(-Ex/T);
F = FiA + FiB; %flujo total
F = F/2; %flujo promedio
pH = 11 + log10(Ph);
U = 19.19/A;
Cp = CA*CpA + CB*CpB + CC*CpC + CD*CpD;
dH = hr + (CpC + CpD - CpA - CpB)*(T-Tref);

%Calcular las derivadas
CAp = (FiA*CiA - F*CA - K*CA*CB*V) / V;

```

```

CBp = (FiB*CiB - F*CB - K*CA*CB*V) / V;
CCp = (-F*CC + K*CA*CB*V) / V;
CDp = (-F*CD + K*CA*CB*V) / V;
Tp = (U*A*(Tr-T))/(V*dL) - FiA*CiA*CpA*(T-TiA) - FiB*CiB*CpB*(T-TiB) + dH*K*CA*CB*V
/ (V*Cp);
Trp = (Fr*dr*Cpr*(Tir-Tr) + U*A*(T-Tr)) / (Vr*dr*Cpr);
Php = (FiA*pHA + FiB*pHB - 2*F*Ph - K*CA*CB) / V;

%Integrar por Euler
CA = CA + CAp*dt;
CB = CB + CBp*dt;
CC = CC + CCp*dt;
CD = CD + CDp*dt;
T = T + Tp*dt;
Tr = Tr + Trp*dt;
Ph = Ph + Php*dt;

```

ReactorModeloPID1.m

```

%-----
%
%           REACTOR QUIMICO AGITADO CONTINUO
%           Modelo Matematico Controlado con PID Discreto
%-----
% Reaccion de Saponificacion de Hidroxido de Sodio (A)
% y Acetato de Etilo (B), se obtiene : Acetato de Sodio (C)
% y Etanol (D)
%-----
%           ---- Para UNA Condicion Inicial ----
%-----

clear all
close all
clc

%-----
%
%           MODELO MATEMATICO
%-----

%Declaracion de Constantes
Ex = 2407.2; %Energía activación y Const. Botzmann
Ko = 63380; %Fact.Esterico * Frec.Colisiones [mol^n/(seg*m^3)]
V = 7.9; %Volumen del tanque [m^3]
Vr = 8; %Volumen de la camisa de refrigeración [m^3]
A = 24; %Superficie o área para la transferencia de calor [m^2]
Cpr = 4.19; %Calor especifico del refrigerante (agua) [kJ/(Kg*°K)]
dr = 1000; %Densidad del refrigerante(agua) [Kg/m3]
dL = 76; %Densidad del liquido en el tanque [Kg/m3]
pHA = 13.3; %Valor de pH del material A
pHB = 7.10; %Valor de pH del material B
CpA = 3.26; %Capacidad calorífica del material A [kJ/(Kg*°K)]
CpB = 2.02; %Capacidad calorífica del material B [kJ/(Kg*°K)]
CpC = 2.51; %Capacidad calorífica del material C [kJ/(Kg*°K)]
CpD = 3.76; %Capacidad calorífica del material D [kJ/(Kg*°K)]

%Perturbaciones
FiA = 0.2; %Velocidad de flujo molar de A a la entrada [lit/seg]
FiB = 0.2; %Velocidad de flujo molar de B a la entrada [lit/seg]
TiA = 300; %Temperatura del material A en la entrada[°K]
TiB = 300; %Temperatura del material B en la entrada[°K]
Fr = 0.40; %Flujo del líquido refrigerante [lit/seg]

%Inicializacion de Señal de Control
Tir = 300; %Temperatura del refrigerante a la entrada [°K]
CiA = 0.2; %Concentración de material A a la entrada[mol]
CiB = 0.2; %Concentración de material B a la entrada[mol]

%Inicializacion de Variables (Condiciones Iniciales)
CA = 0.10; %Concentración de material A a la salida [mol]
CB = 0.40; %Concentración de material B a la salida [mol]
CC = 0.10; %Concentración de material C a la salida [mol]
CD = 0.40; %Concentración de material D a la salida [mol]
T = 309; %Temperatura en el reactor a la salida [°K]

```

```

Tr = 304;      %Temperatura en el refrigerante a la salida  [°K]
Ph = 1;       %Variable auxiliar para determinar el pH

%Terminos auxiliares
%K    Constante de velocidad [moln/(seg*m3)]
%F    Velocidad de flujo molar a la salida [lit/seg]
%pH   Valor de pH dentro del reactor
%U    Coeficiente de transferencia de calor [J/(°K*seg*m2)]
%Cp   Capacidad calorífica general
%dH   Calor desarrollado en la reacción (entalpias) [kJ/C]
%hr   Entalpia relativa para una Tref de 300°K

%Calculo de Entalpia referencial (hr)
Tref = 300;
hr = (CpC + CpD - CpA - CpB);

%=====
%                               CONTROLADOR PID
%-----

% CONDICIONES INICIALES del Controlador PID
uCa=0;  uCb=0;  uTir=0;      %Señal de control
ECa=0;  ECB=0;  ETir=0;      %Error E(k)
E1Ca=0; E1Cb=0; E1Tir=0;    %Error E(k-1)
E2Ca=0; E2Cb=0; E2Tir=0;    %Error E(k-2)

% PARAMETROS del Controlador PID
Kp1 = 2;  Kd1 = 0.05; Ki1 = 0.9; % PID Concentracion C
Kp2 = 2;  Kd2 = 0.05; Ki2 = 0.9; % PID Concentracion D
Kp3 = 3;  Kd3 = 0.15; Ki3 = 0.8; % PID Temperatura

% SET POINT
SPc = 0.25; %concentracion para C y D
SPt = 304;  %temperatura en el reactor

%=====
%Tiempos
ti = 0;
dt = 0.1;
tf = 300;
n = 1;

% SIMULACION DEL SISTEMA

for t=ti:dt:tf

  %Terminos auxiliares
  K = Ko * exp(-Ex/T);
  F = FiA + FiB; %flujo total
  F = F/2; %flujo promedio
  pH = 11 + log10(Ph);
  U = 19.19/A;
  Cp = CA*CpA + CB*CpB + CC*CpC + CD*CpD;
  dH = hr + (CpC + CpD - CpA - CpB)*(T-Tref);

  %Almacenar datos
  tiempo(n) = t;
  mCA(n) = CA;
  mCB(n) = CB;
  mCC(n) = CC;
  mCD(n) = CD;
  mT(n) = T;
  mTr(n) = Tr;
  mpH(n) = pH;
  mTir(n) = Tir;
  mCiA(n) = CiA;
  mCiB(n) = CiB;
  mSPc(n) = SPc;
  mSPt(n) = SPt;

  %Calcular las derivadas
  CAp = (FiA*CiA - F*CA - K*CA*CB*V) / V;
  CBp = (FiB*CiB - F*CB - K*CA*CB*V) / V;

```

```

    CCp = (-F*CC + K*CA*CB*V) / V;
    Cdp = (-F*CD + K*CA*CB*V) / V;
    Tp = (U*A*(Tr-T)/(V*dL) - FiA*CiA*CpA*(T-TiA) - FiB*CiB*CpB*(T-TiB) + dH*K*CA*CB*V)
/ (V*Cp);
    Trp = (Fr*dr*Cpr*(Tir-Tr) + U*A*(T-Tr)) / (Vr*dr*Cpr);
    Php = (FiA*pHA + FiB*pHB - 2*F*Ph - K*CA*CB) / V;

%Integrar por Euler
CA = CA + CAp*dt;
CB = CB + CBp*dt;
CC = CC + CCp*dt;
CD = CD + Cdp*dt;
T = T + Tp*dt;
Tr = Tr + Trp*dt;
Ph = Ph + Php*dt;

%
                                PID

%Controlador PID DISCRETO para CONCENTRACION INICIAL A
E2Ca = E1Ca;
E1Ca = ECa;
ECa = SPC - CC;
uCa = uCa + (Kp1+Ki1+Kd1)*ECa - (Kp1+2*Kd1)*E1Ca - Kd1*E2Ca;

%Controlador PID DISCRETO para CONCENTRACION INICIAL B
E2Cb = E1Cb;
E1Cb = ECB;
ECB = SPC - CD;
uCb = uCb + (Kp2+Ki2+Kd2)*ECB - (Kp2+2*Kd2)*E1Cb - Kd2*E2Cb;

%Controlador PID DISCRETO para TEMPERATURA INICIAL REFRIG
E2Tir = E1Tir;
E1Tir = ETir;
ETir = SPT - T;
uTir = uTir + (Kp3+Ki3+Kd3)*ETir - (Kp3+2*Kd3)*E1Tir - Kd3*E2Tir;

%Saturacion del Actuador
if uCa<0
    uCa=0;
end
if uCa>0.5
    uCa=0.5;
end
if uCb<0
    uCb=0;
end
if uCb>0.5
    uCb=0.5;
end
if uTir<275
    uTir=275;
end
if uTir>350
    uTir=350;
end
CiA = uCa;
CiB = uCb;
Tir = uTir;

%%%%%%%%

n=n+1;
end

figure(1)
subplot(211)
plot(tiempo, mCA)
grid on
title('Concentracion A: Hidroxido de Sodio')
subplot(212)
plot(tiempo, mCB)
grid on
title('Concentracion B: Acetato de Etilo')

```

```

figure(2)
subplot(211)
    plot(tiempo, mCC)
    hold on
    plot(tiempo, mSPc, 'k')
    grid on
    title('Concentracion C: Acetato de Sodio')
subplot(212)
    plot(tiempo, mCD)
    hold on
    plot(tiempo, mSPc, 'k')
    grid on
    title('Concentracion D: Etanol')

figure(3)
subplot(311)
    plot(tiempo, mT)
    title('Temperatura dentro del Reactor')
    hold on
    plot(tiempo, mSPt, 'k')
    grid on
subplot(312)
    plot(tiempo, mTr)
    grid on
    title('Temperatura en la Camisa de Refrigeracion')
subplot(313)
    plot(tiempo, mpH)
    grid on
    title('Nivel de pH en el Reactor')

figure(4)
subplot(311)
    plot(tiempo, mCiA)
    grid on
    title('Concentracion A Entrada')
    axis([0 tf 0 0.5])
subplot(312)
    plot(tiempo, mCiB)
    grid on
    title('Concentracion B Entrada')
    axis([0 tf 0 0.5])
subplot(313)
    plot(tiempo, mTir)
    title('Temperatura Refrigerante Entrada')
    grid on
    axis([0 tf 275 350])

figure(5)
subplot(311)
    plot(tiempo, mCC)
    hold on
    plot(tiempo, mSPc, 'k')
    grid on
    title('Concentracion C: Acetato de Sodio')
    axis([0 tf 0 0.5])
subplot(312)
    plot(tiempo, mCD)
    hold on
    plot(tiempo, mSPc, 'k')
    grid on
    title('Concentracion D: Etanol')
    axis([0 tf 0 0.5])
subplot(313)
    plot(tiempo, mT)
    title('Temperatura dentro del Reactor')
    hold on
    plot(tiempo, mSPt, 'k')
    grid on
    axis([0 tf 295 315])

```

ReactorModeloOPTIMAL1.m

```

%-----
%
%           REACTOR QUIMICO AGITADO CONTINUO
%           Modelo Matematico Controlado con CONTROL OPTIMAL
%-----
% Reaccion de Saponificacion de Hidroxido de Sodio (A)
% y Acetato de Etilo (B), se obtiene : Acetato de Sodio (C)
% y Etanol (D)
%-----
%           ---- Para UNA Condicion Inicial ----
%-----

clear all
close all
clc

%=====
%
%           MODELO MATEMATICO
%-----

%Declaracion de Constantes
Ex = 2407.2; %Energía activación y Const. Botzmann
Ko = 63380; %Fact.Esterico * Frec.Colisiones [mol^n/(seg*m^3)]
V = 7.9; %Volumen del tanque [m^3]
Vr = 8; %Volumen de la camisa de refrigeración [m^3]
A = 24; %Superficie o área para la transferencia de calor [m^2]
Cpr = 4.19; %Calor especifico del refrigerante (agua) [kJ/(Kg*°K)]
dr = 1000; %Densidad del refrigerante (agua) [Kg/m3]
dL = 76; %Densidad del líquido en el tanque [Kg/m3]
pHA = 13.3; %Valor de pH del material A
pHB = 7.10; %Valor de pH del material B
CpA = 3.26; %Capacidad calorífica del material A [kJ/(Kg*°K)]
CpB = 2.02; %Capacidad calorífica del material B [kJ/(Kg*°K)]
CpC = 2.51; %Capacidad calorífica del material C [kJ/(Kg*°K)]
CpD = 3.76; %Capacidad calorífica del material D [kJ/(Kg*°K)]

%Perturbaciones
FiA = 0.2; %Velocidad de flujo molar de A a la entrada [lit/seg]
FiB = 0.2; %Velocidad de flujo molar de B a la entrada [lit/seg]
TiA = 300; %Temperatura del material A en la entrada[°K]
TiB = 300; %Temperatura del material B en la entrada[°K]
Fr = 0.40; %Flujo del líquido refrigerante [lit/seg]

%Inicializacion de Señal de Control
Tir = 300; %Temperatura del refrigerante a la entrada [°K]
CiA = 0.2; %Concentración de material A a la entrada[mol]
CiB = 0.2; %Concentración de material B a la entrada[mol]

%Inicializacion de Variables (Punto de Equilibrio / Linealizacion)
CA = 0.30; %Concentración de material A a la salida [mol]
CB = 0.05; %Concentración de material B a la salida [mol]
CC = 0.25; %Concentración de material C a la salida [mol]
CD = 0.25; %Concentración de material D a la salida [mol]
T = 305; %Temperatura en el reactor a la salida [°K]
Tr = 350; %Temperatura en el refrigerante a la salida [°K]
Ph = 10.184; %Variable auxiliar para determinar el pH

%Terminos auxiliares
%K Constante de velocidad [moln/(seg*m3)]
%F Velocidad de flujo molar a la salida [lit/seg]
%pH Valor de pH dentro del reactor
%U Coeficiente de transferencia de calor [J/(°K*seg*m2)]
%Cp Capacidad calorífica general
%dH Calor desarrollado en la reacción (entalpias) [kJ/C]
%hr Entalpia relativa para una Tref de 300°K

%Calculo de Entalpia referencial (hr)
Tref = 300;
hr = (CpC + CpD - CpA - CpB);

%=====
%
%           CONTROLADOR OPTIMAL
%-----
% SET POINT
Spc = 0.25; %concentracion para C y D

```

```

Spt = 304;      %temperatura en el reactor

%Modelo Continuo LINEALIZADO alrededor del Punto de equilibrio

MatrizA(1,1) = (-1/2*FiA-1/2*FiB-Ko*exp(-Ex/T)*CB*V)/V;
MatrizA(1,2) = -Ko*exp(-Ex/T)*CA;
MatrizA(1,3) = 0;
MatrizA(1,4) = 0;
MatrizA(1,5) = -Ko*Ex/T^2*exp(-Ex/T)*CA*CB;
MatrizA(1,6) = 0;
MatrizA(1,7) = 0;
MatrizA(2,1) = -Ko*exp(-Ex/T)*CB;
MatrizA(2,2) = (-1/2*FiA-1/2*FiB-Ko*exp(-Ex/T)*CA*V)/V;
MatrizA(2,3) = 0;
MatrizA(2,4) = 0;
MatrizA(2,5) = -Ko*Ex/T^2*exp(-Ex/T)*CA*CB;
MatrizA(2,6) = 0;
MatrizA(2,7) = 0;
MatrizA(3,1) = Ko*exp(-Ex/T)*CB;
MatrizA(3,2) = Ko*exp(-Ex/T)*CA;
MatrizA(3,3) = (-1/2*FiA-1/2*FiB)/V;
MatrizA(3,4) = 0;
MatrizA(3,5) = Ko*Ex/T^2*exp(-Ex/T)*CA*CB;
MatrizA(3,6) = 0;
MatrizA(3,7) = 0;
MatrizA(4,1) = Ko*exp(-Ex/T)*CB;
MatrizA(4,2) = Ko*exp(-Ex/T)*CA;
MatrizA(4,3) = 0;
MatrizA(4,4) = (-1/2*FiA-1/2*FiB)/V;
MatrizA(4,5) = Ko*Ex/T^2*exp(-Ex/T)*CA*CB;
MatrizA(4,6) = 0;
MatrizA(4,7) = 0;
MatrizA(5,1) = (hr+(CpC+CpD-CpA-CpB)*(T-Tref))*Ko*exp(-
Ex/T)*CB/(CA*CpA+CB*CpB+CC*CpC+CD*CpD)-((1919/100*Tr-1919/100*T)/V/dL-FiA*CiA*CpA*(T-
TiA)-FiB*CiB*CpB*(T-TiB)+(hr+(CpC+CpD-CpA-CpB)*(T-Tref))*Ko*exp(-
Ex/T)*CA*CB*V)/V/(CA*CpA+CB*CpB+CC*CpC+CD*CpD)^2*CpA;
MatrizA(5,2) = (hr+(CpC+CpD-CpA-CpB)*(T-Tref))*Ko*exp(-
Ex/T)*CA/(CA*CpA+CB*CpB+CC*CpC+CD*CpD)-((1919/100*Tr-1919/100*T)/V/dL-FiA*CiA*CpA*(T-
TiA)-FiB*CiB*CpB*(T-TiB)+(hr+(CpC+CpD-CpA-CpB)*(T-Tref))*Ko*exp(-
Ex/T)*CA*CB*V)/V/(CA*CpA+CB*CpB+CC*CpC+CD*CpD)^2*CpB;
MatrizA(5,3) = -((1919/100*Tr-1919/100*T)/V/dL-FiA*CiA*CpA*(T-TiA)-FiB*CiB*CpB*(T-
TiB)+(hr+(CpC+CpD-CpA-CpB)*(T-Tref))*Ko*exp(-
Ex/T)*CA*CB*V)/V/(CA*CpA+CB*CpB+CC*CpC+CD*CpD)^2*CpC;
MatrizA(5,4) = -((1919/100*Tr-1919/100*T)/V/dL-FiA*CiA*CpA*(T-TiA)-FiB*CiB*CpB*(T-
TiB)+(hr+(CpC+CpD-CpA-CpB)*(T-Tref))*Ko*exp(-
Ex/T)*CA*CB*V)/V/(CA*CpA+CB*CpB+CC*CpC+CD*CpD)^2*CpD;
MatrizA(5,5) = (-1919/100/V/dL-FiA*CiA*CpA-FiB*CiB*CpB+(CpC+CpD-CpA-CpB))*Ko*exp(-
Ex/T)*CA*CB*V+(hr+(CpC+CpD-CpA-CpB)*(T-Tref))*Ko*Ex/T^2*exp(-
Ex/T)*CA*CB*V)/V/(CA*CpA+CB*CpB+CC*CpC+CD*CpD);
MatrizA(5,6) = 1919/100/V^2/dL/(CA*CpA+CB*CpB+CC*CpC+CD*CpD);
MatrizA(5,7) = 0;
MatrizA(6,1) = 0;
MatrizA(6,2) = 0;
MatrizA(6,3) = 0;
MatrizA(6,4) = 0;
MatrizA(6,5) = 1919/100/Vr/dr/Cpr;
MatrizA(6,6) = (-Fr*dr*Cpr-1919/100)/Vr/dr/Cpr;
MatrizA(6,7) = 0;
MatrizA(7,1) = -Ko*exp(-Ex/T)*CB/V;
MatrizA(7,2) = -Ko*exp(-Ex/T)*CA/V;
MatrizA(7,3) = 0;
MatrizA(7,4) = 0;
MatrizA(7,5) = -Ko*Ex/T^2*exp(-Ex/T)*CA*CB/V;
MatrizA(7,6) = 0;
MatrizA(7,7) = (-FiA-FiB)/V;

MatrizB(1,1) = FiA/V;
MatrizB(1,2) = 0;
MatrizB(1,3) = 0;
MatrizB(2,1) = 0;
MatrizB(2,2) = FiB/V;
MatrizB(2,3) = 0;
MatrizB(3,1) = 0;
MatrizB(3,2) = 0;

```

```

MatrizB(3,3) = 0;
MatrizB(4,1) = 0;
MatrizB(4,2) = 0;
MatrizB(4,3) = 0;
MatrizB(5,1) = -FiA*CpA*(T-TiA)/V/(CA*CpA+CB*CpB+CC*CpC+CD*CpD);
MatrizB(5,2) = -FiB*CpB*(T-TiB)/V/(CA*CpA+CB*CpB+CC*CpC+CD*CpD);
MatrizB(5,3) = 0;
MatrizB(6,1) = 0;
MatrizB(6,2) = 0;
MatrizB(6,3) = Fr/Vr;
MatrizB(7,1) = 0;
MatrizB(7,2) = 0;
MatrizB(7,3) = 0;

```

```
%Modelo LINEALIZADO con Integrador
```

```

MatrizAi = zeros(8);
MatrizAi(1:7,1:7) = MatrizA(1:7,1:7);
MatrizAi(8,1) = 1;
MatrizBi = zeros(8,3);
MatrizBi(1:7,1:3) = MatrizB(1:7,1:3);

```

```
%Controlador Optimal
```

```

q1 = 0;
q2 = 0;
q3 = 0;
q4 = 0;
q5 = 0;
q6 = 0;
q7 = 0;
q8 = 250;
Q = diag([q1 q2 q3 q4 q5 q6 q7 q8]);
%Q = diag([q2 q3 q4 q5 q6 q7 q8]);

```

```

RR = [1];
JJ = are(MatrizAi, MatrizBi*inv(RR)*MatrizBi', Q);
KK = inv(RR)*MatrizBi'*JJ;

```

```
%Inicializacion de Variables (Condiciones Iniciales)
```

```

CA = 0.10; %Concentración de material A a la salida [mol]
CB = 0.40; %Concentración de material B a la salida [mol]
CC = 0.10; %Concentración de material C a la salida [mol]
CD = 0.40; %Concentración de material D a la salida [mol]
T = 309; %Temperatura en el reactor a la salida [°K]
Tr = 304; %Temperatura en el refrigerante a la salida [°K]
Ph = 1; %Variable auxiliar para determinar el pH

```

```
%Tiempos
```

```

ti = 0;
dt = 0.1;
tf = 300;
n = 1;

```

```
%Integral del error
```

```
interr1=0; interr2=0; interr3=0;
```

```
% SIMULACION DEL SISTEMA
```

```
for t=ti:dt:tf
```

```
%Terminos auxiliares
```

```

K = Ko * exp(-Ex/T);
F = (FiA + FiB)/2; %flujo promedio
pH = 11 + log10(Ph);
U = 19.19/A;
Cp = CA*CpA + CB*CpB + CC*CpC + CD*CpD;
dH = hr + (CpC + CpD - CpA - CpB)*(T-Tref);

```

```
%Almacenar datos
```

```

tiempo(n) = t;
mCA(n) = CA;
mCB(n) = CB;
mCC(n) = CC;
mCD(n) = CD;

```

```

mT(n) = T;
mTr(n) = Tr;
mpH(n) = pH;
mTir(n) = Tir;
mCiA(n) = CiA;
mCiB(n) = CiB;
mSPc(n) = SPc;
mSPt(n) = SPt;

%Calcular las derivadas
CAp = (FiA*CiA - F*CA - K*CA*CB*V) / V;
CBp = (FiB*CiB - F*CB - K*CA*CB*V) / V;
CCp = (-F*CC + K*CA*CB*V) / V;
CDp = (-F*CD + K*CA*CB*V) / V;
Tp = (U*A*(Tr-T)/(V*dL) - FiA*CiA*CpA*(T-TiA) - FiB*CiB*CpB*(T-TiB) + dH*K*CA*CB*V)
/ (V*Cp);
Trp = (Fr*dr*Cpr*(Tir-Tr) + U*A*(T-Tr)) / (Vr*dr*Cpr);
Php = (FiA*pHA + FiB*pHB - 2*F*Ph - K*CA*CB) / V;

%Integrar por Euler
CA = CA + CAp*dt;
CB = CB + CBp*dt;
CC = CC + CCp*dt;
CD = CD + CDp*dt;
T = T + Tp*dt;
Tr = Tr + Trp*dt;
Ph = Ph + Php*dt;

% CONTROLADOR OPTIMAL
X = [CA CB CC CD T Tr Ph]';
interr1 = interr1 + (CC-SPc)*dt;
interr2 = interr2 + (CD-SPc)*dt;
interr3 = interr3 + (T-SPt)*dt;
uCiA = -KK(1,:) * [X; interr1];
uCiB = -KK(2,:) * [X; interr2];
uTir = -KK(3,:) * [X; interr3];

%Saturacion del Actuador
if uCiA<0
    uCiA=0;
end
if uCiA>0.5
    uCiA=0.5;
end
if uCiB<0
    uCiB=0;
end
if uCiB>0.5
    uCiB=0.5;
end
if uTir<275
    uTir=275;
end
if uTir>350
    uTir=350;
end
CiA = uCiA;
CiB = uCiB;
Tir = uTir;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

n=n+1;
end

figure(1)
subplot(211)
plot(tiempo, mCA)
grid on
title('Concentracion A: Hidroxido de Sodio')
subplot(212)
plot(tiempo, mCB)
grid on

```

```

    title('Concentracion B: Acetato de Etilo')

figure(2)
subplot(211)
    plot(tiempo, mCC)
    hold on
    plot(tiempo, mSPc, 'k')
    grid on
    title('Concentracion C: Acetato de Sodio')
subplot(212)
    plot(tiempo, mCD)
    hold on
    plot(tiempo, mSPc, 'k')
    grid on
    title('Concentracion D: Etanol')

figure(3)
subplot(311)
    plot(tiempo, mT)
    title('Temperatura dentro del Reactor')
    hold on
    plot(tiempo, mSPT, 'k')
    grid on
subplot(312)
    plot(tiempo, mTr)
    grid on
    title('Temperatura en la Camisa de Refrigeracion')
subplot(313)
    plot(tiempo, mpH)
    grid on
    title('Nivel de pH en el Reactor')

figure(4)
subplot(311)
    plot(tiempo, mCiA)
    grid on
    title('Concentracion A Entrada')
subplot(312)
    plot(tiempo, mCiB)
    grid on
    title('Concentracion B Entrada')
subplot(313)
    plot(tiempo, mTir)
    title('Temperatura Refrigerante Entrada')
    grid on

figure(5)
subplot(311)
    plot(tiempo, mCC)
    hold on
    plot(tiempo, mSPc, 'k')
    grid on
    title('Concentracion C: Acetato de Sodio')
subplot(312)
    plot(tiempo, mCD)
    hold on
    plot(tiempo, mSPc, 'k')
    grid on
    title('Concentracion D: Etanol')
subplot(313)
    plot(tiempo, mT)
    title('Temperatura dentro del Reactor')
    hold on
    plot(tiempo, mSPT, 'k')
    grid on

```

NC Estatico Patron1.m

