

Capítulo 5 Pruebas de factibilidad y desempeño de un control híbrido neurodifuso para una unidad turbogás

Chapter 5 Feasibility and Performance of a hybrid neuro-fuzzy system for a gas turbine

VILLAGRÁN-VILLEGAS, Luz Yazmin†*, PATIÑO-ORTIZ, Miguel, HERNÁNDEZ-GÓMEZ, Luis Héctor y SIORDIA-VÁSQUEZ, Xóchitl

*Instituto Politécnico Nacional
Universidad Veracruzana*

ID 1^{er} Autor: *Luz Yazmin, Villagrán-Villegas* / **ORC ID:** 0000-0003-3860-2923, **CVU CONACYT ID:** 96365

ID 1^{er} Coautor: *Miguel, Patiño-Ortiz* / **ORC ID:** 0000-0002-5630-8077, **CVU CONACYT ID:** 167388

ID 2^{do} Coautor: *Luis Héctor, Hernández-Gómez* / **ORC ID:** 0000-0003-2573-9672, **CVU CONACYT ID:** 5107

ID 3^{re} Coautor: *Xóchitl, Siordia-Vázquez* / **ORC ID:** 0002-8472-8001, **CVU CONACYT ID:** 1036998

DOI: 10.35429/H.2020.8.59.68

L. Villagrán, M. Patiño, L. Hernández y X. Siordia

yvillagran@uv.mx

A. Marroquín, J. Olivares, L. Cruz y A. Bautista. (Coord) Ciencias ambientales, uso de recursos. Handbooks-©ECORFAN-Mexico, Querétaro, 2020.

Resumen

Durante el desarrollo e implantación de Sistemas de Control Distribuido para Centrales de Ciclo Combinado Gómez Palacio (SCD-GP) de la Comisión Federal de Electricidad [1, 2] se han detectado varias necesidades y oportunidades de desarrollo tecnológico. Una de las más importantes y necesaria es la del mejoramiento de las estrategias de control de potencia, velocidad y temperatura de las unidades turbogás. En gran parte esto se debe a que las unidades turbogás se caracterizan por operar a temperaturas, presiones y velocidades relativamente más altas que las de cualquier otro tipo de unidades, lo cual se traduce en mayores y más estrictos requerimientos del sistema de control para obtener una operación segura y rentable [3]. Actualmente, los sistemas de control de unidades turbogás están basados en algoritmos de control convencionales del tipo PI (Proporcional e Integral) La idoneidad de este tipo de controladores para tareas de regulación ha sido ampliamente probada. Sin embargo su uso para el control de velocidad durante el arranque, o para el control de potencia en todo el rango de generación de una unidad turbogás, plantea serios cuestionamientos, ya que el desempeño de la unidad puede ser afectado adversamente debido a la no linealidad de la dinámica del proceso, la cual cambia conforme al punto de operación. A pesar de ello el uso de los controladores se ha prolongado por mucho tiempo debido a su sencillez y a que estrictamente, no se requiere de un modelo matemático del proceso para su diseño y ajuste. La importancia de este último hecho no puede menospreciarse, ya que la dificultad de contar con modelos matemáticos precisos del proceso es una de las causas fundamentales para que no se haya generalizado la aplicación de estrategias de control moderno. Una alternativa atractiva para mejorar el desempeño de las unidades turbogás es el empleo de técnicas de Inteligencia Artificial para el control de procesos, las cuales podrían superar algunas de las desventajas del control moderno y permitirían satisfacer requerimientos más sofisticados que con el control convencional. Específicamente resulta de interés investigar la aplicabilidad del control basado en lógica difusa, para el cual se han reportado múltiples aplicaciones exitosas en otras áreas industriales. En el Instituto de Investigaciones Eléctricas, en el desarrollo de controladores difusos para unidades turbogás [4], en donde se rediseñó la programación del sistema de control para la unidad turbogás W501 y se incorporó un controlador difuso de velocidad en tiempo real para el arranque de la turbina de gas [5,6] Posteriormente este trabajo fue continuado y extendido al control de la potencia generada [7,8] En ambos casos los resultados obtenidos fueron exitosos y constituyen una base sólida para el uso de controladores difusos en una unidad turbogás real. Sin embargo, desde un principio fue latente la dificultad para obtener la base de reglas y los parámetros de los diversos elementos del sistema de inferencia difuso incluido en el controlador. Para solucionar esta problemática y automatizar lo más posible el diseño del sistema de sintonización basado en redes neuronales, el cual primeramente se aplicó a controladores PI convencionales [9], y en una segunda etapa a la sintonización de un controlador difuso [10] El enfoque de este último trabajo consistió en desarrollar un sistema que proporcionara los parámetros que definen las variables lingüísticas del controlador usando un algoritmo de aprendizaje de redes neuronales. El conjunto formado por la red neuronal y el sistema difuso del controlador es un sistema de tipo cooperativo en donde ambos componentes son aplicaciones independientes; la red neuronal le comunica los resultados de aprendizaje al sistema difuso. Debido a las dificultades encontradas con el sistema neuro-difuso cooperativo, se planteó el desarrollo de un controlador neuro-difuso en donde se conjuguen en un solo sistema híbrido las ventajas de las redes neuronales y los sistemas de inferencia difusos, de tal manera que el procedimiento de aprendizaje de los parámetros del controlador difuso se lleve a cabo en una forma directa y más simple. En este artículo se presenta un controlador digital basado en un sistema de inferencia neuro-difuso que puede ser diseñado fuera de línea en forma automatizada y se demuestra su factibilidad basada en la evaluación de robustez de desempeño, como un primer paso a su aplicación en el control de unidades turbogás. La evaluación se hace mediante simulaciones extensivas, aplicando el controlador a un sistema de primer orden con retardo. Las pruebas incluyen variaciones en rango amplio de la ganancia, retardo y constante de tiempo del proceso. También se evalúa el efecto de perturbaciones determinísticas y estocásticas en la señal de control, la variable manipulada y la señal controlada. Los resultados obtenidos demuestran la factibilidad de utilizar el controlador neurodifuso en aplicaciones reales.

