

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE CONTROL Y
AUTOMATIZACIÓN



**DESARROLLO DE UN SISTEMA DE CONTROL NEURO-DIFUSO DE LA
DISTRIBUCIÓN DE AGUA EN UN TRAMO DE UN CANAL PRINCIPAL
DE RIEGO**

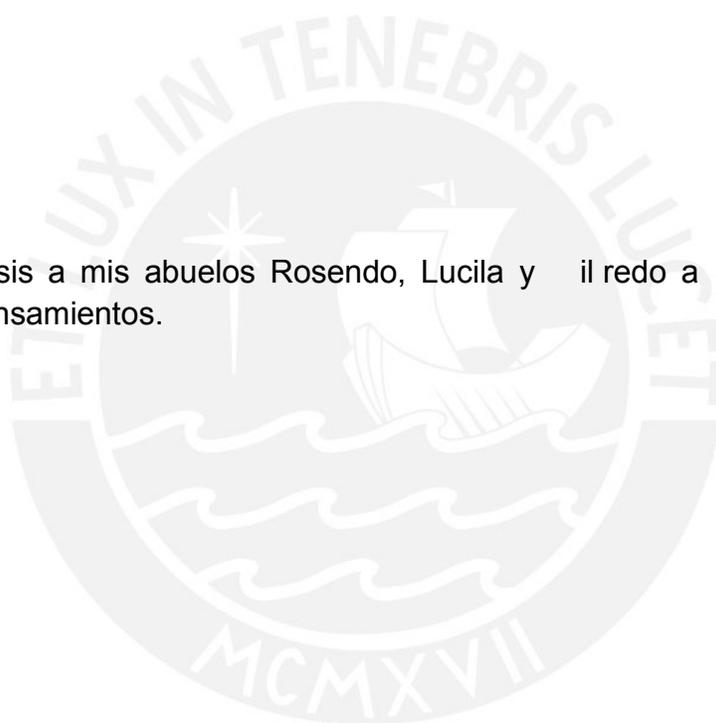
Tesis en opción al grado de Magister en Ingeniería de Control y
Automatización

Autor: Edwin Milton Calderón Mendoza

Asesor de tesis: D. Carlos Raúl Rivas Perce

2014

Dedico esta tesis a mis abuelos Rosendo, Lucila y al resto a quienes siempre llevo en mis pensamientos.



AGRADECIMIENTOS

Mi profundo agradecimiento a mis profesores de la maestría en Ing. de Control y automatización de quienes recibí un valioso conocimiento. En especial al Dr. Raúl Rivas, Dr. Javier Rotomayor y Dr. Antonio Morán por su denodado apoyo, dedicación, comprensión y empleo de amor a la ciencia y tecnología.

RESUMEN

El presente trabajo tiene por intención sentar las bases necesarias para el desarrollo de sistemas de control y su implementación en los canales de riego más representativos del Perú. Partiendo de la problemática actual en que los recursos hídricos están siendo cada vez más escasos y en el futuro cercano el Perú será uno de los países más afectados de Latinoamérica por los cambios climáticos, lo que ocasionará un estrés hídrico permanente. Ello implica que se requiera la utilización de técnicas adecuadas para una distribución eficiente del agua de acuerdo a las demandas establecidas por los regantes. En este contexto se plantea una solución desde el punto de vista de la Ingeniería de Control y Automatización con el desarrollo de un controlador neurodifuso con predictor de tipo NDP, a partir de un modelo obtenido mediante técnicas de identificación de sistemas, tomando como base un tramo del canal principal "Imperial de Aragón", ubicado en la conederación hidrográfica del río Ebro en España. Dicho planteamiento podrá luego extenderse mediante su adecuación a otras estructuras hidráulicas como por ejemplo a la primera etapa del Proyecto Cavimoc ubicado en la Región Libertad – Perú.

En el capítulo 1, se desarrolla el estado del arte a nivel internacional, el cual consiste en la descripción de los canales principales de riego, sus partes, elementos empleados en la regulación de flujo de agua y de los sistemas de control de la distribución de agua en canales principales de riego. Se aborda en el ámbito nacional la problemática actual que afronta el Perú en cuanto a infraestructuras hidráulicas adecuadas y carencia de sistemas de medición y control de la distribución de agua.

En el capítulo 2, se obtuvo un modelo matemático que describe el comportamiento dinámico de un tramo de canal de riego. Para ello se consideraron diversas estructuras de modelos de caja negra y validación para la determinación del mejor modelo. Finalmente se realizó la transformación del modelo obtenido en tiempo discreto a tiempo continuo.

En el capítulo 3 se desarrolla el diseño de un controlador neurodifuso con predictor de tipo NDP para controlar la apertura de la compuerta equivalente aguas arriba de un tramo de un canal principal de riego. Para ello se estableció un modelo discreto en espacio estado equivalente y en base a las variables de estado establecidas la determinación de un rango de variabilidad para la construcción de una base de reglas. Posteriormente la incorporación de dichas reglas dentro de una estructura neurodifusa. Además, la incorporación de un predictor de tipo NDP para compensar el retardo de tiempo presente en la dinámica de la planta, con realimentación proporcionada por las salidas estimadas de un filtro de Kalman. Finalmente la comparación del controlador NDP con un PI con predictor de tipo NDP y evaluación de sus comportamientos.

En el capítulo 4 se realizó la propuesta de implementación práctica del controlador desarrollado con la selección de instrumentos para la medición de variables de nivel y posición, la selección de un controlador local y un sistema de monitoreo. Además la selección de los protocolos de comunicación entre los distintos elementos.

Contenido

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1 ESTADO DEL ARTE DE LOS TEMAS DE CONTROL DE LA DISTRIBUCIÓN DE AGUA EN CANALES PRINCIPALES DE RIEGO.....	
1.1 Introducción.....	
1.2 Estado del arte en el ámbito internacional.....	
1.2.1 Inicios de la automatización y control en canales de riego.....	
1.2.2 Desarrollo actual de los sistemas de control para canales de riego.....	
1.3 Estado del arte en el ámbito nacional.....	
1.3.1 Los canales principales de riego como objetivo de control.....	
1.3.2 Descripción del canal de riego con proyección a la automatización.....	10
1.3.2.1 Ubicación.....	11
1.3.2.2 Desarrollo actual.....	11
1.3.2.3 La primera etapa.....	12
1.3.2.4 La segunda etapa.....	12
1.4 Objetivos de la tesis.....	12
CAPÍTULO 2 IDENTIFICACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LA DISTRIBUCIÓN DE AGUA EN UN TRAMO DE UN CANAL PRINCIPAL DE RIEGO.....	14
2.1 Introducción.....	14
2.2 Los canales principales de riego como objetivo de control.....	14
2.2.1 Lógicas de control.....	14
2.2.1.1 Control aguas arriba.....	1
2.2.1.2 Control aguas abajo.....	1
2.2.1.3 Control aguas abajo alejado.....	1
2.2.2 Modelado matemático de un tramo principal de un canal de riego.....	20
2.3 Descripción del canal.....	22
2.4 Identificación del comportamiento dinámico del canal.....	24
2.4.1 Metodología de identificación.....	2
2.4.2 Planificación experimental e identificación no paramétrica.....	2
2.4.2.1 Experimento con señal escalón.....	2
2.4.2.2 Experimento con señal binaria.....	1

2.4.2. Preprocesamiento de los datos e perimentales	
2.4. elección de la estructura del modelo y estimación de parámetros	
Identificación de parámetros	
2.4.4 Formulación del criterio y estimación de parámetros.....	40
2. Validación del modelo	42
2. Conclusiones preliminares	
CAP TULO DE ARROLLO DE N I TEMA DE CONTROL NEURO DIFUSO DE LA	
DISTRIBUCIÓN DE AGUA EN UN TRAMO DE UN CANAL PRINCIPAL DE RIEGO.....	
.1 Introducci n.....	
.2 Fundamentación de la estrategia de control a utilizar	
. Conceptos básicos de control neuro di uso	
. .1 Redes neuronales.....	
. .1.1 Esquema general de un sistema de red neuronal artificial RNA	
. .1.2 Entrenamiento de la red neuronal artificial RNA	0
. .1. Acondicionamiento de los datos	0
. .2 Lógica difusa.....	1
. .2.1 Funciones de pertenencia de conjuntos difusos	1
. .2.2 Fuzzyficator.....	2
. .2. Base de reglas difusas	
. .2.4 Desfuzzyficator.....	
. . Control Neuro di uso.....	4
.4 Síntesis del sistema de control neuro di uso de la distribución de agua en un tramo de un canal principal de riego.....	
.4.1 Obtención del modelo discreto de la planta para el diseño del controlador neuro di uso.....	
.4.1.1 Representación espacio estado de la planta en tiempo continuo y selección del periodo de muestreo.....	
.4.1.2 Representación espacio estado de la planta en tiempo discreto	
.4.2 Obtención de una base de reglas para el diseño del controlador neuro di uso	
.4.2.1 Determinación del rango de variación de parámetros.....	
.4.2.2 Partición de rango y de iniciación de términos lingüísticos.....	0
.4.2. Elaboración de base de reglas	1
.4. Implementación básica de un controlador neuro di uso sin retardo de tiempo .	4
.4. .1 Diagrama de bloques de controlador.....	4

.4. .2 Descripción matemática de funciones de membresía y obtención de la variable de control.....	
.4. .3 Sistema de control en lazo cerrado y pruebas de funcionamiento	
.4. .4 Diseño de un observador discreto para la estimación de variables de estado	
.4. .4.1 Diseño de un filtro de Kalman.....	4
.4.4 Desarrollo de un controlador neurodifuso, basado en el predictor de Kalman	
.4. Resultados de simulación y variación de parámetros.....	1
.4. Pruebas de simulación y comparación con un controlador PID.....	
.4. .1 Variación de parámetros internos	
.4. .2 Respuesta comparativa de controladores.....	100
. Conclusiones preliminares	10
CAPÍTULO 4 PROPIEDAD DE IMPLEMENTACIÓN PRÁCTICA DEL SISTEMA DE CONTROL NEURODIFUSO DE ARROLLADO.....	10
4.1 Introducción.....	10
4.2 Propuesta de instrumentación.....	10
4.2.1 Selección de instrumentos	10
4.2.1.1 Sensor transmisor de nivel	10
4.2.1.2 Sensor transmisor de posición.....	10
4.2.1.3 Actuador etapa de potencia motor cáscara reductora	10
4.2.1.4 PLC.....	110
4.2.1.5 Computador.....	111
4.2.1.6 Fuente de energía auxiliar	111
4. Propuesta de implementación del controlador desarrollado	112
4.4 Propuesta del sistema de control	112
4. Conclusiones preliminares	11
CONCLUSIONES	11
RECOMENDACIONES	11
ÍNDICE ALFABÉTICO.....	11
ANEXO	12

INTRODUCCIÓN

En la actualidad el agua se está convirtiendo en un recurso escaso y en el futuro inmediato la escasez de dicho elemento constituirá uno de los grandes retos que la sociedad moderna deberá enfrentar (Nielsen et al., 2004). Es por ello que se observa un determinado incremento en la aplicación de controladores automáticos en la distribución del agua en los canales principales de riego (Clemmens and Cuurmans, 2004; Litrico and Fromion, 2006). Sin embargo, es necesario señalar que las investigaciones destinadas a lograr una gestión eficiente de los recursos hídricos disponibles en los sistemas de riego, no han sido suficientemente impulsadas, debido entre otros factores a las dificultades tecnológicas que presentan estos sistemas (Rivas Pere et al., 2006).

El aprovechamiento del agua en los sistemas de riego demanda una atención especial debido a que la agricultura es la rama que consume la mayor cantidad de este líquido y probablemente con la menor eficiencia. Por consiguiente, un incremento en la eficiencia de la distribución de agua en los canales principales de riego puede traducirse en volúmenes adicionales de agua para atender mayores áreas de cultivo (Rivas Pere et al., 2014a). En este sentido, el control automático se muestra como una posible estrategia para mejorar la operatividad de los canales de riego, así como el servicio a los usuarios con tiempos mínimos de respuesta (Litrico and Fromion, 2006; Rivas Pere et al., 2014b). Los controladores PID han sido muy utilizados y extendidos en el control de la distribución de agua en los canales principales de riego (Guyals y el al., 1991; Clemmens and Cuurmans, 2004; Litrico and Fromion, 2006; Malaterre and Rogers, 1996). Sin embargo, diferentes estudios muestran que los canales principales de riego pueden presentar parámetros dinámicos variables en el tiempo en un amplio rango, por lo que la aplicación de controladores PID convencionales no siempre resulta efectiva (Rivas Pere et al., 2014a). Por tal motivo, una de las tendencias tecnológicas actuales consiste en el desarrollo de controladores con un mayor grado de robustez, entre los que se destacan los controladores ∞ , CP, M, predictor de Smith, P, PID de orden racional, etc. (Rivas Pere et al., 2014b). Entre las principales desventajas que presentan estos controladores se encuentran mayor complejidad matemática de los algoritmos de control, necesidad de ajustar parámetros adicionales y/o de disponer de un modelo interno, razonablemente bueno, de la planta a controlar, etc.

En los últimos años se vienen aplicando en diferentes ramas de la ciencia, con resultados satisfactorios, los controladores inteligentes, los cuales representan una opción alternativa de solución de problemas de control de plantas caracterizadas por presentar comportamientos dinámicos complejos (Liu, 2006). En muchos casos reales, las plantas son efectivamente tan complejas que resulta casi imposible o inapropiado controlarlas utilizando controladores convencionales. El tratamiento de estas plantas con un entorno de incertidumbre, en general imposible de formular en un riguroso marco matemático, ha conducido al desarrollo de los controladores inteligentes (Gantner, 2011).

En este sentido, considerando el complejo comportamiento dinámico que presentan los canales principales de riego (comportamiento dinámico no lineal y distribuido, retardo de tiempo dominante, parámetros dinámicos variantes en el tiempo, etc.) surge la necesidad de desarrollar controladores inteligentes para el control de la distribución de agua en canales principales de riego, que se distingan por su robustez, confiabilidad y fácil entendimiento. Una alternativa de esta clase de controladores consiste en el diseño de controladores neurodifusos, los cuales se caracterizan por combinar la capacidad de

aprendizaje de las redes neuronales artificiales (RNA) con el poder de interpretación lingüística de los sistemas de inferencia difusa, obteniéndose los siguientes resultados: aplicabilidad de los algoritmos de aprendizaje desarrollados para las RNA en la integración de conocimientos implícitos, adquiridos a través del aprendizaje, y explícitos, los cuales pueden ser aplicados mediante reglas e inferencia de conocimientos para una base de reglas difusas a partir de un conjunto de datos.

El presente trabajo tiene como objetivo general el desarrollo de un controlador neurodifuso con predictor de mínima NDP para el control efectivo de la distribución del agua en un tramo de un canal principal de riego, que posibilite el aumento de la operatividad sobre el canal, así como la disminución de las pérdidas por concepto de operación.

Los objetivos específicos de este trabajo son los siguientes:

1. Identificar las herramientas de identificación de sistemas para obtener un modelo matemático adecuado de la distribución de agua en un tramo de un canal principal de riego.
2. Desarrollar un sistema de control NDP de la distribución de agua en un tramo de un canal principal de riego.
3. Desarrollar un análisis comparativo del sistema de control NDP desarrollado vs sistema de control PI con predictor de mínima, determinando la robustez del sistema obtenido frente a diferentes tipos de perturbaciones.
4. Realizar una propuesta de implementación práctica del sistema de control desarrollado.

hipótesis En este trabajo se parte de la hipótesis de que es posible aumentar la efectividad en el control de la distribución de agua en los canales principales de riego, así como disminuir las actuales pérdidas improductivas de recursos hidráulicos que afectan al medio ambiente, mediante el desarrollo e implementación práctica de controladores neurodifusos.

Contribución al conocimiento El controlador NDP desarrollado en el presente trabajo, fue aprobado para su presentación en el XV Congreso Latinoamericano de Control Automático a desarrollarse en México en octubre del 2014 (ver anexo).

CAPÍTULO 1: ESTADO DEL ARTE DE LOS SISTEMAS DE CONTROL DE LA DISTRIBUCIÓN DE AGUA EN CANALES PRINCIPALES DE RIEGO

1.1 Introducción

A modo de referencia se tendrá en cuenta una serie de trabajos previos realizados sobre el control automático en canales principales de riego, los cuales podrán ser considerados como una potente herramienta para mejorar la eficiencia en los sistemas de riego (Feliu Atlle et al., 2011). La introducción del control automático en canales principales de riego ha aumentado considerablemente en los últimos años y constituye un área que presenta una creciente atención en el ámbito internacional, existiendo diversos canales en diferentes países que se encuentran totalmente automatizados (Feliu Atlle et al., 2000 y 2001; Litrico and Fromion, 2004; Malaterre, 1991; Mareels and Meyer, 2004; Rivas Pere et al., 2004).

Debido a que actualmente el agua se está convirtiendo en un recurso escaso y en el futuro inmediato la escasez de dicho elemento constituirá uno de los grandes retos que la sociedad moderna deberá enfrentar (Arreguin, 1991; Ni on et al., 2004). Sin embargo es necesario señalar que las investigaciones destinadas a lograr una gestión eficiente del uso del agua no han sido suficientemente impulsadas (Rivas Pere et al., 2004).

1.2 Estado del arte en el ámbito internacional

1.2.1 Beneficios de la automatización y control en canales de riego

Tradicionalmente el manejo de los canales de riego ha tenido una baja eficiencia. La cantidad de agua que reciben las cosechas representa una pequeña fracción de la cantidad de agua que se envía desde las fuentes de suministro. Por otro lado, la modernización de los canales usualmente mejora la eficiencia y provee un mejor servicio al usuario. Por tanto, el control automático se muestra como un posible método para la mejora de la operatividad y al mismo tiempo mejorar la calidad de servicio con un tiempo puntual de respuesta, para un determinado servicio (Litrico and Fromion, 2004).

Los albores de la automatización de canales de riego comenzaron antes de 1900 y se caracterizan por el uso de compuertas hidráulicas autocontroladas. En las décadas de 1900 y 1910, los controladores electromecánicos fueron desarrollados e instalados en EE.UU. Posteriormente se realizó el control local con la implementación de controladores lógicos programables PLC (Lurt and Piao, 2004) y con el advenimiento de computadores personales, la simulación de modelos de canales de flujo con dinámica complicada fueron aplicados en combinación con algoritmos de control (Lurt and Piao, 2004; Clemmens et al., 2000). Esta aproximación permitió avances significativos en la ingeniería de control y automatización de canales.

Los beneficios fundamentales de la distribución de agua mediante el control y automatización en canales principales de riego son

- mejoran la eficiencia y distribución del agua,
- reducen las pérdidas de agua,

- e proporciona un suministro de agua a los usuarios en un tiempo conveniente ovalen o, 1 uyls i et al., 1 1 c uurmans, 1 .

Los canales principales de riego son sistemas los cuales están distribuidos por largas distancias, con significativos tiempos de retardo por transporte y dinámicas que cambian con las condiciones de operación hidráulica Litrico and Fromion 2004 . El típico canal principal de riego es un sistema hidráulico abierto, tiene una estructura con orientación longitudinal y sección transversal trapecoidal y cuyo objetivo es principalmente transportar agua desde una fuente hasta los usuarios finales agricultores . La distancia de un canal entre dos compuertas se define como un tramo. Este sistema está integrado por muchos tramos separados por estructuras transversales principalmente compuertas hidráulicas , las cuales son operadas para regular los niveles de agua, descargas y volúmenes de un tramo al siguiente Rivas Pere et al., 200 a . La apertura de la compuerta es adecuadamente regulada para mantener un determinado comportamiento deseado en el nivel de agua. En tramos de canales regulados automáticamente, las variables controladas son los niveles de agua, las variables manipuladas son las posiciones de las compuertas y las variables de perturbación son las descargas e intensas de agua debido a canales laterales, la interacción entre tramos consecutivos, etc. uyls i et al., 1 1 . En La Fig.1.1 muestra una representación esquemática de un canal principal de riego.

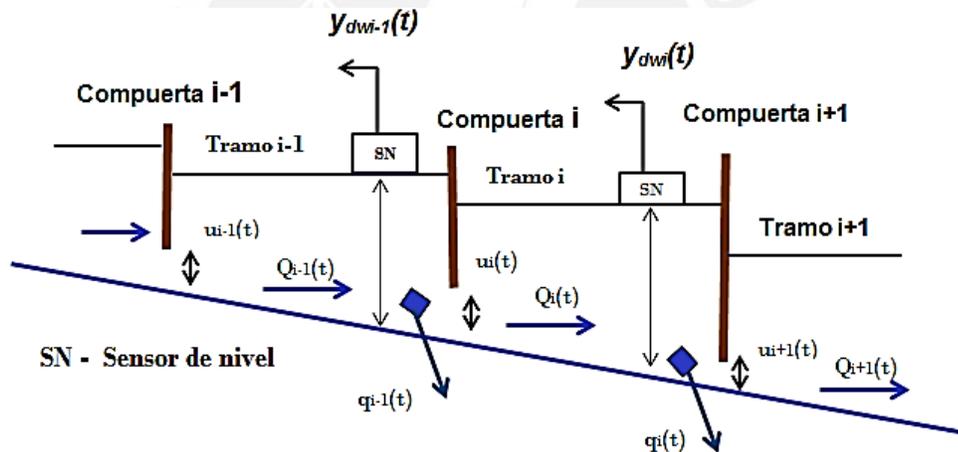


Fig.1.1. Representación esquemática de un canal principal de riego.

Los métodos de control automático modernos usualmente requieren de un adecuado modelo matemático que describa la dinámica de los procesos a ser controlados en orden a asegurar una respuesta deseada de las variables controladas. Como la dinámica de los canales de riego presenta un comportamiento dinámico complejo, los modelos usados para la síntesis de los controladores son recientemente aproximaciones de los modelos hidráulicos. Litrico and Georges, 1 .

La construcción de modelos matemáticos de sistemas físicos reales puede resultar una tarea muy difícil, que implica un elevado consumo de tiempo. En este sentido, las ecuaciones de Saint Venant representan ecuaciones no lineales en derivadas parciales del tipo hiperbólicas con restricciones complejas, por lo que su aplicación en la simulación del comportamiento dinámico de los canales de riego requiere un elevado costo computacional y su utilización de forma directa en el diseño de

sistemas de control presenta serias dificultades Litrico and Fromion, 2004 Rivas Pere *et al.*, 2006 Meyer, 2001. Esto fundamenta la necesidad de obtener modelos matemáticos simples de los canales de riego que posibiliten su aplicación directa en el diseño de sistemas de control efectivo de la distribución del agua.