```

%-----
% Tesis : "Diseño de un Neurocontrolador Dinámico (DBP) aplicado a un
% Reactor Químico Continuo (CSTR)"
%
% NEUROCONTROLADOR ESTATICO APLICADO A UN REACTOR CSTR

```

```

%
% Algoritmo de RetroPropagacion de Errores
% Entrenamiento tipo PATRON - UNA Condicion Inicial
%=====

clear all
close all
clc
disp('RED NEURONAL - ENTRENAMIENTO')
disp(' ')

% ESCALAMIENTO y DEESCALAMIENTO:
% (Y = escM * X + escB) en funcion al rango de saturacion
%Escalar el Error
escM1 = 2/(0.25-(-0.25)); escB1 = 1-0.25*escM1;      %(Cc-refCc),(Cd-refCd)
escM2 = 2/(20-(-20));   escB2 = 1-20*escM2;        %(T-refT)
%Entrada a la red
escM3 = 6/(0.5-(-0.0)); escB3 = 3-0.5*escM3;       %(Ca,Cb,Cc,Cd)
escM4 = 6/(313-(296));  escB4 = 3-313*escM4;       %(T)
escM5 = 6/(350-(275));  escB5 = 3-350*escM5;       %(Tr)
escM6 = 6/(14-(9));     escB6 = 3-14*escM6;        %(pH)
%Salida hacia actuador
escM7 = (0.5-(0))/1.8;  escB7 = 0.5-0.9*escM7;     %CiA, CiB
escM8 = (350-275)/1.8;  escB8 = 350-0.9*escM8;     %Tir

%nm = input('Neuronas en Capas Intermedias : ');
%eta = input('Introducir ratio de aprendizaje v, w: ');
eta = 0.0000000;
%etaa = input('Introducir ratio de aprendizaje inclinacion a : ');
etaa = 0.000000;
%etac = input('Introducir ratio de aprendizaje centro c (cero) : ');
etac = 0.000000;
%contmax = input('Numero Maximo de Iteraciones : ');
contmax = 2;
%errormax = input('Error Maximo Aceptable : ');
errormax = 0.1;

%CONSTANTES
ndata = 3000; %cantidad de datos
ne = 3;      %Entradas
nm = 3;      %Neuronas
ns = 3;      %Salidas

resp = menu('Usar Pesos de file "pesosNCEP1.mat","SI","NO');
if resp == 1
    load pesosNCEP1.mat
    [aux1,NumNeuronas] = size(v);
    if NumNeuronas ~= nm
        disp('Numero Incorrecto de Neuronas, debe usar...');
        NumNeuronas
        break
    end
else
    v = 0.5*randn(ne,nm); %valores
    w = 0.5*randn(nm,ns); %iniciales
    c = zeros(nm,1);
    a = ones(nm,1);
end

%Referencia: ref = [Cc;Cd;T]
ref = [0.25; 0.25; 304];
Ydeseada = zeros(ns,1);

%Tiempo y Error
dt = 0.1; t=0;
cont = 1;
Nini = 1;
errfin = 2^999;
ERROR = errfin;

% ENTRENAMIENTO DE LA RED NEURONAL

while( (ERROR > errormax) & (cont < contmax) )

```

```

for ini=1:Nini

Ja = 0;

%INICIALIZAR CONSTANTES Y VARIABLES
NC_Inicializacion
%CONDICIONES INICIALES
CA = 0.10;      %Concentración de material A a la salida [mol]
CB = 0.40;      %Concentración de material B a la salida [mol]
CC = 0.10;      %Concentración de material C a la salida [mol]
CD = 0.40;      %Concentración de material D a la salida [mol]
T = 309;        %Temperatura en el reactor a la salida      [°K]
Tr = 304;       %Temperatura en el refrigerante a la salida [°K]
Ph = 1;         %Variable auxiliar para determinar el pH
x = [0; 0; 0];
t = 0;
control = [0;0;0];
controlK_1 = [CiA;CiB;Tir];

for k = 1:ndata-1

    Err(1,1) = escM1*(CC-ref(1))+escB1;      %CC
    Err(2,1) = escM1*(CD-ref(2))+escB1;      %CD
    Err(3,1) = escM2*(T-ref(3))+escB2;      %T

    %ENTRADA a la Red : Error Escalado
    in_red(1,1) = Err(1);
    in_red(2,1) = Err(2);
    in_red(3,1) = Err(3);

    %Red Neuronal
    m = v'*in_red;
    n = 2.0./(1 + exp(-(m-c)./a)) - 1;      %Sigmoidea
    %n = exp(-(m-c).^2)./a);                %Gauseana
    out_red = w'*n;

    y = Err;

    %SALIDA: Desescalamiento y Saturacion
    control = [escM7*out_red(1)+escB7; escM7*out_red(2)+escB7;
escM8*out_red(3)+escB8];
    control = 0.1*controlK_1 + control;
    if control(1)>0.5; control(1) = 0.5; end
    if control(1)<0; control(1) = 0; end
    if control(2)>0.5; control(2) = 0.5; end
    if control(2)<0; control(2) = 0; end
    if control(3)>350; control(3) = 350; end
    if control(3)<275; control(3) = 275; end
    controlK_1 = control;

    CiA = control(1); CiB = control(2); Tir = control(3);

    %MODELO MATEMATICO DEL SISTEMA

    %Terminos auxiliares
    K = Ko * exp(-Ex/T);
    F = (FiA + FiB)/2; %flujo promedio
    pH = 11 + log10(Ph);
    Cp = CA*CpA + CB*CpB + CC*CpC + CD*CpD;
    dH = hr + (CpC + CpD - CpA - CpB)*(T-Tref);
    %Almacenar datos
    tiempo(k) = t;
    mCA(k) = CA;
    mCB(k) = CB;
    mCC(k) = CC;
    mCD(k) = CD;
    mT(k) = T;
    mTr(k) = Tr;
    mTir(k) = Tir;
    mCiA(k) = CiA;
    mCiB(k) = CiB;
    mpH(k) = pH;
    mSPc(k) = ref(1);
    mSPt(k) = ref(3);

```

```

    estado(k,:) = [CA CB CC CD T Tr pH];
    %Calcular las derivadas del Reactor
    CAp = (FiA*CiA - F*CA - K*CA*CB*V) / V;
    CBp = (FiB*CiB - F*CB - K*CA*CB*V) / V;
    CCp = (-F*CC + K*CA*CB*V) / V;
    CDp = (-F*CD + K*CA*CB*V) / V;
    Tp = (U*A*(Tr-T)/(V*dL) - FiA*CiA*CpA*(T-TiA) - FiB*CiB*CpB*(T-TiB) +
    dH*K*CA*CB*V) / (V*Cp);
    Trp = (Fr*dr*Cpr*(Tir-Tr) + U*A*(T-Tr)) / (Vr*dr*Cpr);
    Php = (FiA*pHA + FiB*pHB - 2*F*Ph - K*CA*CB) / V;
    %Integrar por Euler
    CA = CA + CAp*dt;
    CB = CB + CBp*dt;
    CC = CC + CCp*dt;
    CD = CD + CDp*dt;
    T = T + Tp*dt;
    Tr = Tr + Trp*dt;
    Ph = Ph + Php*dt;
    t = t + dt;
    x = [Err(1); Err(2); Err(3)]; %Nuevo X para el Neurocontrolador

    %Actualizacion de Pesos
    e = y; %error
    dJdw = n*e';
    dndm = (1-n.*n)/2;
    en = (w*e).*(dndm);
    dJdv = (x)*en';
    dnda = ((n.*n-1).*(m-c)./(2*a.*a));
    dndc = ((n.*n-1)./(2.0.*a));
    dJda = (w*e).*dnda;
    dJdc = (w*e).*dndc;
    v = v - eta*dJdv;
    w = w - eta*dJdw;
    c = c - etac*dJdc;
    a = a - etaa*dJda;
    Ja = Ja + e'*e;

end

end

ERROR = Ja

cont = cont + 1;

if ERROR > errfin
    eta=0.1*eta; etaa=0.1*etaa; etac=0.1*etac;
    if eta<0.0000000000001
        break
    end
end
errfin = ERROR;

end

figure(1)
subplot(211)
plot(tiempo, mCA)
grid on
title('Concentracion A: Hidroxido de Sodio')
subplot(212)
plot(tiempo, mCB)
grid on
title('Concentracion B: Acetato de Etilo')

figure(2)
subplot(211)
plot(tiempo, mCC)
hold on
plot(tiempo, mSPc,'r')
grid on
title('Concentracion C: Acetato de Sodio')

```

```

subplot(212)
    plot(tiempo, mCD)
    hold on
    plot(tiempo, mSPc, 'r')
    grid on
    title('Concentracion D: Etanol')

figure(3)
subplot(311)
    plot(tiempo, mT)
    title('Temperatura dentro del Reactor')
    hold on
    plot(tiempo, mSPT, 'r')
    grid on
subplot(312)
    plot(tiempo, mTr)
    grid on
    title('Temperatura en la Camisa de Refrigeracion')
subplot(313)
    plot(tiempo, mpH)
    grid on
    title('Nivel de pH en el Reactor')

figure(4)
subplot(311)
    plot(tiempo, mCC)
    hold on
    plot(tiempo, mSPc, 'r')
    grid on
    title('Concentracion C: Acetato de Sodio')
    axis([0 t+dt 0 0.5])
subplot(312)
    plot(tiempo, mCD)
    hold on
    plot(tiempo, mSPc, 'r')
    grid on
    title('Concentracion D: Etanol')
    axis([0 t+dt 0 0.5])
subplot(313)
    plot(tiempo, mT)
    title('Temperatura dentro del Reactor')
    hold on
    plot(tiempo, mSPT, 'r')
    grid on
    axis([0 t+dt 295 320])

figure(5)
subplot(311)
    plot(tiempo, mCiA)
    grid on
    title('Concentracion A Entrada')
    axis([0 t+dt 0 0.5])
subplot(312)
    plot(tiempo, mCiB)
    grid on
    title('Concentracion B Entrada')
    axis([0 t+dt 0 0.5])
subplot(313)
    plot(tiempo, mTir)
    title('Temperatura Refrigerante Entrada')
    grid on
    axis([0 t+dt 275 350])

%GRABAR PESOS EN ARCHIVO
resp = menu('Grabar Pesos en file "pesosNCEP1.mat", 'SI', 'NO');
if resp == 1
    save pesosNCEP1.mat v w c a
    disp('..OK..')
else
    break
end

```

NC Estatico Modificado1.m

```

%-----
% Tesis : "Diseño de un Neurocontrolador Dinámico (DBP) aplicado a un
% Reactor Químico Continuo (CSTR)"
%
% NEUROCONTROLADOR ESTATICO APLICADO A UN REACTOR CSTR
%
% (SE HACE USO DE DATOS 3 ANTERIORES POR CADA ESTADO)
%
% Algoritmo de RetroPropagacion de Errores
% Entrenamiento tipo PATRON - UNA Condicion Inicial
%=====

clear all
close all
clc
disp('RED NEURONAL - ENTRENAMIENTO')
disp(' ')

% ESCALAMIENTO y DEESCALAMIENTO:
% (Y = escM * X + escB) en funcion al rango de saturacion
%Escalar el Error
escM1 = 2/(0.25-(-0.25)); escB1 = 1-0.25*escM1;      %(Cc-refCc),(Cd-refCd)
escM2 = 2/(20-(-20));   escB2 = 1-20*escM2;        %(T-refT)
%Entrada a la red
escM3 = 6/(0.5-(-0.0)); escB3 = 3-0.5*escM3;      %(Ca,Cb,Cc,Cd)
escM4 = 6/(313-(296));  escB4 = 3-313*escM4;      %(T)
escM5 = 6/(350-(275));  escB5 = 3-350*escM5;      %(Tr)
escM6 = 6/(14-(9));    escB6 = 3-14*escM6;        %(pH)
%Salida hacia actuador
escM7 = (0.5-(0))/1.8;  escB7 = 0.5-0.9*escM7;    %CiA, CiB
escM8 = (350-275)/1.8;  escB8 = 350-0.9*escM8;    %Tir
%nm = input('Neuronas en Capas Intermedias : ');
%eta = input('Introducir ratio de aprendizaje v, w: ');
eta = 0.000;
%etaa = input('Introducir ratio de aprendizaje inclinacion a : ');
etaa = 0.000000;
%etac = input('Introducir ratio de aprendizaje centro c (cero) : ');
etac = 0.000000;
%contmax = input('Numero Maximo de Iteraciones : ');
contmax = 2;
%errormax = input('Error Maximo Aceptable : ');
errormax = 0.1;

%CONSTANTES
ndata = 3000; %cantidad de datos
ne = 9;      %Entradas
nm = 9;      %Neuronas
ns = 3;      %Salidas

resp = menu('Usar Pesos de file "pesosNCM1.mat",'SI','NO');
if resp == 1
    load pesosNCM1.mat
    [aux1,NumNeuronas] = size(v);
    if NumNeuronas ~= nm
        disp('Numero Incorrecto de Neuronas, debe usar...');
        NumNeuronas
        break
    end
else
    v = 5.5*randn(ne,nm); %valores
    w = 5.5*randn(nm,ns); %iniciales
    c = zeros(nm,1);
    a = ones(nm,1);
end

%Referencia: ref = [Cc;Cd;T]
ref = [0.25; 0.25; 304];
Ydeseada = zeros(ns,1);
%Tiempo y Error
dt = 0.1; t=0;
cont = 1;

```

```

Nini = 1;
errfin = 2^999;
ERROR = errfin;

% ENTRENAMIENTO DE LA RED NEURONAL

while( (ERROR > errormax) & (cont < contmax) )

    for ini=1:Nini

        Ja = 0;

        %INICIALIZAR CONSTANTES Y VARIABLES
        NC_Inicializacion
        %CONDICIONES INICIALES
        CA = 0.10;      %Concentración de material A a la salida [mol]
        CB = 0.40;      %Concentración de material B a la salida [mol]
        CC = 0.10;      %Concentración de material C a la salida [mol]
        CD = 0.40;      %Concentración de material D a la salida [mol]
        T = 309;        %Temperatura en el reactor a la salida      [°K]
        Tr = 304;       %Temperatura en el refrigerante a la salida [°K]
        Ph = 1;         %Variable auxiliar para determinar el pH
        x = [0; 0; 0];
        t = 0;
        control = [0;0;0];
        controlK_1 = [CiA;CiB;Tir];

        Ek_0=[0;0;0]; Ek_1=[0;0;0]; Ek_2=[0;0;0]; %Error en Tiempos Anteriores

        for k = 1:ndata-1

            Err(1,1) = escM1*(CC-ref(1))+escB1;      %CC
            Err(2,1) = escM1*(CD-ref(2))+escB1;      %CD
            Err(3,1) = escM2*(T-ref(3))+escB2;      %T

            Ek_2 = Ek_1;
            Ek_1 = Ek_0;
            Ek_0 = Err;
            Ek = [Ek_0; Ek_1; Ek_2];

            %ENTRADA a la Red : Error Escalado
            in_red(1,1) = Ek(1);
            in_red(2,1) = Ek(2);
            in_red(3,1) = Ek(3);
            in_red(4,1) = Ek(4);
            in_red(5,1) = Ek(5);
            in_red(6,1) = Ek(6);
            in_red(7,1) = Ek(7);
            in_red(8,1) = Ek(8);
            in_red(9,1) = Ek(9);

            %Red Neuronal
            m = v'*in_red;
            n = 2.0./(1 + exp(-(m-c)./a)) - 1;      %Sigmoidea
            %n = exp(-(m-c).^2)./a);              %Gauseana
            out_red = w'*n;

            y = Err;

            %SALIDA: Desescalamiento y Saturacion
            control = [escM7*out_red(1)+escB7; escM7*out_red(2)+escB7;
            escM8*out_red(3)+escB8];
            control = 0.1*controlK_1 + control;
            if control(1)>0.5; control(1) = 0.5; end
            if control(1)<0; control(1) = 0; end
            if control(2)>0.5; control(2) = 0.5; end
            if control(2)<0; control(2) = 0; end
            if control(3)>350; control(3) = 350; end
            if control(3)<275; control(3) = 275; end
            controlK_1 = control;

            CiA = control(1); CiB = control(2); Tir = control(3);

```

```

%MODELO MATEMATICO DEL SISTEMA

%Terminos auxiliares
K = Ko * exp(-Ex/T);
F = (FiA + FiB)/2; %flujo promedio
pH = 11 + log10(Ph);
Cp = CA*CpA + CB*CpB + CC*CpC + CD*CpD;
dH = hr + (CpC + CpD - CpA - CpB)*(T-Tref);
%Almacenar datos
tiempo(k) = t;
mCA(k) = CA;
mCB(k) = CB;
mCC(k) = CC;
mCD(k) = CD;
mT(k) = T;
mTr(k) = Tr;
mTir(k) = Tir;
mCiA(k) = CiA;
mCiB(k) = CiB;
mpH(k) = pH;
mSPc(k) = ref(1);
mSPt(k) = ref(3);
estado(k,:) = [CA CB CC CD T Tr pH];
%Calcular las derivadas del Reactor
CAp = (FiA*CiA - F*CA - K*CA*CB*V) / V;
CBp = (FiB*CiB - F*CB - K*CA*CB*V) / V;
CCp = (-F*CC + K*CA*CB*V) / V;
CDp = (-F*CD + K*CA*CB*V) / V;
Tp = (U*A*(Tr-T)/(V*dL) - FiA*CiA*CpA*(T-TiA) - FiB*CiB*CpB*(T-TiB) +
dH*K*CA*CB*V) / (V*Cp);
Trp = (Fr*dr*Cpr*(Tir-Tr) + U*A*(T-Tr)) / (Vr*dr*Cpr);
Php = (FiA*pHA + FiB*pHB - 2*F*Ph - K*CA*CB) / V;
%Integrar por Euler
CA = CA + CAp*dt;
CB = CB + CBp*dt;
CC = CC + CCp*dt;
CD = CD + CDp*dt;
T = T + Tp*dt;
Tr = Tr + Trp*dt;
Ph = Ph + Php*dt;
t = t + dt;
x = [Ek]; %Nuevo X para el Neurocontrolador

%Actualizacion de Pesos
e = y; %error
dJdw = n*e';
dndm = (1-n.*n)/2;
en = (w*e).*(dndm);
dJdv = (x)*en';
dnada = ((n.*n-1).*(m-c)./(2*a.*a));
dnadc = ((n.*n-1)./(2.0.*a));
dJda = (w*e).*dnada;
dJdc = (w*e).*dnadc;
v = v - eta*dJdv;
w = w - eta*dJdw;
c = c - etac*dJdc;
a = a - etaa*dJda;
Ja = Ja + e'*e;

end

end

ERROR = Ja

cont = cont + 1;

if ERROR > errfin
eta=0.1*eta; etaa=0.1*etaa; etac=0.1*etac;
if eta<0.00000000000001
break
end
end

```

```

end
errfin = ERROR;

end

figure(1)
subplot(211)
    plot(tiempo, mCA)
    grid on
    title('Concentracion A: Hidroxido de Sodio')
subplot(212)
    plot(tiempo, mCB)
    grid on
    title('Concentracion B: Acetato de Etilo')

figure(2)
subplot(211)
    plot(tiempo, mCC)
    hold on
    plot(tiempo, mSPc, 'r')
    grid on
    title('Concentracion C: Acetato de Sodio')
subplot(212)
    plot(tiempo, mCD)
    hold on
    plot(tiempo, mSPc, 'r')
    grid on
    title('Concentracion D: Etanol')

figure(3)
subplot(311)
    plot(tiempo, mT)
    title('Temperatura dentro del Reactor')
    hold on
    plot(tiempo, mSPt, 'r')
    grid on
subplot(312)
    plot(tiempo, mTr)
    grid on
    title('Temperatura en la Camisa de Refrigeracion')
subplot(313)
    plot(tiempo, mpH)
    grid on
    title('Nivel de pH en el Reactor')

figure(4)
subplot(311)
    plot(tiempo, mCC)
    hold on
    plot(tiempo, mSPc, 'r')
    grid on
    title('Concentracion C: Acetato de Sodio')
    axis([0 t+dt 0 0.5])
subplot(312)
    plot(tiempo, mCD)
    hold on
    plot(tiempo, mSPc, 'r')
    grid on
    title('Concentracion D: Etanol')
    axis([0 t+dt 0 0.5])
subplot(313)
    plot(tiempo, mT)
    title('Temperatura dentro del Reactor')
    hold on
    plot(tiempo, mSPt, 'r')
    grid on
    axis([0 t+dt 295 320])

figure(5)
subplot(311)
    plot(tiempo, mCiA)
    grid on
    title('Concentracion A Entrada')

```

```

    axis([0 t+dt 0 0.5])
subplot(312)
    plot(tiempo, mCiB)
    grid on
    title('Concentracion B Entrada')
    axis([0 t+dt 0 0.5])
subplot(313)
    plot(tiempo, mTir)
    title('Temperatura Refrigerante Entrada')
    grid on
    axis([0 t+dt 275 350])

%GRABAR PESOS EN ARCHIVO
resp = menu('Grabar Pesos en file "pesosNCM1.mat','SI','NO');
if resp == 1
    save pesosNCM1.mat v w c a
    disp('..OK..')
else
    break
end

```

NC Dinamico DBP1.m

```

%-----
% Tesis : "Diseño de un Neurocontrolador Dinámico (DBP) aplicado a un
% Reactor Químico Continuo (CSTR)"
%
% NEUROCONTROLADOR DINAMICO APLICADO A UN REACTOR CSTR
%
% Dynamic Back Propagation - DBP / Para UNA condicion inicial
%-----
% Entradas : IN = [(CC-refCC) (CD-refCD) (T-refT)]
% Señal de control : [CiA CiB Tir]
% Estados del Sistema :[CA CB CC CD T Tr pH]
%-----

clear all
close all
clc
disp('RED NEURONAL - ENTRENAMIENTO')
disp(' ')

% ESCALAMIENTO y DESESCALAMIENTO:
% (Y = escM * X + escB) en funcion al rango de saturacion
%Entrada
escM1 = 6/(0.25-(-0.25)); escB1 = 3-0.25*escM1;      %(Cc-refCc),(Cd-refCd)
escM2 = 6/(20-(-20)); escB2 = 3-20*escM2;          %(T-refT)
escM3 = 6/(0.02-(-0.02)); escB3 = 3-0.02*escM3;    %(Cap,Cbp,Ccp,Cdp)
escM4 = 6/(0.3-(-0.3)); escB4 = 3-0.3*escM4;      %(Tp)
escM5 = 6/(2-(-2)); escB5 = 3-2*escM5;            %(Trp)
escM6 = 6/(0.01-(-0.01)); escB6 = 3-0.01*escM6;   %(Php)
%Salida
escM7 = (0.5-(0))/1.8; escB7 = 0.5-0.9*escM7;     %CiA, CiB
escM8 = (350-275)/1.8; escB8 = 350-0.9*escM8;     %Tir

%nm = input('Neuronas en Capas Intermedias : ');
%eta = input('Introducir ratio de aprendizaje v, w: ');
eta = 0.0000000000;
%etaa = input('Introducir ratio de aprendizaje inclinacion a : ');
etaa = 0.00000;
%etac = input('Introducir ratio de aprendizaje centro c (cero) : ');
etac = 0.00000;
%contmax = input('Numero Maximo de Iteraciones : ');
contmax = 2;
%errormax = input('Error Maximo Aceptable : ');
errormax = 0.1;

%CONSTANTES
ndata = 3000; %cantidad de datos
ne = 3; %Entradas
nm = 3; %Neuronas
ns = 3; %Salidas

```

```

%RECUPERAR PESOS GRABADOS
resp = menu('Usar Pesos de file "pesosDBP1.mat','SI','NO');
if resp == 1
    load pesosDBP1.mat
    [aux1,NumNeuronas] = size(v);
    if NumNeuronas ~= nm
        disp('Numero Incorrecto de Neuronas, debe usar...');
        NumNeuronas
        break
    end
else
    v = 0.5*randn(ne,nm)    %valores
    w = 0.5*randn(nm,ns)    %iniciales
    c = zeros(nm,1);
    a = ones(nm,1);
end

%Referencia: ref = [Cc;Cd;T]
ref = [0.25; 0.25; 304];
r = zeros(ne,1);        % Vector de salida deseado
Ydeseada = ones(ndata,ne) * diag(r);
% Ydeseada = xref;

%Tiempo y Error
dt = 0.1; t=0;
cont = 1;
Nini = 1;
errfin = 2^999;
ERROR = errfin;

% ENTRENAMIENTO DE LA RED NEURONAL

while( (ERROR > errormax) & (cont < contmax) )

    for ini=1:Nini

        ersum2 = zeros(ns,1);
        dJdw = 0;
        dJdv = 0;
        dx1dw_t = zeros(nm,ns);
        dx2dw_t = zeros(nm,ns);
        dx3dw_t = zeros(nm,ns);
        dx1dv_t = zeros(ne,nm);
        dx2dv_t = zeros(ne,nm);
        dx3dv_t = zeros(ne,nm);
        dx1dc_t = zeros(nm,1);
        dx2dc_t = zeros(nm,1);
        dx3dc_t = zeros(nm,1);
        dx1da_t = zeros(nm,1);
        dx2da_t = zeros(nm,1);
        dx3da_t = zeros(nm,1);
        dJdw_t = zeros(nm,ns);
        dJdv_t = zeros(ne,nm);
        dJdc_t = zeros(nm,1);
        dJda_t = zeros(nm,1);

        %INICIALIZAR CONSTANTES Y VARIABLES
        NC_Inicializacion
        %CONDICIONES INICIALES
        CA = 0.10;    %Concentración de material A a la salida [mol]
        CB = 0.40;    %Concentración de material B a la salida [mol]
        CC = 0.10;    %Concentración de material C a la salida [mol]
        CD = 0.40;    %Concentración de material D a la salida [mol]
        T = 309;      %Temperatura en el reactor a la salida    [°K]
        Tr = 304;     %Temperatura en el refrigerante a la salida [°K]
        Ph = 1;       %Variable auxiliar para determinar el pH
        x_ini = [CC; CD; T];
        x = x_ini;
        t = 0;
        control = [0;0;0];
        controlK_1 = [CiA;CiB;Tir];

        for k = 1:ndata-1

```

```

%ENTRADA a la Red : Error Escalado
in_red(1,1) = escM1*(x(1)-ref(1))+escB1;      %CC-refC
in_red(2,1) = escM1*(x(2)-ref(2))+escB1;      %CD-refD
in_red(3,1) = escM2*(x(3)-ref(3))+escB2;      %T-refT

