

Implementación de sistemas de control borroso en actividades académicas dirigidas en las Escuelas de Ingeniería

Implementing fuzzy control systems in academic activities in the Engineering Schools

Inmaculada Pulido-Calvo,
Juan Carlos Gutiérrez-Estrada
UNIVERSIDAD HUELVA
ipulido@uhu.es, juanc@uhu.es

Pau Martí
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA
paumarpe@doctor.upv.es

Ignacio de la Rosa
LANGOSTINOS DE HUELVA S.A.
Huelva

Abstract

Como propuesta de trabajo práctico dirigido se ha planteado el diseño, desarrollo e implementación de un sistema experto que permite la simulación de modelos de lógica borrosa o difusa. Este sistema experto se ha utilizado en la resolución de un problema real de ingeniería, la regulación automática de los caudales de entrada de agua en balsas de plantas de acuicultura semi-intensiva (esteros mejorados). El objetivo fundamental de esta regulación es controlar la calidad del agua en las balsas de producción. El desarrollo de esta actividad académica se ha incluido en los programas docentes de las materias ‘Mecánica de Fluidos’ e ‘Impacto Ambiental’ de 3er curso de algunos Grados de Ingeniería impartidos en la Universidad de Huelva. De forma global se puede afirmar que esta metodología docente, basada en el estudio y solución de un problema práctico, ha supuesto un estímulo para la promoción de la autonomía y el aprendizaje significativo del alumno.

The design, development and implementation of an expert system that allows the simulation of fuzzy logic models was proposed as supervised practical work. This expert system was used in solving a real engineering problem: the automatic regulation of the water inflow of semi-intensive aquaculture plants. The main objective of this regulation is to control the water quality in the aquaculture ponds. The development of this academic activity has been included in the subject programs ‘Fluid Mechanics’ and ‘Environmental Impact’ of 3rd course of some Degrees of Engineering of Huelva University. Globally, we can say that this teaching methodology, based on the study and solution of a practical problem, has been an incentive for the promotion of autonomy and significant learning of students.

Keywords: Expert System; Fuzzy Logic; Gate; Inflow Regulation; Aquaculture; water quality. Palabras clave: Sistema Experto; Lógica difusa; Compuerta; Regulación caudal; Acuicultura; Calidad del agua.

1 Introducción

Según el Real Decreto 1125/2003 (BOE, 2003), en las titulaciones universitarias actuales el crédito europeo es la unidad de medida del trabajo del estudiante para cumplir los objetivos académicos del programa de estudios y, por lo tanto, comprende el conjunto de enseñanzas teóricas y prácticas, así como otras actividades académicas dirigidas. Estas últimas actividades docentes pueden incluir seminarios impartidos por técnicos especialistas, exposiciones de trabajos por los estudiantes, excursiones y visitas, tutorías colectivas, elaboración de trabajos prácticos, etc.

Una de las propuestas que en las Áreas de Conocimiento de Mecánica de Fluidos y de Tecnologías del Medio Ambiente de la Universidad de Huelva se están planteando para la docencia de materias vinculadas a los distintos grados de Ingeniería es el desarrollo de trabajos prácticos que sirvan de ejemplo de solución de problemas reales de Ingeniería, y que permitan: (a) Intercambio de conocimientos y experiencias de profesores e investigadores de distintas Áreas de Conocimiento; (b) Incorporación de objetivos formativos en las competencias de estas actividades académicas y dirigidos a generar en los alumnos una experiencia profesional previa a su etapa laboral; (c) Fomento de la cultura emprendedora y de calidad en el desarrollo de estos trabajos dirigidos; y (d) Evaluación del uso de modelos para el análisis de la dinámica de procesos industriales, físicos y biológicos. En este último punto es fundamental remarcar que las actividades de modelización contribuyen al desarrollo en el alumno de las competencias básicas de ‘Aprender a aprender’, ‘Autonomía e iniciativa personal’ y ‘Tratamiento de la información y competencia digital’ (Sol, 2013).

En este contexto, se ha planteado el diseño, desarrollo e implementación de un sistema experto que permite la simulación de modelos de lógica borrosa o difusa (fuzzy logic). El objetivo fundamental de la lógica borrosa es proporcionar las bases del razonamiento aproximado que utiliza premisas imprecisas como instrumento para formular el conocimiento. La lógica borrosa trata de copiar la forma en que los humanos toman decisiones. La implementación de este sistema experto para el control de distintos tipos de sistemas o procesos, se ha realizado en MICROSOFT VISUAL BASIC. Esta aplicación de ordenador, denominada NUBECILLA 1.0, al estar definida en un entorno amigable e intuitivo, facilita la aplicación didáctica de los modelos de lógica borrosa ya que el usuario final no tiene que elaborar ningún código de programación.

De este modo, la programación de la actividad docente dirigida que se propone se compone de forma global de dos partes diferenciadas: (a) Diseño, desarrollo e implementación por parte del profesorado implicado del sistema experto NUBECILLA 1.0 para la simulación de modelos de lógica borrosa; y (b) Uso, por parte de los alumnos, de esta aplicación de ordenador para la solución de un problema real de Ingeniería.