Control neurodifuso, turbina de gas, redes neuronales, control PI

5. Introducción

En este capítulo se presentan los resultados de la evaluación de la robustez del desempeño de un controlador neurodifuso, como un primer paso a su aplicación en un proceso real. En estas pruebas se presenta una de las versiones más simples de un controlador neuro-difuso digital basado en un algoritmo de control PI convencional del tipo velocidad. La evaluación se hace mediante simulaciones en tiempo discreto; aplicando el controlador a un sistema de primer orden con retardo.

El diseño se realiza fuera de línea en forma automatizada en una computadora personal y puede ser implantado directamente en una plataforma digital de grado industrial para su aplicación a un proceso real [1]. Así, como un primer paso para su aplicación en el control en tiempo real de unidades turbogás, se presentan los resultados de la evaluación de la robustez del desempeño del controlador.

Las pruebas consisten en evaluar la respuesta del sistema ante variaciones en rango amplio de los parámetros del proceso, los cuales incluyen la ganancia, el retardo y la constante de tiempo. También se evalúa el efecto de perturbaciones determinísticas y estocásticas en la señal de control, la variable manipulada y la variable controlada.

El controlador PI neurodifuso se encuentra en un lazo de control para su análisis en un ambiente de simulación desarrollado en una plataforma de computadora personal usando el ambiente de programación Matlab/Simulink que puede ser personalizado para la ejecución de diversas pruebas que permiten sintonizar y analizar el sistema de control. En la Fig. 1. 1 se presenta el diagrama de un sistema de primer Durante el desarrollo e implantación de Sistemas de Control Distribuido para Centrales de Ciclo Combinado Gómez Palacio (SCD-GP) de la Comisión Federal de Electricidad [2, 3] se han detectado varias necesidades y oportunidades de desarrollo tecnológico. Una de las más importantes y apremiantes es la del mejoramiento de las estrategias de control de potencia, velocidad y temperatura de las unidades turbogás. En gran parte esto se debe a que las unidades turbogás se caracterizan por operar a temperaturas, presiones y velocidades relativamente más altas que las de cualquier otro tipo de unidades, lo cual se traduce en mayores y más estrictos requerimientos para el sistema de control a fin de obtener una operación segura y rentable [4]

Actualmente, los sistemas de control de unidades turbogás están basados en algoritmos de control convencionales del tipo PI (Proporcional e Integral) La idoneidad de este tipo de controladores para tareas de regulación ha sido ampliamente probada. Sin embargo su uso para el control de velocidad durante el arranque, o para el control de potencia en todo el rango de generación de una unidad turbogás, plantea serios cuestionamientos, ya que el desempeño de la unidad puede ser afectado adversamente debido a la no linealidad de la dinámica del proceso, la cual cambia conforme al punto de operación. A pesar de ello el uso de los controladores se ha prolongado por mucho tiempo debido a su sencillez y a que estrictamente, no se requiere de un modelo matemático del proceso para su diseño y ajuste. La importancia de este último hecho no puede menospreciarse, ya que la dificultad de contar con modelos matemáticos precisos del proceso es una de las causas fundamentales para que no se haya generalizado la aplicación de estrategias de control moderno.