%Red Neuronal
m = v'*in_red;
n = 2.0./(1 + exp(-(m-c)./a)) - 1;      %Sigmoidea
%n = exp(-((m-c).^2)./a);      %Gauseana
out_red = w'*n;
%SALIDA: Desescalamiento y Saturacion
control = [escM7*out_red(1)+escB7; escM7*out_red(2)+escB7;
escM8*out_red(3)+escB8];
control = 0.1*controlK_1 + control;
if control(1)>0.5; control(1) = 0.5; end
if control(1)<0; control(1) = 0; end
if control(2)>0.5; control(2) = 0.5; end
if control(2)<0; control(2) = 0; end
if control(3)>350; control(3) = 350; end
if control(3)<275; control(3) = 275; end
controlK_1 = control;

CiA = control(1); CiB = control(2); Tir = control(3);

%DERIVADAS PARCIALES de la Red Neuronal
% Jacobiano = dX(k+1)/dX(k)
jacob(1,1) = 1 - F/V;
jacob(1,2) = 0;
jacob(1,3) = Ko*Ex/T^2*exp(-Ex/T)*CA*CB;
jacob(2,1) = 0;
jacob(2,2) = 1 - F/V;
jacob(2,3) = Ko*Ex/T^2*exp(-Ex/T)*CA*CB;
jacob(3,1) = -(U*A*(Tr-T)/V/dL-FiA*CiA*CpA*(T-TiA)-FiB*CiB*CpB*(T-
TiB)+(hr+(CpC+CpD-CpA-CpB)*(T-Tref))*Ko*exp(-
Ex/T)*CA*CB*V)/V/(CA*CpA+CB*CpB+CC*CpC+CD*CpD)^2*CpC;
jacob(3,2) = -(U*A*(Tr-T)/V/dL-FiA*CiA*CpA*(T-TiA)-FiB*CiB*CpB*(T-
TiB)+(hr+(CpC+CpD-CpA-CpB)*(T-Tref))*Ko*exp(-
Ex/T)*CA*CB*V)/V/(CA*CpA+CB*CpB+CC*CpC+CD*CpD)^2*CpD;
jacob(3,3) = 1 + (-U*A/V/dL-FiA*CiA*CpA-FiB*CiB*CpB+(CpC+CpD-CpA-CpB)*Ko*exp(-
Ex/T)*CA*CB*V+(hr+(CpC+CpD-CpA-CpB)*(T-Tref))*Ko*Ex/T^2*exp(-
Ex/T)*CA*CB*V)/V/(CA*CpA+CB*CpB+CC*CpC+CD*CpD);
% dxdu = dX(k+1)/dU(k)
dxdu(1,1) = 0;
dxdu(1,2) = 0;
dxdu(1,3) = 0;
dxdu(2,1) = 0;
dxdu(2,2) = 0;
dxdu(2,3) = 0;
dxdu(3,1) = -FiA*CpA*(T-TiA)/V/(CA*CpA+CB*CpB+CC*CpC+CD*CpD);
dxdu(3,2) = -FiB*CpB*(T-TiB)/V/(CA*CpA+CB*CpB+CC*CpC+CD*CpD);
dxdu(3,3) = 0.01;
%dU(k)/dW
dndm = diag(2.0./(1+exp(-(m+c)./a)).^2./a.*exp(-(m+c)./a));
%dndm = diag((1 - n.*n)./(2*a));      %Sigmoidea
%dndm = diag(-2.*(m-c)./a.*exp(-(m-c).^2./a));      %Gauseana
dudx = w'*dndm*v';
dudw_s = [n];
dudv_s1 = in_red*w(:,1)'*dndm;
dudv_s2 = in_red*w(:,2)'*dndm;
dudv_s3 = in_red*w(:,3)'*dndm;
dndc = -2./(1+exp(-(m+c)./a)).^2./a.*exp(-(m+c)./a);
%dndc = ((n.*n-1)./(2.0.*a));      %
dudc_s = [dndc.* w(:,1) dndc.* w(:,2) dndc.* w(:,3)];
dnda = 2.0./(1+exp(-(m+c)./a)).^2.*(m-c)./a.^2.*exp(-(m+c)./a);
%dnda = ((n.*n-1).*(m-c)./(2*a.*a));      %
duda_s = [dnda.* w(:,1) dnda.* w(:,2) dnda.* w(:,3)]; ;
jacob_t = dxdu*dudx + jacob;

%MODELO MATEMATICO DEL SISTEMA

%Terminos auxiliares
K = Ko * exp(-Ex/T);

```

```

F = (FiA + FiB)/2; %flujo promedio
pH = ll + log10(Ph);
Cp = CA*CpA + CB*CpB + CC*CpC + CD*CpD;
dH = hr + (CpC + CpD - CpA - CpB)*(T-Tref);
%Almacenar datos
tiempo(k) = t;
mCA(k) = CA;
mCB(k) = CB;
mCC(k) = CC;
mCD(k) = CD;
mT(k) = T;
mTr(k) = Tr;
mTir(k) = Tir;
mCiA(k) = CiA;
mCiB(k) = CiB;
mpH(k) = pH;
mSPc(k) = ref(1);
mSPt(k) = ref(3);
estado(k,:) = [CA CB CC CD T Tr pH];
%Calcular las derivadas del Reactor
CAp = (FiA*CiA - F*CA - K*CA*CB*V) / V;
CBp = (FiB*CiB - F*CB - K*CA*CB*V) / V;
CCp = (-F*CC + K*CA*CB*V) / V;
CDp = (-F*CD + K*CA*CB*V) / V;
Tp = (U*A*(Tr-T)/(V*dL) - FiA*CiA*CpA*(T-TiA) - FiB*CiB*CpB*(T-TiB) +
dH*K*CA*CB*V) / (V*Cp);
Trp = (Fr*dr*Cpr*(Tir-Tr) + U*A*(T-Tr)) / (Vr*dr*Cpr);
Php = (FiA*pHA + FiB*pHB - 2*F*Ph - K*CA*CB) / V;
%Integrar por Euler
CA = CA + CAp*dt;
CB = CB + CBp*dt;
CC = CC + CCp*dt;
CD = CD + CDp*dt;
T = T + Tp*dt;
Tr = Tr + Trp*dt;
Ph = Ph + Php*dt;
t = t + dt;
x = [CC; CD; T];

%Actualizacion de Derivadas en la Red Neuronal
dxldw_t = [dxdu(1,1).*dudw_s dxdu(1,2).*dudw_s dxdu(1,3).*dudw_s] +
jacob_t(1,1).*dxldw_t + jacob_t(1,2).*dx2dw_t + jacob_t(1,3).*dx3dw_t;
dx2dw_t = [dxdu(2,1).*dudw_s dxdu(2,2).*dudw_s dxdu(2,3).*dudw_s] +
jacob_t(2,1).*dxldw_t + jacob_t(2,2).*dx2dw_t + jacob_t(2,3).*dx3dw_t;
dx3dw_t = [dxdu(3,1).*dudw_s dxdu(3,2).*dudw_s dxdu(3,3).*dudw_s] +
jacob_t(3,1).*dxldw_t + jacob_t(3,2).*dx2dw_t + jacob_t(3,3).*dx3dw_t;
dxldv_t = dxdu(1,1).*dudv_s1 + dxdu(1,2).*dudv_s2 + dxdu(1,3).*dudv_s3 +
jacob_t(1,1).*dxldv_t + jacob_t(1,2).*dx2dv_t + jacob_t(1,3).*dx3dv_t;
dx2dv_t = dxdu(2,1).*dudv_s1 + dxdu(2,2).*dudv_s2 + dxdu(2,3).*dudv_s3 +
jacob_t(2,1).*dxldv_t + jacob_t(2,2).*dx2dv_t + jacob_t(2,3).*dx3dv_t;
dx3dv_t = dxdu(3,1).*dudv_s1 + dxdu(3,2).*dudv_s2 + dxdu(3,3).*dudv_s3 +
jacob_t(3,1).*dxldv_t + jacob_t(3,2).*dx2dv_t + jacob_t(3,3).*dx3dv_t;
dxl1dc_t = dxdu(1,1).*dudc_s(:,1) + dxdu(1,2).*dudc_s(:,2) + dxdu(1,3).*dudc_s(:,3)
+ jacob_t(1,1).*dxl1dc_t + jacob_t(1,2).*dx2dc_t + jacob_t(1,3).*dx3dc_t;
dx2dc_t = dxdu(2,1).*dudc_s(:,1) + dxdu(2,2).*dudc_s(:,2) + dxdu(2,3).*dudc_s(:,3)
+ jacob_t(2,1).*dxl1dc_t + jacob_t(2,2).*dx2dc_t + jacob_t(2,3).*dx3dc_t;
dx3dc_t = dxdu(3,1).*dudc_s(:,1) + dxdu(3,2).*dudc_s(:,2) + dxdu(3,3).*dudc_s(:,3)
+ jacob_t(3,1).*dxl1dc_t + jacob_t(3,2).*dx2dc_t + jacob_t(3,3).*dx3dc_t;
dxl1da_t = dxdu(1,1).*duda_s(:,1) + dxdu(1,2).*duda_s(:,2) + dxdu(1,3).*duda_s(:,3)
+ jacob_t(1,1).*dxl1da_t + jacob_t(1,2).*dx2da_t + jacob_t(1,3).*dx3da_t;
dx2da_t = dxdu(2,1).*duda_s(:,1) + dxdu(2,2).*duda_s(:,2) + dxdu(2,3).*duda_s(:,3)
+ jacob_t(2,1).*dxl1da_t + jacob_t(2,2).*dx2da_t + jacob_t(2,3).*dx3da_t;
dx3da_t = dxdu(3,1).*duda_s(:,1) + dxdu(3,2).*duda_s(:,2) + dxdu(3,3).*duda_s(:,3)
+ jacob_t(3,1).*dxl1da_t + jacob_t(3,2).*dx2da_t + jacob_t(3,3).*dx3da_t;

%Actualizacion del Error
out_des = Ydeseada(k+1,:);
out_des = out_des';
erJ = (in_red - out_des);
erJ = [1 1 1]' .* (in_red - out_des).^1;
dJdw_t = dJdw_t + erJ(1,1).*dxldw_t + erJ(2,1).*dx2dw_t + erJ(3,1).*dx3dw_t;
dJdv_t = dJdv_t + erJ(1,1).*dxldv_t + erJ(2,1).*dx2dv_t + erJ(3,1).*dx3dv_t;
dJdc_t = dJdc_t + erJ(1,1).*dxl1dc_t + erJ(2,1).*dx2dc_t + erJ(3,1).*dx3dc_t;

```

```

dJda_t = dJda_t + erJ(1,1).*dx1da_t + erJ(2,1).*dx2da_t + erJ(3,1).*dx3da_t;

ersum2 = ersum2 + er.^2;
if( (abs(x(1,1)) > 0.5) | (abs(x(2,1)) > 0.5) | (abs(x(3,1)) > 350) |
(abs(x(1,1)) < 0) | (abs(x(2,1)) < 0) | (abs(x(3,1)) < 275) )
    %break;
end
if( (control(1) > 0.5) | (control(1) < 0) | (control(2) > 0.5) | (control(2) <
0) | (control(3) > 350) | (control(3) < 275) )
    %break;
end

end

end

dJdw_t = dJdw_t/k;
dJdv_t = dJdv_t/k;
dJdc_t = dJdc_t/k;
dJda_t = dJda_t/k;
dw = dJdw_t;
dv = dJdv_t;
dc = dJdc_t;
da = dJda_t;

w = w - eta*dw;
v = v - eta*dv;
c = c - etac*dc;
a = a - etaa*da;

ERROR = sum(ersum2)*ndata/1000
cont = cont + 1;

if ERROR > errfin
    %break
    eta=0.1*eta; etaa=0.1*etaa; etac=0.1*etac;
end
errfin = ERROR;

end

figure(1)
subplot(211)
plot(tiempo, mCA)
grid on
title('Concentracion A: Hidroxido de Sodio')
subplot(212)
plot(tiempo, mCB)
grid on
title('Concentracion B: Acetato de Etilo')

figure(2)
subplot(211)
plot(tiempo, mCC)
hold on
plot(tiempo, mSPc, 'r')
grid on
title('Concentracion C: Acetato de Sodio')
subplot(212)
plot(tiempo, mCD)
hold on
plot(tiempo, mSPc, 'r')
grid on
title('Concentracion D: Etanol')

figure(3)
subplot(311)
plot(tiempo, mT)
title('Temperatura dentro del Reactor')

```

```

    hold on
    plot(tiempo, mSPt, 'r')
    grid on
    subplot(312)
    plot(tiempo, mTr)
    grid on
    title('Temperatura en la Camisa de Refrigeracion')
    subplot(313)
    plot(tiempo, mpH)
    grid on
    title('Nivel de pH en el Reactor')

figure(4)
subplot(311)
    plot(tiempo, mCC)
    hold on
    plot(tiempo, mSPc, 'r')
    grid on
    title('Concentracion C: Acetato de Sodio')
    axis([0 t+dt 0 0.5])
subplot(312)
    plot(tiempo, mCD)
    hold on
    plot(tiempo, mSPc, 'r')
    grid on
    title('Concentracion D: Etanol')
    axis([0 t+dt 0 0.5])
subplot(313)
    plot(tiempo, mT)
    title('Temperatura dentro del Reactor')
    hold on
    plot(tiempo, mSPt, 'r')
    grid on
    axis([0 t+dt 295 320])

figure(5)
subplot(311)
    plot(tiempo, mCiA)
    grid on
    title('Concentracion A Entrada')
    axis([0 t+dt 0 0.5])
subplot(312)
    plot(tiempo, mCiB)
    grid on
    title('Concentracion B Entrada')
    axis([0 t+dt 0 0.5])
subplot(313)
    plot(tiempo, mTir)
    title('Temperatura Refrigerante Entrada')
    grid on
    axis([0 t+dt 275 350])

%GRABAR PESOS EN ARCHIVO
resp = menu('Grabar Pesos en file "pesosDBP1.mat", 'SI', 'NO');
if resp == 1
    save pesosDBP1.mat v w c a
    disp('..OK..')
else
    break
end

```

ReactorModeloPID2.m

```

%-----
%
%           REACTOR QUIMICO AGITADO CONTINUO
%           Modelo Matematico Controlado con PID Discreto
%-----
% Reaccion de Saponificacion de Hidroxido de Sodio (A)
% y Acetato de Etilo (B), se obtiene : Acetato de Sodio (C)
% y Etanol (D)
%-----
%           ---- Para VARIAS Condiciones Iniciales ----
%

```

```

%-----
clear all
close all
clc

%=====
%                               MODELO MATEMATICO
%-----

%Declaracion de Constantes
Ex = 2407.2; %Energía activación y Const. Botzmann
Ko = 63380; %Fact.Esterico * Frec.Colisiones [mol^n/(seg*m^3)]
V = 7.9; %Volumen del tanque [m^3]
Vr = 8; %Volumen de la camisa de refrigeración [m^3]
A = 24; %Superficie o área para la transferencia de calor [m^2]
Cpr = 4.19; %Calor especifico del refrigerante (agua) [kJ/(Kg*°K)]
dr = 1000; %Densidad del refrigerante(agua) [Kg/m3]
dL = 76; %Densidad del liquido en el tanque [Kg/m3]
pHA = 13.3; %Valor de pH del material A
pHB = 7.10; %Valor de pH del material B
CpA = 3.26; %Capacidad calorífica del material A [kJ/(Kg*°K)]
CpB = 2.02; %Capacidad calorífica del material B [kJ/(Kg*°K)]
CpC = 2.51; %Capacidad calorífica del material C [kJ/(Kg*°K)]
CpD = 3.76; %Capacidad calorífica del material D [kJ/(Kg*°K)]

%Perturbaciones
FiA = 0.2; %Velocidad de flujo molar de A a la entrada [lit/seg]
FiB = 0.2; %Velocidad de flujo molar de B a la entrada [lit/seg]
TiA = 300; %Temperatura del material A en la entrada[°K]
TiB = 300; %Temperatura del material B en la entrada[°K]
Fr = 0.40; %Flujo del líquido refrigerante [lit/seg]

%Inicializacion de Señal de Control
Tir = 300; %Temperatura del refrigerante a la entrada [°K]
CiA = 0.2; %Concentración de material A a la entrada[mol]
CiB = 0.2; %Concentración de material B a la entrada[mol]

%Inicializacion de Variables (Condiciones Iniciales)
%CA = 0.05; %Concentración de material A a la salida [mol]
%CB = 0.10; %Concentración de material B a la salida [mol]
%CC = 0.15; %Concentración de material C a la salida [mol]
%CD = 0.10; %Concentración de material D a la salida [mol]
%T = 300; %Temperatura en el reactor a la salida [°K]
%Tr = 285; %Temperatura en el refrigerante a la salida [°K]
%Ph = 0.01; %Variable auxiliar para determinar el pH

%Terminos auxiliares
%K Constante de velocidad [moln/(seg*m3)]
%F Velocidad de flujo molar a la salida [lit/seg]
%pH Valor de pH dentro del reactor
%U Coeficiente de transferencia de calor [J/(°K*seg*m2)]
%Cp Capacidad calorífica general
%dH Calor desarrollado en la reacción (entalpias) [kJ/C]
%hr Entalpia relativa para una Tref de 300°K

%Calculo de Entalpia referencial (hr)
Tref = 300;
hr = (CpC + CpD - CpA - CpB);

%=====
%                               CONTROLADOR PID
%-----

% PARAMETROS del Controlador PID
Kp1 = 2; Kd1 = 0.05;Ki1 = 0.9; % PID Concentracion C
Kp2 = 2; Kd2 = 0.05;Ki2 = 0.9; % PID Concentracion D
Kp3 = 3; Kd3 = 0.15;Ki3 = 0.8; % PID Temperatura

% SET POINT
SPc = 0.26; %concentracion para C y D
SPt = 304; %temperatura en el reactor

```

```

%=====

%Tiempos
ti = 0;
dt = 0.1;
tf = 300;
Nini = 20;
disp('PID DISCRETO (Reactor CSTR) ..... wait !')

% SIMULACION DEL SISTEMA

for ini=1:Nini

    ReactorCondicionesIniciales
    n = 1;
    %CONDICIONES INICIALES del Controlador PID
    uCa=0;   uCb=0;   uTir=0;   %Señal de control
    ECa=0;   ECb=0;   ETir=0;   %Error E(k)
    E1Ca=0;  E1Cb=0;  E1Tir=0;  %Error E(k-1)
    E2Ca=0;  E2Cb=0;  E2Tir=0;  %Error E(k-2)

for t=ti:dt:tf

    %Terminos auxiliares
    K = Ko * exp(-Ex/T);
    F = (FiA + FiB)/2; %flujo promedio
    pH = 11 + log10(Ph);
    U = 19.19/A;
    Cp = CA*CpA + CB*CpB + CC*CpC + CD*CpD;
    dH = hr + (CpC + CpD - CpA - CpB)*(T-Tref);

    %Almacenar datos
    tiempo(n) = t;
    mSPc(n) = SPc;
    mSPt(n) = SPt;
    mCA(n,ini) = CA;
    mCB(n,ini) = CB;
    mCC(n,ini) = CC;
    mCD(n,ini) = CD;
    mT(n,ini) = T;
    mTr(n,ini) = Tr;
    mpH(n,ini) = pH;
    mTir(n,ini) = Tir;
    mCiA(n,ini) = CiA;
    mCiB(n,ini) = CiB;

    %Calcular las derivadas
    CAp = (FiA*CiA - F*CA - K*CA*CB*V) / V;
    CBp = (FiB*CiB - F*CB - K*CA*CB*V) / V;
    CCp = (-F*CC + K*CA*CB*V) / V;
    CDp = (-F*CD + K*CA*CB*V) / V;
    Tp = (U*A*(Tr-T)/(V*dL) - FiA*CiA*CpA*(T-TiA) - FiB*CiB*CpB*(T-TiB) + dH*K*CA*CB*V)
/ (V*Cp);
    Trp = (Fr*dr*Cpr*(Tir-Tr) + U*A*(T-Tr)) / (Vr*dr*Cpr);
    Php = (FiA*pHA + FiB*pHB - 2*F*Ph - K*CA*CB) / V;

    %Integrar por Euler
    CA = CA + CAp*dt;
    CB = CB + CBp*dt;
    CC = CC + CCp*dt;
    CD = CD + CDp*dt;
    T = T + Tp*dt;
    Tr = Tr + Trp*dt;
    Ph = Ph + Php*dt;

    %
    PID
    %Controlador PID DISCRETO para CONCENTRACION INICIAL A
    E2Ca = E1Ca;
    E1Ca = ECa;
    ECa = SPc - CC;
    uCa = uCa + (Kp1+Kil+Kd1)*ECa - (Kp1+2*Kd1)*E1Ca - Kd1*E2Ca;

    %Controlador PID DISCRETO para CONCENTRACION INICIAL B

```

```

E2Cb = E1Cb;
E1Cb = ECb;
ECb = SPc - CD;
uCb = uCb + (Kp2+Ki2+Kd2)*ECb - (Kp2+2*Kd2)*E1Cb - Kd2*E2Cb;

%Controlador PID DISCRETO para TEMPERATURA INICIAL REFRIG
E2Tir = E1Tir;
E1Tir = ETir;
ETir = SPt - T;
uTir = uTir + (Kp3+Ki3+Kd3)*ETir - (Kp3+2*Kd3)*E1Tir - Kd3*E2Tir;

%Saturacion del Actuador
if uCa<0
    uCa=0;
end
if uCa>0.5
    uCa=0.5;
end
if uCb<0
    uCb=0;
end
if uCb>0.5
    uCb=0.5;
end
if uTir<275
    uTir=275;
end
if uTir>350
    uTir=350;
end
CiA = uCa;
CiB = uCb;
Tir = uTir;

%%%%%%%%

n=n+1;
end
end

figure(1)
subplot(211)
plot(tiempo, mCA)
grid on
title('Concentracion A: Hidroxido de Sodio')
subplot(212)
plot(tiempo, mCB)
grid on
title('Concentracion B: Acetato de Etilo')

figure(2)
subplot(211)
plot(tiempo, mCC)
hold on
plot(tiempo, mSPc, 'k')
grid on
title('Concentracion C: Acetato de Sodio')
subplot(212)
plot(tiempo, mCD)
hold on
plot(tiempo, mSPc, 'k')
grid on
title('Concentracion D: Etanol')

figure(3)
subplot(311)
plot(tiempo, mT)
title('Temperatura dentro del Reactor')
hold on
plot(tiempo, mSPT, 'k')
grid on
subplot(312)
plot(tiempo, mTr)

```

```

    grid on
    title('Temperatura en la Camisa de Refrigeracion')
subplot(313)
    plot(tiempo, mpH)
    grid on
    title('Nivel de pH en el Reactor')

figure(4)
subplot(311)
    plot(tiempo, mCiA)
    grid on
    title('Concentracion A Entrada')
    axis([0 tf 0 0.5])
subplot(312)
    plot(tiempo, mCiB)
    grid on
    title('Concentracion B Entrada')
    axis([0 tf 0 0.5])
subplot(313)
    plot(tiempo, mTir)
    title('Temperatura Refrigerante Entrada')
    grid on
    axis([0 tf 275 350])

figure(5)
subplot(311)
    plot(tiempo, mCC)
    hold on
    plot(tiempo, mSPc, 'k')
    grid on
    title('Concentracion C: Acetato de Sodio')
    axis([0 tf 0 0.5])
subplot(312)
    plot(tiempo, mCD)
    hold on
    plot(tiempo, mSPc, 'k')
    grid on
    title('Concentracion D: Etanol')
    axis([0 tf 0 0.5])
subplot(313)
    plot(tiempo, mT)
    title('Temperatura dentro del Reactor')
    hold on
    plot(tiempo, mSPT, 'k')
    grid on
    axis([0 tf 295 315])

```

ReactorModeloOPTIMAL2.m

```

%-----
%          REACTOR QUIMICO AGITADO CONTINUO
%          Modelo Matematico Controlado con CONTROL OPTIMAL
%-----
% Reaccion de Saponificacion de Hidroxido de Sodio (A)
% y Acetato de Etilo (B), se obtiene : Acetato de Sodio (C)
% y Etanol (D)
%-----
%          ---- Para VARIAS Condiciones Iniciales ----
%-----

clear all
close all
clc

%=====
%          MODELO MATEMATICO
%-----

%Declaracion de Constantes
Ex = 2407.2; %Energía activación y Const. Botzmann
Ko = 63380; %Fact.Esterico * Frec.Colisiones [mol^n/(seg*m^3)]

```

```

V = 7.9;           %Volumen del tanque [m^3]
Vr = 8;           %Volumen de la camisa de refrigeración [m^3]
A = 24;           %Superficie o área para la transferencia de calor [m^2]
Cpr = 4.19;       %Calor específico del refrigerante (agua) [kJ/(Kg*°K)]
dr = 1000;       %Densidad del refrigerante (agua) [Kg/m3]
dL = 76;         %Densidad del líquido en el tanque [Kg/m3]
pHA = 13.3;      %Valor de pH del material A
pHB = 7.10;      %Valor de pH del material B
CpA = 3.26;      %Capacidad calorífica del material A [kJ/(Kg*°K)]
CpB = 2.02;      %Capacidad calorífica del material B [kJ/(Kg*°K)]
CpC = 2.51;      %Capacidad calorífica del material C [kJ/(Kg*°K)]
CpD = 3.76;      %Capacidad calorífica del material D [kJ/(Kg*°K)]

```

%Perturbaciones

```

FiA = 0.2;       %Velocidad de flujo molar de A a la entrada [lit/seg]
FiB = 0.2;       %Velocidad de flujo molar de B a la entrada [lit/seg]
TiA = 300;       %Temperatura del material A en la entrada[°K]
TiB = 300;       %Temperatura del material B en la entrada[°K]
Fr = 0.40;       %Flujo del líquido refrigerante [lit/seg]

```

%Inicializacion de Señal de Control

```

Tir = 300;       %Temperatura del refrigerante a la entrada [°K]
CiA = 0.2;       %Concentración de material A a la entrada[mol]
CiB = 0.2;       %Concentración de material B a la entrada[mol]

```

%Inicializacion de Variables (Condiciones Iniciales)

```

CA = 0.30;       %Concentración de material A a la salida [mol]
CB = 0.05;       %Concentración de material B a la salida [mol]
CC = 0.25;       %Concentración de material C a la salida [mol]
CD = 0.25;       %Concentración de material D a la salida [mol]
T = 305;         %Temperatura en el reactor a la salida [°K]
Tr = 350;        %Temperatura en el refrigerante a la salida [°K]
Ph = 10.184;     %Variable auxiliar para determinar el pH

```

%Terminos auxiliares

```

%K Constante de velocidad [moln/(seg*m3)]
%F Velocidad de flujo molar a la salida [lit/seg]
%pH Valor de pH dentro del reactor
%U Coeficiente de transferencia de calor [J/(°K*seg*m2)]
%Cp Capacidad calorífica general
%dH Calor desarrollado en la reacción (entalpias) [kJ/C]
%hr Entalpia relativa para una Tref de 300°K

```

%Calculo de Entalpia referencial (hr)