En los cursos académicos 2013-2014 y 2014-2015 se ha propuesto esta actividad docente dirigida en 3er curso de los Grados de Ingeniería Mecánica, de Ingeniería Energética y de Ingeniería Electrónica Industrial, incluida de forma transversal en la guía docente de las materias ‘Mecánica de Fluidos’ (adscrita al Área de Conocimiento de Mecánica de Fluidos) e ‘Ingeniería Ambiental’ (adscrita al Área de Conocimiento de Tecnologías del Medio Ambiente). Este sistema experto se ha utilizado en el planteamiento de un trabajo práctico basado en la posibilidad de realizar una regulación automática de las compuertas que controlan los caudales de entrada de agua en balsas de plantas de acuicultura semi-intensiva (esteros mejorados).

2 Material y métodos

2.1 Planificación de la actividad académica

La actividad docente que se presenta puede clasificarse como ‘un aprendizaje por proyecto’ que se define como una situación en la que el alumno debe explorar y trabajar un problema práctico aplicando conocimientos interdisciplinarios (Universitat Jaume I de Castelló, 2006).

En este contexto, los profesores implicados de las Áreas de Conocimiento de Mecánica de Fluidos y de Tecnologías del Medio Ambiente de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Huelva han incluido de forma transversal este trabajo práctico en las materias ‘Mecánica de Fluidos’ e ‘Impacto Ambiental’ de 3er curso de los Grados de Ingeniería Mecánica, de Ingeniería Energética y de Ingeniería Electrónica Industrial. Se ha considerado que los alumnos de 3er curso de estos Grados han adquirido en los dos cursos anteriores los fundamentos de materias básicas como Física, Matemáticas, Estadística, Informática y Electrónica, y están capacitados para trabajar en un caso de estudio que requiera analizar una situación profesional presentada por el profesor para buscar soluciones eficaces.

La metodología de trabajo que se ha seguido para la planificación de esta actividad docente dirigida es:

- (a) Reuniones de los profesores de las Áreas de Conocimiento implicadas para el planteamiento y coordinación esta actividad transversal. Los principales criterios a decidir han sido: grados y materias en los que incluir esta actividad; técnicas de modelización a utilizar; y caso de estudio a plantear.
- (b) Una vez seleccionado el caso de estudio, reuniones de los profesores con los técnicos responsables de la dirección y gestión de la instalación en estudio para conseguir datos reales.
- (c) Diseño, desarrollo e implementación por parte de los profesores del sistema experto que utilizarán los alumnos para la solución del caso en estudio. Se ha elegido MICROSOFT VISUAL BASIC como entorno de programación para conseguir una implementación de las técnicas de modelización borrosas que permita el carácter intuitivo de los entornos gráficos diseñados y así los alumnos puedan concentrarse en el entendimiento de los aspectos conceptuales de estos modelos de control.
- (d) Elaboración de la guía de la actividad académica para que el alumno disponga de ella antes y durante el desarrollo del caso en estudio. Los apartados de esta guía son: concepto y aplicaciones de la lógica borrosa; manual de ayuda para utilizar el sistema experto NUBECILLA 1.0; descripción de la instalación en estudio; experiencia propuesta; indicación de desarrollos de trabajos futuros.
- (e) Desarrollo de la actividad docente en aula de informática con una duración de dos sesiones de 1,5 horas cada una. El número de alumnos por grupo es de 15.
- (f) Desarrollo, por parte de un grupo de tres alumnos, de una memoria donde analicen y discutan los resultados obtenidos y evalúen las conclusiones principales que obtienen de la actividad planteada.
- (g) Evaluación de la actividad docente por parte de los profesores implicados.

2.2 Finalidades educativas de la actividad académica

Las finalidades educativas perseguidas mediante la propuesta didáctica de modelización presentada son:

- (a) Incorporación de competencias formativas en los alumnos, ya que se les plantea el estudio y análisis de un problema real y concreto.
- (b) Intercambio de conocimientos y experiencias de profesores e investigadores de distintas Áreas de Conocimiento y del personal técnico encargado de la gestión de la instalación en estudio. Es una actividad académica transversal que necesita de un equipo multidisciplinar para su dirección.
- (c) Fomento de la cultura emprendedora y de calidad en el desarrollo de este trabajo práctico. Se plantea la posible solución a un problema real utilizando metodologías de modelización innovadoras cuyas bases están siendo estudiadas en algunas de las materias de los Planes de Estudios de los Grados de las distintas Ingenierías.
- (d) Promoción del trabajo en equipo, incidiendo en la interdependencia entre las distintas Ingenierías y otras disciplinas con el objetivo compartido de conseguir resultados previsibles en procesos productivos, en términos económicamente competitivos, mediante la invención, el uso y el perfeccionamiento de distintas técnicas de modelización.
- (e) Desarrollo en el alumno de un pensamiento creativo y de un razonamiento crítico para que sea capaz de hacer sus propios juicios.

2.3 Sistemas de control borroso y aplicación de ordenador NUBECILLA 1.0

La lógica borrosa permite establecer límites suaves para los conjuntos, haciendo que no todo tenga que ser blanco o negro, sino que es posible la existencia de niveles de grises. Los sistemas de control borroso pueden considerarse como una extensión de los sistemas expertos, pero superando los problemas que éstos presentan para el razonamiento en tiempo real, ocasionados por la explosión exponencial de las necesidades de cálculo requeridas para un análisis lógico completo de las amplias bases de datos que éstos manejan.