Una alternativa atractiva para mejorar el desempeño de las unidades turbogás es el empleo de técnicas de Inteligencia Artificial para el control de procesos, las cuales podrían superar algunas de las desventajas del control moderno y permitirían satisfacer requerimientos más sofisticados que con el control convencional. Específicamente resulta de interés investigar la aplicabilidad del control basado en lógica difusa, para el cual se han reportado múltiples aplicaciones exitosas en otras áreas industriales.

En el Instituto de Investigaciones Eléctricas, el desarrollo de controladores difusos para unidades turbogás se inició en 1993 [5], en donde se rediseñó la programación del sistema de control para la unidad turbogás W501 y se incorporó un controlador difuso de velocidad en tiempo real para el arranque de la turbina de gas [6,7] Posteriormente este trabajo fue continuado y extendido al control de la potencia generada [8,9] En ambos casos los resultados obtenidos fueron exitosos y constituyen una base sólida para el uso de controladores difusos en una unidad turbogás real.

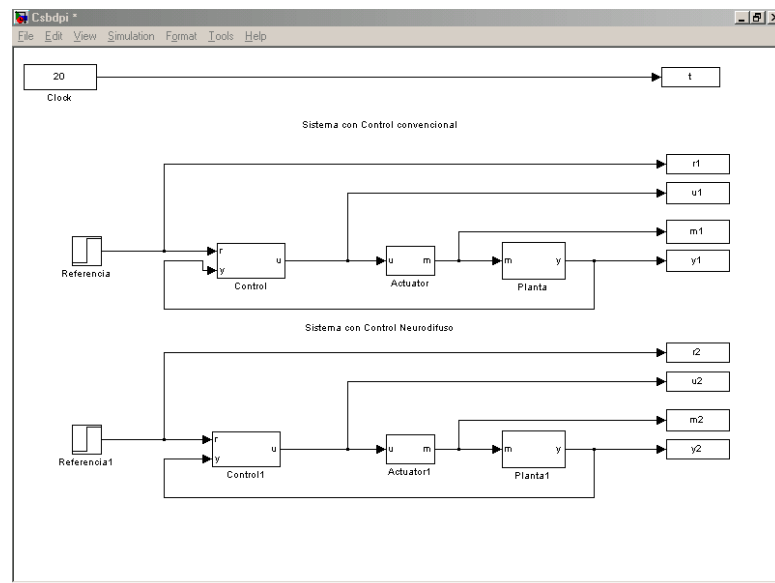
Sin embargo, desde un principio fue patente la dificultad para obtener la base de reglas y los parámetros de los diversos elementos del sistema de inferencia difuso embebido en el controlador.

Para solucionar esta problemática y automatizar lo más posible el diseño del sistema de sintonización basado en redes neuronales, el cual primeramente se aplicó a controladores PI convencionales [10], y en una segunda etapa a la sintonización de un controlador difuso [11,12] El enfoque de este último trabajo consistió en desarrollar un sistema que proporcionara los parámetros que definen las variables lingüísticas del controlador usando un algoritmo de aprendizaje de redes neuronales. El conjunto formado por la red neuronal y el sistema difuso del controlador es un sistema de tipo cooperativo en donde ambos componentes son aplicaciones independientes; la red neuronal le comunica los resultados de aprendizaje al sistema difuso.

Debido a las dificultades encontradas con el sistema neuro-difuso cooperativo, se planteo el desarrollo de un controlador neuro-difuso en donde se conjuguen en un solo sistema híbrido las ventajas de las redes neuronales y los sistemas de inferencia difusos, de tal manera que el procedimiento de aprendizaje de los parámetros del controlador difuso se lleve a cabo en una forma directa y más simple.

En este artículo se presenta un controlador digital basado en un sistema de inferencia neuro-difuso que puede ser diseñado fuera de línea en forma automatizada y se demuestra su factibilidad basada en la evaluación de robustez de desempeño, como un primer paso a su aplicación en el control de unidades turbogás. La evaluación se hace mediante simulaciones extensivas, aplicando el controlador a un sistema de primer orden con retardo. Las pruebas incluyen variaciones en rango amplio de la ganancia, retardo y constante de tiempo del proceso. También se evalúa el efecto de perturbaciones determinísticas y estocásticas en la señal de control, la variable manipulada y la señal controlada. Los resultados obtenidos demuestran la factibilidad de utilizar el controlador neurodifuso en aplicaciones reales.