```

Tref = 300;
hr = (CpC + CpD - CpA - CpB);

```

```

%-----
%                               CONTROLADOR OPTIMAL
%-----

```

% SET POINT

```

Spc = 0.35;      %concentracion para C y D
Spt = 302;       %temperatura en el reactor

```

%Modelo Continuo LINEALIZADO alrededor del Punto de equilibrio

```

MatrizA(1,1) = (-1/2*FiA-1/2*FiB-Ko*exp(-Ex/T)*CB*V)/V;
MatrizA(1,2) = -Ko*exp(-Ex/T)*CA;
MatrizA(1,3) = 0;
MatrizA(1,4) = 0;
MatrizA(1,5) = -Ko*Ex/T^2*exp(-Ex/T)*CA*CB;
MatrizA(1,6) = 0;
MatrizA(1,7) = 0;
MatrizA(2,1) = -Ko*exp(-Ex/T)*CB;
MatrizA(2,2) = (-1/2*FiA-1/2*FiB-Ko*exp(-Ex/T)*CA*V)/V;
MatrizA(2,3) = 0;
MatrizA(2,4) = 0;
MatrizA(2,5) = -Ko*Ex/T^2*exp(-Ex/T)*CA*CB;
MatrizA(2,6) = 0;
MatrizA(2,7) = 0;
MatrizA(3,1) = Ko*exp(-Ex/T)*CB;
MatrizA(3,2) = Ko*exp(-Ex/T)*CA;

```

```

MatrizA(3,3) = (-1/2*FiA-1/2*FiB)/V;
MatrizA(3,4) = 0;
MatrizA(3,5) = Ko*Ex/T^2*exp(-Ex/T)*CA*CB;
MatrizA(3,6) = 0;
MatrizA(3,7) = 0;
MatrizA(4,1) = Ko*exp(-Ex/T)*CB;
MatrizA(4,2) = Ko*exp(-Ex/T)*CA;
MatrizA(4,3) = 0;
MatrizA(4,4) = (-1/2*FiA-1/2*FiB)/V;
MatrizA(4,5) = Ko*Ex/T^2*exp(-Ex/T)*CA*CB;
MatrizA(4,6) = 0;
MatrizA(4,7) = 0;
MatrizA(5,1) = (hr+(CpC+CpD-CpA-CpB)*(T-Tref))*Ko*exp(-
Ex/T)*CB/(CA*CpA+CB*CpB+CC*CpC+CD*CpD)-((1919/100*Tr-1919/100*T)/V/dL-FiA*CiA*CpA*(T-
TiA)-FiB*CiB*CpB*(T-TiB)+(hr+(CpC+CpD-CpA-CpB)*(T-Tref))*Ko*exp(-
Ex/T)*CA*CB*V)/V/(CA*CpA+CB*CpB+CC*CpC+CD*CpD)^2*CpA;
MatrizA(5,2) = (hr+(CpC+CpD-CpA-CpB)*(T-Tref))*Ko*exp(-
Ex/T)*CA/(CA*CpA+CB*CpB+CC*CpC+CD*CpD)-((1919/100*Tr-1919/100*T)/V/dL-FiA*CiA*CpA*(T-
TiA)-FiB*CiB*CpB*(T-TiB)+(hr+(CpC+CpD-CpA-CpB)*(T-Tref))*Ko*exp(-
Ex/T)*CA*CB*V)/V/(CA*CpA+CB*CpB+CC*CpC+CD*CpD)^2*CpB;
MatrizA(5,3) = -((1919/100*Tr-1919/100*T)/V/dL-FiA*CiA*CpA*(T-TiA)-FiB*CiB*CpB*(T-
TiB)+(hr+(CpC+CpD-CpA-CpB)*(T-Tref))*Ko*exp(-
Ex/T)*CA*CB*V)/V/(CA*CpA+CB*CpB+CC*CpC+CD*CpD)^2*CpC;
MatrizA(5,4) = -((1919/100*Tr-1919/100*T)/V/dL-FiA*CiA*CpA*(T-TiA)-FiB*CiB*CpB*(T-
TiB)+(hr+(CpC+CpD-CpA-CpB)*(T-Tref))*Ko*exp(-
Ex/T)*CA*CB*V)/V/(CA*CpA+CB*CpB+CC*CpC+CD*CpD)^2*CpD;
MatrizA(5,5) = (-1919/100/V/dL-FiA*CiA*CpA-FiB*CiB*CpB+(CpC+CpD-CpA-CpB)*Ko*exp(-
Ex/T)*CA*CB*V+(hr+(CpC+CpD-CpA-CpB)*(T-Tref))*Ko*Ex/T^2*exp(-
Ex/T)*CA*CB*V)/V/(CA*CpA+CB*CpB+CC*CpC+CD*CpD);
MatrizA(5,6) = 1919/100/V^2/dL/(CA*CpA+CB*CpB+CC*CpC+CD*CpD);
MatrizA(5,7) = 0;
MatrizA(6,1) = 0;
MatrizA(6,2) = 0;
MatrizA(6,3) = 0;
MatrizA(6,4) = 0;
MatrizA(6,5) = 1919/100/Vr/dr/Cpr;
MatrizA(6,6) = (-Fr*dr*Cpr-1919/100)/Vr/dr/Cpr;
MatrizA(6,7) = 0;
MatrizA(7,1) = -Ko*exp(-Ex/T)*CB/V;
MatrizA(7,2) = -Ko*exp(-Ex/T)*CA/V;
MatrizA(7,3) = 0;
MatrizA(7,4) = 0;
MatrizA(7,5) = -Ko*Ex/T^2*exp(-Ex/T)*CA*CB/V;
MatrizA(7,6) = 0;
MatrizA(7,7) = (-FiA-FiB)/V;

MatrizB(1,1) = FiA/V;
MatrizB(1,2) = 0;
MatrizB(1,3) = 0;
MatrizB(2,1) = 0;
MatrizB(2,2) = FiB/V;
MatrizB(2,3) = 0;
MatrizB(3,1) = 0;
MatrizB(3,2) = 0;
MatrizB(3,3) = 0;
MatrizB(4,1) = 0;
MatrizB(4,2) = 0;
MatrizB(4,3) = 0;
MatrizB(5,1) = -FiA*CpA*(T-TiA)/V/(CA*CpA+CB*CpB+CC*CpC+CD*CpD);
MatrizB(5,2) = -FiB*CpB*(T-TiB)/V/(CA*CpA+CB*CpB+CC*CpC+CD*CpD);
MatrizB(5,3) = 0;
MatrizB(6,1) = 0;
MatrizB(6,2) = 0;
MatrizB(6,3) = Fr/Vr;
MatrizB(7,1) = 0;
MatrizB(7,2) = 0;
MatrizB(7,3) = 0;

```

%Modelo LINEALIZADO con Integrador

```

MatrizAi = zeros(8);
MatrizAi(1:7,1:7) = MatrizA(1:7,1:7);
MatrizAi(8,1) = 1;
MatrizBi = zeros(8,3);

```

```

MatrizBi(1:7,1:3) = MatrizB(1:7,1:3);

%Controlador Optimal
q1 = 0;
q2 = 0;
q3 = 0;
q4 = 0;
q5 = 0;
q6 = 0;
q7 = 0;
q8 = 250;
Q = diag([q1 q2 q3 q4 q5 q6 q7 q8]);

RR = [1];
JJ = are(MatrizAi, MatrizBi*inv(RR)*MatrizBi', Q);
KK = inv(RR)*MatrizBi'*JJ;

%=====

%Tiempos
ti = 0;
dt = 0.1;
tf = 300;
n = 1;
Nini = 20;
disp('CONTROL OPTIMAL (Reactor CSTR) ..... wait !')

%=====

% SIMULACION DEL SISTEMA

for ini=1:Nini

    ReactorCondicionesIniciales
    n = 1;
    %Integral del error
    interr1=0; interr2=0; interr3=0;

for t=ti:dt:tf

    %Terminos auxiliares
    K = Ko * exp(-Ex/T);
    F = (FiA + FiB)/2; %flujo promedio
    pH = 11 + log10(Ph);
    U = 19.19/A;
    Cp = CA*CpA + CB*CpB + CC*CpC + CD*CpD;
    dH = hr + (CpC + CpD - CpA - CpB)*(T-Tref);

    %Almacenar datos
    tiempo(n) = t;
    mSPc(n) = SPc;
    mSPt(n) = SPt;
    mCA(n,ini) = CA;
    mCB(n,ini) = CB;
    mCC(n,ini) = CC;
    mCD(n,ini) = CD;
    mT(n,ini) = T;
    mTr(n,ini) = Tr;
    mpH(n,ini) = pH;
    mTir(n,ini) = Tir;
    mCiA(n,ini) = CiA;
    mCiB(n,ini) = CiB;

    %Calcular las derivadas
    CAp = (FiA*CiA - F*CA - K*CA*CB*V) / V;
    CBp = (FiB*CiB - F*CB - K*CA*CB*V) / V;
    CCp = (-F*CC + K*CA*CB*V) / V;
    CDP = (-F*CD + K*CA*CB*V) / V;

```

```

    Tp = (U*A*(Tr-T)/(V*dL) - FiA*CiA*CpA*(T-TiA) - FiB*CiB*CpB*(T-TiB) + dH*K*CA*CB*V)
  / (V*Cp);
  Trp = (Fr*dr*Cpr*(Tir-Tr) + U*A*(T-Tr)) / (Vr*dr*Cpr);
  Php = (FiA*pHA + FiB*pHB - 2*F*Ph - K*CA*CB) / V;

  %Integrar por Euler
  CA = CA + CAp*dt;
  CB = CB + CBp*dt;
  CC = CC + CCp*dt;
  CD = CD + CDp*dt;
  T = T + Tp*dt;
  Tr = Tr + Trp*dt;
  Ph = Ph + Php*dt;

% CONTROLADOR OPTIMAL

X = [CA CB CC CD T Tr Ph]';
interr1 = interr1 + (CC-SPc)*dt;
interr2 = interr2 + (CD-SPc)*dt;
interr3 = interr3 + (T-SPt)*dt;
uCiA = -KK(1,:) * [X; interr1];
uCiB = -KK(2,:) * [X; interr2];
uTir = -KK(1,:) * [X; interr3];

% Saturacion del Actuador
if uCiA<0
    uCiA=0;
end
if uCiA>0.5
    uCiA=0.5;
end
if uCiB<0
    uCiB=0;
end
if uCiB>0.5
    uCiB=0.5;
end
if uTir<275
    uTir=275;
end
if uTir>350
    uTir=350;
end
CiA = uCiA;
CiB = uCiB;
Tir = uTir;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

n=n+1;
end
end

figure(1)
subplot(211)
plot(tiempo, mCA)
grid on
title('Concentracion A: Hidroxido de Sodio')
subplot(212)
plot(tiempo, mCB)
grid on
title('Concentracion B: Acetato de Etilo')

figure(2)
subplot(211)
plot(tiempo, mCC)
hold on
plot(tiempo, mSPc, 'k')
grid on
title('Concentracion C: Acetato de Sodio')
subplot(212)

```

```

    plot(tiempo, mCD)
    hold on
    plot(tiempo, mSPc, 'k')
    grid on
    title('Concentracion D: Etanol')

figure(3)
subplot(311)
    plot(tiempo, mT)
    title('Temperatura dentro del Reactor')
    hold on
    plot(tiempo, mSPT, 'k')
    grid on
subplot(312)
    plot(tiempo, mTr)
    grid on
    title('Temperatura en la Camisa de Refrigeracion')
subplot(313)
    plot(tiempo, mpH)
    grid on
    title('Nivel de pH en el Reactor')

figure(4)
subplot(311)
    plot(tiempo, mCiA)
    grid on
    title('Concentracion A Entrada')
    axis([0 tf 0 0.5])
subplot(312)
    plot(tiempo, mCiB)
    grid on
    title('Concentracion B Entrada')
    axis([0 tf 0 0.5])
subplot(313)
    plot(tiempo, mTir)
    title('Temperatura Refrigerante Entrada')
    grid on
    axis([0 tf 275 350])

figure(5)
subplot(311)
    plot(tiempo, mCC)
    hold on
    plot(tiempo, mSPc, 'k')
    grid on
    title('Concentracion C: Acetato de Sodio')
    axis([0 tf 0 0.5])
subplot(312)
    plot(tiempo, mCD)
    hold on
    plot(tiempo, mSPc, 'k')
    grid on
    title('Concentracion D: Etanol')
    axis([0 tf 0 0.5])
subplot(313)
    plot(tiempo, mT)
    title('Temperatura dentro del Reactor')
    hold on
    plot(tiempo, mSPT, 'k')
    grid on
    axis([0 tf 295 315])

```

NC Estatico Patron2.m

```

%-----
% Tesis : "Diseño de un Neurocontrolador Dinámico (DBP) aplicado a un
% Reactor Químico Continuo (CSTR)"
%
% NEUROCONTROLADOR ESTATICO APLICADO A UN REACTOR CSTR
%
% Algoritmo de RetroPropagacion de Errores

```

```

% Entrenamiento tipo PATRON - VARIAS Condicion Inicial
%=====

clear all
close all
clc
disp('RED NEURONAL - ENTRENAMIENTO')
disp(' ')

% ESCALAMIENTO y DEESCALAMIENTO:
% (Y = escM * X + escB) en funcion al rango de saturacion
%Escalar el Error
escM1 = 2/(0.25-(-0.25)); escB1 = 1-0.25*escM1;      %(Cc-refCc),(Cd-refCd)
escM2 = 2/(20-(-20));   escB2 = 1-20*escM2;        %(T-refT)
%Entrada a la red
escM3 = 6/(0.5-(-0.0)); escB3 = 3-0.5*escM3;      %(Ca,Cb,Cc,Cd)
escM4 = 6/(313-(296));  escB4 = 3-313*escM4;      %(T)
escM5 = 6/(350-(275));  escB5 = 3-350*escM5;      %(Tr)
escM6 = 6/(14-(9));     escB6 = 3-14*escM6;        %(pH)
%Salida hacia actuador
escM7 = (0.5-(0))/1.8;  escB7 = 0.5-0.9*escM7;     %CiA, CiB
escM8 = (350-275)/1.8; escB8 = 350-0.9*escM8;     %Tir

%nm = input('Neuronas en Capas Intermedias : ');
%eta = input('Introducir ratio de aprendizaje v, w: ');
eta = 0.000000;
%etaa = input('Introducir ratio de aprendizaje inclinacion a : ');
etaa = 0.00000000;
%etac = input('Introducir ratio de aprendizaje centro c (cero) : ');
etac = 0.00000000;
%contmax = input('Numero Maximo de Iteraciones : ');
contmax = 2;
%errormax = input('Error Maximo Aceptable : ');
errormax = 0.1;

%CONSTANTES
ndata = 3000; %cantidad de datos
ne = 3;      %Entradas
nm = 3;      %Neuronas
ns = 3;      %Salidas

resp = menu('Usar Pesos de file "pesosNCEP2.mat","SI","NO');
if resp == 1
    load pesosNCEP2.mat
    [aux1,NumNeuronas] = size(v);
    if NumNeuronas ~= nm
        disp('Numero Incorrecto de Neuronas, debe usar...');
        NumNeuronas
        break
    end
else
    v = 0.5*randn(ne,nm); %valores
    w = 0.5*randn(nm,ns); %iniciales
    c = zeros(nm,1);
    a = ones(nm,1);
end

%Referencia: ref = [Cc;Cd;T]
ref = [0.35; 0.35; 302];
Ydeseada = zeros(ns,1);

%Tiempo y Error
dt = 0.1; t=0;
cont = 1;
Nini = 20;
errfin = 2^999;
ERROR = errfin;
Vini=v; Wini=w; Cini=c; Aini=a;

```

```

% ENTRENAMIENTO DE LA RED NEURONAL

while( (ERROR > errormax) & (cont < contmax) )

for ini=1:Nini

Ja = 0; v=Vini; w=Wini; c=Cini; a=Aini;

%INICIALIZAR CONSTANTES Y VARIABLES
NC_Inicializacion
%CONDICIONES INICIALES
ReactorCondicionesIniciales

x = [0; 0; 0];
t = 0;
control = [0;0;0];
controlK_1 = [CiA;CiB;Tir];

for k = 1:ndata-1

Err(1,1) = escM1*(CC-ref(1))+escB1; %CC
Err(2,1) = escM1*(CD-ref(2))+escB1; %CD
Err(3,1) = escM2*(T-ref(3))+escB2; %T

%ENTRADA a la Red : Error Escalado
in_red(1,1) = Err(1);
in_red(2,1) = Err(2);
in_red(3,1) = Err(3);

%Red Neuronal
m = v'*in_red;
n = 2.0./(1 + exp(-(m-c)./a)) - 1; %Sigmoidea
%n = exp(-(m-c).^2)./a); %Gauseana
out_red = w'*n;

y = Err;

%SALIDA: Desescalamiento y Saturacion
control = [escM7*out_red(1)+escB7; escM7*out_red(2)+escB7;
escM8*out_red(3)+escB8];
control = 0.1*controlK_1 + control;
if control(1)>0.5; control(1) = 0.5; end
if control(1)<0; control(1) = 0; end
if control(2)>0.5; control(2) = 0.5; end
if control(2)<0; control(2) = 0; end
if control(3)>350; control(3) = 350; end
if control(3)<275; control(3) = 275; end
controlK_1 = control;

CiA = control(1); CiB = control(2); Tir = control(3);

%MODELO MATEMATICO DEL SISTEMA

%Terminos auxiliares
K = Ko * exp(-Ex/T);
F = (FiA + FiB)/2; %flujo promedio
pH = 11 + log10(Ph);
Cp = CA*CpA + CB*CpB + CC*CpC + CD*CpD;
dH = hr + (CpC + CpD - CpA - CpB)*(T-Tref);

%Almacenar datos
tiempo(k) = t;
mSPc(k) = ref(1);
mSPt(k) = ref(3);
mCA(k,ini) = CA;
mCB(k,ini) = CB;
mCC(k,ini) = CC;
mCD(k,ini) = CD;
mT(k,ini) = T;
mTr(k,ini) = Tr;
mTir(k,ini) = Tir;
mCiA(k,ini) = CiA;

```

```

mCiB(k,ini) = CiB;
mpH(k,ini) = pH;
%Calcular las derivadas del Reactor
CAp = (FiA*CiA - F*CA - K*CA*CB*V) / V;
CBp = (FiB*CiB - F*CB - K*CA*CB*V) / V;
CCp = (-F*CC + K*CA*CB*V) / V;
CDp = (-F*CD + K*CA*CB*V) / V;
Tp = (U*A*(Tr-T)/(V*dL) - FiA*CiA*CpA*(T-TiA) - FiB*CiB*CpB*(T-TiB) +
dH*K*CA*CB*V) / (V*Cp);
Trp = (Fr*dr*Cpr*(Tir-Tr) + U*A*(T-Tr)) / (Vr*dr*Cpr);
Php = (FiA*pHA + FiB*pHB - 2*F*Ph - K*CA*CB) / V;
%Integrar por Euler
CA = CA + CAp*dt;
CB = CB + CBp*dt;
CC = CC + CCp*dt;
CD = CD + CDp*dt;
T = T + Tp*dt;
Tr = Tr + Trp*dt;
Ph = Ph + Php*dt;
t = t + dt;
x = [Err(1); Err(2); Err(3)]; %Nuevo X para el Neurocontrolador

%Actualizacion de Pesos
e = y; %error
dJdw = n*e';
dndm = (1-n.*n)/2;
en = (w*e).*(dndm);
dJdv = (x)*en';
dnda = ((n.*n-1).*(m-c)./(2*a.*a));
dndc = ((n.*n-1)./(2.0.*a));
dJda = (w*e).*dnda;
dJdc = (w*e).*dndc;
v = v - eta*dJdv;
w = w - eta*dJdw;
c = c - etac*dJdc;
a = a - etaa*dJda;
Ja = Ja + e'*e;

end

JA(ini) = Ja;
Vv(1:ne,(ini-1)*nm+1:ini*nm) = v;
Ww(1:nm,(ini-1)*ns+1:ini*ns) = w;
pesosC(:,ini) = c;
pesosA(:,ini) = a;

end

VV=zeros(ne,nm);
WW=zeros(nm,ns);
for aux=1:Nini
    VV = VV + Vv(1:ne,(aux-1)*nm+1:aux*nm);
    WW = WW + Ww(1:nm,(ini-1)*ns+1:ini*ns);
end
for aux=1:nm
    pesosCC(aux,1) = sum(pesosC(aux,:));
    pesosAA(aux,1) = sum(pesosA(aux,:));
end

Vini = VV./Nini;
Wini = WW./Nini;
Cini = pesosCC/Nini;
Aini = pesosAA/Nini;

ERROR = sum(JA)/Nini

cont = cont + 1;

if ERROR > errfin
    eta=0.1*eta; etaa=0.1*etaa; etac=0.1*etac;
    if eta<0.00000000000001
        break
    end
end

```

```

    end
  end
  errfin = ERROR;

end

figure(1)
subplot(211)
  plot(tiempo, mCA)
  grid on
  title('Concentracion A: Hidroxido de Sodio')
subplot(212)
  plot(tiempo, mCB)
  grid on
  title('Concentracion B: Acetato de Etilo')

figure(2)
subplot(211)
  plot(tiempo, mCC)
  hold on
  plot(tiempo, mSPc, 'r')
  grid on
  title('Concentracion C: Acetato de Sodio')
subplot(212)
  plot(tiempo, mCD)
  hold on
  plot(tiempo, mSPc, 'r')
  grid on
  title('Concentracion D: Etanol')

figure(3)
subplot(311)
  plot(tiempo, mT)
  title('Temperatura dentro del Reactor')
  hold on
  plot(tiempo, mSPT, 'r')
  grid on
subplot(312)
  plot(tiempo, mTr)
  grid on
  title('Temperatura en la Camisa de Refrigeracion')
subplot(313)
  plot(tiempo, mpH)
  grid on
  title('Nivel de pH en el Reactor')

figure(4)
subplot(311)
  plot(tiempo, mCC)
  hold on
  plot(tiempo, mSPc, 'r')
  grid on
  title('Concentracion C: Acetato de Sodio')
  axis([0 t+dt 0 0.5])
subplot(312)
  plot(tiempo, mCD)
  hold on
  plot(tiempo, mSPc, 'r')
  grid on
  title('Concentracion D: Etanol')
  axis([0 t+dt 0 0.5])
subplot(313)
  plot(tiempo, mT)
  title('Temperatura dentro del Reactor')
  hold on
  plot(tiempo, mSPT, 'r')
  grid on
  axis([0 t+dt 295 320])

figure(5)
subplot(311)

```

```

    plot(tiempo, mCiA)
    grid on
    title('Concentracion A Entrada')
    axis([0 t+dt 0 0.5])
subplot(312)
    plot(tiempo, mCiB)
    grid on
    title('Concentracion B Entrada')
    axis([0 t+dt 0 0.5])
subplot(313)
    plot(tiempo, mTir)
    title('Temperatura Refrigerante Entrada')
    grid on
    axis([0 t+dt 275 350])

%GRABAR PESOS EN ARCHIVO
resp = menu('Grabar Pesos en file "pesosNCEP2.mat','SI','NO');
if resp == 1
    save pesosNCEP2.mat v w c a
    disp('..OK..')
else
    break
end

```

NC Estatico Modificado2.m

```

%-----
% Tesis : "Diseño de un Neurocontrolador Dinámico (DBP) aplicado a un
% Reactor Químico Continuo (CSTR)"
%
% NEUROCONTROLADOR ESTATICO MODIFICADO APLICADO A UN REACTOR CSTR
%
% (SE HACE USO DE DATOS 3 ANTERIORES POR CADA ESTADO)
%
% Algoritmo de RetroPropagacion de Errores
% Entrenamiento tipo PATRON - VARIAS Condicion Inicial
%=====

clear all
close all
clc
disp('RED NEURONAL - ENTRENAMIENTO')
disp(' ')

% ESCALAMIENTO y DEESCALAMIENTO:
% (Y = escM * X + escB) en funcion al rango de saturacion
%Escalar el Error
escM1 = 2/(0.25-(-0.25)); escB1 = 1-0.25*escM1;      %(Cc-refCc),(Cd-refCd)
escM2 = 2/(20-(-20));   escB2 = 1-20*escM2;         %(T-refT)
%Entrada a la red
escM3 = 6/(0.5-(-0.0)); escB3 = 3-0.5*escM3;        %(Ca,Cb,Cc,Cd)
escM4 = 6/(313-(296));  escB4 = 3-313*escM4;        %(T)
escM5 = 6/(350-(275));  escB5 = 3-350*escM5;        %(Tr)
escM6 = 6/(14-(9));     escB6 = 3-14*escM6;          %(pH)
%Salida hacia actuador
escM7 = (0.5-(0))/1.8;  escB7 = 0.5-0.9*escM7;      %CiA, CiB
escM8 = (350-275)/1.8;  escB8 = 350-0.9*escM8;      %Tir

%nm = input('Neuronas en Capas Intermedias : ');
%eta = input('Introducir ratio de aprendizaje v, w: ');
eta = 0.0000;
%etaa = input('Introducir ratio de aprendizaje inclinacion a : ');
etaa = 0.000000;
%etac = input('Introducir ratio de aprendizaje centro c (cero) : ');
etac = 0.000000;
%contmax = input('Numero Maximo de Iteraciones : ');
contmax = 2;
%errormax = input('Error Maximo Aceptable : ');
errormax = 0.1;

```

```

%CONSTANTES
ndata = 3000; %cantidad de datos
ne = 9; %Entradas
nm = 9; %Neuronas
ns = 3; %Salidas

resp = menu('Usar Pesos de file "pesosNCM2.mat','SI','NO');
if resp == 1
    load pesosNCM2.mat
    [aux1,NumNeuronas] = size(v);
    if NumNeuronas ~= nm
        disp('Numero Incorrecto de Neuronas, debe usar...');
        NumNeuronas
        break
    end
end
else
    v = 5.5*randn(ne,nm); %valores
    w = 5.5*randn(nm,ns); %iniciales
    c = zeros(nm,1);
    a = ones(nm,1);
end

%Referencia: ref = [Cc;Cd;T]
ref = [0.35; 0.35; 302];
Ydeseada = zeros(ns,1);

%Tiempo y Error
dt = 0.1; t=0;
cont = 1;
Nini = 20;
errfin = 2^999;
ERROR = errfin;
Vini=v; Wini=w; Cini=c; Aini=a;

% ENTRENAMIENTO DE LA RED NEURONAL
while( (ERROR > errormax) & (cont < contmax) )

    for ini=1:Nini

        Ja = 0; v=Vini; w=Wini; c=Cini; a=Aini;