La idea básica de las técnicas de programación borrosa es permitir cierta relajación en las restricciones de un problema, que por ejemplo podría ser el control 'ON-LINE' de un sistema de distribución de agua. Los conjuntos borrosos permiten agrupar sucesos por el valor de una cierta magnitud. Por ejemplo, las desviaciones de demanda de agua respecto al régimen previsto en la optimización 'OFF-LINE' pueden ser agrupadas por intervalos de caudal. Así, si se define el conjunto clásico de desviaciones de demandas de agua significativas con caudales mayores a $100 \text{ m}^3/\text{h}$, resulta que una desviación de la demanda de $101 \text{ m}^3/\text{h}$ es significativa mientras que una de $99 \text{ m}^3/\text{h}$ no lo es.

Esta descripción que proporciona la teoría clásica de conjuntos no resulta perfectamente satisfactoria ya que las desviaciones de las demandas tan solo se diferencian en $2 \text{ m}^3/\text{h}$. Una descripción en términos de conjuntos borrosos resulta más adecuada en casos de este tipo. Por ejemplo, podrían introducirse los términos de no significativa, poco significativa y significativa, y definirse mediante funciones de pertenencia, que al variar de forma continua en el rango 0 a 1 indicarían si la desviación es no significativa, poco significativa tirando a significativa, claramente significativa, etc.

La aplicación de la lógica borrosa para el control de sistemas tiene una serie de ventajas frente a los modelos clásicos entre las que se pueden citar:

- (a) Con los sistemas basados en la lógica borrosa se pueden evaluar mayor cantidad de variables, entre otras, variables lingüísticas no numéricas, simulando el razonamiento humano.
- (b) Se puede simplificar la asignación de soluciones previas a problemas sin resolver.

- (c) No se necesita una descripción matemática detallada del funcionamiento del sistema a controlar, ya que se simplifica la adquisición y representación del conocimiento y unas pocas reglas abarcan gran cantidad de información.
- (d) Este tipo de sistemas da muy buenos resultados en procesos no lineales y de difícil modelización.

Para construir un controlador borroso, el primer paso es la definición de una serie de conjuntos borrosos solapados (o particiones geométricas) para cada variable del modelo y la descripción de la relación de las entradas con las salidas expresada como un conjunto de reglas SI-ENTONCES (Kosko, 1997; Zeldis y Prescott, 2000). Estos conjuntos y reglas borrosas constituyen la base del conocimiento del sistema borroso denominado Memoria Asociativa Borrosa (MAB o FAM) (Figuras 1 y 2), que puede ser construida sobre la base del conocimiento del experto o a partir de datos observados (Dubrovin et al., 2002).

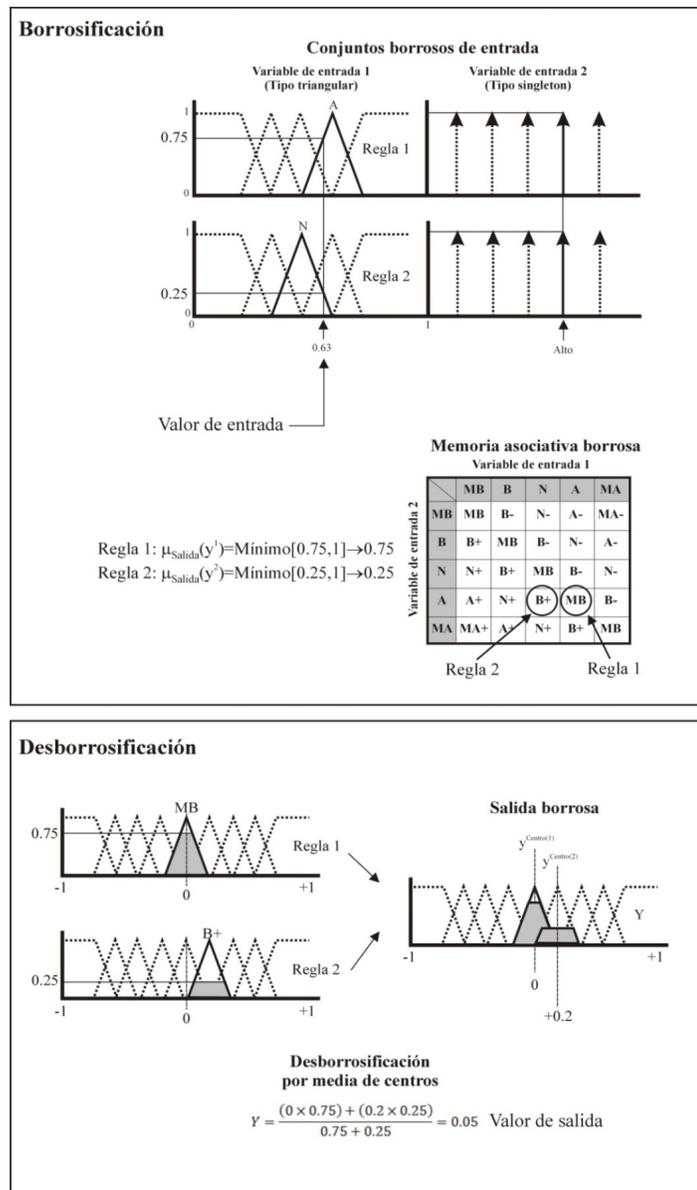


Figura 1: Esquema ejemplo de los pasos a seguir en un controlador borroso

En el controlador borroso, a cada variable de entrada se le asigna un grado de pertenencia a cada uno de los conjuntos borrosos considerados, teniendo como salida los grados de pertenencia de los conjuntos estudiados. Mediante un proceso de inferencia, que representa las reglas que definen el sistema, se relacionan los conjuntos borrosos de entrada y de salida. Posteriormente, a partir de los conjuntos difusos procedentes de la inferencia se obtiene un resultado concreto mediante la aplicación de métodos de desborrosificación (Figura 1).