La identificación de sistemas constituye un área importante de la teoría del control, que posibilita la construcción de modelos matemáticos de los procesos físicos sobre la base de las observaciones mediciones de sus señales de salida y entrada obtenidas en condiciones de funcionamiento, teniendo en cuenta que estas mediciones se verán afectadas por ruidos, perturbaciones e incertidumbres Lung, 1991.

Los experimentos basados en la respuesta a una señal escalón como señal de entrada permiten la obtención de datos a la salida y mediante el proceso de identificación de sistemas, obtener un modelo matemático que describirá su comportamiento dinámico. En esta prueba la compuerta hidráulica es excitada con una señal paso y el nivel de agua con posición estimada aguas arriba o aguas abajo es medido con el sensor de nivel, como se muestra en la Fig.1.2.

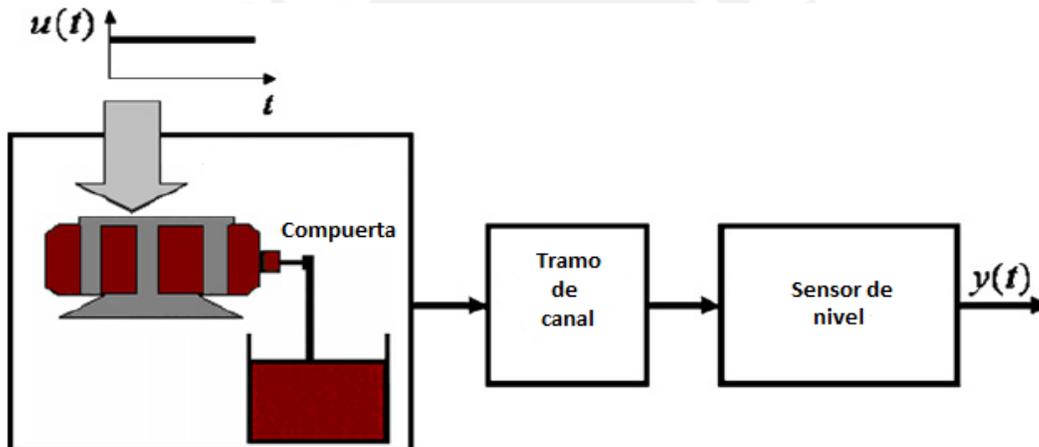


Fig.1.2. Representación del experimento de identificación.

1.2.2 Desarrollo actual de los sistemas de control para canales de riego

El objetivo fundamental del desarrollo e implementación práctica de sistemas efectivos de control automático de la distribución de agua en los canales principales de riego, consiste en satisfacer, a pesar de las incertidumbres, las demandas de agua de los diferentes usuarios, garantizando que los volúmenes de agua extraídos desde la fuente de abasto se correspondan con las necesidades reales, así como se minimicen las pérdidas por concepto de operación en todo el canal Oyals y *et al.*, 1991 Ovalen o, 1991 Rivas P re , 2010.

Las investigaciones desarrolladas en diferentes canales principales de riego muestran que sus parámetros dinámicos experimentan variaciones cuando sus regímenes de descarga varían en el rango de operación Q_{\min} , Q_{\max} y otros parámetros hidráulicos cambian Corrigan *et al.*, 1991 Litrico and Fromion, 2004 Montañar and *et al.*, 2006 Rivas P re *et al.*, 2014a. Esta clase de canales se conoce como canales con parámetros dinámicos variables en el tiempo Litrico *et al.*, 2006 Rivas P re *et*

al., 200 b . Por consiguiente, cualquier controlador que se dise e debe de comportarse de forma robusta frente a esta clase de variaciones Deltour and an ilippo, 1 Felii atlle et al., 200 a Litrico et al., 200 .

Los controladores PID Proporcional integral derivativo constituyen los controladores más utilizados y extendidos en los sistemas de control automático de la distribución de agua en los canales principales de riego Oyals y et al., 1 Clemmens y c uurmans, 2004 Litrico y Fromion, 200 Malaterre et al., 1 c uurmans et al., 1 . Sin embargo, diferentes estudios muestran que cuando los canales principales de riego presentan parámetros dinámicos variables en el tiempo, la aplicación de controladores PID convencionales no resulta efectiva, originándose un aumento significativo en el tiempo de establecimiento y en el pico máximo de la respuesta temporal del sistema de control, lo cual implica que disminuya la operatividad de la distribución de agua en los canales y, por consiguiente, que aumenten las pérdidas de los recursos hidráulicos disponibles por concepto de operación Clemmens y c uurmans, 2004 Litrico y Fromion, 200 Felii atlle et al., 200 b Rivas Pere et al., 2002 a lin, 2004 . Es por ello que en el desarrollo de controladores robustos de la distribución de agua en canales principales de riego constituye un área de investigación de elevado interés científico – técnico y práctico Litrico y Fromion, 200 a lin and Clemmens, 200 . El diseño de esta clase de controladores constituye un reto y un problema vital para mejorar la operatividad y eficiencia en la distribución de agua en los canales principales de riego Rivas P re et al., 2014a .

En este sentido, la tendencia actual en el control de los canales de riego, se basa en la utilización de controladores robustos diseñados mediante la técnica H_∞ , controladores predictivos, controladores PID de orden racional Rivas Pere et al., 2014b entre otros. Dichos controladores presentan un buen comportamiento frente a variaciones de los parámetros internos de la planta.

Para el caso de un controlador PID de orden racional, este exhibe el mismo comportamiento que un PI frente al comportamiento dinámico nominal de la planta es decir, diseñado para las mismas especificaciones, pero presenta menos sensibilidad frente a cambios en los parámetros dinámicos de la planta Rivas et al., 2014b . El controlador FPI se representa mediante la función de transferencia, dada por 1.1

$$R_{FPI}(s) = K_p \frac{1 + T_d s^\alpha}{s} \quad 1.1$$

donde

$$s^\alpha = (j\omega)^\alpha = \omega^\alpha e^{\frac{j\pi}{2}\alpha}$$

$$0 \leq \alpha \leq 2$$

Esta clase de controladores requiere el ajuste de tres parámetros K_p , T_d y α , es decir un parámetro más que en caso del controlador PI convencional. El parámetro de orden racional α se utiliza para cumplir con las especificaciones adicionales de comportamiento robusto del sistema de control Rivas et al., 2014b . El método de diseño de un controlador robusto FPI se basa en las siguientes especificaciones en el dominio de la frecuencia a margen de fase deseado ϕ_m , el cual garantiza el amortiguamiento nominal deseado de la respuesta temporal sobreimpulso M_p , así como la robustez del sistema de control frente a variaciones del retardo de tiempo b

recuencia de cruce de ganancia deseada ω_c , la cual garantiza la velocidad nominal deseada de la respuesta temporal del sistema de control tiempo de establecimiento t_s , c Cero error de estado estacionario. La última especificación implica que el controlador debe de incluir un término integral Rivas Pere et al., 2014b. Además, se necesita una sintonización adecuada de sus parámetros para obtener a la salida un comportamiento deseado de la planta.

Por otro lado, el método de diseño de controladores ∞ recupera las propiedades de los controladores clásicos como el PI y los aborda como la solución de un problema de optimización. El diseño de un controlador ∞ se realiza en dos pasos. El primero es la elección de los requerimientos de diseño, como las restricciones en la norma ∞ de la función de transferencia del sistema retroalimentado. El segundo paso consiste en la formulación del problema como una minimización de la norma ∞ de un sistema aumentado incluyendo las restricciones de diseño. Esto conlleva al llamado “problema de norma”, el cual puede ser resuelto usando un software de control clásico Litrico and Fromion 200. En particular, la teoría de ∞ permite incorporar requerimientos de robustez, atenuación a disturbios y propiedades de desempeño dentro de un problema de optimización. Sin embargo entre sus principales desventajas se encuentran el nivel de entendimiento necesario para una aplicación exitosa y la necesidad de un modelo razonablemente bueno del sistema a ser controlado.

1.3 Estado del arte en el ámbito nacional

El riego en el Perú ha sido y se espera que continúe siendo un actor determinante en el incremento de la seguridad alimentaria, el crecimiento agrícola y productivo, y el desarrollo humano en las zonas rurales del país. El aprovechamiento del recurso hídrico en el sector agrícola, demanda una atención especial debido a que este sector es el que consume mayor cantidad de agua y probablemente es el que con menor eficiencia lo hace en tal sentido un incremento en la eficiencia de riego, puede traducirse en volúmenes adicionales de agua para atender mayores áreas de cultivo. Fuente ANA 200

En América Latina, el Perú es uno de los países que cuenta con mayor área irrigada después de Brasil, Chile y Argentina Fuente a uastat. Aproximadamente, el 10% de la extracción de agua en el Perú se utiliza para el riego sin embargo la mayor parte del agua se pierde debido a las deficientes condiciones de los sistemas de riego y la deficiente gestión y administración. A pesar de los importantes avances, en la construcción de infraestructura hidráulica, principalmente en la costa y al apoyo para fortalecer las capacidades de las organizaciones de los usuarios de agua, todavía persisten varios retos, entre los que destacan la implementación de estructuras de control y medición. Fuente MEF

Se estima que la eficiencia total del uso del agua en los sistemas de riego es aproximadamente 50% se considera que es bajo y se debe principalmente a los deficientes sistemas de riego y al uso extensivo de agua con métodos de riegos elevados por gravedad o inundación. Existe también la tendencia a suministrar cantidades mayores a las necesidades medias, originándose pérdidas significativas por percolación profunda y escorrentía superficial así como los malos hábitos de uso de agua de riego por parte de los agricultores. Fuente MEF

La infraestructura de riego en el país, ha sido de índole en su mayoría de canales no revestidos, en los cuales el 80% se encontraban sin revestir y solo el 20% estaban revestidos. Fuente ANA inventario 2000. La modernización de los sistemas de riego requiere alcanzar la sostenibilidad financiera para el adecuado mantenimiento y la buena gestión de la infraestructura existente. Fuente MEF

La mejora actual de la eficiencia de la distribución de agua en un canal de riego en el ámbito nacional es posible mediante una única alternativa actual de solución, planteada con la construcción de obras de medición a oradores, los cuales están localizados principalmente en los canales de derivación y/o laterales por cada bloque de riego. Un a orador es una estructura rígida que forma una contracción dentro de un canal por medio de la cual se dan las condiciones hidráulicas para que se presente un campo de régimen crítico dentro de él. Permitiendo efectuar una medición del caudal de escurrimiento. En las Fig.1. y Fig.1.4 se muestran las representaciones gráficas de un a orador e implementación en un canal de riego.

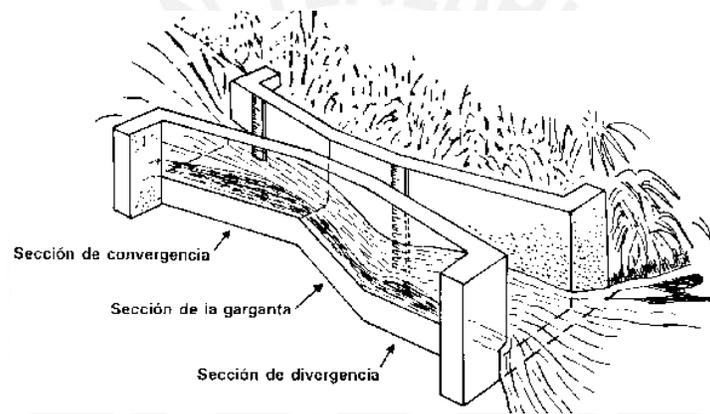


Fig.1. . A orador.

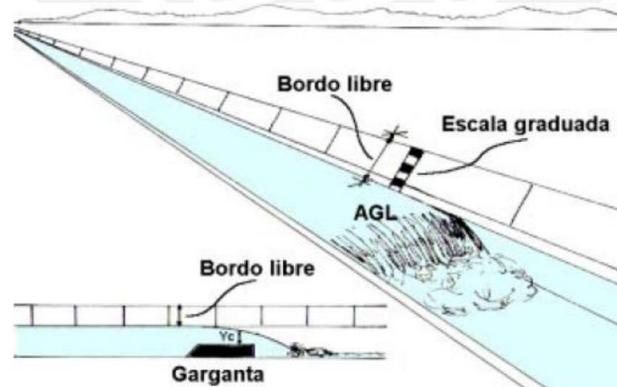


Fig.1.4. A orador en un tramo de canal principal.

sin embargo las estructuras de medición a oradores de caudales de agua generalmente pierden precisión en su lectura cuando varían las características y condiciones a las que fueron diseñadas y construidas inicialmente, por cuanto se les debe dar un permanente mantenimiento.

Se observa que, la única referencia de control y medición del agua en el ámbito nacional es mediante el manejo manual de compuertas y medición de caudal a partir de la implementación de estructuras hidráulicas rígidas de medición en los canales laterales de riego, sin tomar en cuenta los canales principales de riego, por lo que existen bastantes meras por realizar fundamentalmente en la modernización de las técnicas tradicionales de control y medición de la distribución del agua en un canal de principal de riego desde una perspectiva de la Ingeniería de control y automatización. La inclusión de sistemas de control avanzado podrá elevar de mejor manera la eficiencia de la distribución aplicando sobre ello una efectiva entrega en la distribución del agua de riego.

1.3.1 Los canales principales de riego como objeto de control.

Con los proyectos de irrigación, se logran regar terrenos que son capaces de ser rentables y sostenibles en la actividad agraria, involucrando aspectos sociales, políticos y económicos. Los sistemas de riego en estos proyectos son la construcción de infraestructura la cual permita que grandes áreas peruanas puedan ser cultivadas con la aplicación del agua necesaria. Esta infraestructura la constituyen

Obras de cabecera

- Presa de regulación Embalses o reservorios .
- Presa de derivación ocatoma .
- Estación de bombeo pozos .

Obras de conducción

- Desarenador.
- Canales de conducción.
- Obras de arte sifones, acueductos, puentes, alcantarillas .

Obras de riego o distribución

- Canales de drenaje.
- Dispositivos de riego tecnificado.

En la actualidad existen veinte proyectos principales que se vienen desarrollando en el Perú. La inversión total por proyecto varía desde los 140 millones hasta los 244 millones y tres proyectos sobrepasan los 1000 millones **Majes-Siguas** 244 millones, **Chavimochic** 214 millones y **Olmos** 110 millones. En la Fig.1. se muestra un resumen de proyectos de irrigación en el Perú

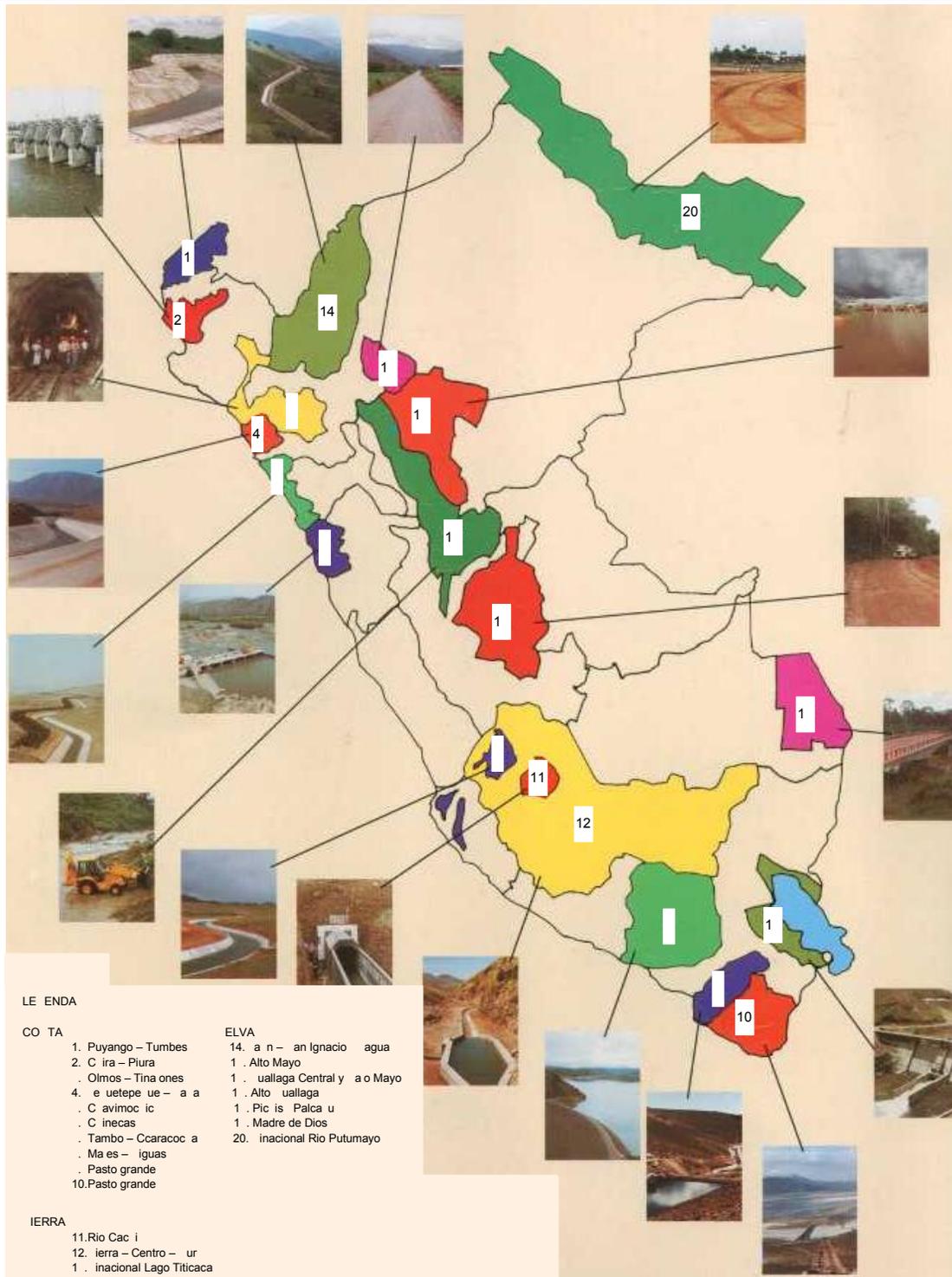


Fig.1. . Proyectos de irrigaci n en el Per .

1.3.1.2 Descripción del canal de riego con proyección a la automatización

El canal principal de riego ue se podra automatizar pertenece al proyecto C avimoc ic primera etapa. El Proyecto Especial C avimoc ic es un sistema de irrigaci n ue se e tiende a trav s de una gran parte de la costa del Departamento de

La Libertad en la costa norte del Perú. Fue iniciado en la década de 1970 por el Instituto Nacional de Desarrollo INADE, con dependencia del gobierno central peruano. En el 2000 se efectuó la transferencia de su administración al gobierno Regional de La Libertad.

se extiende en la parte baja de las cuencas de los ríos Santa, en el cual se ubica la bocatoma principal, Chao, Virú, Moche y Chicama. El objetivo del Proyecto Especial es el de garantizar el agua de riego en los perímetros de riego de las partes bajas de las cuencas mencionadas.

El área total irrigada beneficiada por el sistema es de 144,000 ha, de las cuales se han ganado al desierto 100,000 ha, en las zonas entre los valles. Estas obras han permitido además dotar de agua potable a la Ciudad de Trujillo y generar energía hidroeléctrica.

1.3.1.2.1 Ubicación:

El proyecto especial CAVIMOCIC está ubicado en la parte noroeste del Perú y tiene un área comprendida entre la margen derecha del río Santa por el sur, hasta las Pampas de Miricape por el norte. Está en las provincias de Virú, Trujillo y Ascope perteneciente al departamento de la Libertad.

En el ámbito del proyecto se encuentra la ciudad de Trujillo, el centro poblado más importante del departamento de la Libertad y uno de los más importantes del país.

1.3.1.2.2 Desarrollo actual:

Están en operación las obras de la primera y segunda etapa, que han permitido llevar las aguas del río Santa hasta el valle de Moche a lo largo de 1000 metros aproximadamente, tal como se puede apreciar en la Fig.1.

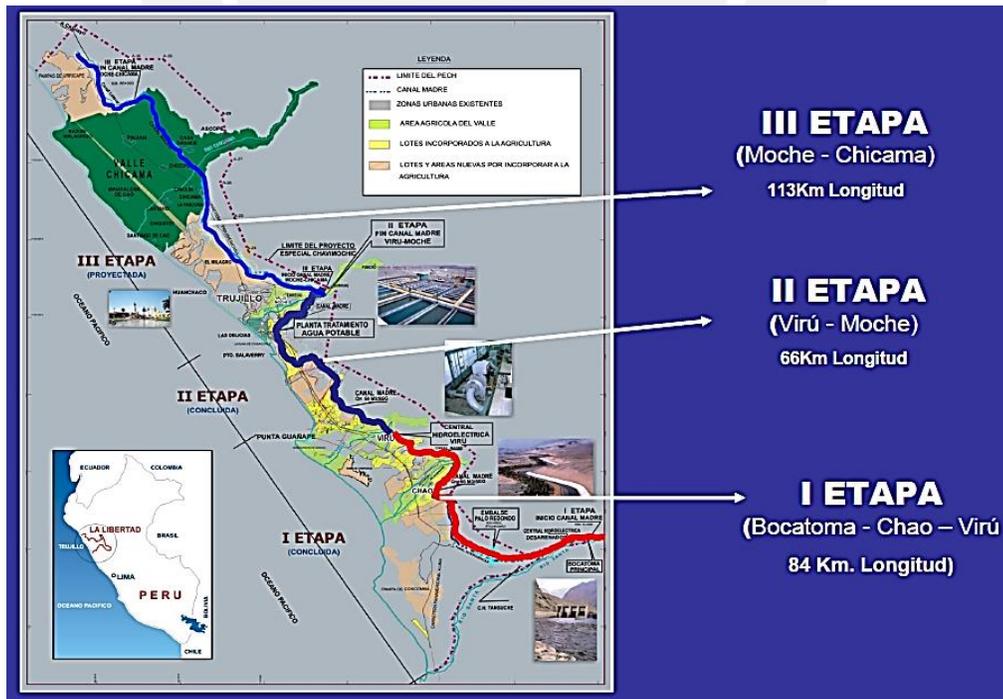


Fig.1. . Etapas de implementación del proyecto especial CAVIMOCIC.