        %INICIALIZAR CONSTANTES Y VARIABLES
        NC_Inicializacion
        %CONDICIONES INICIALES
        ReactorCondicionesIniciales

        x = [0; 0; 0];
        t = 0;
        control = [0;0;0];
        controlK_1 = [CiA;CiB;Tir];
        Ek_0=[0;0;0]; Ek_1=[0;0;0]; Ek_2=[0;0;0]; %Error en Tiempos Anteriores

        for k = 1:ndata-1

            Err(1,1) = escM1*(CC-ref(1))+escB1; %CC
            Err(2,1) = escM1*(CD-ref(2))+escB1; %CD
            Err(3,1) = escM2*(T-ref(3))+escB2; %T

            Ek_2 = Ek_1;
            Ek_1 = Ek_0;
            Ek_0 = Err;
            Ek = [Ek_0; Ek_1; Ek_2];

            %ENTRADA a la Red : Error Escalado
            in_red(1,1) = Ek(1);
            in_red(2,1) = Ek(2);
            in_red(3,1) = Ek(3);
            in_red(4,1) = Ek(4);
            in_red(5,1) = Ek(5);
        end
    end
end

```

```

in_red(6,1) = Ek(6);
in_red(7,1) = Ek(7);
in_red(8,1) = Ek(8);
in_red(9,1) = Ek(9);

%Red Neuronal
m = v'*in_red;
n = 2.0./(1 + exp(-(m-c)./a)) - 1;      %Sigmoidea
% n = exp(-(m-c).^2)./a);              %Gauseana
out_red = w'*n;

y = Err;

%SALIDA: Desescalamiento y Saturacion
control = [escM7*out_red(1)+escB7; escM7*out_red(2)+escB7;
escM8*out_red(3)+escB8];
control = 0.1*controlK_1 + control;
if control(1)>0.5; control(1) = 0.5; end
if control(1)<0; control(1) = 0; end
if control(2)>0.5; control(2) = 0.5; end
if control(2)<0; control(2) = 0; end
if control(3)>350; control(3) = 350; end
if control(3)<275; control(3) = 275; end
controlK_1 = control;
CiA = control(1); CiB = control(2); Tir = control(3);

%MODELO MATEMATICO DEL SISTEMA

%Terminos auxiliares
K = Ko * exp(-Ex/T);
F = (FiA + FiB)/2; %flujo promedio
pH = 11 + log10(Ph);
Cp = CA*CpA + CB*CpB + CC*CpC + CD*CpD;
dH = hr + (CpC + CpD - CpA - CpB)*(T-Tref);
%Almacenar datos
tiempo(k) = t;
mSPc(k) = ref(1);
mSPt(k) = ref(3);
mCA(k,ini) = CA;
mCB(k,ini) = CB;
mCC(k,ini) = CC;
mCD(k,ini) = CD;
mT(k,ini) = T;
mTr(k,ini) = Tr;
mTir(k,ini) = Tir;
mCiA(k,ini) = CiA;
mCiB(k,ini) = CiB;
mpH(k,ini) = pH;
%Calcular las derivadas del Reactor
CAp = (FiA*CiA - F*CA - K*CA*CB*V) / V;
CBp = (FiB*CiB - F*CB - K*CA*CB*V) / V;
CCp = (-F*CC + K*CA*CB*V) / V;
CDp = (-F*CD + K*CA*CB*V) / V;
Tp = (U*A*(Tr-T)/(V*dL) - FiA*CiA*CpA*(T-TiA) - FiB*CiB*CpB*(T-TiB) +
dH*K*CA*CB*V) / (V*Cp);
Trp = (Fr*dr*Cpr*(Tir-Tr) + U*A*(T-Tr)) / (Vr*dr*Cpr);
Php = (FiA*pHA + FiB*pHB - 2*F*Ph - K*CA*CB) / V;
%Integrar por Euler
CA = CA + CAp*dt;
CB = CB + CBp*dt;
CC = CC + CCp*dt;
CD = CD + CDp*dt;
T = T + Tp*dt;
Tr = Tr + Trp*dt;
Ph = Ph + Php*dt;
t = t + dt;
x = [Ek]; %Nuevo X para el Neurocontrolador

%Actualizacion de Pesos
e = y; %error
dJdw = n*e';
dndm = (1-n.*n)/2;
en = (w*e).*(dndm);

```

```

dJdv = (x)*en';
dnda = ((n.*n-1).*(m-c)./(2*a.*a));
dndc = ((n.*n-1)./(2.0.*a));
dJda = (w*e).*dnda;
dJdc = (w*e).*dndc;
v = v - eta*dJdv;
w = w - eta*dJdw;
c = c - etac*dJdc;
a = a - etaa*dJda;
Ja = Ja + e'*e;

end

JA(ini) = Ja;
Vv(1:ne,(ini-1)*nm+1:ini*nm) = v;
Ww(1:nm,(ini-1)*ns+1:ini*ns) = w;
pesosC(:,ini) = c;
pesosA(:,ini) = a;

end

VV=zeros(ne,nm);
WW=zeros(nm,ns);
for aux=1:Nini
    VV = VV + Vv(1:ne,(aux-1)*nm+1:aux*nm);
    WW = WW + Ww(1:nm,(ini-1)*ns+1:ini*ns);
end
for aux=1:nm
    pesosCC(aux,1) = sum(pesosC(aux,:));
    pesosAA(aux,1) = sum(pesosA(aux,:));
end

Vini = VV./Nini;
Wini = WW./Nini;
Cini = pesosCC/Nini;
Aini = pesosAA/Nini;

ERROR = sum(JA)/Nini;

cont = cont + 1;

if ERROR > errfin
    eta=0.1*eta; etaa=0.1*etaa; etac=0.1*etac;
    if eta<0.0000000000001
        break
    end
end
errfin = ERROR;

end

figure(1)
subplot(211)
plot(tiempo, mCA)
grid on
title('Concentracion A: Hidroxido de Sodio')
subplot(212)
plot(tiempo, mCB)
grid on
title('Concentracion B: Acetato de Etilo')

figure(2)
subplot(211)
plot(tiempo, mCC)
hold on
plot(tiempo, mSPc,'r')
grid on
title('Concentracion C: Acetato de Sodio')
subplot(212)
plot(tiempo, mCD)
hold on
plot(tiempo, mSPc,'r')

```

```

    grid on
    title('Concentracion D: Etanol')

figure(3)
subplot(311)
    plot(tiempo, mT)
    title('Temperatura dentro del Reactor')
    hold on
    plot(tiempo, mSPT, 'r')
    grid on
subplot(312)
    plot(tiempo, mTr)
    grid on
    title('Temperatura en la Camisa de Refrigeracion')
subplot(313)
    plot(tiempo, mpH)
    grid on
    title('Nivel de pH en el Reactor')

figure(4)
subplot(311)
    plot(tiempo, mCC)
    hold on
    plot(tiempo, mSPc, 'r')
    grid on
    title('Concentracion C: Acetato de Sodio')
    axis([0 t+dt 0 0.5])
subplot(312)
    plot(tiempo, mCD)
    hold on
    plot(tiempo, mSPc, 'r')
    grid on
    title('Concentracion D: Etanol')
    axis([0 t+dt 0 0.5])
subplot(313)
    plot(tiempo, mT)
    title('Temperatura dentro del Reactor')
    hold on
    plot(tiempo, mSPT, 'r')
    grid on
    axis([0 t+dt 295 320])

figure(5)
subplot(311)
    plot(tiempo, mCiA)
    grid on
    title('Concentracion A Entrada')
    axis([0 t+dt 0 0.5])
subplot(312)
    plot(tiempo, mCiB)
    grid on
    title('Concentracion B Entrada')
    axis([0 t+dt 0 0.5])
subplot(313)
    plot(tiempo, mTir)
    title('Temperatura Refrigerante Entrada')
    grid on
    axis([0 t+dt 275 350])

%GRABAR PESOS EN ARCHIVO
resp = menu('Grabar Pesos en file "pesosNCM2.mat", 'SI', 'NO');
if resp == 1
    save pesosNCM2.mat v w c a
    disp('..OK..')
else
    break
end

%-----
% Tesis : "Diseño de un Neurocontrolador Dinámico (DBP) aplicado a un
% Reactor Químico Continuo (CSTR)"

```

NC Dinamico DBP2.m

```

%
% NEUROCONTROLADOR DINAMICO APLICADO A UN REACTOR CSTR
%
% Dynamic Back Propagation - DBP / Para VARIAS condiciones iniciales
%=====
% Entradas : IN = [(CC-refCC) (CD-refCD) (T-refT)]
% Señal de control : [CiA CiB Tir]
% Estados del Sistema :[CA CB CC CD T Tr pH]
%-----

clear all
close all
clc
disp('RED NEURONAL - ENTRENAMIENTO')
disp(' ')

% ESCALAMIENTO y DEESCALAMIENTO:
% (Y = escM * X + escB) en funcion al rango de saturacion
%Entrada
escM1 = 6/(0.25-(-0.25)); escB1 = 3-0.25*escM1;      %(Cc-refCc),(Cd-refCd)
escM2 = 6/(20-(-20)); escB2 = 3-20*escM2;          %(T-refT)
escM3 = 6/(0.02-(-0.02)); escB3 = 3-0.02*escM3;    %(Cap,Cbp,Ccp,Cdp)
escM4 = 6/(0.3-(-0.3)); escB4 = 3-0.3*escM4;      %(Tp)
escM5 = 6/(2-(-2)); escB5 = 3-2*escM5;            %(Trp)
escM6 = 6/(0.01-(-0.01)); escB6 = 3-0.01*escM6;   %(Php)
%Salida
escM7 = (0.5-(0))/1.8; escB7 = 0.5-0.9*escM7;      %CiA, CiB
escM8 = (350-275)/1.8; escB8 = 350-0.9*escM8;     %Tir

%nm = input('Neuronas en Capas Intermedias : ');
%eta = input('Introducir ratio de aprendizaje v, w: ');
eta = 0.00000000;
%etaa = input('Introducir ratio de aprendizaje inclinacion a : ');
etaa = 0.00;
%etac = input('Introducir ratio de aprendizaje centro c (cero) : ');
etac = 0.00;
%contmax = input('Numero Maximo de Iteraciones : ');
contmax = 2;
%errormax = input('Error Maximo Aceptable : ');
errormax = 0.1;

%CONSTANTES
ndata = 3000; %cantidad de datos
ne = 3; %Entradas
nm = 3; %Neuronas
ns = 3; %Salidas

%RECUPERAR PESOS GRABADOS
resp = menu('Usar Pesos de file "pesosDBP2.mat","SI","NO");
if resp == 1
    load pesosDBP2.mat
    [aux1,NumNeuronas] = size(v);
    if NumNeuronas ~= nm
        disp('Numero Incorrecto de Neuronas, debe usar...');
        NumNeuronas
        break
    end
else
    v = 0.75*randn(ne,nm); %valores
    w = 0.75*randn(nm,ns); %iniciales
    c = zeros(nm,1);
    a = ones(nm,1);
end

%Referencia: ref = [Cc;Cd;T]
ref = [0.12; 0.12; 307];
r = [ 0; 0; 0]; % Vector de salida deseado
Ydeseada = ones(ndata,ne) * diag(r);
% Ydeseada = xref;

%Tiempo y Error
dt = 0.1; t=0;

```

```

cont = 1;
Nini = 20;
errfin = 2^999;
ERROR = errfin;
% ENTRENAMIENTO DE LA RED NEURONAL

while( (ERROR > errormax) & (cont < contmax) )

    for ini=1:Nini

        ersum2 = zeros(ns,1);
        dJdw = 0;
        dJdv = 0;
        dx1dw_t = zeros(nm,ns);
        dx2dw_t = zeros(nm,ns);
        dx3dw_t = zeros(nm,ns);
        dx1dv_t = zeros(ne,nm);
        dx2dv_t = zeros(ne,nm);
        dx3dv_t = zeros(ne,nm);
        dx1dc_t = zeros(nm,1);
        dx2dc_t = zeros(nm,1);
        dx3dc_t = zeros(nm,1);
        dx1da_t = zeros(nm,1);
        dx2da_t = zeros(nm,1);
        dx3da_t = zeros(nm,1);
        dJdw_t = zeros(nm,ns);
        dJdv_t = zeros(ne,nm);
        dJdc_t = zeros(nm,1);
        dJda_t = zeros(nm,1);

        %INICIALIZAR CONSTANTES Y VARIABLES
        NC_Inicializacion
        %CONDICIONES INICIALES
        ReactorCondicionesIniciales
        x_ini = [CC; CD; T];
        x = x_ini;
        t = 0;
        control = [0;0;0];
        controlK_1 = [CiA;CiB;Tir];

        for k = 1:ndata-1

            %ENTRADA a la Red : Error Escalado
            in_red(1,1) = escM1*(x(1)-ref(1))+escB1;
            in_red(2,1) = escM1*(x(2)-ref(2))+escB1;
            in_red(3,1) = escM2*(x(3)-ref(3))+escB2;

            %Red Neuronal
            m = v'*in_red;
            n = 2.0./(1 + exp(-(m-c)./a)) - 1; %sigmoidea
            out_red = w'*n;

            %SALIDA: Desescalamiento y Saturacion
            control = [escM7*out_red(1)+escB7; escM7*out_red(2)+escB7;
            escM8*out_red(3)+escB8];
            control = 0.1*controlK_1 + control;
            if control(1)>0.5; control(1) = 0.5; end
            if control(1)<0; control(1) = 0; end
            if control(2)>0.5; control(2) = 0.5; end
            if control(2)<0; control(2) = 0; end
            if control(3)>350; control(3) = 350; end
            if control(3)<275; control(3) = 275; end
            controlK_1 = control;

            CiA = control(1); CiB = control(2); Tir = control(3);

            %DERIVADAS PARCIALES de la Red Neuronal
            % Jacobiano = dX(k+1)/dX(k)
            jacob(1,1) = 1 - F/V;
            jacob(1,2) = 0;
            jacob(1,3) = Ko*Ex/T^2*exp(-Ex/T)*CA*CB;

```

```

jacob(2,1) = 0;
jacob(2,2) = 1 - F/V;
jacob(2,3) = Ko*Ex/T^2*exp(-Ex/T)*CA*CB;
jacob(3,1) = -(U*A*(Tr-T)/V/dL-FiA*CiA*CpA*(T-TiA)-FiB*CiB*CpB*(T-
TiB)+(hr+(CpC+CpD-CpA-CpB)*(T-Tref))*Ko*exp(-
Ex/T)*CA*CB*V)/V/(CA*CpA+CB*CpB+CC*CpC+CD*CpD)^2*CpC;
jacob(3,2) = -(U*A*(Tr-T)/V/dL-FiA*CiA*CpA*(T-TiA)-FiB*CiB*CpB*(T-
TiB)+(hr+(CpC+CpD-CpA-CpB)*(T-Tref))*Ko*exp(-
Ex/T)*CA*CB*V)/V/(CA*CpA+CB*CpB+CC*CpC+CD*CpD)^2*CpD;
jacob(3,3) = 1 + (-U*A/V/dL-FiA*CiA*CpA-FiB*CiB*CpB+(CpC+CpD-CpA-CpB)*Ko*exp(-
Ex/T)*CA*CB*V+(hr+(CpC+CpD-CpA-CpB)*(T-Tref))*Ko*Ex/T^2*exp(-
Ex/T)*CA*CB*V)/V/(CA*CpA+CB*CpB+CC*CpC+CD*CpD);
% dxdu = dX(k+1)/dU(k)
dxdu(1,1) = 0;
dxdu(1,2) = 0;
dxdu(1,3) = 0;
dxdu(2,1) = 0;
dxdu(2,2) = 0;
dxdu(2,3) = 0;
dxdu(3,1) = -FiA*CpA*(T-TiA)/V/(CA*CpA+CB*CpB+CC*CpC+CD*CpD);
dxdu(3,2) = -FiB*CpB*(T-TiB)/V/(CA*CpA+CB*CpB+CC*CpC+CD*CpD);
dxdu(3,3) = 0.01;
%dU(k)/dW
%dndm = diag((1 - n.*n)./(2*a)); %
dndm = diag(2./(1+exp((-m+c)./a)).^2./a.*exp((-m+c)./a));
dudx = w'*dndm*v';
dudw_s = [n];
dudv_s1 = in_red*w(:,1)*dndm;
dudv_s2 = in_red*w(:,2)*dndm;
dudv_s3 = in_red*w(:,3)*dndm;
%dndc = ((n.*n-1)./(2.0.*a)); %
dndc = -2./(1+exp((-m+c)./a)).^2./a.*exp((-m+c)./a);
dudc_s = [dndc.* w(:,1) dndc.* w(:,2) dndc.* w(:,3)];
%dnda = ((n.*n-1).*(m-c)./(2*a.*a)); %
dnda = 2./(1+exp((-m+c)./a)).^2.*(-m+c)./a.^2.*exp((-m+c)./a);
duda_s = [dnda.* w(:,1) dnda.* w(:,2) dnda.* w(:,3)]; ;
jacob_t = dxdu*dudx + jacob;

%MODELO MATEMATICO DEL SISTEMA

%Terminos auxiliares
K = Ko * exp(-Ex/T);
F = (FiA + FiB)/2; %flujo promedio
pH = 11 + log10(Ph);
Cp = CA*CpA + CB*CpB + CC*CpC + CD*CpD;
dH = hr + (CpC + CpD - CpA - CpB)*(T-Tref);
%Almacenar datos
tiempo(k) = t;
mSPc(k) = ref(1);
mSPt(k) = ref(3);
mCA(k,ini) = CA;
mCB(k,ini) = CB;
mCC(k,ini) = CC;
mCD(k,ini) = CD;
mT(k,ini) = T;
mTr(k,ini) = Tr;
mTir(k,ini) = Tir;
mCiA(k,ini) = CiA;
mCiB(k,ini) = CiB;
mpH(k,ini) = pH;
estado(k,:) = [CA CB CC CD T Tr pH];
%Calcular las derivadas del Reactor
CAp = (FiA*CiA - F*CA - K*CA*CB*V) / V;
CBp = (FiB*CiB - F*CB - K*CA*CB*V) / V;
CCp = (-F*CC + K*CA*CB*V) / V;
CDp = (-F*CD + K*CA*CB*V) / V;
Tp = (U*A*(Tr-T)/(V*dL) - FiA*CiA*CpA*(T-TiA) - FiB*CiB*CpB*(T-TiB) +
dH*K*CA*CB*V) / (V*Cp);
Trp = (Fr*dr*Cpr*(Tir-Tr) + U*A*(T-Tr)) / (Vr*dr*Cpr);
Php = (FiA*pHA + FiB*pHB - 2*F*Ph - K*CA*CB) / V;
%Integrar por Euler
CA = CA + CAp*dt;
CB = CB + CBp*dt;
CC = CC + CCp*dt;

```

```

CD = CD + CDp*dt;
T = T + Tp*dt;
Tr = Tr + Trp*dt;
Ph = Ph + Php*dt;
t = t + dt;
x = [CC; CD; T]; %Nuevo X para el Neurocontrolador

%Actualizacion de Derivadas en la Red Neuronal
dxldw_t = [dxdu(1,1).*dudw_s dxdu(1,2).*dudw_s dxdu(1,3).*dudw_s] +
jacob_t(1,1).*dxldw_t + jacob_t(1,2).*dx2dw_t + jacob_t(1,3).*dx3dw_t;
dx2dw_t = [dxdu(2,1).*dudw_s dxdu(2,2).*dudw_s dxdu(2,3).*dudw_s] +
jacob_t(2,1).*dxldw_t + jacob_t(2,2).*dx2dw_t + jacob_t(2,3).*dx3dw_t;
dx3dw_t = [dxdu(3,1).*dudw_s dxdu(3,2).*dudw_s dxdu(3,3).*dudw_s] +
jacob_t(3,1).*dxldw_t + jacob_t(3,2).*dx2dw_t + jacob_t(3,3).*dx3dw_t;
dxldv_t = dxdu(1,1).*dudv_s1 + dxdu(1,2).*dudv_s2 + dxdu(1,3).*dudv_s3 +
jacob_t(1,1).*dxldv_t + jacob_t(1,2).*dx2dv_t + jacob_t(1,3).*dx3dv_t;
dx2dv_t = dxdu(2,1).*dudv_s1 + dxdu(2,2).*dudv_s2 + dxdu(2,3).*dudv_s3 +
jacob_t(2,1).*dxldv_t + jacob_t(2,2).*dx2dv_t + jacob_t(2,3).*dx3dv_t;
dx3dv_t = dxdu(3,1).*dudv_s1 + dxdu(3,2).*dudv_s2 + dxdu(3,3).*dudv_s3 +
jacob_t(3,1).*dxldv_t + jacob_t(3,2).*dx2dv_t + jacob_t(3,3).*dx3dv_t;
dxldc_t = dxdu(1,1).*dudc_s(:,1) + dxdu(1,2).*dudc_s(:,2) + dxdu(1,3).*dudc_s(:,3)
+ jacob_t(1,1).*dxldc_t + jacob_t(1,2).*dx2dc_t + jacob_t(1,3).*dx3dc_t;
dx2dc_t = dxdu(2,1).*dudc_s(:,1) + dxdu(2,2).*dudc_s(:,2) + dxdu(2,3).*dudc_s(:,3)
+ jacob_t(2,1).*dxldc_t + jacob_t(2,2).*dx2dc_t + jacob_t(2,3).*dx3dc_t;
dx3dc_t = dxdu(3,1).*dudc_s(:,1) + dxdu(3,2).*dudc_s(:,2) + dxdu(3,3).*dudc_s(:,3)
+ jacob_t(3,1).*dxldc_t + jacob_t(3,2).*dx2dc_t + jacob_t(3,3).*dx3dc_t;
dxlda_t = dxdu(1,1).*duda_s(:,1) + dxdu(1,2).*duda_s(:,2) + dxdu(1,3).*duda_s(:,3)
+ jacob_t(1,1).*dxlda_t + jacob_t(1,2).*dx2da_t + jacob_t(1,3).*dx3da_t;
dx2da_t = dxdu(2,1).*duda_s(:,1) + dxdu(2,2).*duda_s(:,2) + dxdu(2,3).*duda_s(:,3)
+ jacob_t(2,1).*dxlda_t + jacob_t(2,2).*dx2da_t + jacob_t(2,3).*dx3da_t;
dx3da_t = dxdu(3,1).*duda_s(:,1) + dxdu(3,2).*duda_s(:,2) + dxdu(3,3).*duda_s(:,3)
+ jacob_t(3,1).*dxlda_t + jacob_t(3,2).*dx2da_t + jacob_t(3,3).*dx3da_t;

%Actualizacion del Error
out_des = Ydeseada(k+1,:);
out_des = out_des';
er = (in_red - out_des);
erJ = (in_red - out_des).^2;
dJdw_t = dJdw_t + erJ(1,1).*dxldw_t + erJ(2,1).*dx2dw_t + erJ(3,1).*dx3dw_t;
dJdv_t = dJdv_t + erJ(1,1).*dxldv_t + erJ(2,1).*dx2dv_t + erJ(3,1).*dx3dv_t;
dJdc_t = dJdc_t + erJ(1,1).*dxldc_t + erJ(2,1).*dx2dc_t + erJ(3,1).*dx3dc_t;
dJda_t = dJda_t + erJ(1,1).*dxlda_t + erJ(2,1).*dx2da_t + erJ(3,1).*dx3da_t;

ersum2 = ersum2 + er.^2;
if( (abs(x(1,1)) > 0.5) | (abs(x(2,1)) > 0.5) | (abs(x(3,1)) > 350) |
(abs(x(1,1)) < 0) | (abs(x(2,1)) < 0) | (abs(x(3,1)) < 275) )
%break;
end
if( (control(1) > 0.5) | (control(1) < 0) | (control(2) > 0.5) | (control(2) <
0) | (control(3) > 350) | (control(3) < 275) )
%break;
end
end

dJdw_t = dJdw_t/k;
dJdv_t = dJdv_t/k;
dJdc_t = dJdc_t/k;
dJda_t = dJda_t/k;

DJw1(:,ini) = dJdw_t(:,1);
DJw2(:,ini) = dJdw_t(:,2);
DJw3(:,ini) = dJdw_t(:,3);
DJv1(ini,:) = dJdv_t(1,:);
DJv2(ini,:) = dJdv_t(2,:);
DJv3(ini,:) = dJdv_t(3,:);
DJa(:,ini) = dJda_t(:,1);
DJc(:,ini) = dJdc_t(:,1);

end

for aux=1:nm

```

```

    DJW1(aux,1) = sum(DJw1(aux,:))/Nini;
    DJW2(aux,1) = sum(DJw2(aux,:))/Nini;
    DJW3(aux,1) = sum(DJw3(aux,:))/Nini;
    DJV1(1,aux) = sum(DJv1(:,aux))/Nini;
    DJV2(1,aux) = sum(DJv2(:,aux))/Nini;
    DJV3(1,aux) = sum(DJv3(:,aux))/Nini;
    DJA(aux,1) = sum(DJa(aux,:))/Nini;
    DJC(aux,1) = sum(DJc(aux,:))/Nini;

end

dw = [DJW1 DJW2 DJW3];
dv = [DJV1; DJV2; DJV3];
da = DJA;
dc = DJC;

w = w - eta*dw;
v = v - eta*dv;
c = c - etac*dc;
a = a - etaa*da;

ERROR = sum(ersum2)*ndata/1000
cont = cont + 1;

if ERROR > errfin
    eta=0.1*eta; etaa=0.1*etaa; etac=0.1*etac;
    if eta<0.00000001
        break
    end
end
errfin = ERROR;

end

figure(1)
subplot(211)
plot(tiempo, mCA)
grid on
title('Concentracion A: Hidroxido de Sodio')
subplot(212)
plot(tiempo, mCB)
grid on
title('Concentracion B: Acetato de Etilo')

figure(2)
subplot(211)
plot(tiempo, mCC)
hold on
plot(tiempo, mSPc,'r')
grid on
title('Concentracion C: Acetato de Sodio')
subplot(212)
plot(tiempo, mCD)
hold on
plot(tiempo, mSPc,'r')
grid on
title('Concentracion D: Etanol')

figure(3)
subplot(311)
plot(tiempo, mT)
title('Temperatura dentro del Reactor')
hold on
plot(tiempo, mSPt,'r')
grid on
subplot(312)
plot(tiempo, mTr)
grid on
title('Temperatura en la Camisa de Refrigeracion')
subplot(313)
plot(tiempo, mpH)
grid on
title('Nivel de pH en el Reactor')

```