Para facilitar la implementación de estos modelos de lógica borrosa para el control de distintos tipos de sistemas, la aplicación de ordenador NUBECILLA 1.0, escrito en MICROSOFT VISUAL BASIC, ha sido diseñado. Este programa, al estar definido en un entorno amigable e intuitivo, facilita la aplicación didáctica de los modelos de lógica borrosa ya que el usuario final no tiene que elaborar ningún código de programación. En la Figura 2 se presenta una de las ventanas principales de la aplicación de ordenador NUBECILLA 1.0 donde se muestra la Memoria Asociativa Borrosa (MAB), las magnitudes de evaluación de errores (coeficiente de correlación R, coeficientes de eficiencia E1 y E2, RMSE, etc.) y las particiones geométricas de los conjuntos borrosos.

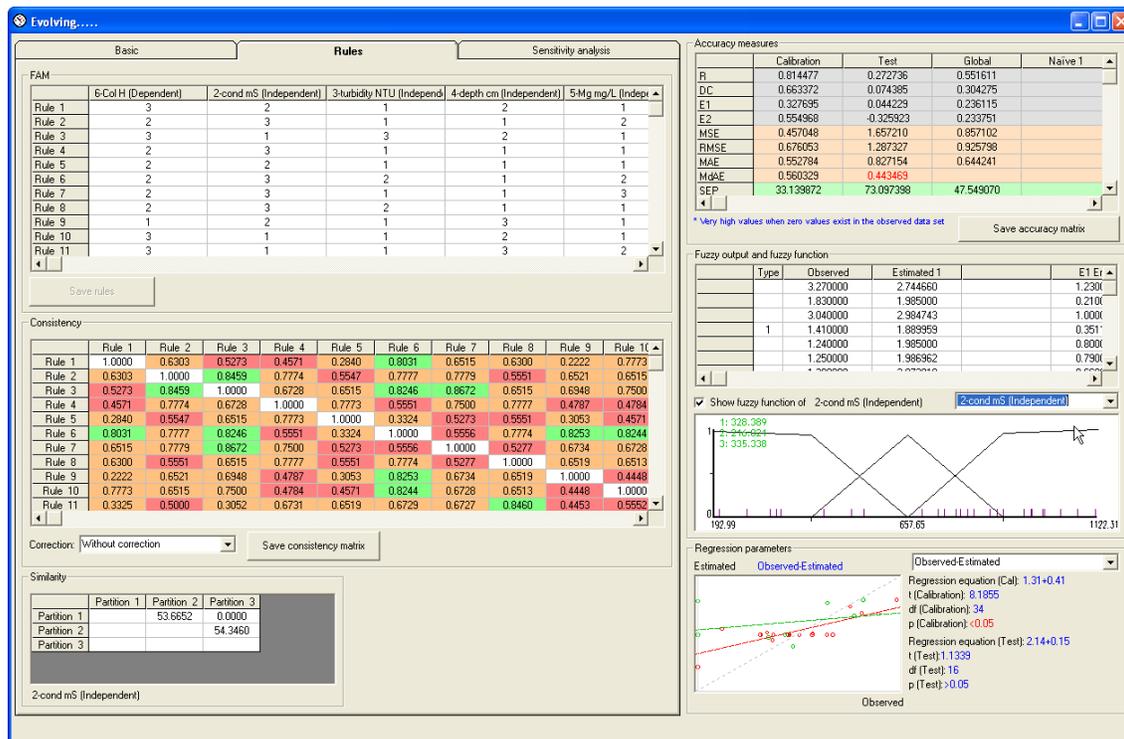


Figura 2: Ventana de la aplicación de ordenador NUBECILLA 1.0.

2.4 Caso de estudio: Plantas de acuicultura semi-intensiva

Las balsas de tierra son el elemento más usado para la producción de pescado en todo el mundo, y más del 40% de la producción acuícola mundial se realiza en balsas (Lekang, 2007). El 60% de la producción del sector acuícola andaluz procede de cultivos semi-intensivos o esteros mejorados que se caracterizan, de forma general, por instalaciones en tierra cerca de la costa que toman el agua de una fuente de suministro (río o mar) mediante una estación de bombeo o por gravedad. El agua se distribuye mediante canales, normalmente sin revestir, a los distintos estanques o balsas (normalmente sin revestir también) donde se procede a la cría y cultivo de una especie acuícola determinada. La entrada del agua a las balsas se realiza

normalmente mediante la regulación manual de compuertas en función de los parámetros de calidad del agua en las balsas de producción (concentración de oxígeno disuelto, concentración de amonio, turbidez, temperatura del agua, etc.) (Gutiérrez-Estrada et al., 2012).

