



## Introducción a la sección especial “Técnicas de estabilidad de sistemas de control borroso”

El grupo Temático “Control Inteligente” de CEA, ha organizado y supervisado bajo los estrictos parámetros de la revista esta sección especial, la cual tenemos el honor de presentar a los lectores en este número. Nos sentimos muy orgullosos de ello, tanto por la gran calidad de los trabajos enviados a la llamada para la sección especial como por el resultado final después del riguroso proceso de revisión.

Una de las principales áreas de aplicación de la lógica borrosa ha sido sin duda el diseño de sistemas de control debido, principalmente, a la capacidad que tienen los sistemas borrosos de manejar el conocimiento heurístico, formulado mediante reglas lingüísticas cualitativas. La lógica borrosa se ha empleado de manera exitosa para regular complejos procesos industriales sin la necesidad de obtener previamente un preciso y complejo modelo matemático para estos procesos. Sin embargo, carecer de modelo de la planta y, en consecuencia, de modelo del sistema en lazo cerrado, implica que el análisis de sus propiedades, fundamentalmente la estabilidad, no pueda realizarse de forma analítica, con lo cual hay que recurrir, usualmente, a análisis empíricos basados en simulaciones. No obstante, siempre es deseable garantizar analíticamente la estabilidad del sistema en lazo cerrado.

Los estudios de estabilidad de sistemas de control borroso heredan, en general, la problemática ya conocida de los sistemas no lineales, donde el precio a pagar por su riqueza dinámica es la ausencia de una teoría unitaria que permita el diseño de sistemas de control de forma paralela a como se hace para los sistemas lineales, donde su comportamiento, esencialmente e independientemente de su orden, queda gobernado por la naturaleza de los autovalores de su matriz de estado.

Debido al carácter no lineal que presentan los sistemas borrosos será necesario utilizar las diferentes técnicas de estabilidad desarrolladas para los sistemas no lineales, y deberán considerarse situaciones en las que puede aparecer estabilidad local en un determinado punto de trabajo pero no estabilidad global. En estos casos, para conseguir un funcionamiento adecuado del sistema controlado se deberá asegurar además que el sistema no abandona la región de estabilidad local. Por ello, el análisis de la estabilidad de los sistemas borrosos es una de las principales líneas de investigación en el campo de la lógica borrosa.

Basado en lo anterior, la comunidad científica ha realizado un gran esfuerzo de formalización de los sistemas de control borroso, fundamentalmente a partir de la década de los 90. Esto ha permitido dotar al control borroso de una base formal centrada en la teoría de control no lineal, lo cual permite abordar estudios de estabilidad rigurosos.

Esta sección especial se dedica a la presentación de investigaciones, desarrollos y experiencias innovadoras en el área de las diferentes técnicas de estabilidad empleadas en el diseño de sistemas de control borroso. Los seis trabajos que se presentan son de gran interés y distintos unos de otros, sin embargo, todos, a partir de metodologías diferentes, unas más intuitivas y/o heurísticas y otras más formales, tratan sobre el problema de la estabilidad de los sistemas borrosos. Los artículos incluidos en esta sección especial son los siguientes:

- *Metodología formal de análisis del comportamiento dinámico de sistemas no lineales mediante lógica borrosa.* Si no se posee un modelo matemático de un sistema, el modelado del sistema en base a datos de entrada/salida se muestra como una herramienta muy poderosa y útil, más aún si el modelo borroso resultante se presenta en forma de modelo de estado. A partir de este resultado ya mostrado por los autores en un artículo precedente publicado también en esta revista, en este trabajo se da un paso más; se presenta una metodología para la obtención de los estados de equilibrio de un sistema no lineal desconocido identificado mediante su modelo borroso obtenido en base a datos de entrada/salida. A continuación se lleva a cabo la linealización exacta del modelo, el estudio de la estabilidad local de los equilibrios a partir de dicha linealización, y la utilización de la metodología de Poincaré para el estudio de órbitas periódicas. A partir de esa información, es posible estudiar la estabilidad local de los estados de equilibrio, así como la dinámica del sistema en su entorno y la presencia de oscilaciones, obteniéndose información del comportamiento dinámico del sistema en principio desconocido, lo cual puede facilitar el diseño del controlador adecuado para el sistema objeto de estudio.

- *Análisis de estabilidad de controladores borrosos tipo Mamdani mediante el cálculo del exponente de Lyapunov.* La búsqueda de funciones de Lyapunov que permitan demostrar analíticamente la estabilidad de sistemas de control es una tarea ardua y compleja a la vez. Una forma de movernos del campo analítico al numérico, facilitando así el análisis de estabilidad de sistemas complejos, es el denominado exponente de Lyapunov. Se trata de una cantidad que caracteriza el grado de separación de dos trayectorias infinitesimalmente cercanas de su espacio de fases. El signo del exponente de Lyapunov indica la propiedad de estabilidad del sistema dinámico objeto de estudio. En este trabajo el exponente de Lyapunov se calcula mediante el análisis numérico de series temporales. Éstas se obtienen a partir del comportamiento dinámico de sistemas de control borroso tipo Mamdani con la dinámica de la planta no lineal. De las series temporales obtenidas se calculan los exponentes de Lyapunov correspondientes con el fin de analizar la estabilidad de los sistemas de control que generan dichas series.