```

figure(4)
subplot(311)
    plot(tiempo, mCC)
    hold on
    plot(tiempo, mSPc, 'r')
    grid on
    title('Concentracion C: Acetato de Sodio')
    axis([0 t+dt 0 0.5])
subplot(312)
    plot(tiempo, mCD)
    hold on
    plot(tiempo, mSPc, 'r')
    grid on
    title('Concentracion D: Etanol')
    axis([0 t+dt 0 0.5])
subplot(313)
    plot(tiempo, mT)
    title('Temperatura dentro del Reactor')
    hold on
    plot(tiempo, mSPT, 'r')
    grid on
    axis([0 t+dt 295 320])

figure(5)
subplot(311)
    plot(tiempo, mCiA)
    grid on
    title('Concentracion A Entrada')
    axis([0 t+dt 0 0.5])
subplot(312)
    plot(tiempo, mCiB)
    grid on
    title('Concentracion B Entrada')
    axis([0 t+dt 0 0.5])
subplot(313)
    plot(tiempo, mTir)
    title('Temperatura Refrigerante Entrada')
    grid on
    axis([0 t+dt 275 350])

%GRABAR PESOS EN ARCHIVO
resp = menu('Grabar Pesos en file "pesosDBP2.mat", 'SI', 'NO');
if resp == 1
    save pesosDBP2.mat v w c a
    disp('..OK..')
else
    break
end

```

ReactorModeloPID3.m

```

%-----
%
%           REACTOR QUIMICO AGITADO CONTINUO
%           Modelo Matematico Controlado con PID Discreto
%-----
% Reaccion de Saponificacion de Hidroxido de Sodio (A)
% y Acetato de Etilo (B), se obtiene : Acetato de Sodio (C)
% y Etanol (D)
%-----
%           ---- Para VARIAS Condiciones Iniciales ----
%-----
%
% VALIDACION ANTE PERTURBACIONES Y RUIDO EN LA SEÑAL DE CONTROL
%-----

clear all
close all
clc

%-----
%
%           MODELO MATEMATICO
%-----

```

```

%Declaracion de Constantes
Ex = 2407.2; %Energía activación y Const. Botzmann
Ko = 63380; %Fact.Esterico * Frec.Colisiones [mol^n/(seg*m^3)]
V = 7.9; %Volumen del tanque [m^3]
Vr = 8; %Volumen de la camisa de refrigeración [m^3]
A = 24; %Superficie o área para la transferencia de calor [m^2]
Cpr = 4.19; %Calor especifico del refrigerante (agua) [kJ/(Kg*°K)]
dr = 1000; %Densidad del refrigerante (agua) [Kg/m3]
dL = 76; %Densidad del liquido en el tanque [Kg/m3]
pHA = 13.3; %Valor de pH del material A
pHB = 7.10; %Valor de pH del material B
CpA = 3.26; %Capacidad calorífica del material A [kJ/(Kg*°K)]
CpB = 2.02; %Capacidad calorífica del material B [kJ/(Kg*°K)]
CpC = 2.51; %Capacidad calorífica del material C [kJ/(Kg*°K)]
CpD = 3.76; %Capacidad calorífica del material D [kJ/(Kg*°K)]

%Perturbaciones
FiA = 0.2; %Velocidad de flujo molar de A a la entrada [lit/seg]
FiB = 0.2; %Velocidad de flujo molar de B a la entrada [lit/seg]
TiA = 300; %Temperatura del material A en la entrada[°K]
TiB = 300; %Temperatura del material B en la entrada[°K]
Fr = 0.40; %Flujo del líquido refrigerante [lit/seg]

%Inicializacion de Señal de Control
Tir = 300; %Temperatura del refrigerante a la entrada [°K]
CiA = 0.2; %Concentración de material A a la entrada[mol]
CiB = 0.2; %Concentración de material B a la entrada[mol]

%Terminos auxiliares
%K Constante de velocidad [moln/(seg*m3)]
%F Velocidad de flujo molar a la salida [lit/seg]
%pH Valor de pH dentro del reactor
%U Coeficiente de transferencia de calor [J/(°K*seg*m2)]
%Cp Capacidad calorífica general
%dH Calor desarrollado en la reacción (entalpias) [kJ/C]
%hr Entalpia relativa para una Tref de 300°K

%Calculo de Entalpia referencial (hr)
Tref = 300;
hr = (CpC + CpD - CpA - CpB);

%Ingresar Perturbaciones :
resp = menu('Ingresar Perturbaciones', ' SI ', ' NO ');
if resp==1
disp('Ingresar Perturbaciones :');
Pfia = input('Ingresar Perturbacion para FiA (-50% a 50%) : ')/100;
Pfib = input('Ingresar Perturbacion para FiB (-50% a 50%) : ')/100;
Ptia = input('Ingresar Perturbacion para TiA (-2% a 2%) : ')/100;
Ptib = input('Ingresar Perturbacion para TiB (-2% a 2%) : ')/100;
Pfr = input('Ingresar Perturbacion para Fr (-50% a 50%) : ')/100;

if Pfia>0.5; Pfia=0.5; end
if Pfib>0.5; Pfib=0.5; end
if Ptia>0.02; Ptia=0.02; end
if Ptib>0.02; Ptib=0.02; end
if Pfr>0.5; Pfr=0.5; end
if Pfia<-0.5; Pfia=-0.5; end
if Pfib<-0.5; Pfib=-0.5; end
if Ptia<-0.02; Ptia=-0.02; end
if Ptib<-0.02; Ptib=-0.02; end
if Pfr<-0.5; Pfr=-0.5; end

FiA = FiA + FiA*Pfia;
FiB = FiB + FiB*Pfib;
TiA = TiA + TiA*Ptia;
TiB = TiB + TiB*Ptib;
Fr = Fr + Fr*Pfr;
end

%-----
%Ruido en Actuadores: (+/- 20%)

```

```

resp = menu('Ingresar Ruido en Actuadores:', 'Mucho (+/- 20%)', 'Poco (+/- 10%)',
'Nada');
if resp==1; ruidoA=0.04; end
if resp==2; ruidoA=0.02; end
if resp==3; ruidoA=0.00; end
%-----
%Ruido en Sensores: (+/- 0.5%)
resp = menu('Ingresar Ruido en Sensores:', 'Mucho (+/- 1.0%)', 'Poco (+/- 0.5%)',
'Nada');
if resp==1; ruidoS=0.0002; end
if resp==2; ruidoS=0.0001; end
if resp==3; ruidoS=0.00; end
%-----

%=====
%                               CONTROLADOR PID
%-----

% PARAMETROS del Controlador PID
Kp1 = 2;  Kd1 = 0.05;Ki1 = 0.9; % PID Concentracion C
Kp2 = 2;  Kd2 = 0.05;Ki2 = 0.9; % PID Concentracion D
Kp3 = 3;  Kd3 = 0.15;Ki3 = 0.8; % PID Temperatura

% SET POINT
  SPC = 0.25;    %concentracion para C y D
  SPT = 304;    %temperatura en el reactor

%=====

%Tiempos
ti = 0;
dt = 0.1;
tf = 300;

%-----Condiciones Iniciales-----
resp = menu('Condiciones iniciales a utilizar','Multiples Condiciones Iniciales','Una
sola Condicion Inicial');
if resp==1; Nini = 20; end
if resp==2
  Nini = 1;
  CA = 0.10;    %Concentración de material A a la salida [mol]
  CB = 0.40;    %Concentración de material B a la salida [mol]
  CC = 0.10;    %Concentración de material C a la salida [mol]
  CD = 0.40;    %Concentración de material D a la salida [mol]
  T = 309;      %Temperatura en el reactor a la salida  [°K]
  Tr = 304;     %Temperatura en el refrigerante a la salida [°K]
  Ph = 1;       %Variable auxiliar para determinar el pH
end

disp('PID DISCRETO (Reactor CSTR) ..... wait !')

% SIMULACION DEL SISTEMA

for ini=1:Nini

  if Nini==20; ReactorCondicionesIniciales; end
  n = 1;
  %CONDICIONES INICIALES del Controlador PID
  uCa=0;  uCb=0;  uTir=0;    %Señal de control
  ECa=0;  ECb=0;  ETir=0;    %Error E(k)
  E1Ca=0; E1Cb=0; E1Tir=0;   %Error E(k-1)
  E2Ca=0; E2Cb=0; E2Tir=0;   %Error E(k-2)

  for t=ti:dt:tf

    %Terminos auxiliares
    K = Ko * exp(-Ex/T);
    F = (FiA + FiB)/2; %flujo promedio
    pH = 11 + log10(Ph);
    U = 19.19/A;
    Cp = CA*CpA + CB*CpB + CC*CpC + CD*CpD;
  
```

```

dH = hr + (CpC + CpD - CpA - CpB)*(T-Tref);

%Almacenar datos
tiempo(n) = t;
mSPc(n) = SPc;
mSPt(n) = SPt;
mCA(n,ini) = CA;
mCB(n,ini) = CB;
mCC(n,ini) = CC;
mCD(n,ini) = CD;
mT(n,ini) = T;
mTr(n,ini) = Tr;
mpH(n,ini) = pH;
mTir(n,ini) = Tir;
mCiA(n,ini) = CiA;
mCiB(n,ini) = CiB;

%Calcular las derivadas
CAp = (FiA*CiA - F*CA - K*CA*CB*V) / V;
CBp = (FiB*CiB - F*CB - K*CA*CB*V) / V;
CCp = (-F*CC + K*CA*CB*V) / V;
CDp = (-F*CD + K*CA*CB*V) / V;
Tp = (U*A*(Tr-T)/(V*dL) - FiA*CiA*CpA*(T-TiA) - FiB*CiB*CpB*(T-TiB) + dH*K*CA*CB*V) / (V*Cp);
Trp = (Fr*dr*Cpr*(Tir-Tr) + U*A*(T-Tr)) / (Vr*dr*Cpr);
Php = (FiA*pHA + FiB*pHB - 2*F*Ph - K*CA*CB) / V;

%Integrar por Euler
CA = CA + CAp*dt;
CB = CB + CBp*dt;
CC = CC + CCp*dt;
CD = CD + CDp*dt;
T = T + Tp*dt;
Tr = Tr + Trp*dt;
Ph = Ph + Php*dt;

%-----RUIDO-SENSOR-----
CC = CC + CC*ruidoS*randn(1);
CD = CD + CD*ruidoS*randn(1);
T = T + T*ruidoS*randn(1);
%-----RUIDO-SENSOR-----

% PID

%Controlador PID DISCRETO para CONCENTRACION INICIAL A
E2Ca = E1Ca;
E1Ca = ECa;
ECa = SPc - CC;
uCa = uCa + (Kp1+Ki1+Kd1)*ECa - (Kp1+2*Kd1)*E1Ca - Kd1*E2Ca;

%Controlador PID DISCRETO para CONCENTRACION INICIAL B
E2Cb = E1Cb;
E1Cb = ECB;
ECb = SPc - CD;
uCb = uCb + (Kp2+Ki2+Kd2)*ECb - (Kp2+2*Kd2)*E1Cb - Kd2*E2Cb;

%Controlador PID DISCRETO para TEMPERATURA INICIAL REFRIG
E2Tir = E1Tir;
E1Tir = ETir;
ETir = SPt - T;
uTir = uTir + (Kp3+Ki3+Kd3)*ETir - (Kp3+2*Kd3)*E1Tir - Kd3*E2Tir;

%Saturation del Actuador
if uCa<0
    uCa=0;
end
if uCa>0.5
    uCa=0.5;
end
if uCb<0
    uCb=0;
end
if uCb>0.5
    uCb=0.5;
end

```

```

end
if uTir<275
    uTir=275;
end
if uTir>350
    uTir=350;
end
CiA = uCa;
CiB = uCb;
Tir = uTir;
%-----RUIDO-ACTUADOR-----
CiA = CiA + CiA*ruidoA*randn(1);
CiB = CiB + CiB*ruidoA*randn(1);
Tir = Tir + Tir*ruidoA*randn(1);
%-----RUIDO-ACTUADOR-----
%%%%%%%%

n=n+1;
end
end

figure(1)
subplot(211)
plot(tiempo, mCA)
grid on
title('Concentracion A: Hidroxido de Sodio')
subplot(212)
plot(tiempo, mCB)
grid on
title('Concentracion B: Acetato de Etilo')

figure(2)
subplot(211)
plot(tiempo, mCC)
hold on
plot(tiempo, mSPc, 'k')
grid on
title('Concentracion C: Acetato de Sodio')
subplot(212)
plot(tiempo, mCD)
hold on
plot(tiempo, mSPc, 'k')
grid on
title('Concentracion D: Etanol')

figure(3)
subplot(311)
plot(tiempo, mT)
title('Temperatura dentro del Reactor')
hold on
plot(tiempo, mSPt, 'k')
grid on
subplot(312)
plot(tiempo, mTr)
grid on
title('Temperatura en la Camisa de Refrigeracion')
subplot(313)
plot(tiempo, mpH)
grid on
title('Nivel de pH en el Reactor')

figure(4)
subplot(311)
plot(tiempo, mCiA)
grid on
title('Concentracion A Entrada')
axis([0 tf 0 0.5])
subplot(312)
plot(tiempo, mCiB)
grid on
title('Concentracion B Entrada')
axis([0 tf 0 0.5])
subplot(313)

```

```

plot(tiempo, mTir)
title('Temperatura Refrigerante Entrada')
grid on
axis([0 tf 275 350])

figure(5)
subplot(311)
plot(tiempo, mCC)
hold on
plot(tiempo, mSPc, 'k')
grid on
title('Concentracion C: Acetato de Sodio')
axis([0 tf 0 0.5])
subplot(312)
plot(tiempo, mCD)
hold on
plot(tiempo, mSPc, 'k')
grid on
title('Concentracion D: Etanol')
axis([0 tf 0 0.5])
subplot(313)
plot(tiempo, mT)
title('Temperatura dentro del Reactor')
hold on
plot(tiempo, mSPT, 'k')
grid on
axis([0 tf 295 315])

```

ReactorModeloOPTIMAL3.m

```

%-----
% REACTOR QUIMICO AGITADO CONTINUO
% Modelo Matematico Controlado con CONTROL OPTIMAL
%-----
% Reaccion de Saponificacion de Hidroxido de Sodio (A)
% y Acetato de Etilo (B), se obtiene : Acetato de Sodio (C)
% y Etanol (D)
%-----
% ---- Para VARIAS Condiciones Iniciales ----
%-----
% VALIDACION ANTE PERTURBACIONES Y RUIDO EN LA SEÑAL DE CONTROL
%-----

clear all
close all
clc

%=====
% MODELO MATEMATICO
%-----

%Declaracion de Constantes
Ex = 2407.2; %Energía activación y Const. Botzmann
Ko = 63380; %Fact.Esterico * Frec.Colisiones [mol^n/(seg*m^3)]
V = 7.9; %Volumen del tanque [m^3]
Vr = 8; %Volumen de la camisa de refrigeración [m^3]
A = 24; %Superficie o área para la transferencia de calor [m^2]
Cpr = 4.19; %Calor especifico del refrigerante (agua) [kJ/(Kg*°K)]
dr = 1000; %Densidad del refrigerante (agua) [Kg/m3]
dL = 76; %Densidad del liquido en el tanque [Kg/m3]
pHA = 13.3; %Valor de pH del material A
pHB = 7.10; %Valor de pH del material B
CpA = 3.26; %Capacidad calorífica del material A [kJ/(Kg*°K)]
CpB = 2.02; %Capacidad calorífica del material B [kJ/(Kg*°K)]
CpC = 2.51; %Capacidad calorífica del material C [kJ/(Kg*°K)]
CpD = 3.76; %Capacidad calorífica del material D [kJ/(Kg*°K)]

%Perturbaciones
FiA = 0.2; %Velocidad de flujo molar de A a la entrada [lit/seg]
FiB = 0.2; %Velocidad de flujo molar de B a la entrada [lit/seg]

```

```

TiA = 300;      %Temperatura del material A en la entrada[°K]
TiB = 300;      %Temperatura del material B en la entrada[°K]
Fr = 0.40;      %Flujo del líquido refrigerante [lit/seg]

%Inicializacion de Señal de Control
Tir = 300;      %Temperatura del refrigerante a la entrada [°K]
CiA = 0.2;      %Concentración de material A a la entrada[mol]
CiB = 0.2;      %Concentración de material B a la entrada[mol]

%Terminos auxiliares
%K    Constante de velocidad [moln/(seg*m3)]
%F    Velocidad de flujo molar a la salida [lit/seg]
%pH    Valor de pH dentro del reactor
%U    Coeficiente de transferencia de calor [J/(°K*seg*m2)]
%Cp    Capacidad calorífica general
%dH    Calor desarrollado en la reacción (entalpias) [kJ/C]
%hr    Entalpia relativa para una Tref de 300°K

%Calculo de Entalpia referencial (hr)
Tref = 300;
hr = (CpC + CpD - CpA - CpB);

%Ingresar Perturbaciones :
resp = menu('Ingresar Perturbaciones', ' SI ', ' NO ');
if resp==1
disp('Ingresar Perturbaciones :');
Pfia = input('Ingresar Perturbacion para FiA (-50% a 50%) : ')/100;
Pfib = input('Ingresar Perturbacion para FiB (-50% a 50%) : ')/100;
Ptia = input('Ingresar Perturbacion para TiA (-2% a 2%) : ')/100;
Ptib = input('Ingresar Perturbacion para TiB (-2% a 2%) : ')/100;
Pfr = input('Ingresar Perturbacion para Fr (-50% a 50%) : ')/100;

if Pfia>0.5; Pfia=0.5; end
if Pfib>0.5; Pfib=0.5; end
if Ptia>0.02; Ptia=0.02; end
if Ptib>0.02; Ptib=0.02; end
if Pfr>0.5; Pfr=0.5; end
if Pfia<-0.5; Pfia=-0.5; end
if Pfib<-0.5; Pfib=-0.5; end
if Ptia<-0.02; Ptia=-0.02; end
if Ptib<-0.02; Ptib=-0.02; end
if Pfr<-0.5; Pfr=-0.5; end

FiA = FiA + FiA*Pfia;
FiB = FiB + FiB*Pfib;
TiA = TiA + TiA*Ptia;
TiB = TiB + TiB*Ptib;
Fr = Fr + Fr*Pfr;
end

%-----
%Ruido en Actuadores: (+/- 20%)
resp = menu('Ingresar Ruido en Actuadores:', 'Mucho (+/- 20%)', 'Poco (+/- 10%)',
'Nada');
if resp==1; ruidoA=0.04; end
if resp==2; ruidoA=0.02; end
if resp==3; ruidoA=0.00; end
%-----
%Ruido en Sensores: (+/- 0.5%)
resp = menu('Ingresar Ruido en Sensores:', 'Mucho (+/- 1.0%)', 'Poco (+/- 0.5%)',
'Nada');
if resp==1; ruidoS=0.0002; end
if resp==2; ruidoS=0.0001; end
if resp==3; ruidoS=0.00; end
%-----

%=====
%
%                CONTROLADOR OPTIMAL
%-----
% SET POINT
Spc = 0.22;      %concentracion para C y D
Spt = 305;      %temperatura en el reactor

```

```

%Diferencial de Tiempo
dt = 0.1;
%Integral del error
interr1=0; interr2=0; interr3=0;

% PARAMETROS del Controlador Optimal
KK = [ 21.9796 -15.8802 2.2941 3.4365 -0.4576 -0.0039 -0.0000 11.6415
       -16.9375 20.9543 2.5315 3.7922 -0.4552 -0.0043 -0.0000 -10.6993
       -0.0029 -0.0055 -0.0041 -0.0061 0.0008 0.0000 0.0000 0.0006
];

%=====

%Tiempos
ti = 0;
tf = 300;
n = 1;

%-----Condiciones Iniciales-----
resp = menu('Condiciones iniciales a utilizar','Multiples Condiciones Iniciales','Una
sola Condicion Inicial');
if resp==1; Nini = 20; end
if resp==2
  Nini = 1;
  CA = 0.10; %Concentración de material A a la salida [mol]
  CB = 0.40; %Concentración de material B a la salida [mol]
  CC = 0.10; %Concentración de material C a la salida [mol]
  CD = 0.40; %Concentración de material D a la salida [mol]
  T = 309; %Temperatura en el reactor a la salida [°K]
  Tr = 304; %Temperatura en el refrigerante a la salida [°K]
  Ph = 1; %Variable auxiliar para determinar el pH
end

disp('CONTROL OPTIMAL (Reactor CSTR) ..... wait !')

%=====

% SIMULACION DEL SISTEMA

for ini=1:Nini

  if Nini==20; ReactorCondicionesIniciales; end
  n = 1;
  %Integral del error
  interr1=0; interr2=0; interr3=0;

  for t=ti:dt:tf

    %Terminos auxiliares
    K = Ko * exp(-Ex/T);
    F = (FiA + FiB)/2; %flujo promedio
    pH = 11 + log10(Ph);
    U = 19.19/A;
    Cp = CA*CpA + CB*CpB + CC*CpC + CD*CpD;
    dH = hr + (CpC + CpD - CpA - CpB)*(T-Tref);

    %Almacenar datos
    tiempo(n) = t;
    mSPc(n) = SPc;
    mSPt(n) = SPt;
    mCA(n,ini) = CA;
    mCB(n,ini) = CB;
    mCC(n,ini) = CC;
    mCD(n,ini) = CD;
    mT(n,ini) = T;
    mTr(n,ini) = Tr;
    mpH(n,ini) = pH;
    mTir(n,ini) = Tir;
  end
end

```

```

mCiA(n,ini) = CiA;
mCiB(n,ini) = CiB;

%Calcular las derivadas
CAp = (FiA*CiA - F*CA - K*CA*CB*V) / V;
CBp = (FiB*CiB - F*CB - K*CA*CB*V) / V;
CCp = (-F*CC + K*CA*CB*V) / V;
CDp = (-F*CD + K*CA*CB*V) / V;
Tp = (U*A*(Tr-T)/(V*dL) - FiA*CiA*CpA*(T-TiA) - FiB*CiB*CpB*(T-TiB) + dH*K*CA*CB*V)
/ (V*Cp);
Trp = (Fr*dr*Cpr*(Tir-Tr) + U*A*(T-Tr)) / (Vr*dr*Cpr);
Php = (FiA*pHA + FiB*pHB - 2*F*Ph - K*CA*CB) / V;

%Integrar por Euler
CA = CA + CAp*dt;
CB = CB + CBp*dt;
CC = CC + CCp*dt;
CD = CD + CDp*dt;
T = T + Tp*dt;
Tr = Tr + Trp*dt;
Ph = Ph + Php*dt;
%-----RUIDO-SENSOR-----
CC = CC + CC*ruidoS*randn(1);
CD = CD + CD*ruidoS*randn(1);
T = T + T*ruidoS*randn(1);
%-----RUIDO-SENSOR-----

% CONTROLADOR OPTIMAL
X = [CA CB CC CD T Tr Ph]';
interr1 = interr1 + (CC-SPc)*dt;
interr2 = interr2 + (CD-SPc)*dt;
interr3 = interr3 + (T-SPT)*dt;
uCiA = -KK(1,:) * [X; interr1];
uCiB = -KK(2,:) * [X; interr2];
uTir = -KK(1,:) * [X; interr3];

%Saturation del Actuador
if uCiA<0
    uCiA=0;
end
if uCiA>0.5
    uCiA=0.5;
end
if uCiB<0
    uCiB=0;
end
if uCiB>0.5
    uCiB=0.5;
end
if uTir<275
    uTir=275;
end
if uTir>350
    uTir=350;
end
CiA = uCiA;
CiB = uCiB;
Tir = uTir;
%-----RUIDO-ACTUADOR-----
CiA = CiA + CiA*ruidoA*randn(1);
CiB = CiB + CiB*ruidoA*randn(1);
Tir = Tir + Tir*ruidoA*randn(1);
%-----RUIDO-ACTUADOR-----

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

n=n+1;
end
end

```

```

figure(1)
subplot(211)
plot(tiempo, mCA)
grid on
title('Concentracion A: Hidroxido de Sodio')
subplot(212)
plot(tiempo, mCB)
grid on
title('Concentracion B: Acetato de Etilo')

figure(2)
subplot(211)
plot(tiempo, mCC)
hold on
plot(tiempo, mSPc, 'k')
grid on
title('Concentracion C: Acetato de Sodio')
subplot(212)
plot(tiempo, mCD)
hold on
plot(tiempo, mSPc, 'k')
grid on
title('Concentracion D: Etanol')

figure(3)
subplot(311)
plot(tiempo, mT)
title('Temperatura dentro del Reactor')
hold on
plot(tiempo, mSPt, 'k')
grid on
subplot(312)
plot(tiempo, mTr)
grid on
title('Temperatura en la Camisa de Refrigeracion')
subplot(313)
plot(tiempo, mpH)
grid on
title('Nivel de pH en el Reactor')

figure(4)
subplot(311)
plot(tiempo, mCiA)
grid on
title('Concentracion A Entrada')
subplot(312)
plot(tiempo, mCiB)
grid on
title('Concentracion B Entrada')
subplot(313)
plot(tiempo, mTir)
title('Temperatura Refrigerante Entrada')
grid on

figure(5)
subplot(311)
plot(tiempo, mCC)
hold on
plot(tiempo, mSPc, 'k')
grid on
title('Concentracion C: Acetato de Sodio')
subplot(312)
plot(tiempo, mCD)
hold on
plot(tiempo, mSPc, 'k')
grid on
title('Concentracion D: Etanol')
subplot(313)
plot(tiempo, mT)
title('Temperatura dentro del Reactor')
hold on
plot(tiempo, mSPt, 'k')
grid on

```

NC Estatico Patron3.m

```

%-----
% Tesis : "Diseño de un Neurocontrolador Dinámico (DBP) aplicado a un
% Reactor Químico Continuo (CSTR)"
%
% NEUROCONTROLADOR ESTATICO APLICADO A UN REACTOR CSTR
%
% Algoritmo de RetroPropagacion de Errores
% Entrenamiento tipo PATRON - VARIAS Condicion Inicial
%-----
%
% VALIDACION ANTE PERTURBACIONES Y RUIDO (SEÑAL DE CONTROL y SENSORES)
%-----

clear all
close all
clc

% ESCALAMIENTO y DEESCALAMIENTO:
% (Y = escM * X + escB) en funcion al rango de saturacion
%Escalar el Error
escM1 = 2/(0.25-(-0.25)); escB1 = 1-0.25*escM1;      %(Cc-refCc),(Cd-refCd)
escM2 = 2/(20-(-20));   escB2 = 1-20*escM2;        %(T-refT)
%Salida hacia actuador
escM7 = (0.5-(0))/1.8; escB7 = 0.5-0.9*escM7;      %CiA, CiB
escM8 = (350-275)/1.8; escB8 = 350-0.9*escM8;     %Tir

%Neuronas
ne = 3;      %Entradas
nm = 3;      %Neuronas
ns = 3;      %Salidas
ndata = 3000; %cantidad de datos

%Pesos
load pesosNCEP2.mat

%Referencia: ref = [Cc;Cd;T]
ref = [0.22; 0.22; 305];