Por tanto, uno de los objetivos prioritarios presentes en este tipo de plantas de acuicultura semi-intensiva (esteros mejorados) es el control de la calidad del agua en las balsas de producción y, por consiguiente, de la biomasa del cultivo correspondiente. Por una parte, son muchos los parámetros físico-químicos de la calidad del agua los que pueden afectar al bienestar de la especie cultivada, pero sólo unos cuantos juegan un papel decisivo. Normalmente, las operaciones acuícolas son realizadas basándose en la experiencia de los técnicos, y, en general, en la planta de acuicultura sólo se miden aquellas variables que se consideran que son importantes y que pueden ser interpretadas para el éxito de la producción (Boyd y Tucker, 1998). De este modo, en el caso de los esteros mejorados del sur de España, los parámetros que suelen medirse y registrarse son la concentración de oxígeno disuelto, la concentración de amonio, la turbidez y la temperatura del agua (Gutiérrez-Estrada et al., 2012).

En este tipo de plantas de acuicultura semi-intensiva, normalmente los cambios de flujos de agua se llevan a cabo mediante una regulación manual utilizando compuertas. En concreto, en el sur de España, suelen emplearse compuertas tipo rejilla (Figura 3). Estas estructuras hidráulicas están compuestas de varios tablones de madera y de una o varias rejillas, con lo que se consigue controlar el nivel deseado de la lámina de agua en las balsas de producción basándose en la experiencia de los técnicos responsables. En el trabajo práctico planteado se pretende el uso del sistema experto diseñado para la simulación de un modelo de lógica borrosa que permita el control automático de los caudales de agua que entran en las balsas de producción de estas plantas de acuicultura. Estos modelos pueden servir de apoyo en la toma de decisiones de los técnicos encargados de mantener unos niveles adecuados de calidad del agua en este tipo de instalaciones (Pulido-Calvo et al., 2014).

Para la evaluación del trabajo práctico planteado se ha aplicado el sistema experto desarrollado utilizando los datos de la planta de acuicultura semi-intensiva ‘Langostinos de Huelva, S.A.’ localizada en el término municipal de Cartaya (Huelva) y dedicada a la producción de dorada (*Sparus aurata*). El agua es bombeada desde un afluente del río Piedras a dos balsas de regulación. Desde estas balsas, el agua se distribuye por gravedad a las balsas de producción mediante canales (Figura 3). En las balsas de producción, la dorada crece desde un peso de 30-100 g hasta los pesos comerciales de venta (400-500 g y 1000 g).

Las variables que normalmente se evalúan para la regulación del caudal de entrada de agua a las balsas son: temperatura del agua (T , °C), concentración de amonio (AM, mg/l), turbidez (Secchi) y concentración de oxígeno disuelto (Ox, mg/l). Desde el 21 de abril hasta el 29 de mayo de 2008, estas variables fueron medidas diariamente en seis balsas seleccionadas (Figura 1: 5Cn, 5Cs, 6Cn, 6Cs, 6Bn, 6Bs). El oxígeno disuelto se registró a la entrada (Ox1) y la salida (Ox2) de cada balsa y la turbidez a la entrada (Secchi1), a la mitad (Secchi2) y a la salida (Secchi3) de cada balsa. También se midieron los niveles de la lámina de agua a la entrada y la salida de las compuertas (y_1 , y_2 ; Figura 3).

Las compuertas rejilla regulan la descarga de agua Q desde el canal de distribución a las balsas. Estas compuertas están compuestas de varios tablones de madera y de una o varias rejillas (Figura 3), con lo que se consigue controlar el nivel deseado de la lámina de agua en las balsas. La ecuación de descarga para orificios sumergidos se ha utilizado para determinar el caudal de descarga Q (m^3/s) de las compuertas rejilla (Munson et al., 2002):

$$Q = C_d w \sqrt{2gh},$$

siendo C_d el coeficiente de descarga, w la sección transversal del orificio de paso (m^2), g la aceleración de la gravedad (m^2/s) y h la diferencia entre los niveles de agua a la entrada y

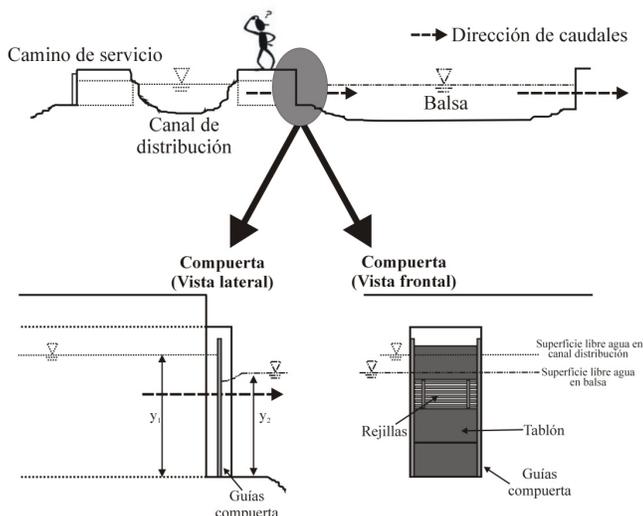
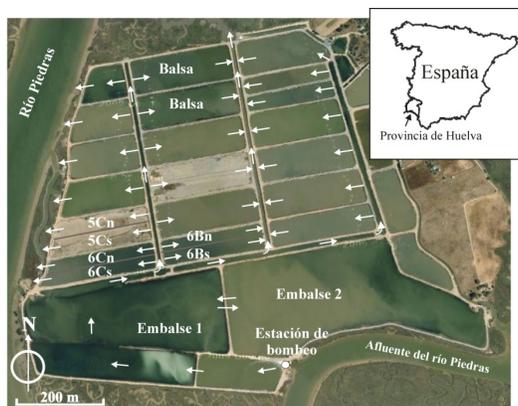