Figura 5.1 Sistema de control PI convencional y sistema de control PI neurodifuso



El proceso por controlar es simulado con un modelo de primer orden con retardo:

$$G(s) = \frac{K_{dc} - e^{t_d s}}{\tau s + 1} \quad (1)$$

en donde K_{dc} es la ganancia en estado estable, t_d es el retardo en el tiempo, τ es la constante de tiempo, y s es la variable de Laplace. Los valores nominales de estos parámetros son:

$$K_{dc} = 2.0$$

$$t_d = 0.4 \text{ sec}$$

$$\tau = 4.0 \text{ sec}$$

Figura 5.2 Control PI convencional

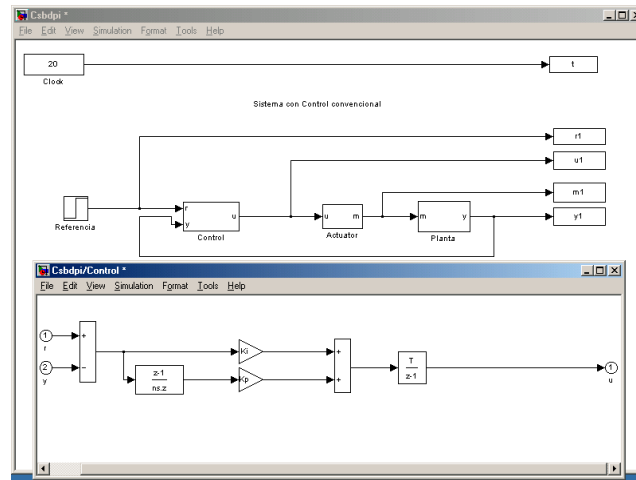
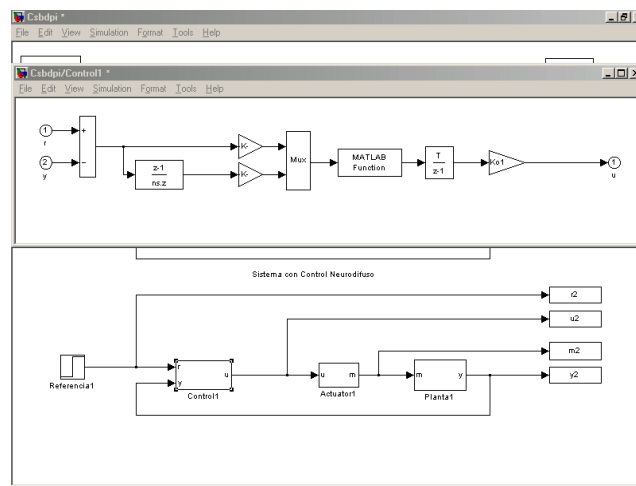


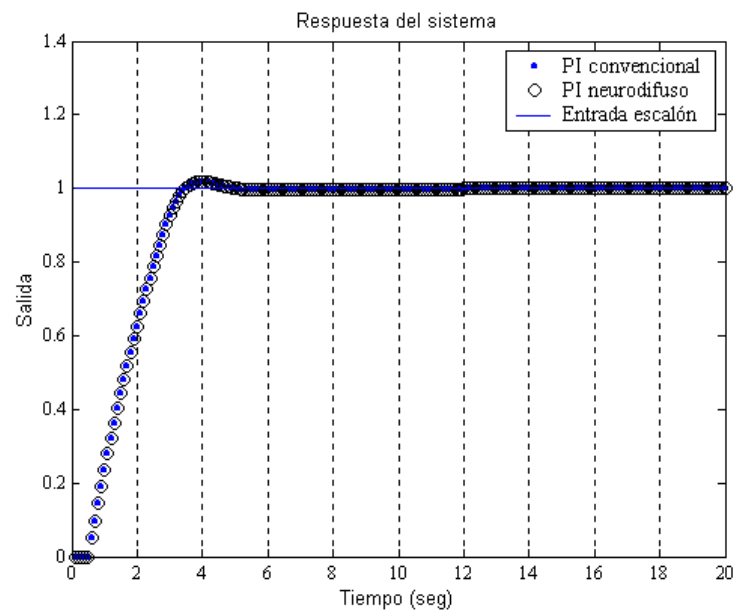
Figura 5.3 Control PI neurodifuso



Las Fig. 5.2. y 5.3. muestran los diagramas de bloques de los controladores implementados para realizar las pruebas de desempeño.

La respuesta de los dos sistemas se muestra en la Fig. 5.4 en donde se observa la respuesta ante una entrada escalón unitario con un control PI convencional y con un control PI neurodifuso.

Figura 5.4 Respuesta del control PI convencional y PI neurodifuso.



A fin de determinar las características de robustez en el desempeño del controlador PI neurodifuso se llevaron a cabo varias pruebas en dos conjuntos.