%Tiempo y Error
dt = 0.1; t=0;

%=====
%                               MODELO MATEMATICO
%-----

%Declaracion de Constantes
Ex = 2407.2; %Energía activación y Const. Botzmann
Ko = 63380; %Fact.Esterico * Frec.Colisiones [mol^n/(seg*m^3)]
V = 7.9; %Volumen del tanque [m^3]
Vr = 8; %Volumen de la camisa de refrigeración [m^3]
A = 24; %Superficie o área para la transferencia de calor [m^2]
Cpr = 4.19; %Calor especifico del refrigerante (agua) [kJ/(Kg*°K)]
dr = 1000; %Densidad del refrigerante (agua) [Kg/m3]
dL = 76; %Densidad del liquido en el tanque [Kg/m3]
pHA = 13.3; %Valor de pH del material A
pHB = 7.10; %Valor de pH del material B
CpA = 3.26; %Capacidad calorífica del material A [kJ/(Kg*°K)]
CpB = 2.02; %Capacidad calorífica del material B [kJ/(Kg*°K)]
CpC = 2.51; %Capacidad calorífica del material C [kJ/(Kg*°K)]
CpD = 3.76; %Capacidad calorífica del material D [kJ/(Kg*°K)]

%Perturbaciones
FiA = 0.2; %Velocidad de flujo molar de A a la entrada [lit/seg]
FiB = 0.2; %Velocidad de flujo molar de B a la entrada [lit/seg]
TiA = 300; %Temperatura del material A en la entrada[°K]
TiB = 300; %Temperatura del material B en la entrada[°K]

```

```

Fr = 0.40;      %Flujo del líquido refrigerante [lit/seg]

%Inicializacion de Señal de Control
Tir = 300;      %Temperatura del refrigerante a la entrada  [°K]
CiA = 0.2;      %Concentración de material A a la entrada[mol]
CiB = 0.2;      %Concentración de material B a la entrada[mol]

%Terminos auxiliares
U = 19.19/A;    %Coeficiente de transferencia de calor [J/(°K*seg*m2)]
F = (FiA+FiB)/2; %Velocidad de flujo molar a la salida [lit/seg]
%K      Constante de velocidad [moln/(seg*m3)]
%pH      Valor de pH dentro del reactor
%CP      Capacidad calorífica general
%dH      Calor desarrollado en la reacción (entalpias) [kJ/C]
%hr      %Entalpia relativa para una Tref de 300°K

%Calculo de Entalpia referencial (hr)
Tref = 300;
hr = (CpC + CpD - CpA - CpB);

%Ingresar Perturbaciones :
resp = menu('Ingresar Perturbaciones', ' SI ', ' NO ');
if resp==1
disp('Ingresar Perturbaciones :');
Pfia = input('Ingresar Perturbacion para FiA (-50% a 50%) : ')/100;
Pfib = input('Ingresar Perturbacion para FiB (-50% a 50%) : ')/100;
Ptia = input('Ingresar Perturbacion para TiA (-2% a 2%) : ')/100;
Ptib = input('Ingresar Perturbacion para TiB (-2% a 2%) : ')/100;
Pfr = input('Ingresar Perturbacion para Fr (-50% a 50%) : ')/100;

if Pfia>0.5; Pfia=0.5; end
if Pfib>0.5; Pfib=0.5; end
if Ptia>0.02; Ptia=0.02; end
if Ptib>0.02; Ptib=0.02; end
if Pfr>0.5; Pfr=0.5; end
if Pfia<-0.5; Pfia=-0.5; end
if Pfib<-0.5; Pfib=-0.5; end
if Ptia<-0.02; Ptia=-0.02; end
if Ptib<-0.02; Ptib=-0.02; end
if Pfr<-0.5; Pfr=-0.5; end

FiA = FiA + FiA*Pfia;
FiB = FiB + FiB*Pfib;
TiA = TiA + TiA*Ptia;
TiB = TiB + TiB*Ptib;
Fr = Fr + Fr*Pfr;
end

%-----
%Ruido en Actuadores: (+/- 20%)
resp = menu('Ingresar Ruido en Actuadores:', 'Mucho (+/- 20%)', 'Poco (+/- 10%)',
'Nada');
if resp==1; ruidoA=0.04; end
if resp==2; ruidoA=0.02; end
if resp==3; ruidoA=0.00; end
%-----
%Ruido en Sensores: (+/- 0.5%)
resp = menu('Ingresar Ruido en Sensores:', 'Mucho (+/- 1.0%)', 'Poco (+/- 0.5%)',
'Nada');
if resp==1; ruidoS=0.0002; end
if resp==2; ruidoS=0.0001; end
if resp==3; ruidoS=0.00; end
%-----

%-----Condiciones Iniciales-----
resp = menu('Condiciones iniciales a utilizar','Multiples Condiciones Iniciales','Una
sola Condicion Inicial');
if resp==1; Nini = 20; end
if resp==2
Nini = 1;
CA = 0.10;      %Concentración de material A a la salida [mol]

```

```

CB = 0.40;      %Concentración de material B a la salida [mol]
CC = 0.10;      %Concentración de material C a la salida [mol]
CD = 0.40;      %Concentración de material D a la salida [mol]
T = 309;        %Temperatura en el reactor a la salida  [°K]
Tr = 304;       %Temperatura en el refrigerante a la salida [°K]
Ph = 1;        %Variable auxiliar para determinar el pH
end

disp('RED NEURONAL - ENTRENAMIENTO')
disp(' ')
% ENTRENAMIENTO DE LA RED NEURONAL

for ini=1:Nini

    if Nini==20; ReactorCondicionesIniciales; end

    x = [0; 0; 0];
    t = 0;
    control = [0;0;0];
    controlK_1 = [CiA;CiB;Tir];

    for k = 1:ndata-1

        Err(1,1) = escM1*(CC-ref(1))+escB1;      %CC
        Err(2,1) = escM1*(CD-ref(2))+escB1;      %CD
        Err(3,1) = escM2*(T-ref(3))+escB2;      %T

        %ENTRADA a la Red : Error Escalado
        in_red(1,1) = Err(1);
        in_red(2,1) = Err(2);
        in_red(3,1) = Err(3);

        %Red Neuronal
        m = v'*in_red;
        n = 2.0./(1 + exp(-(m-c)./a)) - 1;      %Sigmoidea
        %n = exp((-m-c).^2)./a);              %Gauseana
        out_red = w'*n;

        y = Err;

        %SALIDA: Desescalamiento y Saturacion
        control = [escM7*out_red(1)+escB7; escM7*out_red(2)+escB7;
        escM8*out_red(3)+escB8];
        control = 0.1*controlK_1 + control;
        if control(1)>0.5; control(1) = 0.5; end
        if control(1)<0; control(1) = 0; end
        if control(2)>0.5; control(2) = 0.5; end
        if control(2)<0; control(2) = 0; end
        if control(3)>350; control(3) = 350; end
        if control(3)<275; control(3) = 275; end
        controlK_1 = control;

        CiA = control(1); CiB = control(2); Tir = control(3);

        %-----RUIDO-ACTUADOR-----
        CiA = CiA + CiA*ruidoA*randn(1);
        CiB = CiB + CiB*ruidoA*randn(1);
        Tir = Tir + Tir*ruidoA*randn(1);
        %-----RUIDO-ACTUADOR-----

        %MODELO MATEMATICO DEL SISTEMA

        %Terminos auxiliares
        K = Ko * exp(-Ex/T);
        F = (FiA + FiB)/2;      %flujo promedio
        pH = 11 + log10(Ph);
        Cp = CA*CpA + CB*CpB + CC*CpC + CD*CpD;
        dH = hr + (CpC + CpD - CpA - CpB)*(T-Tref);
        %Almacenar datos
        tiempo(k) = t;
        mSPc(k) = ref(1);
    end
end

```

```

    mSPt(k) = ref(3);
    mCA(k,ini) = CA;
    mCB(k,ini) = CB;
    mCC(k,ini) = CC;
    mCD(k,ini) = CD;
    mT(k,ini) = T;
    mTr(k,ini) = Tr;
    mTir(k,ini) = Tir;
    mCiA(k,ini) = CiA;
    mCiB(k,ini) = CiB;
    mpH(k,ini) = pH;
    %Calcular las derivadas del Reactor
    CAp = (FiA*CiA - F*CA - K*CA*CB*V) / V;
    CBp = (FiB*CiB - F*CB - K*CA*CB*V) / V;
    CCP = (-F*CC + K*CA*CB*V) / V;
    CDP = (-F*CD + K*CA*CB*V) / V;
    Tp = (U*A*(Tr-T)/(V*dL) - FiA*CiA*CpA*(T-TiA) - FiB*CiB*CpB*(T-TiB) +
    dH*K*CA*CB*V) / (V*Cp);
    Trp = (Fr*dr*Cpr*(Tir-Tr) + U*A*(T-Tr)) / (Vr*dr*Cpr);
    Php = (FiA*pHA + FiB*pHB - 2*F*Ph - K*CA*CB) / V;
    %Integrar por Euler
    CA = CA + CAp*dt;
    CB = CB + CBp*dt;
    CC = CC + CCP*dt;
    CD = CD + CDP*dt;
    T = T + Tp*dt;
    Tr = Tr + Trp*dt;
    Ph = Ph + Php*dt;
    t = t + dt;
    x = [Err(1); Err(2); Err(3)]; %Nuevo X para el Neurocontrolador
    %-----RUIDO-SENSOR-----
    CC = CC + CC*ruidoS*randn(1);
    CD = CD + CD*ruidoS*randn(1);
    T = T + T*ruidoS*randn(1);
    %-----RUIDO-SENSOR-----

end

end

figure(1)
subplot(211)
plot(tiempo, mCA)
grid on
title('Concentracion A: Hidroxido de Sodio')
subplot(212)
plot(tiempo, mCB)
grid on
title('Concentracion B: Acetato de Etilo')

figure(2)
subplot(211)
plot(tiempo, mCC)
hold on
plot(tiempo, mSPc,'r')
grid on
title('Concentracion C: Acetato de Sodio')
subplot(212)
plot(tiempo, mCD)
hold on
plot(tiempo, mSPc,'r')
grid on
title('Concentracion D: Etanol')

figure(3)
subplot(311)
plot(tiempo, mT)
title('Temperatura dentro del Reactor')
hold on
plot(tiempo, mSPt,'r')
grid on
subplot(312)
plot(tiempo, mTr)

```

```

    grid on
    title('Temperatura en la Camisa de Refrigeracion')
subplot(313)
    plot(tiempo, mpH)
    grid on
    title('Nivel de pH en el Reactor')

figure(4)
subplot(311)
    plot(tiempo, mCC)
    hold on
    plot(tiempo, mSPc, 'r')
    grid on
    title('Concentracion C: Acetato de Sodio')
    axis([0 t+dt 0 0.5])
subplot(312)
    plot(tiempo, mCD)
    hold on
    plot(tiempo, mSPc, 'r')
    grid on
    title('Concentracion D: Etanol')
    axis([0 t+dt 0 0.5])
subplot(313)
    plot(tiempo, mT)
    title('Temperatura dentro del Reactor')
    hold on
    plot(tiempo, mSPT, 'r')
    grid on
    axis([0 t+dt 295 320])

figure(5)
subplot(311)
    plot(tiempo, mCiA)
    grid on
    title('Concentracion A Entrada')
    axis([0 t+dt 0 0.5])
subplot(312)
    plot(tiempo, mCiB)
    grid on
    title('Concentracion B Entrada')
    axis([0 t+dt 0 0.5])
subplot(313)
    plot(tiempo, mTir)
    title('Temperatura Refrigerante Entrada')
    grid on
    axis([0 t+dt 275 350])

```

NC Estatico Modificado3.m

```

%-----
% Tesis : "Diseño de un Neurocontrolador Dinámico (DBP) aplicado a un
% Reactor Químico Continuo (CSTR)"
%
% NEUROCONTROLADOR ESTATICO MODIFICADO APLICADO A UN REACTOR CSTR
%
% (SE HACE USO DE DATOS 3 ANTERIORES POR CADA ESTADO)
%
% Algoritmo de RetroPropagacion de Errores
% Entrenamiento tipo PATRON - VARIAS Condicion Inicial
%-----
%
% VALIDACION ANTE PERTURBACIONES Y RUIDO (SEÑAL DE CONTROL y SENSORES)
%
%-----

clear all
close all
clc

% ESCALAMIENTO y DEESCALAMIENTO:

```

```

% (Y = escM * X + escB) en funcion al rango de saturacion
%Escalar el Error
escM1 = 2/(0.25-(-0.25)); escB1 = 1-0.25*escM1;      %(Cc-refCc),(Cd-refCd)
escM2 = 2/(20-(-20));   escB2 = 1-20*escM2;        %(T-refT)
%Salida hacia actuador
escM7 = (0.5-(0))/1.8; escB7 = 0.5-0.9*escM7;      %CiA, CiB
escM8 = (350-275)/1.8; escB8 = 350-0.9*escM8;     %Tir

%Neuronas
ne = 9;          %Entradas
nm = 9;          %Neuronas
ns = 3;          %Salidas
ndata = 3000;   %cantidad de datos

%Pesos
load pesosNCM2.mat

%Referencia: ref = [Cc;Cd;T]
ref = [0.25; 0.25; 304];

%Tiempo y Error
dt = 0.1; t=0;

%=====
%                               MODELO MATEMATICO
%-----

%Declaracion de Constantes
Ex = 2407.2; %Energía activación y Const. Botzmann
Ko = 63380; %Fact.Esterico * Frec.Colisiones [mol^n/(seg*m^3)]
V = 7.9; %Volumen del tanque [m^3]
Vr = 8; %Volumen de la camisa de refrigeración [m^3]
A = 24; %Superficie o área para la transferencia de calor [m^2]
Cpr = 4.19; %Calor especifico del refrigerante (agua) [kJ/(Kg*°K)]
dr = 1000; %Densidad del refrigerante(agua) [Kg/m3]
dL = 76; %Densidad del liquido en el tanque [Kg/m3]
pHA = 13.3; %Valor de pH del material A
pHB = 7.10; %Valor de pH del material B
CpA = 3.26; %Capacidad calorífica del material A [kJ/(Kg*°K)]
CpB = 2.02; %Capacidad calorífica del material B [kJ/(Kg*°K)]
CpC = 2.51; %Capacidad calorífica del material C [kJ/(Kg*°K)]
CpD = 3.76; %Capacidad calorífica del material D [kJ/(Kg*°K)]

%Perturbaciones
FiA = 0.2; %Velocidad de flujo molar de A a la entrada [lit/seg]
FiB = 0.2; %Velocidad de flujo molar de B a la entrada [lit/seg]
TiA = 300; %Temperatura del material A en la entrada[°K]
TiB = 300; %Temperatura del material B en la entrada[°K]
Fr = 0.40; %Flujo del líquido refrigerante [lit/seg]

%Inicializacion de Señal de Control
Tir = 300; %Temperatura del refrigerante a la entrada [°K]
CiA = 0.2; %Concentración de material A a la entrada[mol]
CiB = 0.2; %Concentración de material B a la entrada[mol]

%Terminos auxiliares
U = 19.19/A; %Coeficiente de transferencia de calor [J/(°K*seg*m2)]
F = (FiA+FiB)/2; %Velocidad de flujo molar a la salida [lit/seg]
%K Constante de velocidad [moln/(seg*m3)]
%pH Valor de pH dentro del reactor
%Cp Capacidad calorífica general
%dH Calor desarrollado en la reacción (entalpias) [kJ/C]
%hr %Entalpia relativa para una Tref de 300°K

%Calculo de Entalpia referencial (hr)
Tref = 300;
hr = (CpC + CpD - CpA - CpB);

%Ingresar Perturbaciones :

```

```

resp = menu('Ingresar Perturbaciones', ' SI ', ' NO ');
if resp==1
disp('Ingresar Perturbaciones :');
Pfia = input('Ingresar Perturbacion para FiA (-50% a 50%) : ')/100;
Pfib = input('Ingresar Perturbacion para FiB (-50% a 50%) : ')/100;
Ptia = input('Ingresar Perturbacion para TiA (-2% a 2%) : ')/100;
Ptib = input('Ingresar Perturbacion para TiB (-2% a 2%) : ')/100;
Pfr = input('Ingresar Perturbacion para Fr (-50% a 50%) : ')/100;

if Pfia>0.5; Pfia=0.5; end
if Pfib>0.5; Pfib=0.5; end
if Ptia>0.02; Ptia=0.02; end
if Ptib>0.02; Ptib=0.02; end
if Pfr>0.5; Pfr=0.5; end
if Pfia<-0.5; Pfia=-0.5; end
if Pfib<-0.5; Pfib=-0.5; end
if Ptia<-0.02; Ptia=-0.02; end
if Ptib<-0.02; Ptib=-0.02; end
if Pfr<-0.5; Pfr=-0.5; end

FiA = FiA + FiA*Pfia;
FiB = FiB + FiB*Pfib;
TiA = TiA + TiA*Ptia;
TiB = TiB + TiB*Ptib;
Fr = Fr + Fr*Pfr;
end

%-----
%Ruido en Actuadores: (+/- 20%)
resp = menu('Ingresar Ruido en Actuadores:', 'Mucho (+/- 20%)', 'Poco (+/- 10%)',
'Nada');
if resp==1; ruidoA=0.04; end
if resp==2; ruidoA=0.02; end
if resp==3; ruidoA=0.00; end
%-----
%Ruido en Sensores: (+/- 0.5%)
resp = menu('Ingresar Ruido en Sensores:', 'Mucho (+/- 1.0%)', 'Poco (+/- 0.5%)',
'Nada');
if resp==1; ruidoS=0.0002; end
if resp==2; ruidoS=0.0001; end
if resp==3; ruidoS=0.00; end
%-----

%-----Condiciones Iniciales-----
resp = menu('Condiciones iniciales a utilizar','Multiples Condiciones Iniciales','Una
sola Condicion Inicial');
if resp==1; Nini = 20; end
if resp==2
Nini = 1;
CA = 0.10; %Concentración de material A a la salida [mol]
CB = 0.40; %Concentración de material B a la salida [mol]
CC = 0.10; %Concentración de material C a la salida [mol]
CD = 0.40; %Concentración de material D a la salida [mol]
T = 309; %Temperatura en el reactor a la salida [°K]
Tr = 304; %Temperatura en el refrigerante a la salida [°K]
Ph = 1; %Variable auxiliar para determinar el pH
end

disp('RED NEURONAL - ENTRENAMIENTO')
disp(' ')

% ENTRENAMIENTO DE LA RED NEURONAL

for ini=1:Nini

if Nini==20; ReactorCondicionesIniciales; end

x = [0; 0; 0];
t = 0;
control = [0;0;0];

```

```

controlK_1 = [CiA;CiB;Tir];
Ek_0=[0;0;0]; Ek_1=[0;0;0]; Ek_2=[0;0;0]; %Error en Tiempos Anteriores

for k = 1:ndata-1

    Err(1,1) = escM1*(CC-ref(1))+escB1; %CC
    Err(2,1) = escM1*(CD-ref(2))+escB1; %CD
    Err(3,1) = escM2*(T-ref(3))+escB2; %T

    Ek_2 = Ek_1;
    Ek_1 = Ek_0;
    Ek_0 = Err;
    Ek = [Ek_0; Ek_1; Ek_2];

%ENTRADA a la Red : Error Escalado
in_red(1,1) = Ek(1);
in_red(2,1) = Ek(2);
in_red(3,1) = Ek(3);
in_red(4,1) = Ek(4);
in_red(5,1) = Ek(5);
in_red(6,1) = Ek(6);
in_red(7,1) = Ek(7);
in_red(8,1) = Ek(8);
in_red(9,1) = Ek(9);

%Red Neuronal
m = v'*in_red;
n = 2.0./(1 + exp(-(m-c)./a)) - 1; %Sigmoidea
% n = exp(-(m-c).^2)./a; %Gauseana
out_red = w'*n;

y = Err;

%SALIDA: Desescalamiento y Saturacion
control = [escM7*out_red(1)+escB7; escM7*out_red(2)+escB7;
escM8*out_red(3)+escB8];
control = 0.1*controlK_1 + control;
if control(1)>0.5; control(1) = 0.5; end
if control(1)<0; control(1) = 0; end
if control(2)>0.5; control(2) = 0.5; end
if control(2)<0; control(2) = 0; end
if control(3)>350; control(3) = 350; end
if control(3)<275; control(3) = 275; end
controlK_1 = control;

CiA = control(1); CiB = control(2); Tir = control(3);

%-----RUIDO-ACTUADOR-----
CiA = CiA + CiA*ruidoA*randn(1);
CiB = CiB + CiB*ruidoA*randn(1);
Tir = Tir + Tir*ruidoA*randn(1);
%-----RUIDO-ACTUADOR-----

%MODELO MATEMATICO DEL SISTEMA

%Terminos auxiliares
K = Ko * exp(-Ex/T);
F = (FiA + FiB)/2; %flujo promedio
pH = 11 + log10(Ph);
Cp = CA*CpA + CB*CpB + CC*CpC + CD*CpD;
dH = hr + (CpC + CpD - CpA - CpB)*(T-Tref);
%Almacenar datos
tiempo(k) = t;
mSPc(k) = ref(1);
mSPt(k) = ref(3);
mCA(k,ini) = CA;
mCB(k,ini) = CB;
mCC(k,ini) = CC;
mCD(k,ini) = CD;
mT(k,ini) = T;
mTr(k,ini) = Tr;
mTir(k,ini) = Tir;

```

```

    mCiA(k,ini) = CiA;
    mCiB(k,ini) = CiB;
    mpH(k,ini) = pH;
    %Calcular las derivadas del Reactor
    CAp = (FiA*CiA - F*CA - K*CA*CB*V) / V;
    CBp = (FiB*CiB - F*CB - K*CA*CB*V) / V;
    CCp = (-F*CC + K*CA*CB*V) / V;
    CDp = (-F*CD + K*CA*CB*V) / V;
    Tp = (U*A*(Tr-T)/(V*dL) - FiA*CiA*CpA*(T-TiA) - FiB*CiB*CpB*(T-TiB) +
    dH*K*CA*CB*V) / (V*Cp);
    Trp = (Fr*dr*Cpr*(Tir-Tr) + U*A*(T-Tr)) / (Vr*dr*Cpr);
    Php = (FiA*pHA + FiB*pHB - 2*F*Ph - K*CA*CB) / V;
    %Integrar por Euler
    CA = CA + CAp*dt;
    CB = CB + CBp*dt;
    CC = CC + CCp*dt;
    CD = CD + CDp*dt;
    T = T + Tp*dt;
    Tr = Tr + Trp*dt;
    Ph = Ph + Php*dt;
    t = t + dt;
    x = [Ek]; %Nuevo X para el Neurocontrolador
    %-----RUIDO-SENSOR-----
    CC = CC + CC*ruidoS*randn(1);
    CD = CD + CD*ruidoS*randn(1);
    T = T + T*ruidoS*randn(1);
    %-----RUIDO-SENSOR-----

end

end

figure(1)
subplot(211)
plot(tiempo, mCA)
grid on
title('Concentracion A: Hidroxido de Sodio')
subplot(212)
plot(tiempo, mCB)
grid on
title('Concentracion B: Acetato de Etilo')

figure(2)
subplot(211)
plot(tiempo, mCC)
hold on
plot(tiempo, mSPc,'r')
grid on
title('Concentracion C: Acetato de Sodio')
subplot(212)
plot(tiempo, mCD)
hold on
plot(tiempo, mSPc,'r')
grid on
title('Concentracion D: Etanol')

figure(3)
subplot(311)
plot(tiempo, mT)
title('Temperatura dentro del Reactor')
hold on
plot(tiempo, mSPT,'r')
grid on
subplot(312)
plot(tiempo, mTr)
grid on
title('Temperatura en la Camisa de Refrigeracion')
subplot(313)
plot(tiempo, mpH)
grid on

```

```

    title('Nivel de pH en el Reactor')

figure(4)
subplot(311)
    plot(tiempo, mCC)
    hold on
    plot(tiempo, mSPc, 'r')
    grid on
    title('Concentracion C: Acetato de Sodio')
    axis([0 t+dt 0 0.5])
subplot(312)
    plot(tiempo, mCD)
    hold on
    plot(tiempo, mSPc, 'r')
    grid on
    title('Concentracion D: Etanol')
    axis([0 t+dt 0 0.5])
subplot(313)
    plot(tiempo, mT)
    title('Temperatura dentro del Reactor')
    hold on
    plot(tiempo, mSPt, 'r')
    grid on
    axis([0 t+dt 295 320])

figure(5)
subplot(311)
    plot(tiempo, mCiA)
    grid on
    title('Concentracion A Entrada')
    axis([0 t+dt 0 0.5])
subplot(312)
    plot(tiempo, mCiB)
    grid on
    title('Concentracion B Entrada')
    axis([0 t+dt 0 0.5])
subplot(313)
    plot(tiempo, mTir)
    title('Temperatura Refrigerante Entrada')
    grid on
    axis([0 t+dt 275 350])


```

NC Dinamico DBP3.m

```

%-----
% Tesis : "Diseño de un Neurocontrolador Dinámico (DBP) aplicado a un
% Reactor Químico Continuo (CSTR)"
%
% NEUROCONTROLADOR DINAMICO APLICADO A UN REACTOR CSTR
%
% Dynamic Back Propagation - DBP/ Para VARIAS condiciones iniciales
%=====
% Entradas : IN = [(CC-refCC) (CD-refCD) (T-refT)]
% Señal de control : [CiA CiB Tir]
% Estados del Sistema :[CA CB CC CD T Tr pH]
%-----
%
%
% VALIDACION ANTE PERTURBACIONES Y RUIDO EN LA SEÑAL DE CONTROL
%-----

clear all
close all
clc

% ESCALAMIENTO y DESESCALAMIENTO:
% (Y = escM * X + escB) en funcion al rango de saturacion
escM1 = 6/(0.25-(-0.25)); escB1 = 3-0.25*escM1;      %(Cc-refCc),(Cd-refCd)
escM2 = 6/(20-(-20)); escB2 = 3-20*escM2;          %(T-refT)

```

```

%Salida hacia actuador
escM7 = (0.5-(0))/1.8; escB7 = 0.5-0.9*escM7; %CiA, CiB
escM8 = (350-275)/1.8; escB8 = 350-0.9*escM8; %Tir

%Neuronas
ne = 3; %Entradas
nm = 3; %Neuronas
ns = 3; %Salidas
ndata = 3000; %cantidad de datos

%Pesos
load pesosDBP2.mat

%Referencia: ref = [Cc;Cd;T]
ref = [0.25; 0.25; 304];

%Tiempo y Error
dt = 0.1; t=0;