1.3.1.2.3 La primera etapa:

Dentro de las principales obras ejecutadas en la Primera Etapa del Proyecto Especial CAVIMOC IC destacan la estructura hidráulica fundamental del proyecto constituida por la bocatoma ver Fig.1. , ubicada en la margen derecha del río Santa Cruz ubicada en la cota 412m.s.n.m. con una capacidad de captación de 10 m³ s y un caudal de diseño máximo de 1000 m³ s. El desarenador diseñado para evacuar 2.2 millones de toneladas de sedimentos el tramo de Intercuenca de 10 m de longitud para el trasvase de aguas de la cuenca del río Santa Cruz hacia la cuenca del río Cuzco, el canal de derivación y conducción con una longitud total de 100 m. Cubriendo el tramo Río Santa Cruz hasta el valle Virajm, permitiendo el riego de 1000 ha de tierras nuevas.



Fig.1. Bocatoma en el margen derecho del río Santa Cruz.

1.3.1.2.4 La segunda etapa:

Comprende las obras de conducción del tramo Virajm - Mocupe, abarcando una longitud total de 100 m diseñado para conducir un caudal máximo de 10 m³ s en todo su recorrido, de los cuales 4 m³ s serán para derivar la Tercera Etapa. Destacan en esta conducción las obras de cruce del río Virajm a través de un túnel invertido de 44 m de longitud y 2.0 m de diámetro y la planta de Agua Potable de Trujillo.

En estas primeras etapas, destacan las obras correspondientes al tramo de 100 m del canal principal construido, el cual está conformado por 2.0 m de canales abiertos 0.5 y 2.4 m de tuberías, conductos abiertos, transiciones y obras de arte 40 cm así como también la infraestructura menor de riego y drenaje en los valles de Cuzco, Virajm y Mocupe con cerca de 200 m de longitud.

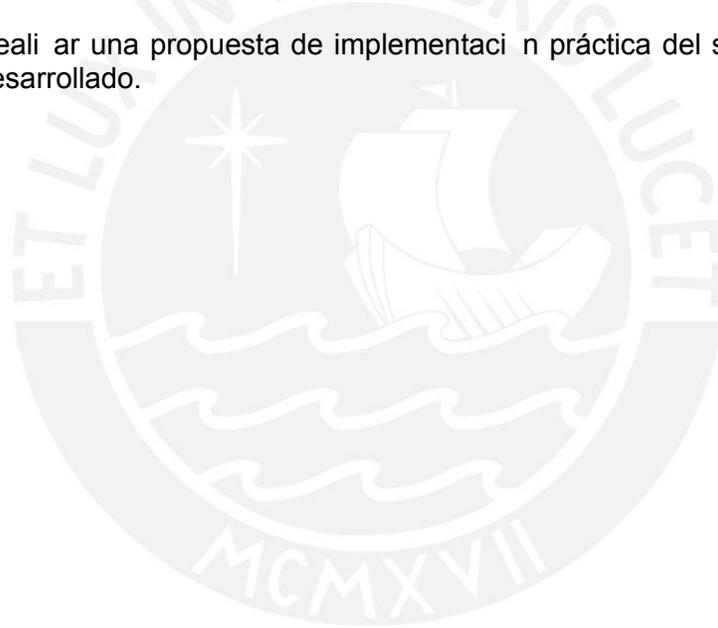
1.4 Objetivos de la tesis

Considerando que el proceso que presenta un mayor significado en la distribución de agua en un tramo de un canal principal de riego es la variación del nivel de agua el cual se encuentra intrínsecamente ligado con el flujo de agua a través del tramo. El control de dicha variación se realizará mediante el manejo de la apertura o cierre de una compuerta equivalente aguas arriba. Esta tesis presenta el siguiente objetivo general.

“Desarrollar un sistema de control NDP de la distribución de agua en un tramo de un canal principal de riego que posibilite aumentar la operatividad sobre el canal, así como disminuir las pérdidas de agua por concepto de operación.”

Para poder alcanzar el objetivo general es necesario alcanzar los siguientes objetivos específicos

1. Identificar las herramientas de identificación de sistemas a fin de obtener un modelo matemático adecuado de la distribución de agua en un tramo de un canal principal de riego.
2. Desarrollar un sistema de control NDP de la distribución de agua en un tramo de un canal principal de riego.
3. Desarrollar un análisis comparativo del sistema de control NDP desarrollado vs sistema de control convencional, determinando la robustez del sistema obtenido frente a diferentes tipos de perturbaciones.
4. Realizar una propuesta de implementación práctica del sistema de control desarrollado.



CAPÍTULO 2: IDENTIFICACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LA DISTRIBUCIÓN DE AGUA EN UN TRAMO DE UN CANAL PRINCIPAL DE RIEGO

2.1 Introducción

El comportamiento dinámico de un tramo de canal de riego puede determinarse de manera directa mediante la medición de nivel en un punto del tramo y mediante un proceso de identificación lograr un modelo de caja negra que se aproxime a la planta real en el punto de su medición. En el presente capítulo se determinarán diferentes modelos de caja negra para su análisis y posterior validación escogiéndose aquel que posea una mejor aproximación de acuerdo a los métodos de correlación cruzada y también al ajuste de sus valores en comparación con una determinada cantidad de datos utilizados para su validación.

2.2 Los canales principales de riego como objetivo de control

Un canal principal de riego es un sistema hidráulico abierto, cuyo objetivo es principalmente transportar agua de una fuente río, lago, etc. a usuarios finales agricultores. El espacio de un canal entre dos compuertas se denomina tramo. Este sistema está integrado por varios tramos separados por compuertas Rivas et al., 2000, donde estas estructuras son generalmente utilizadas para controlar el nivel de agua o la entrega una descarga o volumétrico Litrico and Fromion 2000.

En este punto, el control automático se asoma con significancia para mejorar la eficiencia de la distribución del agua y mejorar la calidad de servicio, por tal motivo actualmente existe un doble objetivo de control Litrico and Fromion, 2000

- Primero, asegurar un buen manejo de agua minimizando las pérdidas operacionales de agua.
- Segundo, proveer un buen servicio al usuario de agua, entregando la cantidad necesaria de la misma en un tiempo establecido.

Para la realización de cualquier acción de control sobre el sistema, resulta necesaria la identificación de la variable de proceso variable controlada y la variable que permite ejercer acción de control variable manipulada, en un tramo de canal principal de riego. Por ello debido a que el nivel de agua será constantemente medido mediante un sensor se le considerará dicha magnitud como la variable controlada y la regulación de la compuerta apertura o cierre, como la variable de control. La localización de la variable controlada en un tramo influye en el comportamiento dinámico del sistema como por ejemplo en el volumen de almacenamiento y en las restricciones estructurales, por tanto las características operacionales son muy diferentes dependiendo de la localización del punto de medición de nivel. Malaterre et al 1998, por tanto se establecerán lógicas de control que determinen la operatividad del sistema bajo estudio.

2.2.1 Lógicas de control

De acuerdo a lo anterior existen lógicas de control que se encuentran orientadas a la oferta de agua o a la demanda de la misma, cada una referida a la localización de donde la inercia es extraída. En este sentido se consideran tres lógicas

- Control aguas arriba.
- Control aguas abajo.
- Control aguas abajo alejado

En el control aguas arriba, la acción de control está referida en la información obtenida aguas arriba, este tipo de control es apropiado para sistemas de canales que están orientados a la oferta. En cambio en el control aguas abajo sus ajustes están basados en la información aguas abajo. Este control transfiere las demandas de extracción de agua a la fuente de alimentación aguas arriba, por lo tanto es apropiado para sistemas de entrega orientados a la demanda Lozano et al., 2000 .

Por otro lado una variante del control aguas abajo, es conocida como control aguas abajo alejado y presenta una diferencia respecto al anterior. En el control aguas abajo la variable controlada nivel de agua, puede estar localizado en diferentes puntos a lo largo del tramo del canal pero si es localizada aguas abajo y en la parte final del tramo entonces se considera esta nueva variante conocida como logística de control aguas abajo alejado.

Teniendo en cuenta lo anterior, los canales deberán ser diseñados para transportar el máximo flujo estable, ya que el nivel de agua en condiciones de flujo estable nunca deberá ceder la prioridad para el flujo de diseño Lozano et al., 2000 .

2.2.1.2 Control aguas arriba

En el control aguas arriba, el perfil de superficie libre límite superior de volumen de descarga, pivotea alrededor de un nivel de agua establecido y constante solo aguas arriba de dicha estructura. El almacenamiento de agua limitado por los límites de descarga es creado. Cuando el flujo cambia, el volumen almacenado de agua deberá también cambiar en el mismo sentido incrementando o decrementando. Esto resulta efectivo para los programas de distribución orientados a la oferta de agua. Lozano et al., 2000 . Sin embargo este método presenta desventajas cuando es combinado con el manejo orientado a la demanda, ya que el almacenamiento de agua del tramo debe de cambiar en sentido opuesto a la tendencia natural (Ayala et al., 1991), por esta razón las pérdidas de agua podrán ser significantes. En la Fig.2.1. presenta un esquema de control aguas arriba

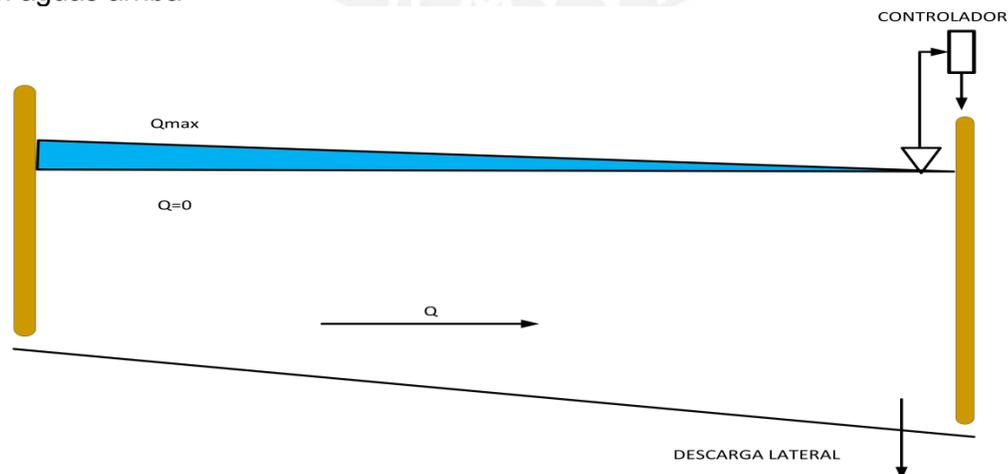


Fig.2.1. Control de un tramo de canal principal de riego con logística de control aguas arriba.

El volumen de almacenamiento de agua que se muestra en la zona sombreada, se produce por las descargas laterales presentes en el tramo principal y se encuentra limitado por las superficies que se originan por una máxima y mínima descarga lateral Q_{\max} y $Q=0$.

2.2.1.2 Control aguas abajo

El control aguas abajo, fue el primer método de control desarrollado para operaciones orientadas a la demanda. Bajo este método de control, los cambios de flujo originados aguas abajo hacen que el volumen almacenado en el tramo de canal cambie en sentido opuesto. Lozano et al., 2000. El volumen almacenado en forma de curva, responde a las variaciones de caudales rápida y eficientemente (Luyalsi et al., 1991; Goussard et al., 1991). Sin embargo, la estructura del canal tiende a ser horizontal para acomodarse al perfil de superficie de flujo nulo, por tanto la construcción del canal resultaría muy costosa y de difícil realización (Lozano et al., 2000). En la Fig.2.2. muestra el esquema de control aguas abajo

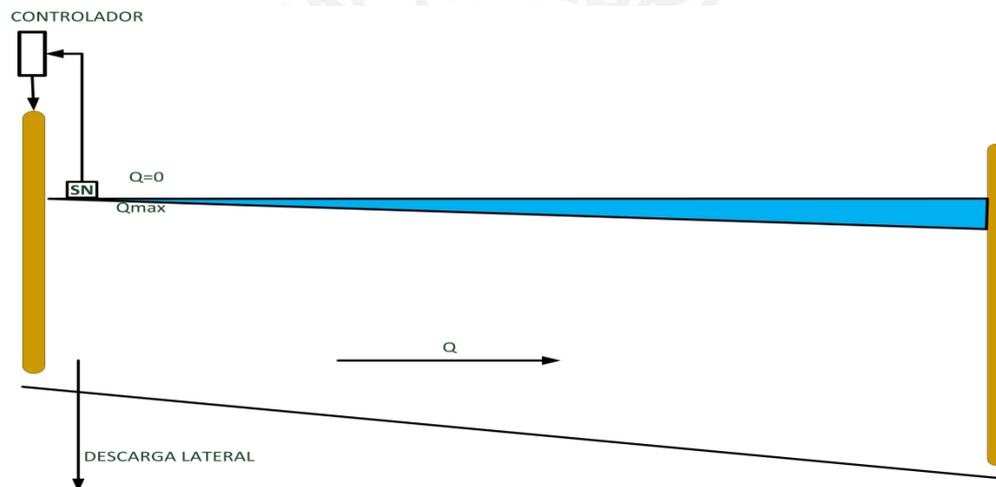


Fig.2.2. Control de un tramo de canal principal de riego con técnica de control aguas abajo.

Una de las ventajas del control del nivel aguas abajo es que un volumen de almacenamiento está disponible entre el volumen de descarga nula y el volumen de descarga máxima. Esto permite una rápida respuesta a demandas imprevistas de las descargas laterales aguas abajo y un almacenamiento de agua en caso de una reducción en el consumo (Malaterre et al., 1991).

El control aguas abajo de un tramo de canal principal consiste en controlar el nivel de agua aguas abajo y usando la variable de control aguas arriba u_2 . Como se verá más adelante el control aguas abajo además representa una variante del control aguas arriba en este sentido se puede realizar el modelado matemático que involucre a ambas técnicas de control, con la consideración inicial de funciones de transferencia de caja negra y de acuerdo a la representación gráfica de la Fig.2. (Litrico and Fromion, 2000)

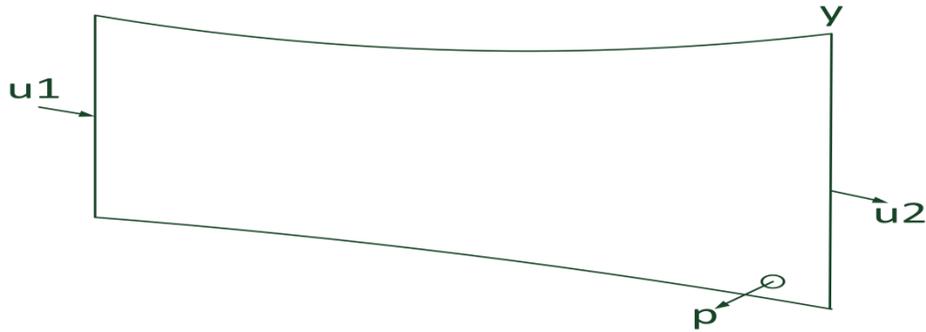


Fig.2. . De inici n de las variables para acci n de control de un tramo de canal principal de riego.

Se denota por u_1 la acci n de control por la compuerta aguas arriba, p la perturbaci n aguas abajo, correspondiente a una desconocida descarga lateral Litrico and Fromion, 200 .

Se consideran $G_1(s)$ y $\tilde{G}_1(s)$, como las unciones de transferencia de “ u_1 ” hacia “ y ” y de “ u_2 ” hacia “ y ” (Lógica de control aguas abajo. La perturbaci n desconocida se supone localizada aguas abajo alejado del tramo del canal . El tramo de canal por tanto estar representado por la expresi n Litrico and Fromion, 200

$$y(s) = G_1(s)u_1(s) + \tilde{G}_1(s)(u_2(s) + p(s)) \tag{2.1}$$

Nosotros enfocaremos nuestra atenci n en el dise o de un controlador activo en baja frecuencia compatible con el ancho de banda del actuador o tambi n por limitaciones inducidas por un bajo periodo de muestreo . En este contexto, el principal objetivo del controlador en cada estructura idrúulica es el de reemplazar los efectos inducidos por las estructuras idrúulicas en bajas frecuencias. La compensaci n en baja frecuencia de las estructuras idrúulicas actualmente conlleva a recuperar en bajas frecuencias el modelo asociado al tramo de canal controlado por la descarga en cada compuerta Litrico and Fromion, 200 .

El esquema de la Fig.2. 4 se muestra una representaci n de implementaci n de ambas pol ticas de control aguas abajo y aguas arriba alejado

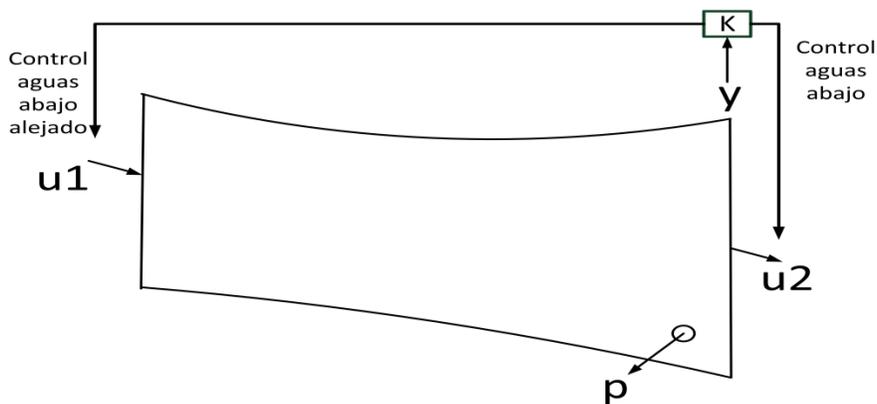


Fig.2. 4. Control aguas abajo y control aguas arriba alejado de un tramo de canal principal de riego.

El controlador local aguas abajo puede ser denotado por el modelo de caja negra "K". Considerando una entrada nula en $u_1 = 0$ la señal del error en el lazo cerrado estará dada por Litrico and Fromion, 2000

$$e(s) = (G_1(s) * k + 1)^{-1} * (r(s) - \tilde{G}_1(s) * p(s)) \quad 2.2$$

La especificación de respuesta a perturbación se encuentra relacionada al modelo de $\tilde{G}_1(s)(1 + \tilde{G}_1(s)k)^{-1}$, el cual tiende a ser pequeño ≈ 0 sobre la mayor frecuencia de ancho de banda en frecuencia. Por otra parte $\tilde{G}_1(s)$ no se encuentra asociada intrínsecamente a un retardo de tiempo a diferencia de $G_1(s)$, como se verá más adelante, por tanto el ancho de banda alcanzable, está solo restringido a las limitaciones del actuador Litrico and Fromion, 2000.

De esta manera, el control local aguas abajo lidera una alta performance respecto a perturbaciones no predecibles, pero tiene una baja eficiencia de agua, ya que todas las perturbaciones son propagadas aguas abajo sin la adaptación de la descarga aguas arriba. Además al acercarse a una demanda decreciente, el único camino para mantener el nivel de agua aguas abajo es de ar una descarga innecesaria aguas abajo, llegando a costar el manejo de agua.

2.2.1.3 Control aguas abajo alejado

El control aguas abajo alejado, permite que las estructuras de canal puedan seguir su pendiente natural sin mayores complicaciones, lo cual reduce los costos de construcción de la estructura hidráulica. Sin embargo no existe un volumen de almacenamiento disponible entre el volumen de descarga nula y el volumen de descarga máxima. Debido a que el volumen de agua cambia en dirección opuesta de la dirección que ayuda a satisfacer cambios de demanda aguas abajo Malaterre et al., 1998. Por tanto el sistema no puede responder rápidamente a demandas imprevistas asimismo la demanda de agua no puede ser brusca ni tampoco de gran amplitud, debido a que el sistema hidráulico del tramo de canal sigue siendo el mismo que el del control aguas arriba Guyals i et al., 1998; Coussard, 1998. Por tanto, para lograr los cambios de volumen requeridos con un control aguas abajo alejado, el flujo de entrada debe de ser cambiado por una cantidad mayor a la entrada que a la salida hasta que se alcance el nuevo nivel de agua en estado estacionario Lozano et al., 2000, en la Fig.2. se muestra el esquema de control aguas abajo alejado.

Por otro lado, si los cambios en la demanda de agua pueden predecirse, el flujo de entrada se puede cambiar por adelantado y la operación se vuelve más eficiente y económica. Como los cambios en el nivel del agua en el extremo del tramo pueden ser detectados, el control aguas abajo alejado permite anticipar la respuesta. Por este motivo, el control aguas abajo alejado recurrentemente representa una opción para el mejoramiento respecto al control tradicional aguas arriba que se plantean actualmente en proyectos de modernización Ríos and Arrana, 2000.

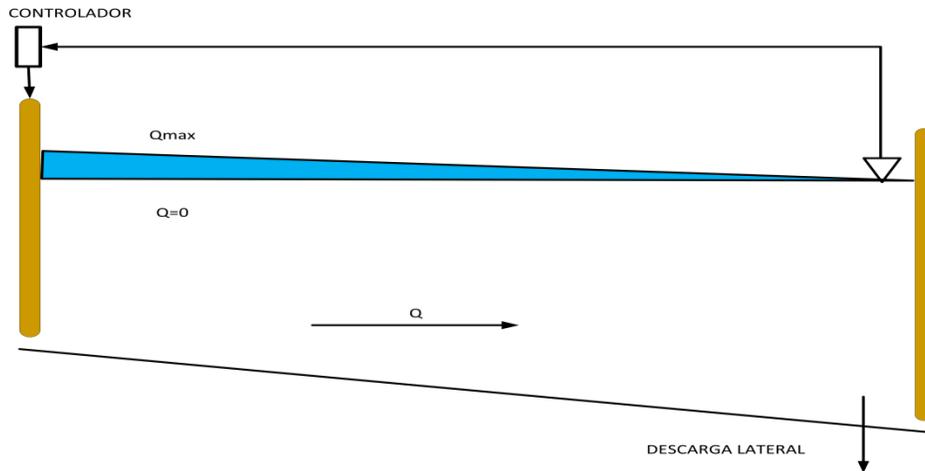


Fig.2. . Control de un tramo de canal principal de riego con l gica de control aguas aba o ale ado.

El Control aguas aba o ale ado de un tramo de canal consiste en controlar el nivel de aguas aba o y , al inal de un tramo utili ando la variable de control u_1 con $u_2 = 0$ aguas arriba ver Fig. 2.4 y Fig. 2. . Denotamos por “ r ” la se~al de referencia, “ e ” el error de seguimiento y “ K ” la funci3n de transferencia del controlador (representaci3n de caja negra aguas aba o ale ado Litrico and Fromion, 200 . De acuerdo a lo anterior y en base a la Ec. 2.1. se puede obtener el diagrama de blo ues para la l gica de control aguas aba o ale ado, ue se muestra en la Fig.2. .