En el primer conjunto de pruebas se evalúa la robustez del controlador PI neurodifuso ante cambios en los valores de los parámetros de la planta. Y se realiza la medición del índice de desempeño IAE (integral del valor absoluto del error):

$$IAE = \int_0^t |r - y| dt \quad (2)$$

En el segundo conjunto de pruebas se sometió al lazo de control a perturbaciones estocásticas y determinísticas en las señales más importantes. En ambos conjuntos de pruebas se evaluaron varios índices de desempeño evaluados durante la respuesta a un cambio en escalón en la señal de referencia. Aquí solamente se presentan los resultados obtenidos con el índice IAE definido.

Las Fig. 5.5, 5.6 y 5.7 muestran el desempeño del controlador cuando los parámetros del modelo, ganancia en estado estable, tiempo de retardo y constante de tiempo, respectivamente, se hicieron variar en un rango desde el 50% hasta el 200% de su valor nominal, el cual es un rango de variación muy amplio, más allá de lo razonablemente esperado en una aplicación real, que se reporta aquí solo con fines ilustrativos del desempeño en condiciones extremas. Como puede observarse, el desempeño en la vecindad de los valores nominales solamente presenta una variación suave, lo cual es esperado en una aplicación real.

Figura 5.5 Desempeño ante variaciones en la ganancia

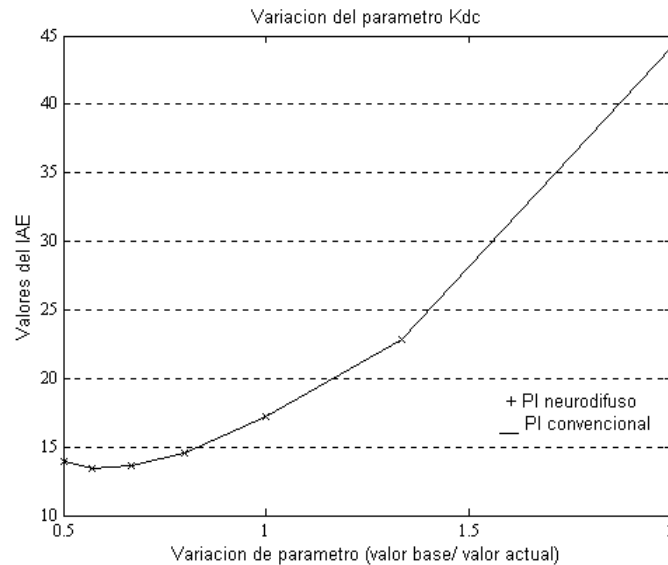


Figura 5.6 Desempeño ante variaciones en el tiempo de retardo

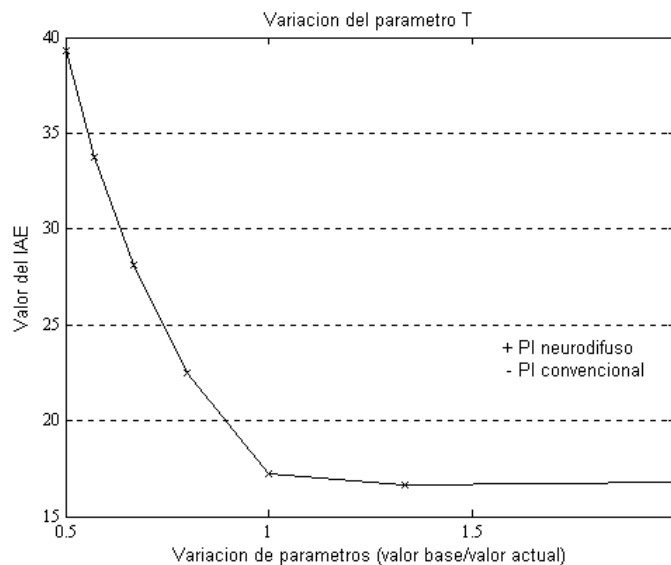
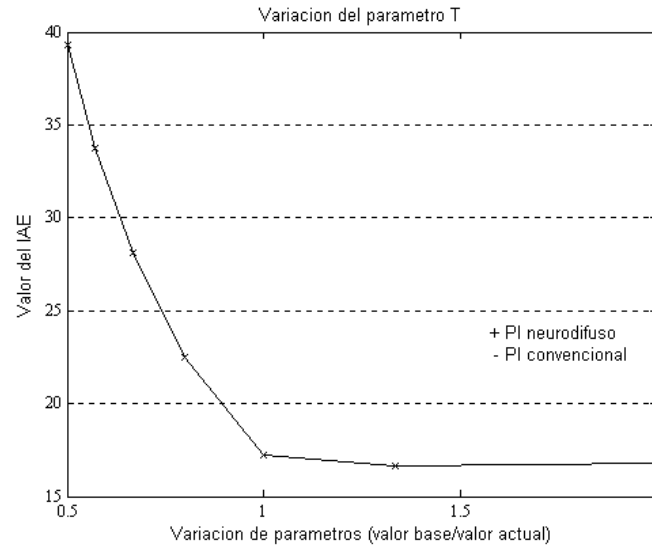