Figura 3: Área de estudio y representación esquemática del suministro y distribución del agua a las balsas de producción.

la salida de la compuerta ($h = y_1 - y_2, m$). El coeficiente de descarga C_d considera efectos geométricos y de fricción y puede tomar un valor medio de 0.62 (Munson et al., 2002).

3 Experiencia propuesta: Uso de modelos borrosos para la regulación de caudales en plantas de acuicultura semi-intensiva

Para el desarrollo del modelo borroso con la aplicación NUBECILLA 1.0, el alumno debe seleccionar primero el número de conjuntos borrosos de entrada y salida. En el caso en estudio, el modelo borroso puede tener hasta un máximo de siete conjuntos borrosos de entrada (temperatura del agua, T; concentración de amonio, AM; concentración de oxígeno disuelto en dos localizaciones de las balsas, Ox1 y Ox2; y turbidez en tres localizaciones de las balsas, Secchi1, Secchi2 y Secchi3) y un conjunto borroso de salida (caudal de entrada a la balsa, Q).

El siguiente paso es asociar estos conjuntos a un número de particiones triangulares. Es frecuente utilizar cinco particiones triangulares, que en este caso se denominan Muy Bajo [MB], Bajo [B], Normal [N], Alto [A] y Muy Alto [MA]. De este modo, la formulación general de las reglas, obtenidas de la experiencia de los técnicos de la instalación en estudio, tiene la forma:

SI T es Muy Bajo/Bajo/Normal/Alto/Muy Alto,
 Y AM es Muy Bajo/Bajo/Normal/Alto/Muy Alto,
 Y Ox1 es Muy Bajo/Bajo/Normal/Alto/Muy Alto,
 Y Ox2 es Muy Bajo/Bajo/Normal/Alto/Muy Alto,
 Y Secchi1 es Muy Bajo/Bajo/Normal/Alto/Muy Alto,
 Y Secchi2 es Muy Bajo/Bajo/Normal/Alto/Muy Alto,
 Y Secchi3 es Muy Bajo/Bajo/Normal/Alto/Muy Alto,
 ENTONCES Q es Muy Bajo/Bajo/Normal/Alto/Muy Alto.

A los alumnos se les indica las reglas extraídas de la gestión realizada por los técnicos responsables del manejo de las balsas, y éstas deben introducirlas de forma tabulada en la aplicación de ordenador NUBECILLA 1.0 (Figura 2, tabla FAM).

Para la construcción de cualquier modelo es fundamental una selección adecuada de las variables de entrada o variables independientes (Fernando et al., 2009; Pulido-Calvo et al., 2012). Una selección incorrecta de las variables de entrada puede provocar efectos no deseados como la dificultad de extraer algún significado físico de las relaciones entre las variables de entrada y salida (variables independientes y dependientes) de los modelos calibrados, y el aumento de mínimos locales en el proceso de calibración del modelo que dificultan la consecución de un modelo estadísticamente aceptable para la caracterización del proceso en estudio. El análisis de sensibilidad es una de las metodologías más utilizadas para una correcta selección de las variables de entrada de un modelo. Este método evalúa la variación en la respuesta del modelo debido a la variación de alguna o algunas de las variables independientes (variables de entrada) del mismo.

De este modo, también se les plantea a los alumnos que mediante un análisis de sensibilidad evalúen la influencia de las distintas variables de entrada en los modelos borrosos. Los alumnos consiguieron los mejores resultados con el controlador borroso que considera como variables de entrada Secchi1, Ox1 y Ox2. La varianza explicada por este modelo es del 56%, correspondiendo a un coeficiente de correlación de $R=0.75$ y una magnitud de error RMSE (square root of the mean square error) de $0.038 \text{ m}^3/\text{s}$. En la Figura 4 se muestra la representación de los caudales observados frente a los estimados para este controlador borroso. Estos resultados permiten confirmar el buen funcionamiento de este modelo heurístico.

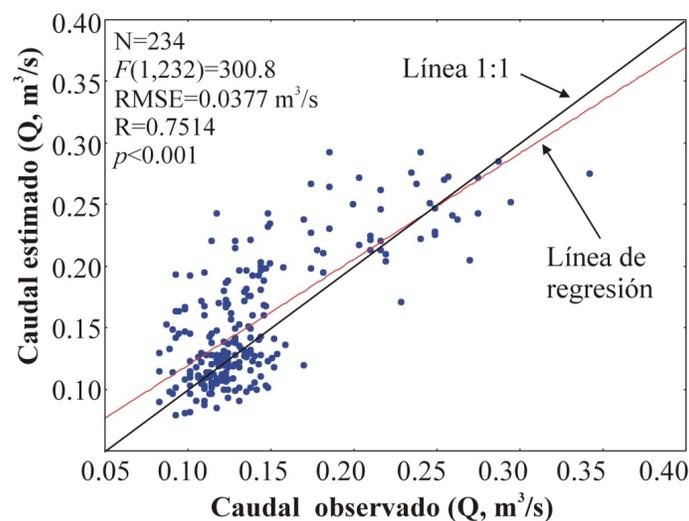


Figura 4: Representación de los caudales de entrada observados *versus* los caudales de entrada estimados por el mejor controlador borroso.