%-----
%
% MODELO MATEMATICO
%-----

%Declaracion de Constantes
Ex = 2407.2; %Energía activación y Const. Botzmann
Ko = 63380; %Fact.Esterico * Frec.Colisiones [mol^n/(seg*m^3)]
V = 7.9; %Volumen del tanque [m^3]
Vr = 8; %Volumen de la camisa de refrigeración [m^3]
A = 24; %Superficie o área para la transferencia de calor [m^2]
Cpr = 4.19; %Calor especifico del refrigerante (agua) [kJ/(Kg*°K)]
dr = 1000; %Densidad del refrigerante(agua) [Kg/m3]
dL = 76; %Densidad del liquido en el tanque [Kg/m3]
pHA = 13.3; %Valor de pH del material A
pHB = 7.10; %Valor de pH del material B
CpA = 3.26; %Capacidad calorífica del material A [kJ/(Kg*°K)]
CpB = 2.02; %Capacidad calorífica del material B [kJ/(Kg*°K)]
CpC = 2.51; %Capacidad calorífica del material C [kJ/(Kg*°K)]
CpD = 3.76; %Capacidad calorífica del material D [kJ/(Kg*°K)]

%Perturbaciones
FiA = 0.2; %Velocidad de flujo molar de A a la entrada [lit/seg]
FiB = 0.2; %Velocidad de flujo molar de B a la entrada [lit/seg]
TiA = 300; %Temperatura del material A en la entrada[°K]
TiB = 300; %Temperatura del material B en la entrada[°K]
Fr = 0.40; %Flujo del líquido refrigerante [lit/seg]

%Inicializacion de Señal de Control
Tir = 300; %Temperatura del refrigerante a la entrada [°K]
CiA = 0.2; %Concentración de material A a la entrada[mol]
CiB = 0.2; %Concentración de material B a la entrada[mol]

%Terminos auxiliares
U = 19.19/A; %Coeficiente de transferencia de calor [J/(°K*seg*m2)]
F = (FiA+FiB)/2; %Velocidad de flujo molar a la salida [lit/seg]
%K Constante de velocidad [moln/(seg*m3)]
%pH Valor de pH dentro del reactor
%Cp Capacidad calorífica general
%dH Calor desarrollado en la reacción (entalpias) [kJ/C]
%hr %Entalpia relativa para una Tref de 300°K

%Calculo de Entalpia referencial (hr)
Tref = 300;
hr = (CpC + CpD - CpA - CpB);

%-----
%Ingresar Perturbaciones :
resp = menu('Ingresar Perturbaciones', ' SI ', ' NO ');
if resp==1
disp('Ingresar Perturbaciones :');

```

```

Pfia = input('Ingresar Perturbacion para FiA (-50% a 50%) : ')/100;
Pfib = input('Ingresar Perturbacion para FiB (-50% a 50%) : ')/100;
Ptia = input('Ingresar Perturbacion para TiA (-2% a 2%) : ')/100;
Ptib = input('Ingresar Perturbacion para TiB (-2% a 2%) : ')/100;
Pfr = input('Ingresar Perturbacion para Fr (-50% a 50%) : ')/100;

if Pfia>0.5; Pfia=0.5; end
if Pfib>0.5; Pfib=0.5; end
if Ptia>0.02; Ptia=0.02; end
if Ptib>0.02; Ptib=0.02; end
if Pfr>0.5; Pfr=0.5; end
if Pfia<-0.5; Pfia=-0.5; end
if Pfib<-0.5; Pfib=-0.5; end
if Ptia<-0.02; Ptia=-0.02; end
if Ptib<-0.02; Ptib=-0.02; end
if Pfr<-0.5; Pfr=-0.5; end

FiA = FiA + FiA*Pfia;
FiB = FiB + FiB*Pfib;
TiA = TiA + TiA*Ptia;
TiB = TiB + TiB*Ptib;
Fr = Fr + Fr*Pfr;
end

%-----
%Ruido en Actuadores: (+/- 20%)
resp = menu('Ingresar Ruido en Actuadores:', 'Mucho (+/- 20%)', 'Poco (+/- 10%)',
'Nada');
if resp==1; ruidoA=0.04; end
if resp==2; ruidoA=0.02; end
if resp==3; ruidoA=0.00; end
%-----
%Ruido en Sensores: (+/- 0.5%)
resp = menu('Ingresar Ruido en Sensores:', 'Mucho (+/- 1.0%)', 'Poco (+/- 0.5%)',
'Nada');
if resp==1; ruidoS=0.0002; end
if resp==2; ruidoS=0.0001; end
if resp==3; ruidoS=0.00; end
%-----
%-----Condiciones Iniciales-----
resp = menu('Condiciones iniciales a utilizar', 'Multiples Condiciones Iniciales', 'Una
sola Condicion Inicial');
if resp==1; Nini = 20; end
if resp==2
Nini = 1;
CA = 0.10; %Concentración de material A a la salida [mol]
CB = 0.40; %Concentración de material B a la salida [mol]
CC = 0.10; %Concentración de material C a la salida [mol]
CD = 0.40; %Concentración de material D a la salida [mol]
T = 309; %Temperatura en el reactor a la salida [°K]
Tr = 304; %Temperatura en el refrigerante a la salida [°K]
Ph = 1; %Variable auxiliar para determinar el pH
end

disp('RED NEURONAL - ENTRENAMIENTO')
disp(' ')

% ENTRENAMIENTO DE LA RED NEURONAL

for ini=1:Nini

if Nini==20; ReactorCondicionesIniciales; end

x = [0; 0; 0];
t = 0;
control = [0;0;0];
controlK_1 = [CiA;CiB;Tir];

for k = 1:ndata-1

Err(1,1) = escM1*(CC-ref(1))+escB1; %CC
Err(2,1) = escM1*(CD-ref(2))+escB1; %CD

```

```

Err(3,1) = escM2*(T-ref(3))+escB2;           %T

%ENTRADA a la Red : Error Escalado
in_red(1,1) = Err(1);
in_red(2,1) = Err(2);
in_red(3,1) = Err(3);

%Red Neuronal
m = v'*in_red;
n = 2.0./(1 + exp(-(m-c)./a)) - 1;         %Sigmoidea
% n = exp(-(m-c).^2)./a);                 %Gauseana
out_red = w'*n;

y = Err;

%SALIDA: Desescalamiento y Saturacion
control = [escM7*out_red(1)+escB7; escM7*out_red(2)+escB7;
escM8*out_red(3)+escB8];
control = 0.1*controlK_1 + control;
if control(1)>0.5; control(1) = 0.5; end
if control(1)<0; control(1) = 0; end
if control(2)>0.5; control(2) = 0.5; end
if control(2)<0; control(2) = 0; end
if control(3)>350; control(3) = 350; end
if control(3)<275; control(3) = 275; end
controlK_1 = control;

CiA = control(1); CiB = control(2); Tir = control(3);

%-----RUIDO-ACTUADOR-----
CiA = CiA + CiA*ruidoA*randn(1);
CiB = CiB + CiB*ruidoA*randn(1);
Tir = Tir + Tir*ruidoA*randn(1);
%-----RUIDO-ACTUADOR-----

%MODELO MATEMATICO DEL SISTEMA

%Terminos auxiliares
K = Ko * exp(-Ex/T);
F = (FiA + FiB)/2; %flujo promedio
pH = 11 + log10(Ph);
Cp = CA*CpA + CB*CpB + CC*CpC + CD*CpD;
dH = hr + (CpC + CpD - CpA - CpB)*(T-Tref);
%Almacenar datos
tiempo(k) = t;
mSPc(k) = ref(1);
mSPt(k) = ref(3);
mCA(k,ini) = CA;
mCB(k,ini) = CB;
mCC(k,ini) = CC;
mCD(k,ini) = CD;
mT(k,ini) = T;
mTr(k,ini) = Tr;
mTir(k,ini) = Tir;
mCiA(k,ini) = CiA;
mCiB(k,ini) = CiB;
mpH(k,ini) = pH;
%Calcular las derivadas del Reactor
CAp = (FiA*CiA - F*CA - K*CA*CB*V) / V;
CBp = (FiB*CiB - F*CB - K*CA*CB*V) / V;
CCp = (-F*CC + K*CA*CB*V) / V;
CDp = (-F*CD + K*CA*CB*V) / V;
Tp = (U*A*(Tr-T)/(V*dL) - FiA*CiA*CpA*(T-TiA) - FiB*CiB*CpB*(T-TiB) +
dH*K*CA*CB*V) / (V*Cp);
Trp = (Fr*dr*Cpr*(Tir-Tr) + U*A*(T-Tr)) / (Vr*dr*Cpr);
Php = (FiA*pHA + FiB*pHB - 2*F*Ph - K*CA*CB) / V;
%Integrar por Euler
CA = CA + CAp*dt;
CB = CB + CBp*dt;
CC = CC + CCp*dt;
CD = CD + CDp*dt;
T = T + Tp*dt;

```

```

Tr = Tr + Trp*dt;
Ph = Ph + Php*dt;
t = t + dt;
x = [Err(1); Err(2); Err(3)]; %Nuevo X para el Neurocontrolador
%-----RUIDO-SENSOR-----
CC = CC + CC*ruidoS*randn(1);
CD = CD + CD*ruidoS*randn(1);
T = T + T*ruidoS*randn(1);
%-----RUIDO-SENSOR-----

end

end

figure(1)
subplot(211)
plot(tiempo, mCA)
grid on
title('Concentracion A: Hidroxido de Sodio')
subplot(212)
plot(tiempo, mCB)
grid on
title('Concentracion B: Acetato de Etilo')

figure(2)
subplot(211)
plot(tiempo, mCC)
hold on
plot(tiempo, mSPc, 'r')
grid on
title('Concentracion C: Acetato de Sodio')
subplot(212)
plot(tiempo, mCD)
hold on
plot(tiempo, mSPc, 'r')
grid on
title('Concentracion D: Etanol')

figure(3)
subplot(311)
plot(tiempo, mT)
title('Temperatura dentro del Reactor')
hold on
plot(tiempo, mSPt, 'r')
grid on
subplot(312)
plot(tiempo, mTr)
grid on
title('Temperatura en la Camisa de Refrigeracion')
subplot(313)
plot(tiempo, mpH)
grid on
title('Nivel de pH en el Reactor')

figure(4)
subplot(311)
plot(tiempo, mCC)
hold on
plot(tiempo, mSPc, 'r')
grid on
title('Concentracion C: Acetato de Sodio')
axis([0 t+dt 0 0.5])
subplot(312)
plot(tiempo, mCD)
hold on
plot(tiempo, mSPc, 'r')
grid on
title('Concentracion D: Etanol')
axis([0 t+dt 0 0.5])
subplot(313)
plot(tiempo, mT)

```

```

title('Temperatura dentro del Reactor')
hold on
plot(tiempo, mSPt, 'r')
grid on
axis([0 t+dt 295 320])

figure(5)
subplot(311)
plot(tiempo, mCiA)
grid on
title('Concentracion A Entrada')
axis([0 t+dt 0 0.5])
subplot(312)
plot(tiempo, mCiB)
grid on
title('Concentracion B Entrada')
axis([0 t+dt 0 0.5])
subplot(313)
plot(tiempo, mTir)
title('Temperatura Refrigerante Entrada')
grid on
axis([0 t+dt 275 350])

```

NC Inicializacion.m

```

%-----
%                               REACTOR QUIMICO AGITADO CONTINUO
%                               MODELO MATEMATICO
%-----
% Este programa INICIALIZA las CONSTANTES y CONDICIONES INICIALES
%   /// Este programa es llamado desde el NEUROCONTROLADOR ///
%-----
% Reaccion de Saponificacion de Hidroxido de Sodio (A)
% y Acetato de Etilo (B), se obtiene : Acetato de Sodio (C)
% y Etanol (D)
%-----

%Declaracion de Constantes
Ex = 2407.2; %Energía activación y Const. Botzmann
Ko = 63380; %Fact.Esterico * Frec.Colisiones [mol^n/(seg*m^3)]
V = 7.9; %Volumen del tanque [m^3]
Vr = 8; %Volumen de la camisa de refrigeración [m^3]
A = 24; %Superficie o área para la transferencia de calor [m^2]
Cpr = 4.19; %Calor especifico del refrigerante (agua) [kJ/(Kg*°K)]
dr = 1000; %Densidad del refrigerante (agua) [Kg/m3]
dL = 76; %Densidad del liquido en el tanque [Kg/m3]
pHA = 13.3; %Valor de pH del material A
pHB = 7.10; %Valor de pH del material B
CpA = 3.26; %Capacidad calorífica del material A [kJ/(Kg*°K)]
CpB = 2.02; %Capacidad calorífica del material B [kJ/(Kg*°K)]
CpC = 2.51; %Capacidad calorífica del material C [kJ/(Kg*°K)]
CpD = 3.76; %Capacidad calorífica del material D [kJ/(Kg*°K)]

%Perturbaciones
FiA = 0.2; %Velocidad de flujo molar de A a la entrada [lit/seg]
FiB = 0.2; %Velocidad de flujo molar de B a la entrada [lit/seg]
TiA = 300; %Temperatura del material A en la entrada[°K]
TiB = 300; %Temperatura del material B en la entrada[°K]
Fr = 0.40; %Flujo del líquido refrigerante [lit/seg]

%Señal de Control
Tir = 300; %Temperatura del refrigerante a la entrada [°K]
CiA = 0.2; %Concentración de material A a la entrada[mol]
CiB = 0.2; %Concentración de material B a la entrada[mol]

%Inicializacion de Variables (Condiciones Iniciales)
%CA = 0.08; %Concentración de material A a la salida [mol]
%CB = 0.08; %Concentración de material B a la salida [mol]
%CC = 0.09; %Concentración de material C a la salida [mol]
%CD = 0.15; %Concentración de material D a la salida [mol]

```



```

CD = 0.20;      %Concentración de material D a la salida [mol]
T = 305;       %Temperatura en el reactor a la salida      [°K]
Tr = 336;      %Temperatura en el refrigerante a la salida [°K]
Ph = 1000;     %Variable auxiliar para determinar el pH

case {6}
CA = 0.20;     %Concentración de material A a la salida [mol]
CB = 0.30;     %Concentración de material B a la salida [mol]
CC = 0.20;     %Concentración de material C a la salida [mol]
CD = 0.30;     %Concentración de material D a la salida [mol]
T = 304;       %Temperatura en el reactor a la salida      [°K]
Tr = 332;      %Temperatura en el refrigerante a la salida [°K]
Ph = 0.01;     %Variable auxiliar para determinar el pH

case {7}
CA = 0.15;     %Concentración de material A a la salida [mol]
CB = 0.35;     %Concentración de material B a la salida [mol]
CC = 0.15;     %Concentración de material C a la salida [mol]
CD = 0.35;     %Concentración de material D a la salida [mol]
T = 302;       %Temperatura en el reactor a la salida      [°K]
Tr = 328;      %Temperatura en el refrigerante a la salida [°K]
Ph = 0.1;      %Variable auxiliar para determinar el pH

case {8}
CA = 0.10;     %Concentración de material A a la salida [mol]
CB = 0.40;     %Concentración de material B a la salida [mol]
CC = 0.10;     %Concentración de material C a la salida [mol]
CD = 0.40;     %Concentración de material D a la salida [mol]
T = 300;       %Temperatura en el reactor a la salida      [°K]
Tr = 324;      %Temperatura en el refrigerante a la salida [°K]
Ph = 1;        %Variable auxiliar para determinar el pH

case {9}
CA = 0.05;     %Concentración de material A a la salida [mol]
CB = 0.45;     %Concentración de material B a la salida [mol]
CC = 0.05;     %Concentración de material C a la salida [mol]
CD = 0.45;     %Concentración de material D a la salida [mol]
T = 298;       %Temperatura en el reactor a la salida      [°K]
Tr = 320;      %Temperatura en el refrigerante a la salida [°K]
Ph = 100;      %Variable auxiliar para determinar el pH

case {10}
CA = 0.00;     %Concentración de material A a la salida [mol]
CB = 0.50;     %Concentración de material B a la salida [mol]
CC = 0.00;     %Concentración de material C a la salida [mol]
CD = 0.50;     %Concentración de material D a la salida [mol]
T = 296;       %Temperatura en el reactor a la salida      [°K]
Tr = 316;      %Temperatura en el refrigerante a la salida [°K]
Ph = 1000;     %Variable auxiliar para determinar el pH

case {11}
CA = 0.50;     %Concentración de material A a la salida [mol]
CB = 0.00;     %Concentración de material B a la salida [mol]
CC = 0.50;     %Concentración de material C a la salida [mol]
CD = 0.00;     %Concentración de material D a la salida [mol]
T = 296;       %Temperatura en el reactor a la salida      [°K]
Tr = 275;      %Temperatura en el refrigerante a la salida [°K]
Ph = 0.01;     %Variable auxiliar para determinar el pH

case {12}
CA = 0.45;     %Concentración de material A a la salida [mol]
CB = 0.05;     %Concentración de material B a la salida [mol]
CC = 0.45;     %Concentración de material C a la salida [mol]
CD = 0.05;     %Concentración de material D a la salida [mol]
T = 298;       %Temperatura en el reactor a la salida      [°K]
Tr = 280;      %Temperatura en el refrigerante a la salida [°K]
Ph = 0.1;      %Variable auxiliar para determinar el pH

case {13}
CA = 0.40;     %Concentración de material A a la salida [mol]
CB = 0.10;     %Concentración de material B a la salida [mol]
CC = 0.40;     %Concentración de material C a la salida [mol]
CD = 0.10;     %Concentración de material D a la salida [mol]
T = 300;       %Temperatura en el reactor a la salida      [°K]

```

```

Tr = 284;      %Temperatura en el refrigerante a la salida  [°K]
Ph = 1;       %Variable auxiliar para determinar el pH

case {14}
CA = 0.35;    %Concentración de material A a la salida [mol]
CB = 0.15;    %Concentración de material B a la salida [mol]
CC = 0.35;    %Concentración de material C a la salida [mol]
CD = 0.15;    %Concentración de material D a la salida [mol]
T = 302;     %Temperatura en el reactor a la salida      [°K]
Tr = 288;    %Temperatura en el refrigerante a la salida  [°K]
Ph = 100;    %Variable auxiliar para determinar el pH

case {15}
CA = 0.30;    %Concentración de material A a la salida [mol]
CB = 0.20;    %Concentración de material B a la salida [mol]
CC = 0.30;    %Concentración de material C a la salida [mol]
CD = 0.20;    %Concentración de material D a la salida [mol]
T = 304;     %Temperatura en el reactor a la salida      [°K]
Tr = 292;    %Temperatura en el refrigerante a la salida  [°K]
Ph = 1000;   %Variable auxiliar para determinar el pH

case {16}
CA = 0.20;    %Concentración de material A a la salida [mol]
CB = 0.30;    %Concentración de material B a la salida [mol]
CC = 0.20;    %Concentración de material C a la salida [mol]
CD = 0.30;    %Concentración de material D a la salida [mol]
T = 305;     %Temperatura en el reactor a la salida      [°K]
Tr = 296;    %Temperatura en el refrigerante a la salida  [°K]
Ph = 0.01;   %Variable auxiliar para determinar el pH

case {17}
CA = 0.15;    %Concentración de material A a la salida [mol]
CB = 0.35;    %Concentración de material B a la salida [mol]
CC = 0.15;    %Concentración de material C a la salida [mol]
CD = 0.35;    %Concentración de material D a la salida [mol]
T = 307;     %Temperatura en el reactor a la salida      [°K]
Tr = 300;    %Temperatura en el refrigerante a la salida  [°K]
Ph = 0.1;    %Variable auxiliar para determinar el pH

case {18}
CA = 0.10;    %Concentración de material A a la salida [mol]
CB = 0.40;    %Concentración de material B a la salida [mol]
CC = 0.10;    %Concentración de material C a la salida [mol]
CD = 0.40;    %Concentración de material D a la salida [mol]
T = 309;     %Temperatura en el reactor a la salida      [°K]
Tr = 304;    %Temperatura en el refrigerante a la salida  [°K]
Ph = 1;      %Variable auxiliar para determinar el pH

case {19}
CA = 0.05;    %Concentración de material A a la salida [mol]
CB = 0.45;    %Concentración de material B a la salida [mol]
CC = 0.05;    %Concentración de material C a la salida [mol]
CD = 0.45;    %Concentración de material D a la salida [mol]
T = 311;     %Temperatura en el reactor a la salida      [°K]
Tr = 308;    %Temperatura en el refrigerante a la salida  [°K]
Ph = 100;    %Variable auxiliar para determinar el pH

case {20}
CA = 0.00;    %Concentración de material A a la salida [mol]
CB = 0.50;    %Concentración de material B a la salida [mol]
CC = 0.00;    %Concentración de material C a la salida [mol]
CD = 0.50;    %Concentración de material D a la salida [mol]
T = 313;     %Temperatura en el reactor a la salida      [°K]
Tr = 312;    %Temperatura en el refrigerante a la salida  [°K]
Ph = 1000;   %Variable auxiliar para determinar el pH

end

```

ReactorModelo.m

%-----

```

%
% REACTOR QUIMICO AGITADO CONTINUO
% MODELO MATEMATICO
%-----
% Reaccion de Saponificacion de Hidroxido de Sodio (A)
% y Acetato de Etilo (B), se obtiene : Acetato de Sodio (C)
% y Etanol (D)
%-----

clear all
close all
clc

%Declaracion de Constantes
Ex = 2407.2; %Energía activación y Const. Botzmann
Ko = 63380; %Fact.Esterico * Frec.Colisiones [mol^n/(seg*m^3)]
V = 7.9; %Volumen del tanque [m^3]
Vr = 8; %Volumen de la camisa de refrigeración [m^3]
A = 24; %Superficie o área para la transferencia de calor [m^2]
Cpr = 4.19; %Calor especifico del refrigerante (agua) [kJ/(Kg*°K)]
dr = 1000; %Densidad del refrigerante(agua) [Kg/m3]
dL = 76; %Densidad del liquido en el tanque [Kg/m3]
pHA = 13.3; %Valor de pH del material A
pHB = 7.10; %Valor de pH del material B
CpA = 3.26; %Capacidad calorífica del material A [kJ/(Kg*°K)]
CpB = 2.02; %Capacidad calorífica del material B [kJ/(Kg*°K)]
CpC = 2.51; %Capacidad calorífica del material C [kJ/(Kg*°K)]
CpD = 3.76; %Capacidad calorífica del material D [kJ/(Kg*°K)]

%Perturbaciones
FiA = 0.01268; %Velocidad de flujo molar de A a la entrada [lit/seg]
FiB = 0.01037; %Velocidad de flujo molar de B a la entrada [lit/seg]
TiA = 300; %Temperatura del material A en la entrada [°K]
TiB = 300; %Temperatura del material B en la entrada [°K]
Fr = 0.4768; %Flujo del líquido refrigerante [lit/seg]

%Señal de Control
Tir = 306; %Temperatura del refrigerante a la entrada [°K]
CiA = 0.2; %Concentración de material A a la entrada[mol]
CiB = 0.2; %Concentración de material B a la entrada[mol]

%Inicializacion de Variables (Condiciones Iniciales)
CA = 0.08; %Concentración de material A a la salida [mol]
CB = 0.08; %Concentración de material B a la salida [mol]
CC = 0.09; %Concentración de material C a la salida [mol]
CD = 0.15; %Concentración de material D a la salida [mol]
T = 306; %Temperatura en el reactor a la salida [°K]
Tr = 300; %Temperatura en el refrigerante a la salida [°K]
Ph = 0.01; %Variable auxiliar para determinar el pH

%Terminos auxiliares
%K Constante de velocidad [moln/(seg*m3)]
%F Velocidad de flujo molar a la salida [lit/seg]
%pH Valor de pH dentro del reactor
%U Coeficiente de transferencia de calor [J/(°K*seg*m2)]
%Cp Capacidad calorífica general
%dH Calor desarrollado en la reacción (entalpias) [kJ/C]
%hr %Entalpia relativa para una Tref de 300°K

%Calculo de Entalpia referencial (hr)
Tref = 300;
hr = (CpC + CpD - CpA - CpB);

%Tiempos
ti = 0;
dt = 0.5;
tf = 2000;
n = 1;

% SIMULACION
for t=ti:dt:tf

```

```

%Terminos auxiliares
K = Ko * exp(-Ex/T);
F = FiA + FiB; %flujo total
F = F/2; %flujo promedio
pH = 11 + log10(Ph);
U = 19.19/A;
Cp = CA*CpA + CB*CpB + CC*CpC + CD*CpD;
dH = hr + (CpC + CpD - CpA - CpB)*(T-Tref);

%Almacenar datos
tiempo(n) = t;
mCA(n) = CA;
mCB(n) = CB;
mCC(n) = CC;
mCD(n) = CD;
mT(n) = T;
mTr(n) = Tr;
mpH(n) = pH;

%Calcular las derivadas
CAp = (FiA*CiA - F*CA - K*CA*CB*V) / V;
CBp = (FiB*CiB - F*CB - K*CA*CB*V) / V;
CCp = (-F*CC + K*CA*CB*V) / V;
CDp = (-F*CD + K*CA*CB*V) / V;
Tp = (U*A*(Tr-T)/(V*dL) - FiA*CiA*CpA*(T-TiA) - FiB*CiB*CpB*(T-TiB) + dH*K*CA*CB*V)
/ (V*Cp);
Trp = (Fr*dr*Cpr*(Tir-Tr) + U*A*(T-Tr)) / (Vr*dr*Cpr);
Php = (FiA*pHA + FiB*pHB - 2*F*Ph - K*CA*CB) / V;

%Integrar por Euler
CA = CA + CAp*dt;
CB = CB + CBp*dt;
CC = CC + CCp*dt;
CD = CD + CDp*dt;
T = T + Tp*dt;
Tr = Tr + Trp*dt;
Ph = Ph + Php*dt;

n=n+1;
end

figure(1)
subplot(211)
plot(tiempo, mCA, '.')
grid on
title('Concentracion A: Hidroxido de Sodio')
subplot(212)
plot(tiempo, mCB, '.')
grid on
title('Concentracion B: Acetato de Etilo')

figure(2)
subplot(211)
plot(tiempo, mCC, '.')
grid on
title('Concentracion C: Acetato de Sodio')
subplot(212)
plot(tiempo, mCD, '.')
grid on
title('Concentracion D: Etanol')

figure(3)
subplot(311)
plot(tiempo, mT, '.')
title('Temperatura dentro del Reactor')
grid on
subplot(312)
plot(tiempo, mTr, '.')
grid on
title('Temperatura en la Camisa de Refrigeracion')

```

```
subplot(313)
plot(tiempo, mpH, '.')
grid on
title('Nivel de pH en el Reactor')

figure(4)
plot(tiempo, mT, '.')
title('Temperatura dentro del Reactor')
xlabel('Tiempo (seg)')
ylabel('Temperatura °K')
axis([0 1500 300 310])
grid on
```