Figura 5.7 Desempeño ante variaciones en la constante de tiempo

Las Fig. 5.8 presenta el desempeño del lazo de control sujeto a perturbaciones aditivas aleatorias en la señal de control u y en la señal de salida de la planta y , respectivamente. De nueva cuenta el desempeño del controlador presenta variaciones suaves en un gran rango. La Fig. 5.9 muestra el desempeño ante un cambio de carga en la señal de salida de la planta, simulado mediante la adición de un escalón a los 10 segundos de simulación. De estas pruebas puede verse que el controlador posee buenas características de rechazo a perturbaciones, tal y como es deseable en una aplicación real.

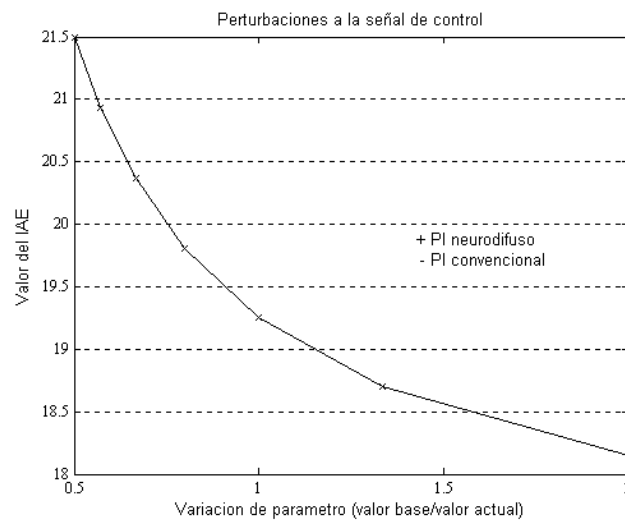
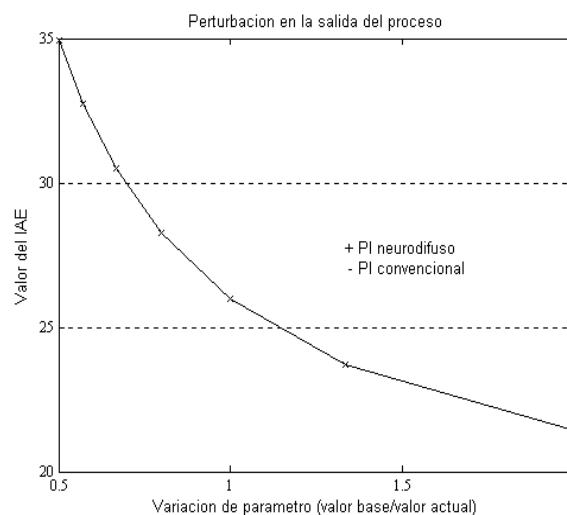
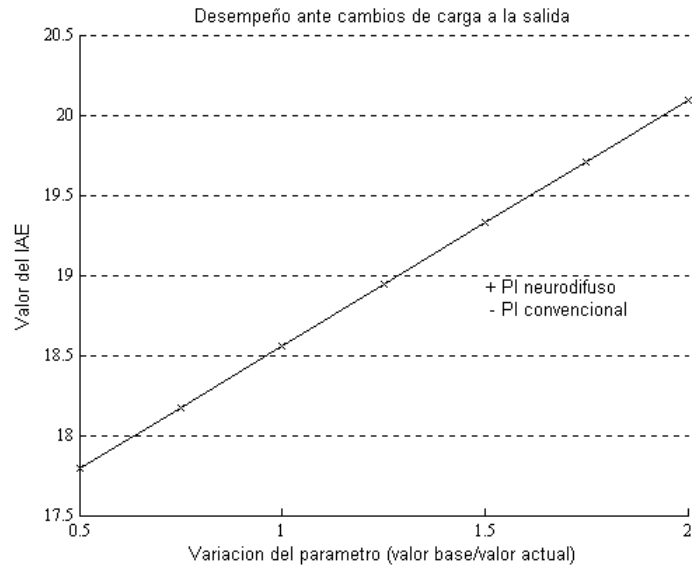
Figura 5.8 Desempeño ante ruido en la señal de control**Figura 5.9** Desempeño ante ruido en la salida del proceso

Figura 5.10 Desempeño ante cambios de carga a la salida

Las Fig. 5.11 a 5.14 muestran la respuesta del sistema utilizando tanto el controlador PI digital convencional (trazo continuo), como el controlador digital neurodifuso (trazo estrellado). En cada figura se muestran dos casos de respuesta típicos, con el objeto de ilustrar un conjunto más amplio de casos de prueba, los cuales demuestran la equivalencia del comportamiento del lazo de control usando ambos controladores.