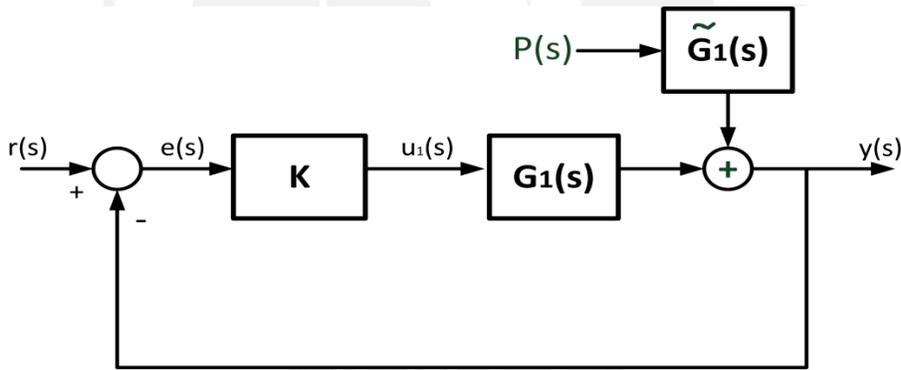


Fig.2. . Es uema de control aguas aba o ale ado considerando $u_2 = 0$.

Del diagrama de blo ues se pueden derivan las siguientes e presiones

$$u_1(s) = e(s) * k \tag{2.2}$$

$$G_1(s) * e(s) * k + \tilde{G}_1(s) * p(s) = y(s) \tag{2.4}$$

$$e(s) = r(s) - y(s) \tag{2.3}$$

$$y(s) = r(s) - e(s) \tag{2.5}$$

$$G_1(s) * e(s) * k + \tilde{G}_1(s) * p(s) = r(s) - e(s) \tag{2.6}$$

$$e(s) * (G_1(s) * k + 1) = r - \tilde{G}_1(s) * p(s) \quad 2.$$

El error de seguimiento se determina mediante la expresión

$$e(s) = (G_1(s) * k + 1)^{-1} * (r(s) - \tilde{G}_1(s) * p(s)) \quad 2.$$

El requisito a la perturbación está directamente caracterizado por el módulo de la función de transferencia $\tilde{G}_1(1 + G_1 * k)^{-1}$. El objetivo de control es encontrar un controlador lineal

“K” de tal forma que: $\left| \tilde{G}_1(j\omega)(1 + G_1(j\omega) * k(j\omega))^{-1} \right| \approx 0$, sobre el mayor ancho de banda posible Litrico and Fromion, 200 .

La función de transferencia $G_1(s)$ contiene un tiempo de retardo originado por el desplazamiento del agua a lo largo del tramo hasta el punto de su medición, el cual impone una limitación en el ancho de banda alcanzable y por tanto en la performance del sistema de control. Es bien conocido que el retardo de tiempo limita el ancho de banda alcanzable a cerca de $1/\tau_d$ donde τ_d es el retardo de tiempo y si dicho retardo es considerable como generalmente suele ocurrir en el transporte de agua en un tramo de canal de riego, entonces se tendrá un ancho de banda estrecho. Sin embargo, Las perturbaciones no predecibles ocurren a frecuencias más allá de $1/\tau_d$ y que no será atenuada por el controlador. Ciertamente, las descargas laterales afectan al canal, por tanto el controlador se adaptará a la descarga aguas arriba. Esto lleva a un manejo parsimonioso del agua, ya que solo el volumen necesario será retirado de la fuente, pero a una baja eficiencia con respecto al usuario del agua, ya que el agua algunas veces tiene trayectorias prolongadas en su recorrido aguas abajo Litrico and Fromion, 200 .

Por tanto, el control aguas abajo llevado a una elevada eficiencia del agua, ya que maneja la demanda de los usuarios, pero tiene una baja performance con respecto a perturbaciones no predecibles, por el tiempo de retardo que incorpora su dinámica Litrico and Fromion, 200 .

2.2.2 Modelado matemático de un tramo principal de un canal de riego

En la sección anterior se mostraron las tres técnicas de control empleadas para el control de un tramo de un canal principal de riego. El análisis de los aspectos más importantes de cada una de ellas proporciona un análisis de las ventajas y desventajas de cada una de las estructuras de control. Teniendo en cuenta que nuestro objetivo es el ahorro de agua con la entrega efectiva según la demanda de los usuarios, se escogerá la estrategia de control que incorpore la técnica de control aguas abajo llevado a cabo. Desde esta perspectiva el diseño del controlador tendrá un rango de operación a bajas frecuencias limitada por el comportamiento dinámico de nivel del sistema sin mucho control sobre perturbaciones no predecibles a frecuencias mayores a las del diseño del controlador.

Establecido el punto anterior, el diseño de un controlador será posible siempre y cuando se cuente con una descripción matemática del sistema bajo estudio modelo matemático. Como una opción para poder modelar matemáticamente este sistema completo a partir de sus principios fundamentales, será necesario evaluar la dinámica del actuador a utilizar, el área de la sección transversal del canal, el caudal a través de dicha sección, la

velocidad media del flujo de agua, la distancia del tramo de canal, la aceleración de gravedad presente, el coeficiente de fricción generado entre el roce del agua con la superficie de canal. Además se tendrá que considerar los caudales laterales (descargas laterales) del tramo principal del canal de riego, la variación del tiempo, producto de la dinámica y transporte de agua a través de distancias considerables, lo cual genera grandes retardos de tiempo en la distribución de agua y su entrega a los usuarios finales.

Tomando en cuenta lo anterior, el flujo y los niveles de agua en un canal abierto pueden ser descritos por las ecuaciones de Saint Venant-Cowley, 1871. Estas ecuaciones en derivadas parciales no lineales e hiperbólicas, consisten de un balance de masa y un balance de momento. El balance de momento es una suma total de las descripciones para la inercia (1), advección (2), fuerza gravitacional (3) y fuerza de fricción (4), como se muestra en las expresiones 2.10 y 2.11

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A_f}{\partial t} = q_{lat} \quad \text{conservación de masa} \quad 2.10$$

$$\underbrace{\frac{\partial Q}{\partial t}}_1 + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A_f} \right)}_2 + \underbrace{g \cdot A_f \frac{\partial h}{\partial x}}_3 + \underbrace{\frac{g \cdot Q |Q|}{C^2 \cdot R_f \cdot A_f}}_4 = 0 \quad \text{conservación de momento} \quad 2.11$$

donde Q representa el flujo m^3/s , t el tiempo s , x la distancia m , A_f el área cubierta por el flujo de agua m^2 , q_{lat} caudal descarga lateral por unidad de longitud m^2/s , h el nivel del agua referenciado sobre el nivel del mar, C el coeficiente de fricción de la velocidad de flujo $m^{1/2}/s$ y R_f el radio hidráulico m . R_f es calculado de la división entre A_f y P_f , donde P_f representa el perímetro cubierto por agua m Van Overloop and Kombois, 2012. La Fig.2., proporciona una representación esquemática de un típico canal abierto con sus variables y parámetros.

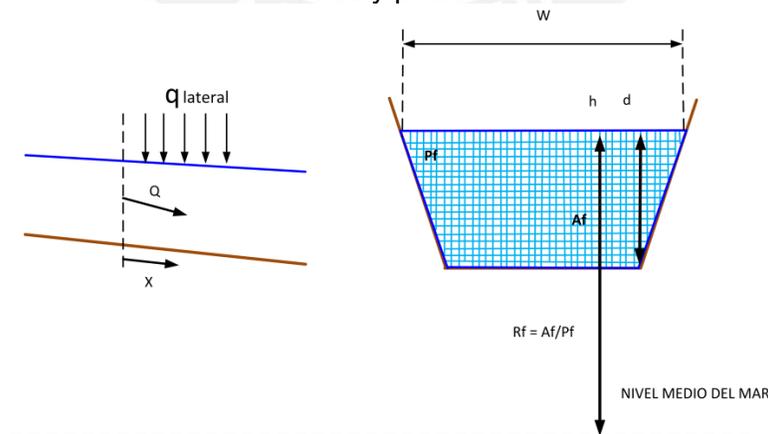


Fig.2. Variables y parámetros de un canal de riego principal.

Para utilizar las fórmulas en un modelo numérico de un canal de agua abierto, las ecuaciones en derivadas parciales son discretizadas en el tiempo Δt y espacio Δx , en

el caso de que estas fórmulas discretizadas sean simuladas, el modelo resulta en soluciones en series de tiempo de los niveles de agua y flujo en lugares discretos a través del canal. También las series de tiempo son soluciones discretas en el tiempo. Este modelo numérico es no lineal y de orden elevado, lo cual hace difícil identificar y utilizar para el diseño del controlador Van Overloop and Tombois, 2012 .

Cuando se considera toda la apertura de una compuerta del canal de agua a la vez, en promedio, el agua fluye a través de un canal de agua abierto con una velocidad promedio $V(m/s)$ que puede ser calculada como el flujo promedio Q dividido por el área promedio A_f . La onda frontal en la parte superior de esta velocidad, viaja con una elevada velocidad la cual está caracterizada por la aceleración $c \text{ m/s}^2$ Chow, 1959 . La aceleración es comúnmente estimada de la profundidad promedio $d \text{ m}$ de acuerdo a la ecuación

$$c = \sqrt{g.d} \tag{2.12}$$

La descripción más compacta de un canal de agua abierto es el modelo con integrador y retardo propuesto por Kulkarni en 1971, donde la entrada es el flujo de agua aguas arriba y la salida es el nivel de agua aguas abajo en el tramo del canal. Este modelo en el dominio de Laplace describe solo la parte de baja frecuencia sin considerar los efectos por resonancia Van Overloop and Tombois, 2012 y se representa como

$$\frac{H(s)}{Q(s)} = \frac{e^{-\tau_d}}{A_s.s} \tag{2.1}$$

donde $H(s)$ es la transformada de Laplace del nivel de agua aguas abajo en el tramo de canal y $Q(s)$ es la transformada de Laplace del flujo de la compuerta aguas arriba. Para una frecuencia dada ω la principal propiedad para el diseño del controlador, el área de almacenamiento A_s , puede ser calculada de la magnitud $M(\omega)$ de su función de transferencia de acuerdo a 2.14

$$A_s = \frac{1}{M(\omega)\omega} \tag{2.14}$$

La ecuación es también válida en la región de frecuencia de modelos de orden elevado donde la acción del integrador de baja frecuencia está presente Van Overloop and Tombois, 2012 .

2.3 Descripción del canal

El canal Imperial de Aragón una de las obras de hidráulica más importantes de Europa, es un canal de riego y de navegación construido en el último tercio del siglo XVIII entre Fontellas Navarra y Puente de Ebro Aragón. Su construcción tenía por objetivo mejorar el regadío de la antigua Acequia Imperial de Aragón, llevando el agua del río Ebro hasta Aragón y permitiendo extender el regadío de la antigua Acequia Imperial Aragón, llevando el agua del río Ebro hasta Aragón y permitiendo extender el regadío

en la ciudad. Así mismo establecí un servicio de transporte de viajeros y mercancías entre Tudela y Aragón.

El canal de riego se divide en tres zonas compuestas por las comunidades que siguen ver Fig. 2.

- Zona alta: Coto de Noria del mar, sus de Fontellas, Ribafórada, Buñuel, Cortes de Navarra, Mallén, Novillas y Gallur.
- Zona media: Boguiñeni, Luceni, Pedrola, Alcalá de Ebro, Cabanas de Ebro, Figueruelas, Acequia de Cascao en Arisón, Alagón, Arilán de Torres de Terrellán, Castellar de Torres de Terrellán, Madrid Centón, término de Almorara, Centón de Tebo y Pinseque, Alagón y Peramán.
- Zona baja: Garrapinillos, Miralbueno, Miralores y El Burgo de Ebro.



Fig.2. Vista superior del canal principal de riego Imperial de Aragón.

El canal principal de riego Imperial de Aragón, pertenece a la Confederación Hidrográfica del Ebro, en Aragón, España. Esto lo constituye en la más importante confederación hidrográfica en ese país, con un área apropiada de 86,100 Km². Este canal es considerado un excelente trabajo de ingeniería hidráulica y discurre de manera más o menos paralela por la margen derecha del río Ebro. El canal cuenta con dos escalonamientos habilitados con esclusas para el paso de la navegación, aunque actualmente no es navegable. También suministra agua para consumo a la ciudad de Zaragoza, garantizando el 100% de sus necesidades. La superficie irrigada por este canal es de 2,000 ha, de las cuales 200 ha están localizadas en Navarra y las restantes en Aragón. Presenta un número apropiado de 100 tomas asignadas a comunidades de

regantes. La producción del área bajo irrigación está principalmente orientada a los cultivos herbáceos e tensivos, también el cultivo de frutas y horticultura Rivas Pere et al., 200 a .

Este canal obtiene el agua del río Ebro gracias a la elevación que produce la represa Pignatelli. Esta represa tiene 20m de longitud y 10m de alto, y su construcción fue completada en 1970. El agua pasa a través de la casa de compuertas el cual controla los 30m³ / seg de descarga en su origen, aunque este valor puede algunas veces ser superior como resultado de un mayor flujo en el río Ebro. Este canal tiene 10 km de longitud, una profundidad variable entre 2m y 4m y una sección transversal trapecoidal Rivas Pere et al., 200 a .

El canal en su mayor parte es de tierra, aunque algunos de sus tramos se encuentran revestidos. Presenta un total de diez tramos de diferentes longitudes separados mediante compuertas sumergibles. El caudal a través de la compuerta sumergible se determina mediante 2.1 Chow, 1959

$$Q(t) = C_d L u(t) \sqrt{2g(y_{up}(t) - y_{dn}(t))} \quad 2.1$$

donde C_d es el coeficiente de descarga de la compuerta L , el ancho de la compuerta $u(t)$, la magnitud de la abertura posición de la compuerta $y_{up}(t)$ y $y_{dn}(t)$, los niveles de agua aguas arriba y aguas abajo respectivamente Rivas Pere et al., 200 a .

Todos los tramos del canal están electricados y equipados con sensores de nivel de agua y de posición de compuerta, motores reductores para el posicionamiento de las compuertas y sistemas de adquisición, procesamiento y almacenamiento de datos. Todos los sensores de nivel del agua se sitúan en puntos de reposo de amortiguación, Rivas Pere et al., 200 a . El canal dispone de una red de teledeteción y telecontrol que transmite mediante radio y buses de campo y procesa todas las variables captadas, proporcionando datos en tiempo real que permiten la toma efectiva de decisiones Rivas Pere et al., 200 a .

El control del canal, en ocho de sus diez tramos, se hace en forma manual desde el Centro de gestión de la cuenca hidrográfica del Ebro, por lo que existen grandes pérdidas de agua por concepto de evaporación. Con el objeto de minimizar estas pérdidas, así como de mejorar la gestión y evaporación de todo el canal, se ha considerado el diseño e implementación práctica de un sistema de control integral de la distribución del agua, el cual en su primera fase, contempla la automatización efectiva de su primer tramo. Para ello es necesario disponer de modelos matemáticos del canal capaces de capturar en forma precisa su comportamiento dinámico dominante Rivas Pere et al., 200 a .

2.4 Identificación del comportamiento dinámico del canal

La manera tradicionalmente empleada en el modelamiento de canales de riego, se realiza mediante las ecuaciones de Saint Venant sin embargo como se explicó anteriormente, su aplicación requiere un elevado costo computacional y su utilización de forma directa en el diseño de sistemas de control presenta serias dificultades Litrico and Fromion, 2004 Rivas et al., 200 a Meyer, 2001 .

Ante esta problemática, se puede utilizar un modelo matemático SISO de tipo “entrada salida”, en el que se toman solamente los valores de las variables manipuladas y controladas, sin considerar las interacciones y dinámica internas. Si se asume que el modelo de un tramo de un canal principal de riego se puede realizar de una manera más sencilla y simplificada al considerarlo como un sistema causal, lineal e invariante en el tiempo, entonces dicho modelo puede ser expresado como una función de transferencia (Ogata, 2000). La obtención de un modelo matemático sencillo se realiza mediante la medición de la variable de proceso en un punto específico y no se requiere conocer su comportamiento dinámico a lo largo de todo el tramo por tanto el modelo matemático obtenido, es referenciado al punto de medición de la variable dinámica analizada. El modelo matemático también deberá incluir un retardo de tiempo el cual resulta fundamental para una buena caracterización del comportamiento dinámico del sistema.

Se entiende por identificación de sistemas a la obtención de forma experimental de un modelo matemático que reproduzca con suiciente exactitud, para los fines deseados, las características dinámicas del proceso objeto de estudio a partir de las variables observadas (medidas de dicho proceso) de salida o variable controlada y $u(t)$, señal de entrada o variable de control $u(t)$, y en algunos casos las perturbaciones $v(t)$ (Ljung, 1987). Los modelos obtenidos por estas técnicas se denominan de “caja negra” (Ljung, 1987). La Fig.2., muestra una esquemática del proceso de identificación.

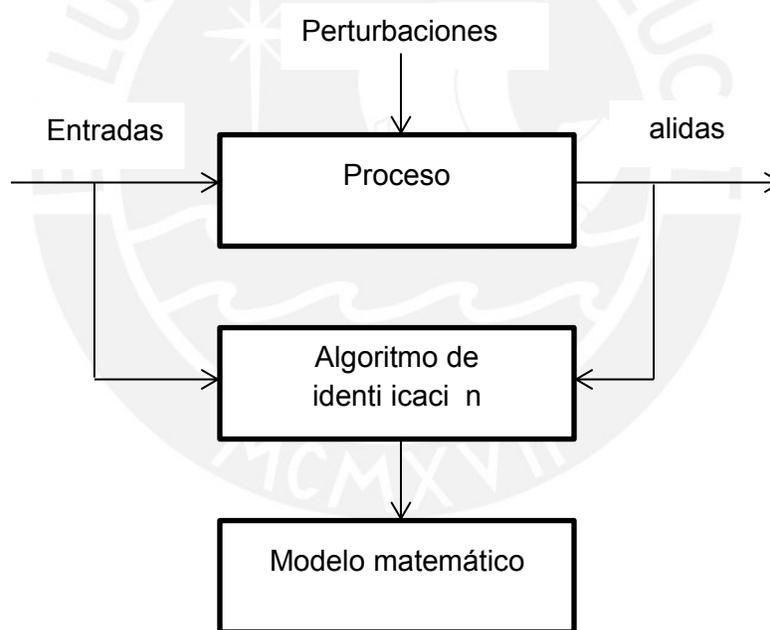


Fig.2. Esquema general de identificación.

En la identificación de sistemas se observan tres elementos fundamentales (Ljung, 1987; Rodríguez, 2000)

1. El experimento debe diseñarse un experimento que involucre entre otros, las señales de excitación, captura de datos y organización de información.
2. Clase de modelos se busca el mejor modelo disponible que refleje el comportamiento del sistema. Se incluye estructuras, retardos, linealidad.

- Criterios mínimos para un índice de performance que refleje el nivel de proximidad del modelo respecto al comportamiento del sistema a identificar.

Si se llega a la conclusión de que el modelo no es válido se deben revisar los siguientes aspectos como posibles causas Rivas Pere et al., 200 a

- El conjunto de datos de entrada salida no proporciona suficiente información sobre la dinámica del sistema.
- La estructura escogida no es capaz de proporcionar una buena descripción del modelo.
- El criterio de ajuste de parámetros seleccionado no es el más adecuado.

2.4.1 Metodología de Identificación

En términos generales, el procedimiento de identificación de sistemas comprende las siguientes etapas Rivas Pere et al., 200

1. Diseño del experimento de identificación y la adquisición de datos de la entrada salida del proceso bajo estudio. Para ello se debe de excitar el sistema mediante la aplicación de diferentes señales de entrada, y registrar la evolución de sus señales de entrada y salida durante un intervalo de tiempo.
2. Tratamiento previo de los datos registrados. Los datos registrados están generalmente acompañados de ruidos indeseados u otro tipo de imperfecciones, que puede ser necesario corregir antes de iniciar la identificación objeto de estudio. Se trata de preparar los datos para facilitar y mejorar el proceso de identificación.
 - Selección de la estructura del modelo. Si el modelo que se desea obtener es un modelo paramétrico, el primer paso es determinar la estructura deseada para dicho modelo. Este punto se facilita en gran medida si se tiene un cierto conocimiento sobre las leyes físicas que determinan el comportamiento dinámico del proceso.
4. Obtención de los parámetros del modelo. A continuación se procede a la estimación de los parámetros de la estructura que mejor ajusta la respuesta del modelo a los datos de entrada salida obtenidos experimentalmente.
 - Validación del modelo. La última etapa consiste en determinar si el modelo obtenido satisface el grado de exactitud exigido para la aplicación requerida.

El proceso de identificación es un proceso iterativo, donde las iteraciones realizadas dependerán de las causas que no permiten validar el modelo. Una vez concluido dicho proceso, finalmente puede considerarse la obtención de un modelo matemático deseado, el cual tendrá un comportamiento dinámico próximo al sistema real. La Fig. 2.11, muestra las etapas de identificación.

2.4.2 Planificación experimental e identificación no paramétrica

El primer paso dentro del procedimiento de identificación consiste en realizar algún tipo de experimento sobre el sistema bajo estudio que posibilite obtener los datos de entrada salida que sirvan de base para la obtención del modelo matemático final o ansón, 1 . Para que el proceso de identificación sea satisfactorio, es necesario que los datos utilizados para tal fin contengan una significativa información sobre el comportamiento dinámico del sistema, lo que implica un cuidadoso diseño del experimento de adquisición de datos Rivas Pere et al., 200 a .

La idea básica del experimento consiste en obtener datos informativos de entrada salida, una vez que el tramo del canal a sido e citado con una determinada sección de entrada y presenta una significativa variación del nivel de agua Rivas Perez et al., 2006.