Para fomentar el razonamiento crítico en los alumnos se les pide, en el guión de la actividad, que analicen y discutan los resultados obtenidos. Durante el desarrollo de la actividad y tras la corrección de las memorias, se ha comprobado que los alumnos son capaces de sugerir que las variables turbidez y concentración de oxígeno tienen un peso significativo sobre el control de la calidad del agua en las balsas de producción.

El oxígeno disuelto se registró a la entrada (Ox1) y la salida (Ox2) de cada balsa y el análisis de sensibilidad ha mostrado que ambas mediciones son variables significativas de entrada para el modelo de control del agua en las balsas. Esto se explica debido a que la concentración de oxígeno disuelto va disminuyendo desde la entrada hacia la salida de las balsas, ya que éste va siendo consumido por los peces a medida de que el flujo de agua se desplaza hacia la salida de la balsa. Sin embargo, la turbidez mantiene unos niveles parecidos a la entrada (Secchi1), a la mitad (Secchi2) y a la salida (Secchi3) de cada balsa, y por consiguiente, el análisis de sensibilidad ha indicado que dos (Secchi2 y Secchi3) de las tres variables de turbidez no son necesarias como variables de entrada en el modelo, debido a que están altamente correlacionadas.

En el caso del parámetro oxígeno disuelto, su influencia es evidente ya que los efectos de este factor sobre la respuesta del pez es fácil de identificar por parte de los técnicos responsables del manejo del cambio del agua en las balsas. Cuando la concentración de oxígeno disuelto baja a unos determinados niveles, los peces presentan nado y respiración superficial. Por otra parte, aunque hay una clara relación entre el oxígeno disuelto y la temperatura del agua, la selección del oxígeno disuelto como variable prioritaria en el modelo borroso en vez de la temperatura del agua podría deberse a que los niveles de oxígeno cambian más bruscamente a lo largo del tiempo que la temperatura (Diana et al., 1997; Gutiérrez-Estrada et al., 2012).

La influencia de la variable turbidez es incluso más fácil de comprender ya que es una propiedad física del agua fácilmente identificable por los técnicos responsables. Cuando la turbidez es alta, los técnicos tienden a aumentar los caudales de entrada a las balsas porque la turbidez limita la producción y el crecimiento de los peces (Yi et al., 2003; Gutiérrez-Estrada et al., 2012).

También se les recomienda a los alumnos que indiquen en la memoria de la actividad las conclusiones principales que obtienen. Se verifica en las memorias presentadas por los alumnos que los resultados obtenidos en esta aplicación práctica le sugieren que el registro de la turbidez y de la concentración de oxígeno disuelto podría ser suficiente para el manejo de las compuertas que regulan la entrada de agua en las balsas de las plantas de acuicultura semi-intensiva. Con la aplicación propuesta se determina el caudal que debe pasar por las compuertas para mantener una calidad adecuada del agua en las balsas de producción.

Como indicación final en el guión de la actividad, se explica a los alumnos posibles desarrollos de trabajos futuros. De este modo, la etapa final en el proceso de automatización de las compuertas sería: (a) Sustituir las actuales compuertas rejilla manuales por compuertas planas automáticas; (b) Integrar el modelo presentado en este estudio en un sistema de instrumentación, como LABVIEW, que permitiera la simulación de la apertura de las compuertas en función del caudal que debe pasar por ellas; y (c) Conectar el sistema LABVIEW con un microcontrolador, como puede ser Arduino, para regular el movimiento del motor de la compuerta automática en función de los datos recibidos en su entorno de desarrollo (Márquez-Díaz, 2014).

4 Evaluación de la experiencia propuesta

La evaluación de la actividad docente propuesta se ha realizado de forma continua, considerando, por una parte, la actitud del alumno durante el desarrollo presencial de la actividad

en las dos sesiones de clases programadas y, por otra parte, la memoria presentada. En los cursos académicos 2013-14 y 2014-15, todos los equipos de alumnos que asistieron a las sesiones de clases presentaron la memoria correspondiente (2 grupos de 15 alumnos por curso académico: 10 equipos de alumnos por curso académico). El 85% de las memorias fueron valoradas con una calificación media de notable y el 15% como sobresaliente. Esta evaluación ha permitido concluir:

- (a) Que con los conocimientos adquiridos en materias ya estudiadas, como Física, Matemáticas, Estadística, Informática y Electrónica, los alumnos son capaces de entender, simular y aplicar modelos de lógica borrosa.
- (b) Que con los conocimientos adquiridos en las asignaturas 'Mecánica de Fluidos' e 'Impacto Ambiental' es posible abordar el problema práctico planteado.
- (c) Que el desarrollo de la aplicación de ordenador NUBECILLA 1.0 para la implementación de sistemas de control de lógica borrosa ha ayudado a un mejor conocimiento del procedimiento operativo de este tipo de técnicas de modelización.
- (d) Que la simulación del problema práctico utilizando la aplicación NUBECILLA 1.0 ha ayudado al análisis, interpretación y discusión de los resultados obtenidos.
- (e) Que, de forma global, la actividad de modelización planteada ha facilitado el aprendizaje de las materias 'Mecánica de Fluidos' e 'Impacto Ambiental' de 3er curso de los Grados de Ingeniería Mecánica, de Ingeniería Energética y de Ingeniería Electrónica Industrial.