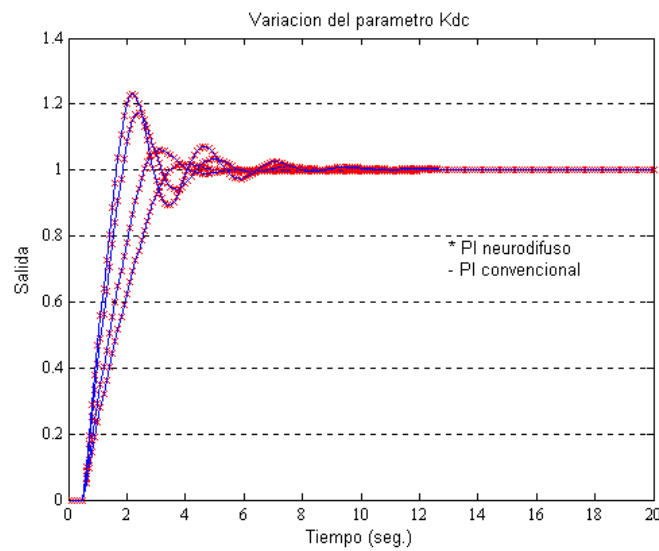
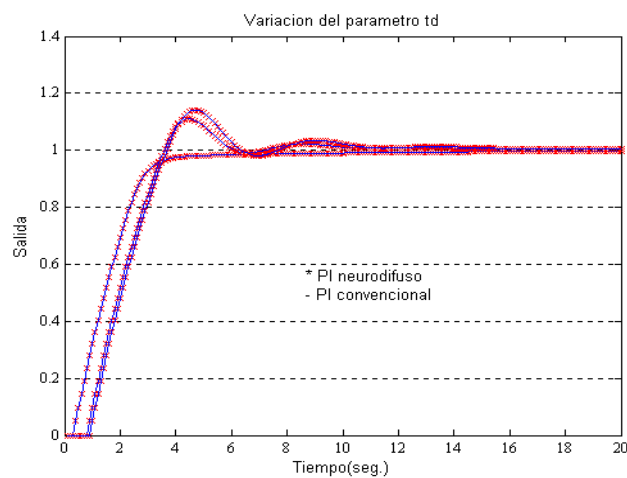
Figura 5.11 Respuesta ante variaciones en la ganancia.**Figura 5.12** Respuesta ante variaciones en el tiempo de retardo.

Figura 5.13 Respuesta con ruido en la señal de control.

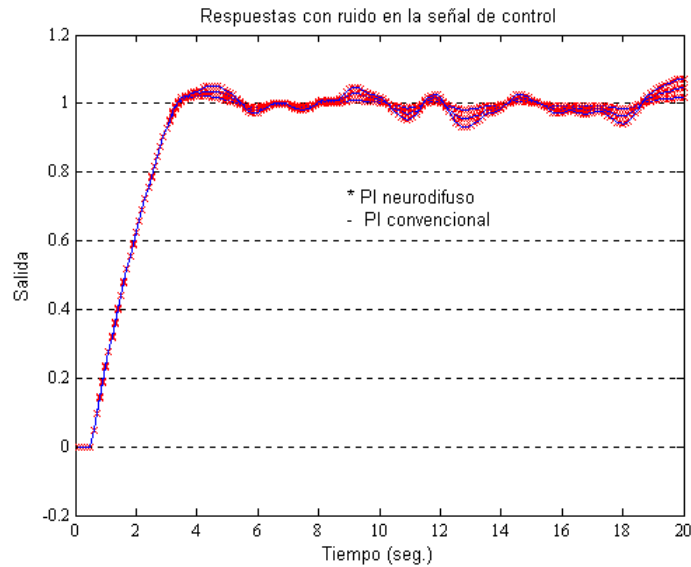
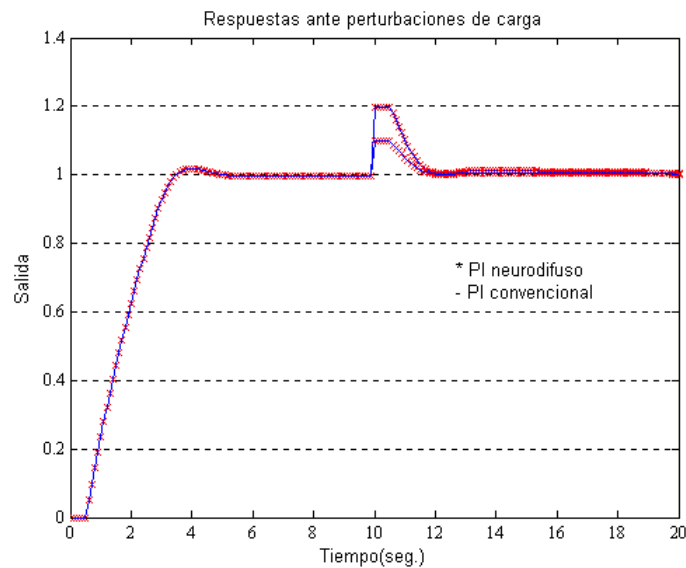


Figura 5.14 Respuesta ante perturbaciones de carga.