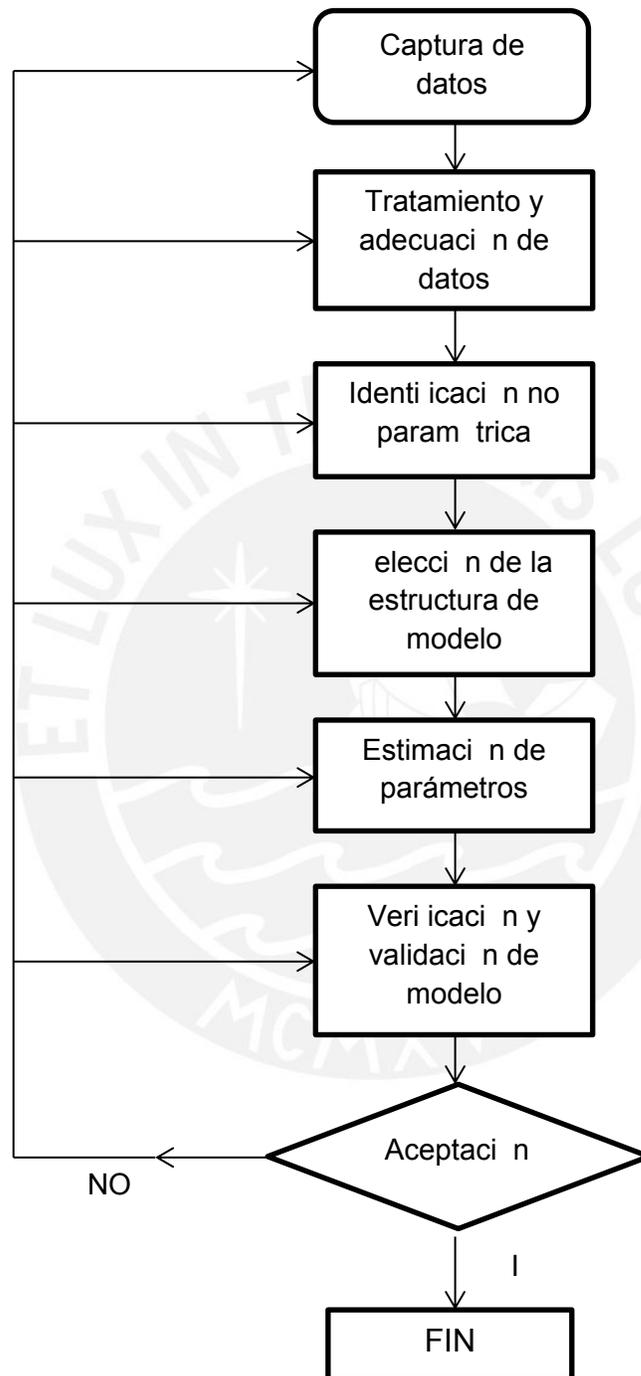


Fig.2.11. Proceso de identificación paramétrica.

Los datos utilizados en el presente trabajo corresponden al tramo 1 origen del canal principal de riego Imperial de Aragón, el cual es conocido como el local y dispone de una infraestructura hidráulica completa. Este tramo presenta un largo de 100 m, una

pro unidad variable entre .1m y . m, un anc o variable de asta 0m y conduce un caudal máximo de 0m s Rivas Pere et al., 200 a .

El nivel del agua en el ocal se controla mediante die compuertas sumergibles C1.2, C1.4, C1. , C1. , C1.10, C1.12, C1.14, C1.1 , C1.1 y C1.20 , las cuales se denominan compuertas de control y se encuentran situadas en la casa de Compuertas del lado del canal Rivas et al., 200 a . La casa de compuertas cuenta además con otras die compuertas sumergibles C1.1, C1. , C1. , C1. , C1. , C1.11, C1.1 , C1.1 , C1.1 , C1.1 situadas del lado del ro Ebro, las cuales son redundantes y se utili an solamente en caso de allos en las compuertas de control. En la ilustraci n 4 se muestra una vista superior de este tramo, en la ue se puede observar la casa de Compuertas Rivas Pere et al., 200 a .

Para garanti ar satisfacer las demandas de agua de los di erentes usuarios, el n mero de compuertas aguas arriba ue se abren en la Casa de Compuertas , as como sus respectivos niveles de apertura, dependen del caudal ue se necesita entregar y ue se deriva desde el ro Ebro Rivas et al., 200 a . Por empleo si se necesita derivar desde el ro Ebro un caudal ue requiere cm de apertura de compuertas, se abren de orma simultánea cuatro compuertas, con una magnitud de 14cm, lo ue equivale a una apertura total de cm. De esta orma, las die compuertas de control pueden ser representadas mediante una sola compuerta e uivalente Rivas Pere et al., 200 a .

El ocal es operado mediante el m todo de regulaci n aguas aba o ale ado con un sensor de nivel en el e tremo del tramo de canal ovalen o, 1 Malaterre, 1 . En la Fig. 2.12 se muestra un diagrama e uivalente del ocal, en el cual las die compuertas de control situadas en la casa de compuertas se representan mediante una compuerta e uivalente Rivas Pere et al., 200 a .

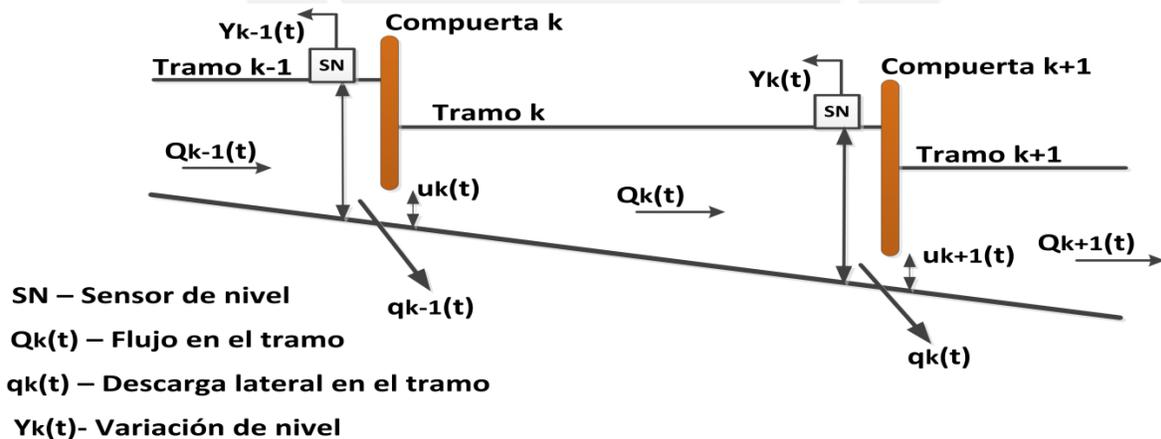


Fig.2.12. Diagrama e uivalente de ocal.

Considerando que en el canal principal de riego “Imperial Aragón” la variable controlada es el nivel del agua aguas aba o $y_k(t)$ y la variable de control es la posici n de las compuertas aguas arriba $u_k(t)$, donde k es el número del tramo, $k=1,2,\dots,n$ y n el número total de tramos, el modelo matemático a obtener del primer tramo ocal tendrá el nivel del agua aguas aba o $y_1(t)$ como se al de salida, y la magnitud de apertura total de las compuertas aguas arriba $u_1(t)$ como se al de entrada Rivas Pere et al., 200 a .

La descarga lateral $q_1(t)$, así como los efectos de las interacciones de los tramos adyacentes aguas arriba río Ebro y aguas abajo representan las perturbaciones fundamentales $v_1(t)$ que actúan sobre el tramo del canal Rivas Pere et al., 200 a . En la Fig. 2.1 se presenta un diagrama tecnológico de la instalación experimental utilizada en la recolección de datos del proceso de variación de nivel de agua aguas abajo en la parte final del tramo del canal de riego

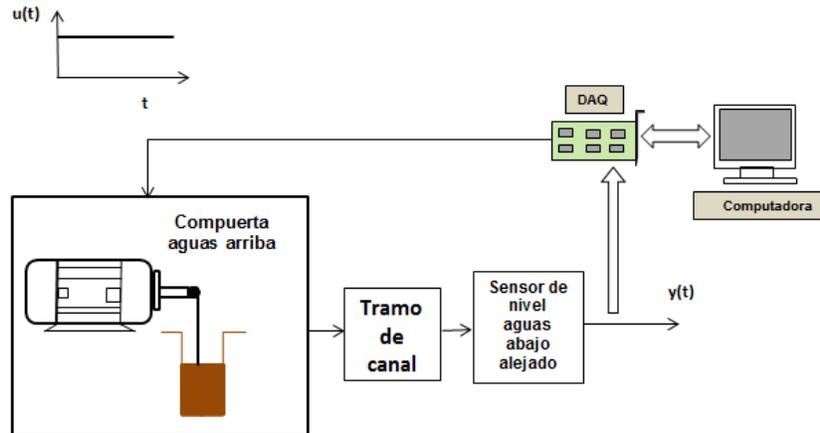


Fig.2.1 . Diagrama tecnológico de la instalación experimental utilizada en la recolección de datos del proceso de variación de nivel aguas abajo alejado.

El nivel del agua aguas arriba y aguas abajo al final del tramo, así como también la magnitud de la apertura total de las compuertas aguas arriba fueron uniformemente muestreados con un periodo de muestreo de 1 s.

2.4.2.1 Experimento con señal escalón

El objeto de este experimento consiste en obtener una estimación inicial del orden y de los parámetros del modelo que caracterizan el comportamiento dinámico del local y luego utilizar estos resultados para diseñar un experimento más informativo donde la apertura de las compuertas siga una señal binaria Rivas Pere et al., 200 a . Este experimento consiste en mantener la compuerta aguas abajo en posición fija para lograr estabilizar la variación del nivel de agua en el tramo. Luego aplicar una señal escalón a las compuertas aguas arriba, y medir y registrar la evolución de la variación del nivel de agua al final del tramo aguas abajo alejado .

Para este experimento, los datos iniciales de las variables del local fueron los siguientes nivel inicial del agua aguas abajo $y_1(t) = 317.42\text{cm}$ estado inicial de las compuertas aguas arriba nivel de apertura C1.2 = 0 cm, C1.4 = 0 cm, C1. = cm, C1. = cm, C1.10 = cm, C1.12 = cm, C1.14 = 10 cm, C1.1 = cm, C1.1 = cm, C1.20 = 2 cm el estado de la compuerta equivalente aguas abajo alejado C2 = 100 cm nivel inicial del agua aguas arriba nivel en el río Ebro $y_{0,0}(t) = 354\text{cm}$.

Un total de cuatro compuertas C1. , C1.10, C1.12 y C1.14 recibieron un incremento simultáneo en su magnitud de apertura de apertura de 14 cm a excepción de C1.12 que recibió un incremento de 1 cm , lo que equivale a un incremento simultáneo de apertura total de cm. Los datos correspondientes a la variación del nivel del agua aguas abajo y

aguas arriba en el río Ebro, así como del incremento de la magnitud de apertura total de las compuertas fueron registrados, almacenados y graficados.

El nivel del agua aguas arriba nivel en el río Ebro puede presentar una gran variación, la cual depende principalmente del caudal en el río Ebro. Esta variación constituye una de las perturbaciones que actúa sobre el tramo del canal. Durante este experimento, la variación del nivel del agua aguas arriba fue creciente, presentando una variación máxima de 11.2 cm. La variación del nivel del agua aguas abajo fue de 11.2 cm. Los resultados del experimento con señal escalón se pueden apreciar en el Fig. 2.14.

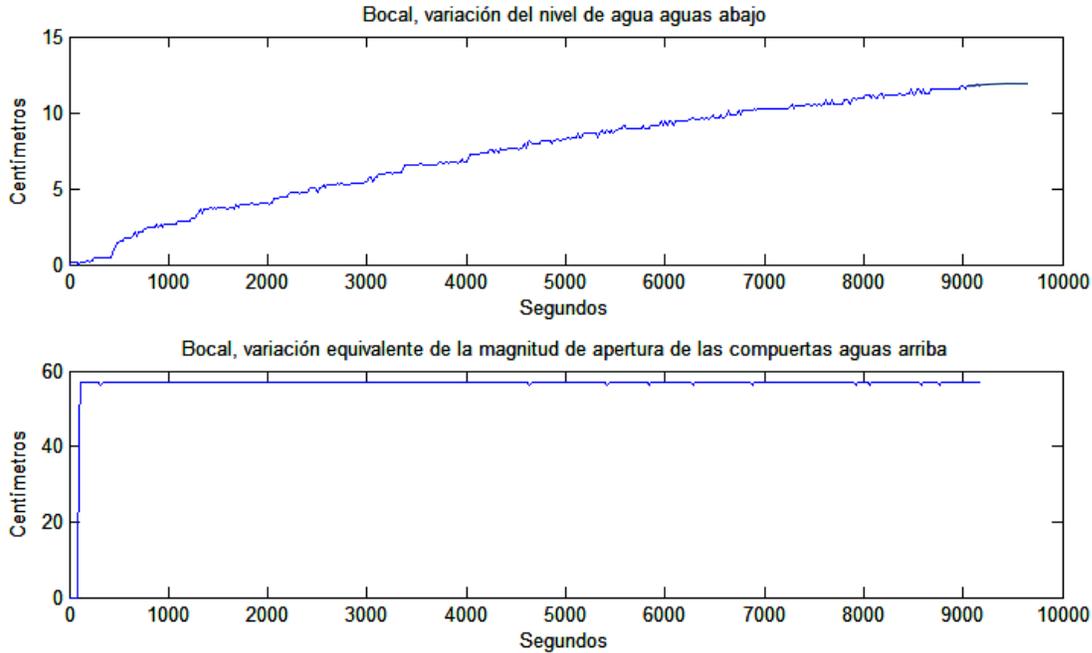


Fig.2. 14. Respuesta experimental a una señal al paso del tramo principal de canal de riego.

Con la respuesta a la señal al paso se puede obtener el tiempo de retardo del sistema. Para la determinación en forma gráfica se realizó un procedimiento de armonización entre magnitudes mediante un escalamiento de la entrada a pequeñas unidades solo con objetivo de visualización. De esta manera se obtiene la Fig. 2.1, para la determinación del tiempo de retardo.

La respuesta describe un sistema de segundo orden con retardo de tiempo, cuyo comportamiento dinámico se puede representar mediante 2.1 Rivas Pere et al., 200 a

$$T_{11}T_{21} \frac{d^2 \Delta y_1(t)}{dt^2} + (T_{11} + T_{21}) \frac{d \Delta y_1(t)}{dt} + \Delta y_1(t) = K_1 \Delta u_1(t - \tau_1) \quad 2.1$$

donde K_1 es la ganancia estática T_{11} , T_{21} , las constantes de tiempo, y τ_1 es el retardo de tiempo, respectivamente del tramo 1 del canal local.

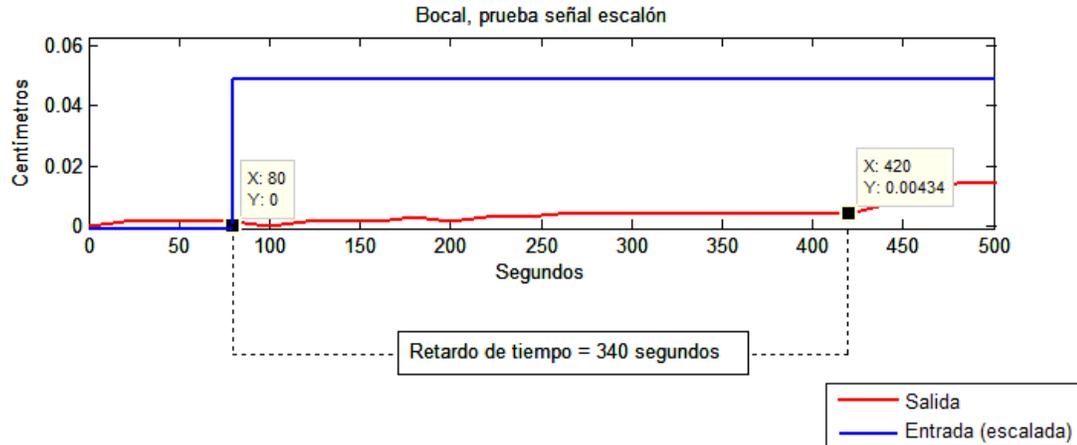


Fig.2. 1 . Obtención gráfica del tiempo de retardo entre la entrada y salida del tramo principal de canal de riego.

La expresión dada por 2.1 , puede ser representada mediante la función de transferencia

$$G_1(s) = \frac{\Delta y_1(s)}{\Delta u_1(s)} = \frac{K_1}{(T_{11}s + 1)(T_{21}s + 1)} e^{-\tau_1 s} \tag{2.1}$$

De la Fig. 2.1 , se obtienen los siguientes valores de los parámetros del modelo 2.1 para la magnitud de apertura de compuertas aguas arriba desarrollada $K_1 = 0.2056$, $T_{11} = 1390\text{ s}$ $T_{21} = 24.9\text{ s}$ $\tau_1 = 340\text{ s}$ $t_{est} = 2.30$ tiempo de establecimiento . T_{11} representa la constante de tiempo dominante constante de tiempo del tramo del canal , mientras que T_{21} representa la constante de tiempo de los motores más compuertas, la cual es mucho menor que T_{11} Rivas Pere et al., 200 a .

Por ser una prueba preliminar, estos resultados son preliminares. Con dichos resultados se diseñará el experimento para obtener los datos necesarios para realizar la identificación paramétrica del proceso de variación de nivel aguas abajo alejado en el tramo de canal.

El periodo de muestreo elegido determina un modelo de buena calidad, este no puede ser ni muy pequeño o ya que los polos del modelo identificado se situan alrededor de -1 ni muy grande que se pierda información fundamental de la dinámica del sistema Rodrigue , 200 . Para este proceso se determinó un periodo de muestreo de 1 s.

2.4.2.2 Experimento con señal binaria

Para obtener datos que contengan la mayor cantidad de información posible sobre el comportamiento dinámico del bocal, este debe de ser excitado por una señal de entrada persistente y que contenga el mayor número de frecuencias posibles Lung and Lad, 1994 . En este sentido, las señales escalonadas con cambios bruscos son muy utilizadas, puesto que contienen un espectro suficientemente amplio de frecuencias Lung, 1994 . Un tipo de señal que cumple con estas condiciones es la secuencia binaria de duración aleatoria Aleatoria o pseudo aleatoria PA o Ansson, 1994 .

Para el desarrollo de este experimento se configuró una secuencia binaria pseudo aleatoria, la cual actuará sobre las compuertas aguas arriba del canal, posibilitando que estas alternen entre dos niveles de variación de magnitud de apertura Rivas Pere et al., 200 a . Esta secuencia fue diseñada con la finalidad de obtener una significativa, aunque no muy grande, variación del nivel de agua en el tramo del canal. Las constantes de tiempo obtenidas $T_{11} = 1390$ s y $T_{21} = 24.9$ s fueron utilizadas para determinar la frecuencia de variación de la señal binaria.

En correspondencia con la teoría de sistemas lineales, para capturar el comportamiento dinámico principal de un proceso, sus entradas deben de ser excitadas alrededor de la frecuencia en la que el diagrama de Bode presenta curvaturas Rivas Pere et al., 200 a es decir alrededor de la frecuencia de corte del sistema, el cual se determina mediante sus constantes de tiempo Do and is op, 200 , tal como se muestra en la Fig.2.1 .

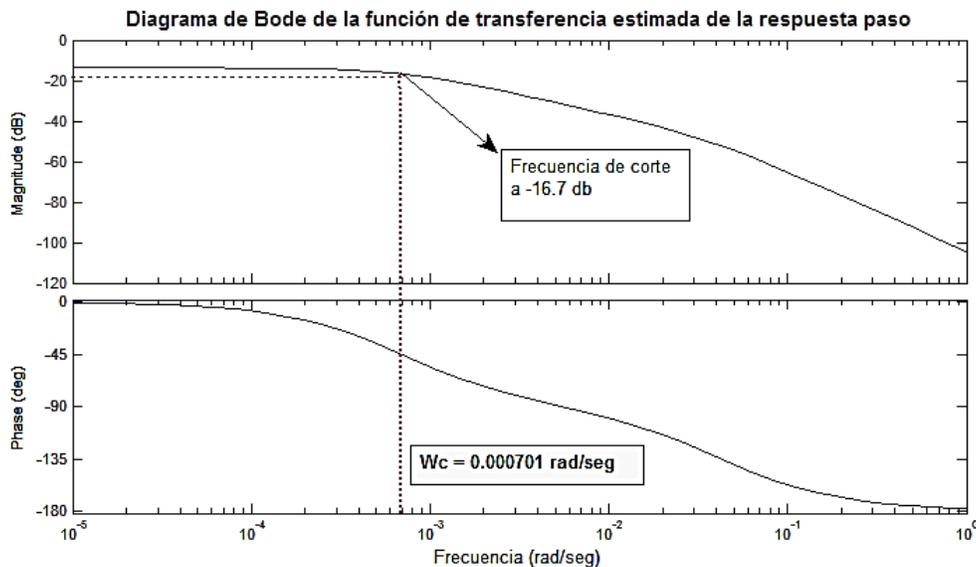


Fig.2.1 . Diagrama de Bode para determinación de amplitudes de la señal PA.

Con la información obtenida se determinó la amplitud máxima de variación de la señal Pseudo aleatoria que se muestra en 2.1 donde ω_c frecuencia de corte

$$T_{max} = \frac{1}{\omega_c} = 1425 \text{ s} \tag{2.1}$$

La amplitud mínima de variación de la señal binaria $T_{min} = 210 \text{ s}$

Para este experimento, los datos iniciales de las variables del canal fueron los siguientes nivel inicial del agua aguas abajo alejado $y_{1,0}(t) = 315.3935$ cm estado inicial de las compuertas aguas arriba nivel de apertura C1.2 = 0cm, C1.4 = 101 cm, C1.1 = 11 cm, C1.11 = 111cm, C1.10 = 12 cm, C1.12 = cm, C1.14 = 101 cm, C1.1 = 100 cm, C1.1 = 100 cm, C1.20 = 101 cm estado de la compuerta 2 aguas abajo C2 = 41 cm nivel inicial del agua aguas arriba nivel en el río Ebro $y_{0,0}(t) = 337$ cm.

Un total de cuatro compuertas C1., C1.10, C1.12 y C1.14 recibieron una variación simultánea en su magnitud de apertura de 200 cm, lo que equivale a una variación en la magnitud de apertura total de las compuertas de 200 cm. Esta variación en la magnitud de la apertura total de las compuertas aguas arriba se corresponde con un régimen de explotación habitual del local Rivas et al., 2004. Los datos correspondientes de la variación del nivel del agua aguas abajo y aguas arriba en el río Ebro, y de la variación de la magnitud de apertura total de las compuertas fueron muestreados con un periodo de 1 s, así como registrados, almacenados y graficados. El experimento tuvo una duración de dos horas treinta y dos minutos y once segundos 2011.

Durante el experimento se observó una variación moderada del nivel del agua aguas arriba nivel en el río Ebro, con un valor promedio de 2.5 cm. La variación promedio del nivel del agua aguas abajo fue de 1.5 cm. Los datos obtenidos del experimento con señal binaria se muestran en la Fig.2.1.