5 Conclusiones

En este trabajo se presenta el diseño, desarrollo y uso del sistema experto NUBECILLA 1.0 que permite la simulación de modelos de lógica borrosa. Esta aplicación de ordenador se está utilizando en una de las actividades académicas, planteada de forma transversal, en las asignaturas 'Mecánica de Fluidos' e 'Impacto Ambiental' de los Grados de Ingeniería Mecánica, de Ingeniería Energética y de Ingeniería Electrónica Industrial impartidos en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Huelva.

De forma específica, se muestra el planteamiento a los alumnos de un trabajo práctico que usa este sistema experto para la regulación y control del caudal de agua que entra en balsas de plantas de acuicultura semi-intensiva (esteros), con el objetivo principal de mantener una calidad adecuada de agua para conseguir los mejores rendimientos de producción.

La evaluación de la propuesta didáctica de modelización presentada nos sugiere una respuesta positiva por parte de los alumnos, que han sido capaces de entender los conceptos y procedimientos necesarios para utilizar el sistema experto NUBECILLA 1.0 en la exploración y análisis de un problema real de ingeniería. De forma global se puede afirmar que esta metodología docente ha supuesto un estímulo para la promoción de la autonomía y el aprendizaje significativo del alumno, al fomentar competencias como el trabajo en equipo, la integración de conocimientos, el razonamiento crítico y la capacidad de análisis.

Referencias

-  BOE. 2003. Real Decreto 1125/2003, de 5 de septiembre, por el que se establece el sistema europeo de créditos y el sistema de calificaciones en las titulaciones universitarias de carácter oficial y validez en todo el territorio nacional. BOE núm. 224, de 18 de septiembre de 2003, 34355–34356.
-  Boyd, C.E., Tucker, C.S. (1998). *Pond aquaculture water quality management*. Kluwer Academic Publishers, MA, USA.
-  Diana, J. S., Szyper, J. P., Batterson, T. R., Boyd, C. E., Piedrahita, R. H. (1997). *Water quality in ponds*. En: Egna, H.S., Boyd, C.E. (Eds.), Dynamics of pond aquaculture, 3, CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 53–71.
-  Dubrovin, T., Jolma, A., Turunen, E. (2002). *Fuzzy model for real-time reservoir operation*. Journal of Water Resources Planning and Management 128(1), 66–73.
-  Fernando, T. M. K. G., Maier, H. R., Dandy, G. C. (2009). *Selection of input variables for data driven models: an average shifted histogram partial mutual information estimator approach*. Journal of Hydrology 367, 165–176.
-  Gutiérrez-Estrada, J. C., Pulido-Calvo, I., de la Rosa, I., Marchini, B. (2012). *Modeling inflow rates for the water exchange management in semi-intensive aquaculture ponds*. Aquacultural Engineering 48, 19–30.
-  Kosko, B., (1997). *Fuzzy engineering*. Prentice Hall, Londres, Reino Unido.
-  Lekang, O.I. (2007). *Aquaculture engineering*. Blackwell Publishing, Oxford, Reino Unido.
-  Márquez-Díaz, M. (2014). *Diseño y construcción experimental de compuertas para la regulación del caudal de agua en plantas de acuicultura semi-intensiva*. Trabajo Fin de Grado, Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Huelva.
-  Munson, B. R., Young, D. F., Okiishi, T. H. (2002). *Fundamentals of fluid mechanics*. Wiley (4° ed.), Nueva York, USA.
-  Pulido-Calvo, I., Gutiérrez-Estrada, J.C., Savic, D. (2012). *Heuristic modelling of the water resources management in the Guadalquivir River Basin, southern Spain*. Water Resources Management 26, 185–209.

-  Pulido-Calvo, I., Gutiérrez-Estrada, J.C., Díaz-Rubio, E., de la Rosa, I. (2014). *Assisted management of water exchange in traditional semi-intensive aquaculture ponds*. Computers and Electronics in Agriculture 101, 128–134.
-  Sol, M. (2013). *Contribuciones de la modelización al desarrollo de competencias básicas*. Modelling in Science Education and Learning 6(1), 73–91.
-  Universitat Jaume I de Castelló. (2006). *Documento-guía para la elaboración de guías didácticas/docentes ECTS*. Conselleria d'Empresa, Universitat i Ciència de la Generalitat Valenciana, Valencia.
-  Yi, Y., Lin, C. D., Diana, J. S. (2003). *Techniques to mitigate clay turbidity problems in fertilized earthen fish ponds*. Aquacultural Engineering 27, 39–51.
-  Zeldis, D., Prescott, S. (2000). *Fish disease diagnosis program-problems and some solutions*. Aquacultural Engineering 23, 3–11.

Modelling in Science Education and Learning
<http://polipapers.upv.es/index.php/MSEL>