5.1 Agradecimiento

Este trabajo fue apoyado por el Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias, SEPI-ESIME y el CONACYT.

5.2 Conclusiones

En esta primera parte de pruebas se puede concluir que el controlador PI neurodifuso emula la dinámica de un controlador PI convencional en configuración de velocidad. El sistema de inferencia difuso incluido en el controlador es del tipo TSK de primer orden implementa un mapeo $R2 \rightarrow R$, de la señal de error y su razón de cambio a la diferencial de la señal de control. El diseño del sistema de inferencia difuso se lleva a cabo fuera de línea empleando el método ANFIS con patrones de aprendizaje obtenidos de las entradas y la salida de un controlador PI convencional.

Los resultados obtenidos en las pruebas de análisis de robustez muestran que el controlador PI neurodifuso posee buenas características de desempeño, lo cual demuestra la factibilidad de emplearlo en el mismo tipo de aplicaciones que un controlador PI convencional mediante una sustitución directa. Demostrándose finalmente la factibilidad de utilizarlo en aplicaciones reales cuyos rangos de incertidumbre y variación son mucho menores a los evaluados en este caso de estudio.

Después de la demostración de factibilidad del controlador PI neurodifuso, reportada en esta primera parte de pruebas se tiene planeada su utilización para el control de la velocidad durante el arranque y el control de potencia generada de una unidad turbogás, en donde se tendrá en cuenta la disponibilidad de un gran número de parámetros para mejorar el rendimiento de la unidad bajo índices de desempeño específicos.

5.3 Referencias

Benavente, J. C. (2020). Solar Matienzo: estudio sobre la factibilidad y propuesta de instalación de un sistema de generación solar fotovoltaico en la Base Matienzo-Antártico.

Chávez, R. y Delgadillo, M.A. (1990). Modernization of a computer control system in a combined cycle power plant. Proceedings ISA 90. Nueva Orleans, E.E.U.U. Vol. 4, págs. 165-170.

Chávez, R. y Díaz, R. (1993). Upgrading of a computer control system in a combined cycle power plant. Proceedings Power-Gen Americas '93. Dallas, E.E.U.U. Vol. 12-13, págs. 56-62.

Chávez, R. y Gómez, O. (1995). Sistemas de control distribuido en plantas de ciclo combinado. Boletín IIE. Vol. 19, No. 2, págs. 47-51.

Garduño, R. y Sánchez, M. (1995). Control system modernization: turbogás unit case study. Symposium on Control of Power Plants and Power Systems. Cancún, México. Vol. 2, págs. 245-250.

García, C.D. (1997). Control Digital de Unidades Turbogás. Tesis de Maestría. Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico. Cuernavaca, México.

García, C.D. y Garduño R. (1997). Gas turbine fuzzy speed control. Proceedings 2nd Joint Mexico-USA International Conference on Neural Networks and Neurocontrol. Sianka'an, México.

Pat, M. y de Lara, S. (1999). Sintonización con redes neuronales de un controlador PID. Aplicación a una unidad tubogás. Información Tecnológica. Vol. 10, No. 6, págs. 25-32.

Ramírez, G.M. (1996). Modernización del Control de Velocidad, Potencia y Temperatura de una Unidad Turbogás. Tesis de Licenciatura. Instituto Politécnico Nacional. D.F, México.

De Lara, S. y Martínez, M.A. (1999). Desarrollo del sistema para la sintonización de controladores difusos usando redes neuronales artificiales. IIE reporte interno. No. 11500INDT (A5)01.03. Cuernavaca, México.

Sánchez, M. y Bahamaca L. (1999). Realización de controladores lógicos difusos para el control de procesos en tiempo real: especificación y diseño. Memorias 2o. Encuentro Nacional de Computación. Pachuca, México.

Sánchez, M. y Bahamaca L. (2000). Speed and load fuzzy control for gas turbines. Proceedings 1 st. ISA POWID/EPRI/DOE Joint Controls and Instrumentation Conference. Snt. Antonio U.S.A. Vol. 1, págs. 2180-2185.