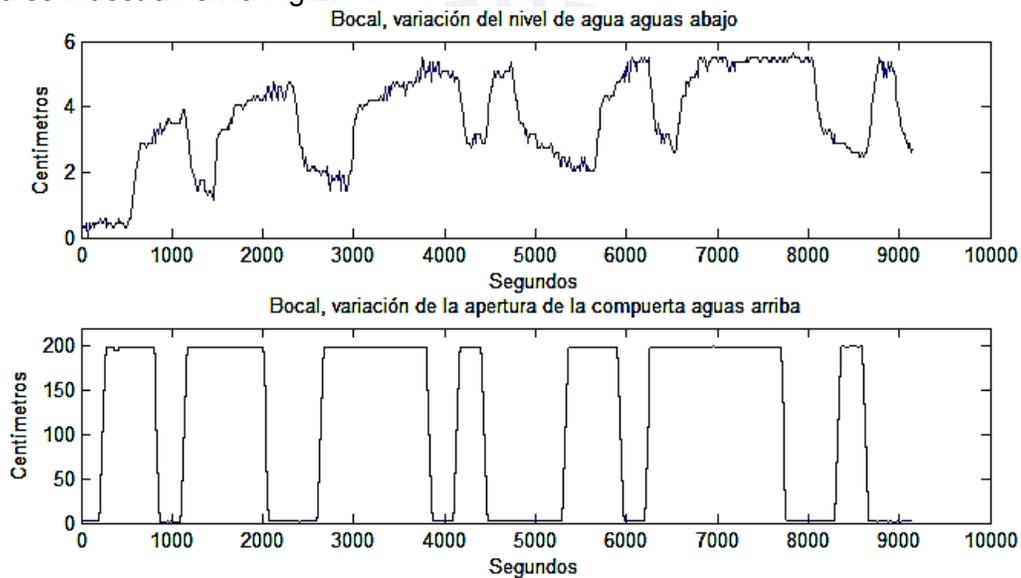


Fig.2.1 . Respuesta a la señal de excitación PA.

2.4.2.3 Preprocesamiento de los datos experimentales:

Cuando se dispone de los datos del proceso de variación del nivel de agua aguas abajo aleatorio, resulta necesario realizar un tratamiento previo de los mismos antes de ser utilizados en los algoritmos de identificación Lung, 1998. Existen distintas deficiencias en los datos adquiridos que deben ser corregidos para garantizar una correcta estimación de parámetros, entre los que se encuentran Rodríguez, 2004:

- Perturbaciones de altas frecuencias en los datos.
- Ocasionales datos incorrectos y olvidados.
- Derivas, o set y perturbaciones a bajas frecuencias.
- Los valores numéricos de las distintas señales no tienen el mismo orden de magnitud.
- Presencia de tiempos de retardo importantes.

Las perturbaciones de altas frecuencias aparecen cuando se elige un tiempo de muestreo muy pequeño o Rodríguez, 2000. En los datos adquiridos el tiempo de muestreo considerado no permite la presencia de este tipo de perturbaciones. Los datos incorrectos y olvidados por otra parte se presentan cuando existe deficiencia en el sistema de adquisición de datos. Para corregir esta situación existen algoritmos que permiten “arreglar” los datos adquiridos sin alterarlos Rodríguez, 2000. En el experimento realizado, se presenta un pequeño periodo transitorio al inicio de la adquisición de datos, el cual se elimina para no influir en la estimación de parámetros Rodríguez, 2000.

Las derivadas, o set y perturbaciones a bajas frecuencias se deben a factores externos que no es deseable incluir en el modelo. Asimismo, se tiene que el modelo paramétrico a determinar, se encuentra en función del operador de desplazamiento hacia atrás q^{-1} , el cual implica que la respuesta del proceso debe ocurrir alrededor de un punto de operación al que se considera como “cero” (Rodríguez, 2006). Para solucionar esta deficiencia se utiliza la función **detrend** de Matlab, la cual permite eliminar el offset y las derivas de los datos adquiridos Rodríguez, 2000.

La diferencia de valores numéricos entre señales se presenta recurrentemente en sistemas MIMO, al utilizar señales de entrada y de salida que numéricamente tienen elevada diferencia de magnitudes. Finalmente, la presencia de tiempo de retardo se analiza durante la identificación no paramétrica, la cual en este caso ofrece resultados más confiables Rodríguez, 2000.

Un procedimiento adicional es la división de los datos en “datos para la identificación” y “datos para la validación”. Esto con el objetivo de realizar una comparación de modelos con datos que no han sido utilizados para su estimación. Los datos adquiridos luego de haber sido preprocesados se muestran en la Fig.2.1.

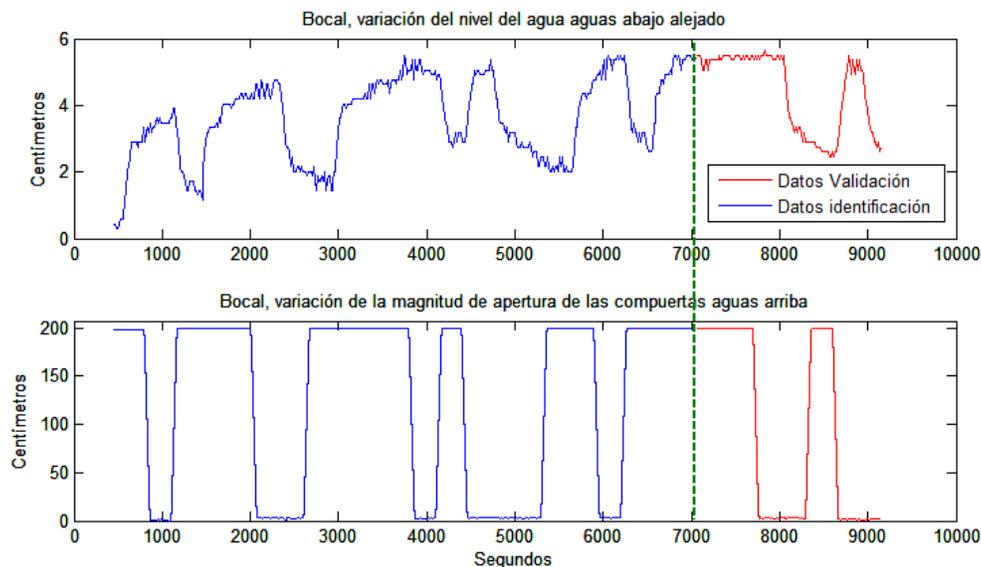


Fig.2.1. División de datos para estimación y validación.

Los datos obtenidos de este experimento fueron analizados utilizando el Toolbox de identificación de MATLAB Lung, 2000, con el objeto de comprobar si los mismos resultan adecuados para el proceso de obtención del modelo matemático final del bocal o

si necesitan algún tipo de tratamiento previo. Se comprobó que los mismos no presentaban deficiencias y que por tanto podrían ser utilizados en los siguientes pasos del procedimiento de identificación de sistemas.

Se puede obtener una respuesta escalón a partir de los datos obtenidos realizando la correlación de la entrada y salida para analizar su respuesta, que se muestra en la Fig.2.1.

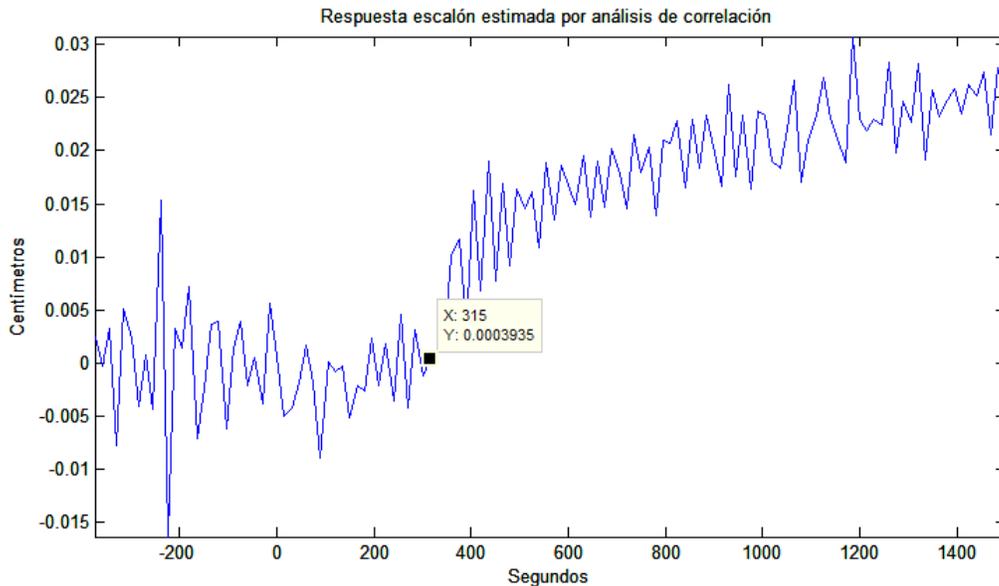


Fig.2.1 . Respuesta escalón a partir de los datos correlacionando entrada y salida.

Dicha respuesta presenta un tiempo aproximado de retardo de transporte de 1 s y mantiene una tendencia respecto al obtenido mediante la experimentación con una señal escalón presente a la entrada compuerta equivalente. Entonces para la obtención de modelos en la identificación paramétrica, se considerará un rango de valores dentro de las estimaciones del retardo de tiempo por transporte obtenidos hasta el momento.

2.4.3 Selección de la estructura del modelo y estimación de parámetros (Identificación de parámetros)

Los modelos paramétricos, a diferencia del modelo no paramétrico, obtenido en la sección "Experimento con señal escalón", se describen mediante una estructura y un número finito de parámetros que relacionan las señales de interés del sistema (entrada, salida y perturbaciones) $L(u, 1)$. Estos modelos se describen en el dominio discreto, puesto que los datos que sirven de base para la identificación se obtienen por muestreo (Rivas Pérez et al., 2004). Para contar con un modelo en tiempo continuo se realizará la transformación del dominio discreto al continuo.

Todo modelo matemático de un sistema debe ser capaz de predecir el valor de la señal de salida de dicho sistema en función de sus señales de entradas y salidas en instantes de tiempo anteriores (Rivas Pérez et al., 2004). La salida de un modelo puede representarse mediante 2.1

$$\hat{y}(t) = \varphi^T(t)\theta \tag{2.1}$$

donde $\hat{y}(t)$ es la salida estimada del modelo en el instante t , $\varphi^T(t)$, el vector de regresión, con formado por las señales de entradas y salidas anteriores θ , el vector de parámetros de la estructura de modelo. Por ejemplo, para una estructura de modelo OE, $\varphi^T(t)$ y θ , se representarán mediante las expresiones de 2.20 y 2.21 Rivas Pere et al., 200 a

$$\varphi(t) = [-y(t-1) - y(t-2) \dots - y(t-na) \quad u(t-nk-1) \dots u(t-nb-nk)]^T \tag{2.20}$$

$$\theta = [b_1 \quad b_2 \dots b_{nb} \quad f_1 \quad f_2 \dots f_{nf}]$$

2.21

El problema a resolver consiste en estimar el vector de parámetros $\hat{\theta}$ a partir de N observaciones mediciones realizadas $y(1) \varphi(t) \dots y(N), \varphi(N)$ Rivas Pere et al., 200 a .

De 2.1 se deduce el siguiente conjunto de ecuaciones lineales que se muestran en 2.22 Rivas Pere et al., 200 a

$$y(1) = \varphi^T(1)\hat{\theta}$$

$$y(2) = \varphi^T(2)\hat{\theta}$$

.

.

$$y(N) = \varphi^T(N)\hat{\theta}$$

2.22

que puede ser representado en forma de vector matricial mediante la expresión 2.2 Rivas Pere et al., 200 a

$$Y = \phi \hat{\theta} \tag{2.2}$$

donde

$$Y = [y(1) \quad y(2) \dots y(N)]^T$$

$$\phi = [\varphi(1) \quad \varphi(2) \dots \varphi(N)]^T .$$

El error modelado o error de predicción entre la salida medida y la salida estimada se define mediante las expresiones de 2.24 2.2 Rivas Pere et al., 200 a

$$\varepsilon = Y - \phi \hat{\theta} \tag{2.24}$$

$$\varepsilon = [\varepsilon(1) \dots \varepsilon(N)]^T . \tag{2.2}$$

La estimación mediante mínimos cuadrados consiste en minimizar la función $V(\hat{\theta})$ de costo mediante 2.2 Rivas Pere et al., 200 a

$$V(\hat{\theta}) = \frac{1}{2} \sum_{t=1}^N \varepsilon^2(t) = \frac{1}{2} \varepsilon^T \varepsilon = \frac{1}{2} \|\varepsilon\|^2 \quad 2.2$$

Al sustituir 2.24 y 2.2 en 2.2 se obtiene que la función a minimizar presenta la forma según 2.2 Rivas Peret et, 200 a

$$\min_{\hat{\theta}} V(\theta) = V(\hat{\theta}) = \frac{1}{2} [Y^T Y - Y^T \hat{\phi} \hat{\theta} - \hat{\theta}^T \hat{\phi}^T Y + \hat{\theta}^T \hat{\phi}^T \hat{\phi} \hat{\theta}] \quad 2.2$$

La derivada de 2.2 respecto a los parámetros debe ser nula, de donde se obtiene que el valor de los parámetros que minimiza la función $V(\hat{\theta})$ se determina mediante la expresión 2.2 Rivas Peret et al., 200 a

$$\hat{\theta} = (\hat{\phi}^T \hat{\phi})^{-1} \hat{\phi}^T Y \quad 2.2$$

La ecuación 2.2 se puede escribir mediante el siguiente producto de sumas dadas en 2.2 Rivas Peret et al., 200 a

$$\hat{\theta} = \left[\sum_{t=1}^N \varphi(t) \varphi(t)^T \right]^{-1} \left[\sum_{t=1}^N \varphi(t) y(t) \right] \quad 2.2$$

De donde, conocido el orden del modelo n_b, n_f, n para el empleo de estructura de modelo OE es fácilmente calculable el valor de sus parámetros.

Se debe de considerar que 2.2 tiene solución si la matriz $\hat{\phi}^T \hat{\phi}$ es de rango positiva. En caso contrario, la ecuación tiene infinitas soluciones. El requisito necesario para garantizar una solución única de 2.2 es que la señal de excitación sea persistentemente excitada Lung, 1 .

Selección de la estructura de modelo

La selección de la estructura de modelo constituye una de las decisiones más importantes y difíciles en el procedimiento de identificación de sistemas debido a que la complejidad del modelo puede afectar la exactitud con la que describe el proceso real Lung, 1 . La selección de una estructura signficativa determinar los polinomios que integran el modelo. Encontrar el mejor modelo implica escoger una estructura conveniente, en combinación con un adecuado número de parámetros Lung y Lad, 1 4 .

Se hicieron trabajos de evaluación de diferentes estructuras de modelos, entre las que se encuentran OE error de salida , ARX auto regresión con entrada controlada , ARMAX auto regresión de media móvil con entrada controlada y otros en ins. La estructura OE ofrece una buena descripción de las propiedades de baja frecuencia del sistema, mientras que la estructura ARX posibilita una mejor descripción de las propiedades de alta frecuencia Lung, 1 . De particular interés resulta la estructura ARMAX, ya que permite modelar la parte determinística y la parte estocástica del tramo del canal bajo estudio con un proceso de media móvil Rivas Peret et al., 200 a .

Estas estructuras pueden representarse mediante las siguientes expresiones en forma de polinomios 2. 0 , 2. 1 , 2. 2 y 2. 3 o Ansson, 1 Lung, 1

$$\hat{y}_{ARX}(t) = B(q)q^{-nd}u(t) + \xi(t) \quad 2.0$$

$$\hat{y}_{OE}(t) = \frac{B(q)}{F(q)}q^{-nd}u(t) + \xi(t) \quad 2.1$$

$$\hat{y}_{ARMAX}(t) = B(q)q^{-nd}u(t) + C(q)\xi(t) \quad 2.2$$

$$\hat{y}_{Box-Jenkins}(t) = \frac{B(q)}{F(q)}q^{-nd}u(t) + \frac{C(q)}{D(q)}\xi(t) \quad 2.$$

donde $\hat{y}_{ARX}(t)$, $\hat{y}_{OE}(t)$, $\hat{y}_{ARMAX}(t)$, $\hat{y}_{Box-Jenkins}(t)$ son las señales de salida estimadas del nivel del agua aguas arriba o aguas abajo de los modelos del primer tramo del canal con estructuras ARX, OE, ARMAX y Box-Jenkins respectivamente. Los polinomios $A(q)$, $B(q)$, $C(q)$, $D(q)$ y $F(q)$ se encuentran definidos en términos del operador de desplazamiento hacia atrás q^{-1} y se determinan como

$$A(q) = 1 + a_1q^{-1} + \dots + a_naq^{-na} \quad 2.4$$

$$B(q) = b_1 + b_2q^{-1} + \dots + b_n bq^{-nb+1} \quad 2.$$

$$C(q) = 1 + c_1q^{-1} + \dots + c_n c q^{-nc} \quad 2.$$

$$D(q) = 1 + d_1q^{-1} + \dots + d_n d q^{-nd} \quad 2.$$

$$F(q) = 1 + f_1q^{-1} + \dots + f_n f q^{-nf} \quad 2.$$

na, nb, nc, nd y n son el orden de los polinomios a_j , b_j , c_j , d_j , f_j los parámetros de las respectivas estructuras del modelo que se necesitan estimar y que conforman el vector de parámetros estimados $\hat{\theta}_j(t)$ del modelo con estructura ARX, OE, ARMAX, Box-Jenkins, el retardo de tiempo entre la entrada y la salida del proceso objeto de estudio $\xi(t)$, la secuencia de ruido blanco de media cero, utilizada para caracterizar matemáticamente el comportamiento dinámico de las perturbaciones $v(t)$ que actúan sobre el tramo del canal objeto de estudio Rivas Pere et al., 2004.

El polinomio $C(q)$ de la estructura ARMAX posibilita cuantificar en el modelo los efectos de las perturbaciones fundamentales que actúan sobre el tramo del canal objeto de estudio, las cuales tal como se señaló en la sección "Diseño del experimento e identificación paramétrica", se encuentran representadas por la descarga lateral $q_1(t)$, así como por las interacciones de los tramos adyacentes aguas arriba o Ebro y aguas abajo. La cuantificación del efecto de las perturbaciones en la estructura del modelo, posibilita desarrollar mejores predicciones del comportamiento dinámico del proceso objeto de estudio. El término $C(q)\xi(t)$ constituye la parte estocástica de esta clase de estructura de modelo.

La estructura del modelo OE y o en ins, considera ue el ruido se a aade directamente a la salida del proceso ob eto de estudio mientras ue en las estructuras ARX y ARMAX, el ruido se a aade en un punto entre la entrada y la salida del proceso ob eto de estudio Lung, 1 .

En la Fig. 2.20, se muestran diagramas de blo es e uivalentes para cada una de las estructuras de modelo seleccionadas

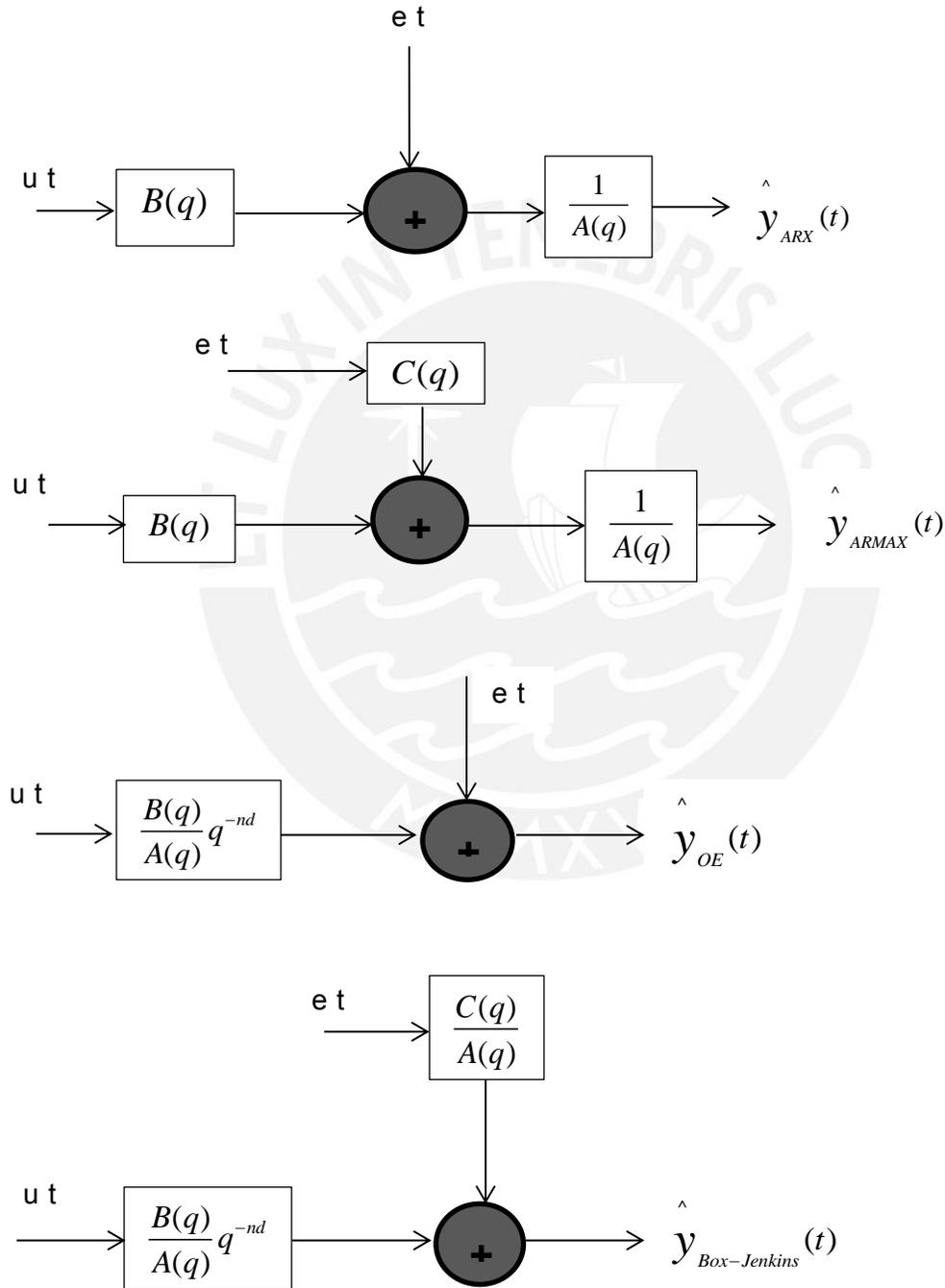


Fig.2.20. Estructuras de modelos estimados.