- *Estabilidad de sistemas Takagi-Sugeno bajo perturbaciones persistentes: estimación de conjuntos inescapables.* Los modelos borrosos del tipo TS son una alternativa para el diseño de controladores no-lineales, debido a que éstos permiten controlar sistemas no lineales lejos de su punto de operación empleando técnicas de control lineal. Sin embargo, dado un sistema borroso TS, si éste es sometido a perturbaciones, los conceptos de estabilidad y dominio de atracción han de aplicarse de forma restrictiva, en el sentido de que se ha de garantizar que la energía de las perturbaciones no sea suficiente para que el sistema abandone la región en la que su modelo TS es válido. El concepto de dominio de atracción cuando no hay perturbaciones debe ser cambiado al de conjunto inescapable en caso de que éstas estén presentes. En este artículo se discute en detalle distintos problemas originados por la presencia de perturbaciones y la validez solamente local de los modelos borrosos para el control de sistemas no lineales. Para ello se consideran las perturbaciones de potencia RMS acotada, se estima el mínimo conjunto inescapable y se calcula el conjunto de condiciones iniciales máximo para asegurar que la zona de modelado es inescapable.

- *Diseño y sintonización de una ley de control borrosa proporcional retardada: enfoque frecuencial.* Los retardos, bajo ciertos condicionantes, pueden tener la propiedad de cooperar en la estabilización de sistemas. De hecho una ley de control proporcional retardada (PR) puede mejorar el desempeño de la planta en comparación con el efecto producido por la acción PD. Sin embargo una limitación de las leyes de control PR es que sólo se pueden aplicar a sistemas lineales y/o a sistemas con una parte nominal lineal. El empleo de modelos borrosos TS permite que el empleo de controladores PR pueda ser extendido a una clase de sistemas no lineales. Así nace el controlador borroso proporcional retardado (BPR). Este artículo propone el diseño y sintonización de una ley de control borrosa proporcional retardada para estabilizar una clase de sistemas no lineales (sistemas no lineales que se puedan modelar mediante subsistemas borrosos lineales de segundo orden). El diseño del controlador BPR se propone a partir de la inclusión de una acción retardada en la estructura TS clásica, mientras que la sintonización del mismo se realiza asegurando estabilidad sobre cada uno de los subsistemas del modelo borroso empleando el método D-particiones. La estabilización del sistema TS-BPR se garantiza mediante un análisis del lugar geométrico de las raíces de su cuasipolinomio característico.

- *Diseño e Implementación de un Sistema de Control estable basado en Lógica Borrosa para optimizar el rendimiento de un sistema de Generación Fotovoltaico.* Este artículo, a diferencia de los anteriores, realiza un enfoque eminentemente práctico sobre una planta real. En concreto un generador fotovoltaico (PVG) conectado a una carga a través de un convertidor CC/CC que hace las veces de seguidor del punto de máxima potencia (MPP) del generador fotovoltaico, lo cual permite aparejar las impedancias del generador y la carga de modo que ésta, en todo momento, reciba la máxima transferencia de potencia del generador. El control del seguimiento del MPP es un reto para los diseñadores de instalaciones fotovoltaicas debido a que las condiciones ambientales determinan la cantidad de energía solar que incide en el generador PV. Puesto que estas condiciones ambientales están cambiando continuamente durante el día, la instalación PV debe adaptarse para suministrar a la carga la máxima potencia posible para cada nueva condición de funcionamiento. En este trabajo se presenta un controlador borroso del ciclo de trabajo del convertidor CC/CC, permitiendo que éste siga el punto de máxima potencia (MPP) del PVG. El artículo propone una forma intuitiva y heurístico-analítica, ya que no se dispone del modelo de la planta, de análisis de la estabilidad del sistema en lazo cerrado. Los resultados obtenidos demuestran la validez del esquema de control borroso sobre un sistema fotovoltaico comercial.

- *Estabilidad para un control borroso en modo deslizante aplicado a un robot paralelo neumático.* En este trabajo se presenta un controlador borroso tipo Mamdani basado en técnicas en modo deslizante para el posicionamiento de un robot paralelo neumático de dos grados de libertad (2 GDL). Se prueba que el sistema es asintóticamente estable en el sentido de Lyapunov y se presentan resultados numéricos y experimentales. El controlador diseñado puede ser aplicado en control de trayectoria al ser realimentadas la velocidad y la aceleración del sistema. Se presentan además resultados satisfactorios obtenidos en forma experimental para el caso de seguimiento de trayectoria.

Redactores invitados:

**Oscar Barambones** y **Eloy Irigoyen**, Universidad del País Vasco.

**María Tomás-Rodríguez**, The City University London, Reino Unido.

e-mails: oscar.barambones@ehu.es, eloy.irigoyen@ehu.es, Maria.Tomas-Rodriguez.1@city.ac.uk