La estructura del modelo seleccionado se determinará durante el procedimiento de validación de modelos.

2.4.4 Formulación del criterio y estimación de parámetros

La estimación de parámetros constituye el procedimiento que posibilita a usar un modelo con una estructura específica Rivas Pere, et al., 2006. Para ello resulta necesario determinar el orden apropiado y los parámetros de los diferentes polinomios que conforman la estructura de modelo a fin de obtener la respuesta de modelo que mejor se ajusta a los datos de entrada salida obtenidos durante el experimento con señal binaria Lung, 1991. Esta tarea consume una elevada cantidad de tiempo. Es muy importante escoger un orden correcto del modelo. Un orden bajo puede implicar que el modelo no describa de forma adecuada la dinámica real del proceso, mientras que un orden elevado incorpora más incertidumbres al modelo Rivas et al., 2006.

De forma similar, el conocimiento e efecto del retardo de tiempo del proceso real presenta una significativa importancia en la estimación de parámetros. Como se se ve en la sección “Experimento con señal escalón”, se determinó que el retardo de tiempo τ_d del proceso real es de 4 s. Con el objeto de considerar las posibles incertidumbres que puedan existir en esta magnitud de retardo de tiempo, durante la estimación de los parámetros de las diferentes estructuras del modelo seleccionadas, el retardo de tiempo se varió en un rango entre 22 y 400 s.

Los datos de entrada salida situados a la izquierda de la línea vertical de la Fig. 2.1, fueron utilizados en el procedimiento de estimación de parámetros. Se realizó la estimación de parámetros del modelo matemático del proceso real utilizando las estructuras de modelo seleccionadas ARX, OE, ARMAX y otros en series con diferentes órdenes y magnitudes de retardo de tiempo a fin de encontrar el que mejor reproduce los datos obtenidos experimentalmente. Esta tarea se desarrolló utilizando el Toolbox de Identificación de Matlab Lung, 2000. De esta forma se llegó a determinar $\hat{\theta}$ Ver el capítulo 2.20, para diferentes estructuras y órdenes de modelo consideradas como relevantes en el estudio. De acuerdo a la Tabla 2.1, Tabla 2.2, Tabla 2.3, Tabla 2.4 y Tabla 2.5.

Tabla 2.1. Coeficientes de polinomio A

ESTRUCTURA DE MODELO	a_1	a_2	a_3	a_4
ARX 2 2 0 0 0 2	0.	0.2 1	0	0
OE 2 2 2 2	0	0	0	0
OE 2 2 2	0	0	0	0
ARMAX 2 2 2 2 2	1. 2	0. 222	0	0
ARMAX 2 4	1.4 1	0.101	0. 4	0
ARMAX 4 4 4 2 4	0. 1 4	1.1	0.1	0. 2 1
0 2 2 2 2 2	0	0	0	0
0 2 4	0	0	0	0

Tabla 2.2. Coeficientes de polinomio

E TR CT RA DE MODELO	b_1	b_2	b_3	b_4
ARX 2 2 0 0 0 2	0.00 14	0.00	0	0
OE 2 2 2 2	0.00	0.00 2	0	0
OE 2 2 2	0.00 1	0.00	0	0
ARMAX 2 2 2 2 2	0.00 2 4	0.00 1 4	0	0
ARMAX 24	0.012 1	0.022	0.010	0
ARMAX 4 4 4 24	0.012	0.010	0.012	0.010 1
0 2 2 2 2 2	0	0	0	0
0 24	0	0	0	0

Tabla 2. . Coeficientes de polinomio C

E TR CT RA DE MODELO	c_1	c_2	c_3	c_4
ARX 2 2 0 0 0 2	0	0	0	0
OE 2 2 2 2	0	0	0	0
OE 2 2 2	0	0	0	0
ARMAX 2 2 2 2 2	1. 0	0.	0	0
ARMAX 24	1.1	0.20 2	0. 4	0
ARMAX 4 4 4 24	0.1	1.1	0.0 2	0. 2
0 2 2 2 2 2	0.1	0. 1	0	0
0 24	0.02	0. 1	0.	0

Tabla 2.4. Coeficientes de polinomio D

E TR CT RA DE MODELO	d_1	d_2	d_3
ARX 2 2 0 0 0 2	0	0	0
OE 2 2 2 2	0	0	0
OE 2 2 2	0	0	0
ARMAX 2 2 2 2 2	0	0	0
ARMAX 24	0	0	0
ARMAX 4 4 4 24	0	0	0
0 2 2 2 2 2	0. 1	0.441	0
0 24	0.2 24	0.4211	0. 4

Tabla 2. . Coeficientes de polinomio F

E TR CT RA DE MODELO	f_1	f_2	f_3
ARX 2 2 0 0 2	0	0	0
OE 2 2 2 2	1.	0. 12	0
OE 2 2 2	1.	0. 01	0
ARMAX 2 2 2 2 2	0	0	0
ARMAX 24	0	0	0
ARMAX 4 4 4 24	0	0	0
0 2 2 2 2 2	1. 0	0. 0	0
0 24	1. 0	0. 0 4	0.2 1

Los resultados obtenidos de la estimación de los parámetros que mejor ajustan el comportamiento dinámico del local en cada una de las estructuras del modelo seleccionadas se presentan en la siguiente sección.

2.5 Validación del modelo

La validación de los modelos calculados es uno de los pasos esenciales en un proceso de identificación (Ljung, 1987). Una vez que la fase de estimación de parámetros ha concluido, es necesario evaluar si el modelo obtenido describe con su precisión y actitud el comportamiento dinámico del sistema real, es decir, si la salida del modelo se ajusta a los datos obtenidos experimentalmente del proceso real objeto de estudio. El procedimiento que posibilita evaluar la calidad del modelo obtenido para la aplicación requerida se conoce como validación de modelo (Ljung, 1987).

Esto puede ser muy impreciso y en realidad no es éste una medida de validación definitiva. La aceptación de modelo no solo depende del modelo en sí, sino del propósito de su uso (Rodríguez, 2000).

Existen varias formas de probar un modelo (Rodríguez, 2000)

- Prueba del error final de predicción y análisis de polos y ceros.
- Validación cruzada.
- Índices de desempeño.
- Verificación cruzada con otros modelos.
- Medidas estadísticas.

Una prueba que resulta importante, es el criterio propuesto por Akaike llamado “final prediction error criterion (FPE)”. En este criterio no solo se toma en cuenta la función de costo, sino que se penaliza la complejidad del modelo como se muestra en la expresión (Rodríguez, 2000)

$$FPE(p) = \frac{N + p}{N - p} J(\theta) \tag{2}$$

donde

$J(\theta)$ función de costos de la estimación de parámetros.

p Número de parámetros del modelo.

N Número de muestras.

Este criterio permite también determinar el orden del modelo. Si se mira la función de costo $V(\hat{\theta})$, cuando se incrementa el orden del modelo, dicha función decrecerá hasta que se mantiene constante o cambia lentamente (Rodríguez, 2000). Para los modelos estimados, la aplicación del criterio FPE dio los resultados que se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Comparación de estructuras de modelos según FPE

Estructura	[na nb nc nd nf d]	FPE
ARX	2 2 0 0 0 2	0.04
ARMAX	2 2 2 0 0 2 2	0.02
ARMAX	0 0 2 4	0.02
ARMAX	4 4 4 0 0 2 4	0.02
OE	0 2 0 0 2 2 2	0.21
OE	0 2 0 0 2 2	0.04
	0 2 2 2 2 2	0.02
	0 2 4	0.02

Se observa que para los modelos ARMAX, el FPE se estableció alrededor de 0.02, de esto se puede afirmar que hasta una aproximación de tercer orden constituye un buen modelo, sin embargo esto puede complicar el diseño del controlador. Con estos resultados preliminares aún no se pueden sacar conclusiones del mejor modelo, sin embargo queda descartado el empleo de un modelo de cuarto orden. La validación de los modelos obtenidos en cada una de las estructuras de modelos seleccionados y la determinación del modelo que mejor describe el comportamiento dinámico del local continúa con el siguiente paso. Para ello se utilizó la validación cruzada, el cual es considerado como el más importante de los métodos de validación y como el único que verdaderamente presenta una aplicabilidad general (Lung, 1998). Este paso en la validación consiste en comparar gráficamente en el dominio del tiempo la respuesta del modelo y la respuesta del sistema real. Para esto se utilizaron los datos experimentales de validación. Se realizaron diversos experimentos de validación de modelo obteniéndose las aproximaciones más representativas que se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Comparación de modelos obtenidos según índice FIT

Estructura	[na nb nc nd nf d]	FIT
ARX	2 2 0 0 0 2	4.2
ARMAX	2 2 2 0 0 2 2	.2
ARMAX	0 0 2 4	.
OE	0 2 0 0 2 2 2	.4
OE	0 2 0 0 2 2	.2
	0 2 2 2 2 2	0.44
	0 2 4	.2

Los resultados gráficos de la validación cruzada de los modelos encontrados de cada una de las estructuras que mejor describen el comportamiento dinámico del local dentro de cada una de las estructuras seleccionadas se muestran en las Fig.2.21, Fig.2.22, Fig.2.23 y Fig.2.24.

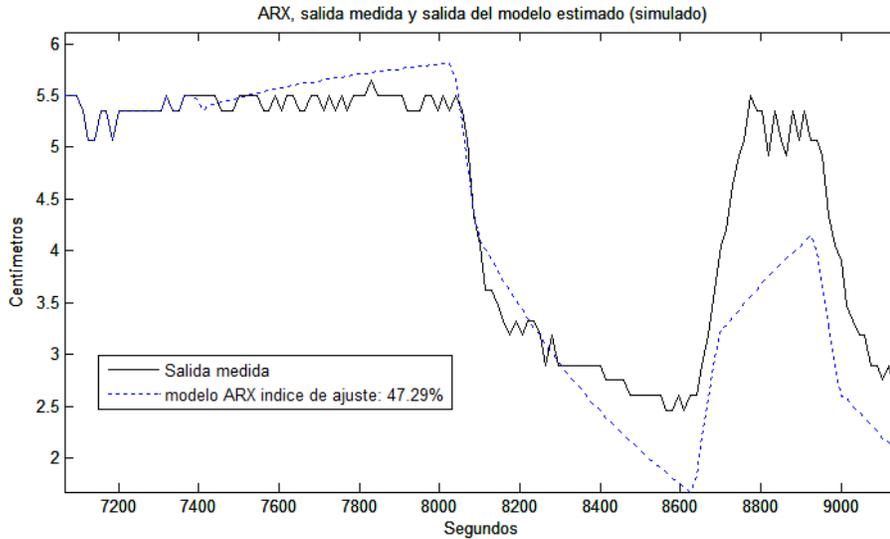


Fig.2.21. Salida comparativa de modelo ARX estimado.

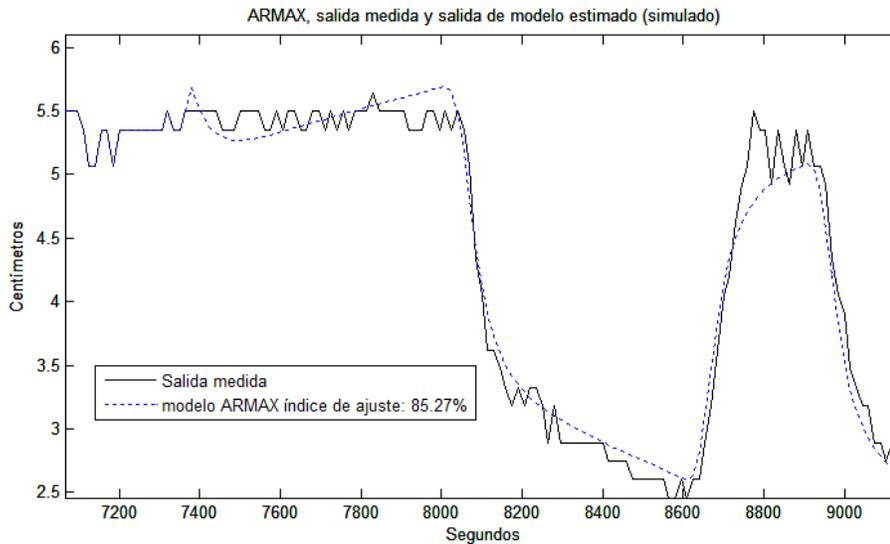


Fig.2.22. Salida comparativa de modelo ARMAX estimado.

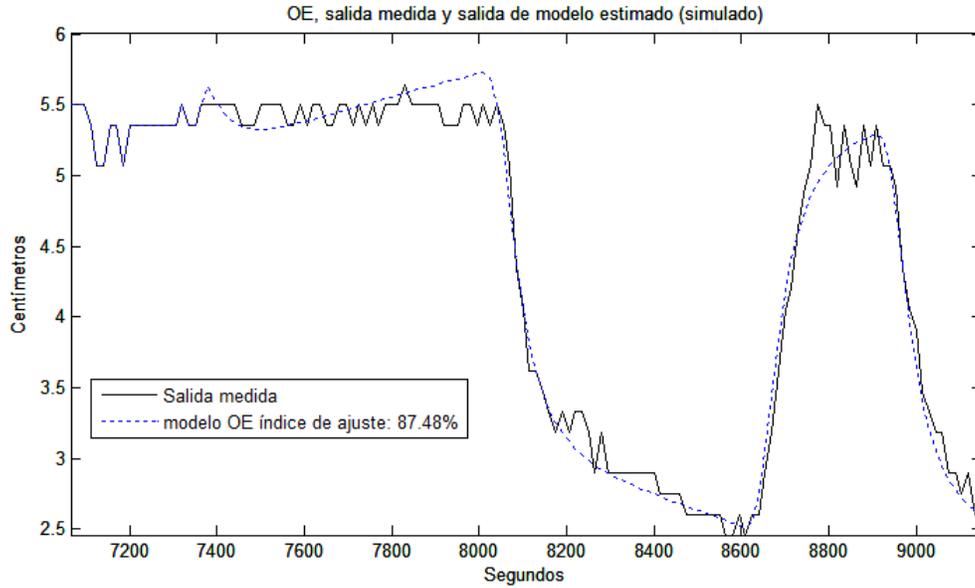


Fig.2.2 . alida comparativa de modelo OE estimado.

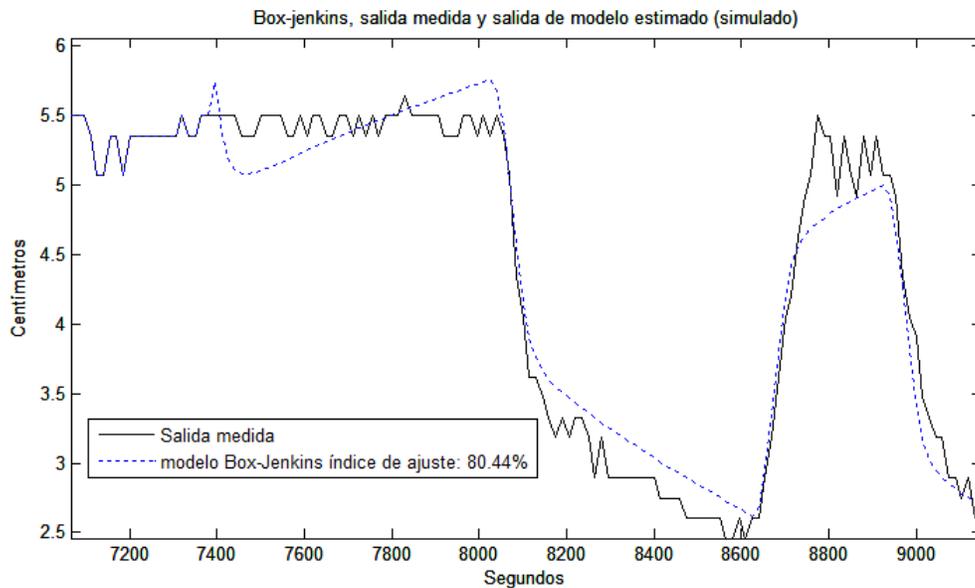


Fig.2.24. alida comparativa de modelo o en ins estimado.

Los mejores modelos encontrados dentro de cada una de las estructuras seleccionadas son de segundo orden las estructuras ARX y o en ins ueron a ustadas con un retardo de tiempo de 4 s mientras estructuras ARMAX y OE recibieron un ajuste de tiempo de 0 s y se representan de forma e pl cita mediante las siguientes ecuaciones en di erencia

$$\hat{y}_{ARX}(t) = 0.6688y_{1ARX}(t-15) - 0.2971y_{1ARX}(t-30) + 0.009914u_1(t-345) - 0.008879u_1(t-360)$$

2. 40

$$\hat{y}_{ARMAX}(t) = 1.72 y_{1ARMAX}(t-15) - 0.7222 y_{1ARMAX}(t-30) + 0.003264 u_1(t-330) - 0.003184 u_1(t-345) + \dots + \xi_1(t) - 1.309 \xi_1(t-15) + 0.3653 \xi_1(t-30)$$

2. 41

$$\hat{y}_{OE}(t) = 1.75 y_{1OE}(t-15) - 0.7512 y_{1OE}(t-30) + 0.003338 u_1(t-330) - 0.0032779 u_1(t-345)$$

2. 42

$$\hat{y}_{BJ}(t) = \frac{0.005143q^{-23T} - 0.00496q^{-24T}}{1 - 1.503q^{-1T} + 0.5085q^{-2T}} u_1(t) + \frac{1 - 0.153q^{-1T} - 0.3715q^{-2T}}{1 - 0.5361q^{-1T} - 0.4415q^{-2T}} \xi_1(t)$$

2. 4

donde T = 1 s periodo de muestreo

De los gráficos presentados se observa una aproximación pobre por parte del modelo ARX [2 2 2] estimado, por tal motivo no será considerada en el siguiente paso de validación. Finalmente un último paso para validar el modelo es utilizar medidas estadísticas. Si un modelo es una representación válida del proceso, los errores o residuos deben ser estadísticamente independientes de la entrada de excitación. Esto quiere decir, que la correlación cruzada entre la entrada y los residuos, no debe ser significativamente diferente de cero para cualquier tiempo. De la misma manera la autocorrelación de los residuos, permite verificar si no hay más información posible a modelar (Rodríguez, 2000). Las gráficas de correlación de los modelos se muestran en las Fig.2.2, Fig.2.2, Fig.2.2, Fig.2.2, Fig.2.2, Fig.2.0.

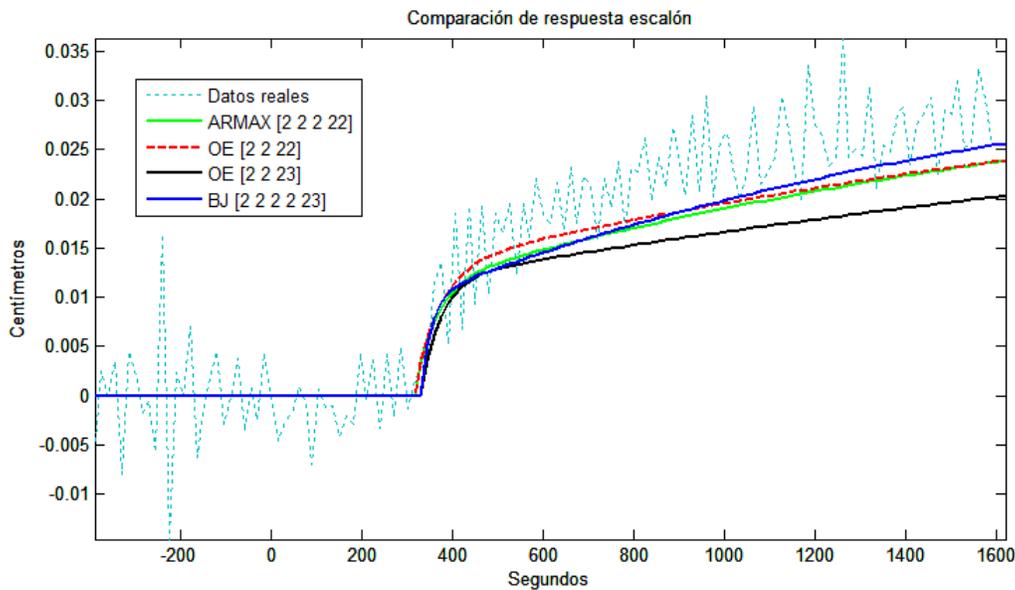


Fig.2.2 . Respuesta escalón de los modelos estimados.

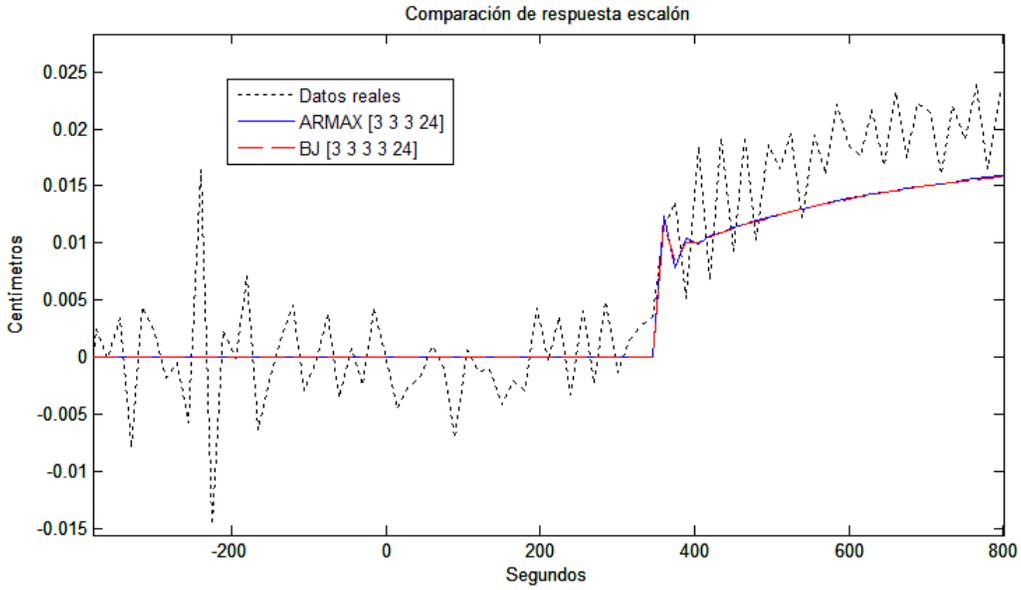


Fig.2.2 . Respuesta escalón de los modelos de tercer orden estimados.

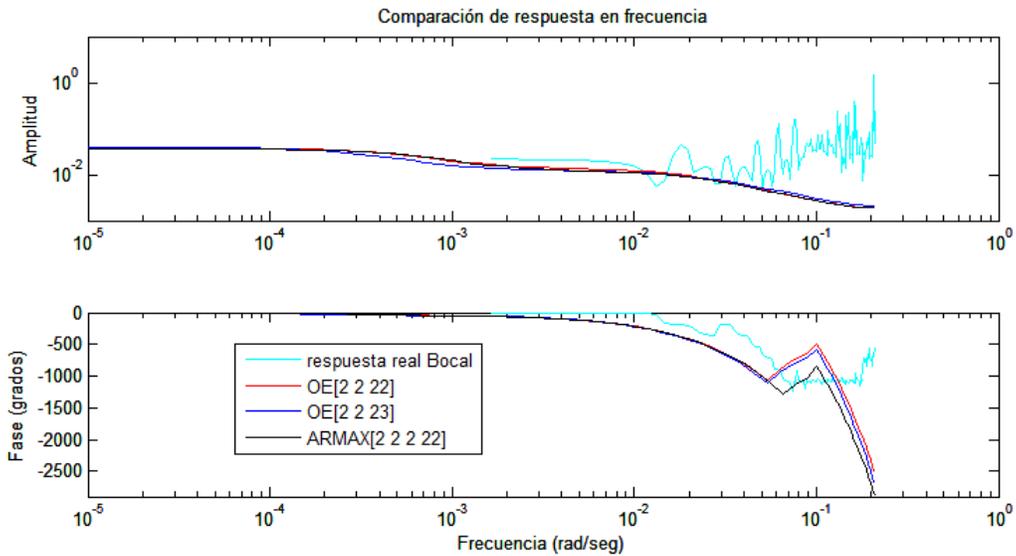


Fig.2.2 . Diagrama de Bode de los modelos estimados.

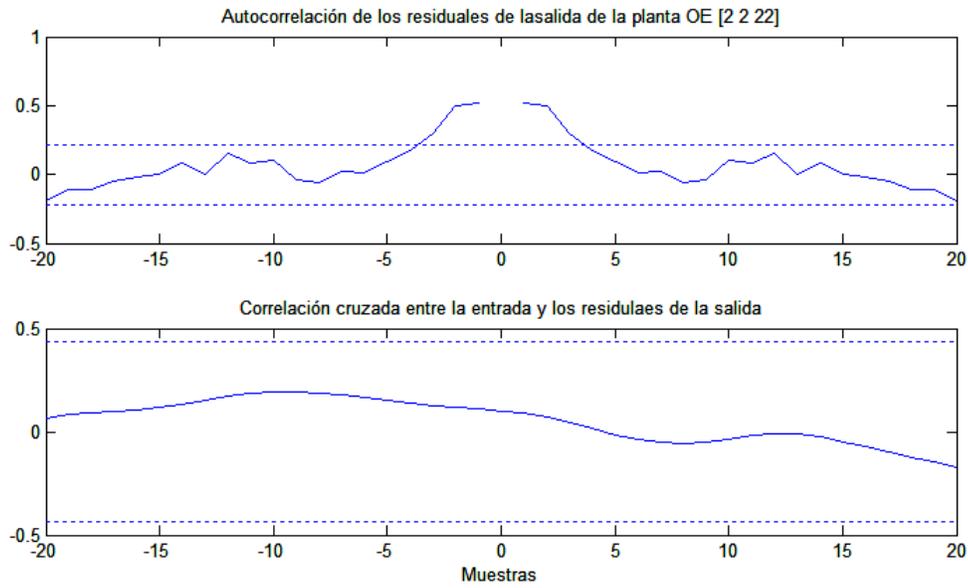


Fig.2.2 . Análisis de correlación del modelo OE estimado.

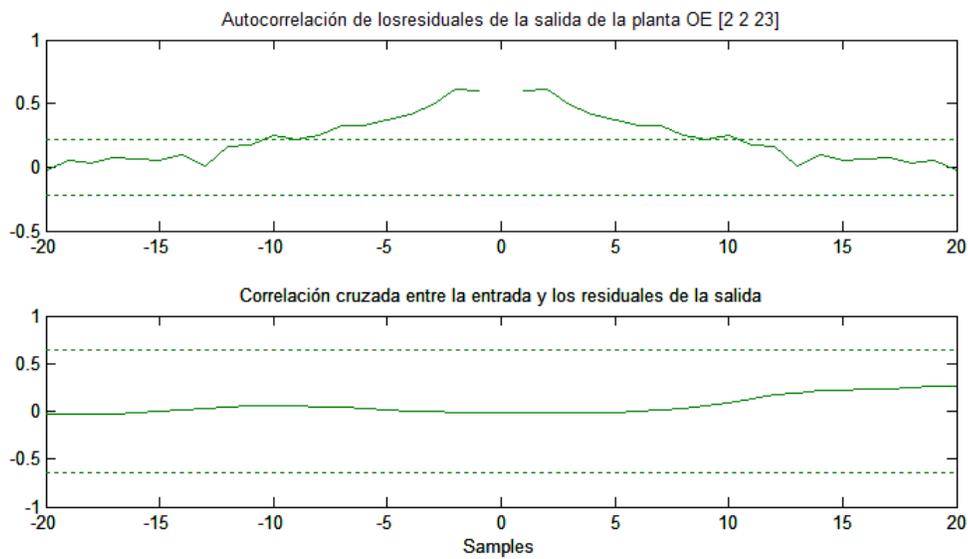


Fig.2.2 . Análisis de correlación del modelo OE estimado con 2 periodos de retardo .

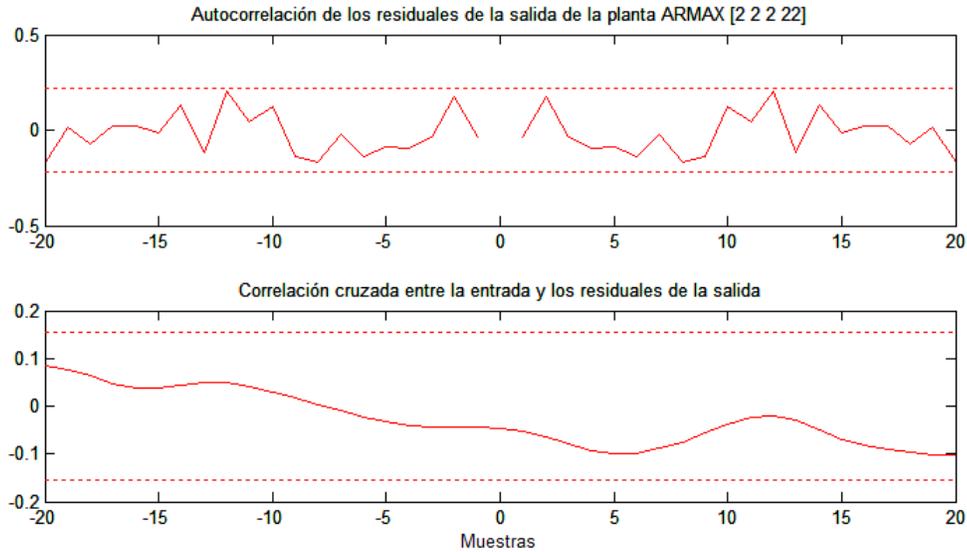


Fig.2. 0. Análisis de autocorrelación del modelo ARMAX estimado.

De los gráficos presentados, se puede observar que las aproximaciones de tercer orden no reflejan una buena respuesta a una entrada escalón, por lo tanto quedarían descartados. Por otra parte existe una buena aproximación de los modelos OE, ARMAX y de segundo orden. No obstante el modelo es descartado por poseer un FIT inferior al resto de los modelos. Finalmente las gráficas de autocorrelación y correlación cruzadas, resultaron determinantes en la elección final del mejor modelo y este estar representado por el modelo ARMAX 2 2 2 22 estimado. En la Tabla 2. , se muestra un resumen con los modelos de mejor aproximación

Tabla 2. . Modelos estimados con mejor índice FIT

Estructura de modelo	ordenes de los polinomios n_a, n_b, n_c, n_d, n	Retardo de tiempo s	índice de ajuste FIT
ARMAX	2 2 2 0 0	0	.2
OE	0 2 0 0 2	0	.4
OE	0 2 0 0 2	4	.2

Concluido el paso de validación, resulta necesaria la transformación del modelo estimado en tiempo discreto a su equivalente en tiempo continuo. Para ello se utilizó el método de aproximación "ZOH". También se tuvo en cuenta la simplificación del orden del numerador. A continuación en la Tabla 2. , se muestran los mejores modelos obtenidos en tiempo discreto, tiempo continuo y tiempo continuo simplificado

Tabla 2. . Funciones de transferencia de modelos con método de ajuste FIT

Modelo	OE 2 2 2 2	OE 2 2 2	ARMAX 2 2 2 2 2
Discreto	$\frac{\Delta y(z)}{\Delta u(z)} = \frac{0.003338z - 0.003277}{z^{23} - 1.75z^{22} + 0.7512z^{21}}$	$\frac{\Delta y(z)}{\Delta u(z)} = \frac{0.00361z - 0.00356}{z^{24} - 1.7z^{23} + 0.7017z^{22}}$	$\frac{\Delta y(z)}{\Delta u(z)} = \frac{0.003264z - 0.003184}{z^{23} - 1.72z^{22} + 0.7222z^{21}}$ $\frac{\Delta y(z)}{\Delta v(z)} = \frac{0.1725z^2 - 0.2257z + 0.063}{z^2 - 1.72z + 0.7222}$
Continuo	$\frac{\Delta y(s)}{\Delta u(s)} = \frac{0.0002535s + 3.122 \cdot 10^{-7}}{s^2 + 0.01907s + 8.224 \cdot 10^{-6}} e^{-330s}$	$\frac{\Delta y(s)}{\Delta u(s)} = \frac{0.0002838s + 2.611 \cdot 10^{-7}}{s^2 + 0.02361s + 6.547 \cdot 10^{-6}} e^{-345s}$	$\frac{\Delta y(s)}{\Delta u(s)} = \frac{0.0002517s + 4.166 \cdot 10^{-7}}{s^2 + 0.0217s + 1.146 \cdot 10^{-5}} e^{-330s}$ $\frac{\Delta y(s)}{\Delta v(s)} = \frac{0.1725s^2 + 0.008897s + 5.086 \cdot 10^{-5}}{s^2 + 0.02169s + 1.161 \cdot 10^{-5}}$
Continuo simplificado	$\frac{\Delta y(s)}{\Delta u(s)} = \frac{3.122 \cdot 10^{-7}}{s^2 + 0.01907s + 8.224 \cdot 10^{-6}} e^{-330s}$	$\frac{\Delta y(s)}{\Delta u(s)} = \frac{2.611 \cdot 10^{-7}}{s^2 + 0.02361s + 6.547 \cdot 10^{-6}} e^{-345s}$	$\frac{\Delta y(s)}{\Delta u(s)} = \frac{4.165 \cdot 10^{-7}}{s^2 + 0.02169s + 1.161 \cdot 10^{-5}} e^{-330s}$ $\frac{\Delta y(s)}{\Delta v(s)} = \frac{0.1725s^2 + 0.008898s + 5.083 \cdot 10^{-5}}{s^2 + 0.02169s + 1.161 \cdot 10^{-5}}$

La respuesta al impulso y al escalón unitario en tiempo discreto del modelo con método de ajuste FIT se muestra en las Fig. 2. 1 y Fig. 2. 2.

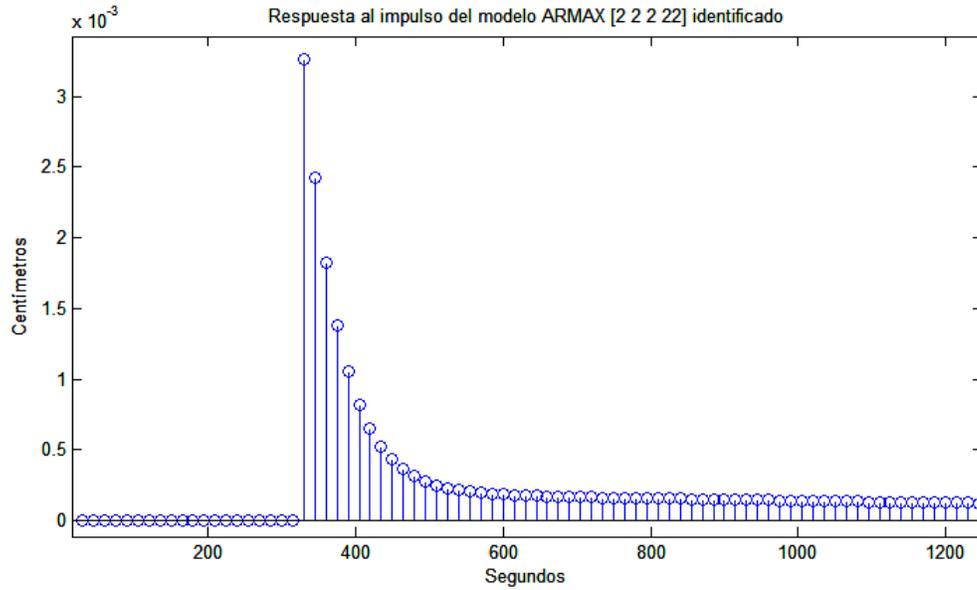


Fig.2. 1. Respuesta al impulso del modelo ARMAX identificado.

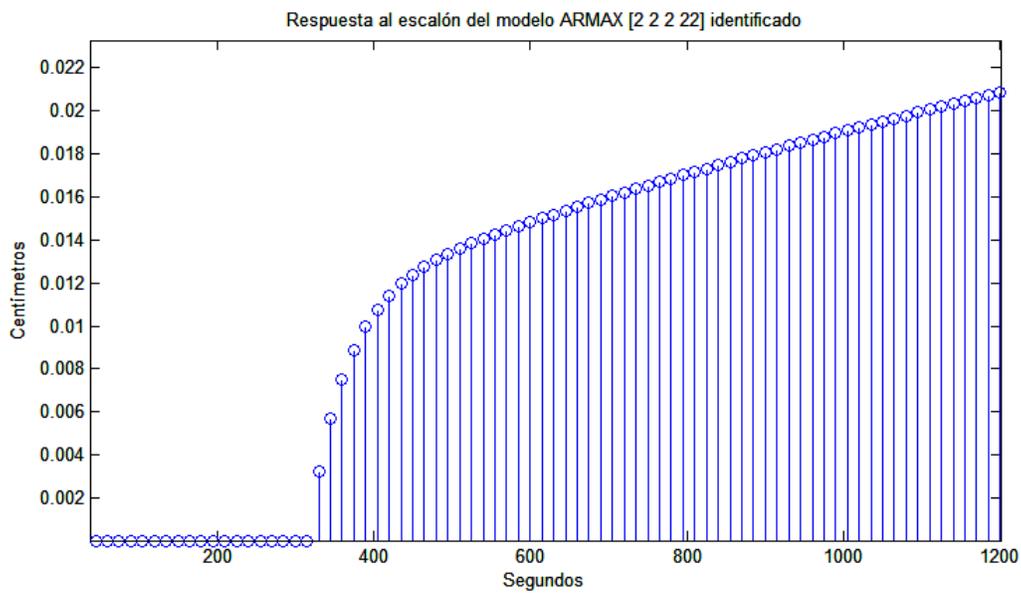


Fig.2. 2. Respuesta al escalón del modelo ARMAX identificado.

En la Fig. 2. se muestra la respuesta comparativa entre el modelo en tiempo discreto y el modelo en tiempo continuo además el diagrama de Bode en la Fig. 2. 4.

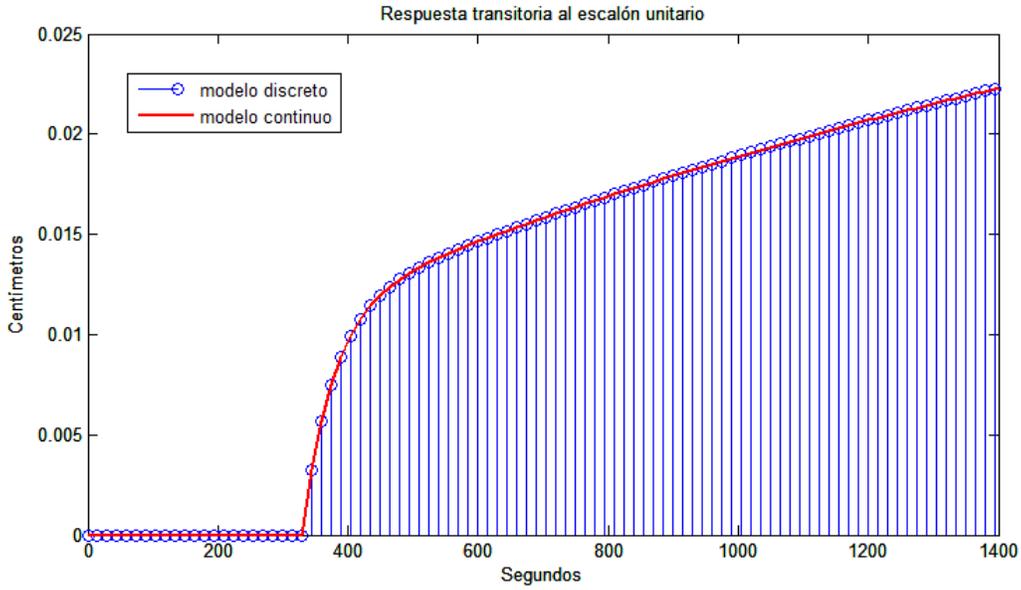


Fig.2. . Resposta comparativa de los modelos en tiempo continuo y tiempo discreto.

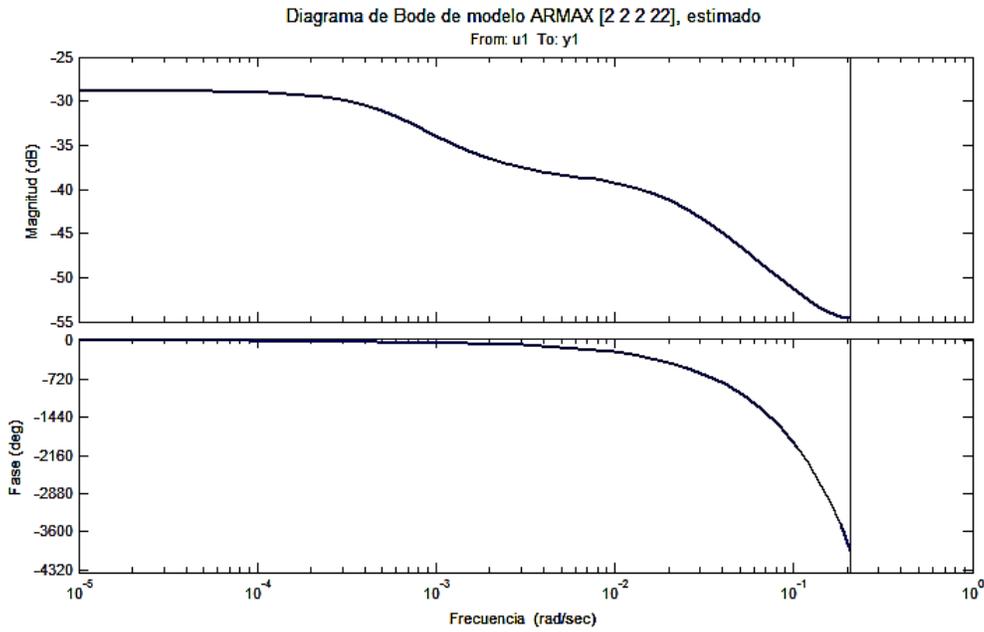


Fig.2. 4. Diagrama de Bode de modelo ARMAX validado.

En la Fig.2. se muestra la respuesta comparativa entre el equivalente continuo del modelo ARMAX [2 2 2 22] y su equivalente de orden reducido

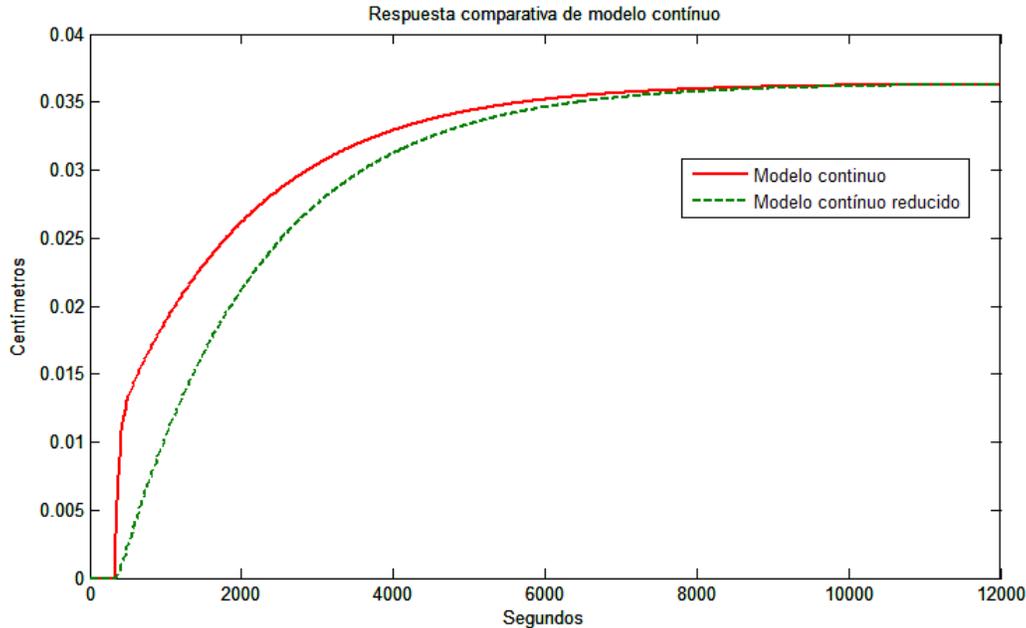


Fig.2. . Respuesta comparativa a un escalón de los modelos.

La influencia de un cero en el numerador es no significativa y no afecta de manera drástica la dinámica de la planta. Por tanto puede ser obviada para simplificación de cálculos en el diseño del controlador.

El modelo equivalente simplificado en tiempo continuo, obtenido bajo un régimen de operación establecido en el experimento, será considerado como un modelo nominal. Si se actúa el denominador se obtendrán las constantes de tiempo en tanto en el numerador se obtiene la ganancia estática de acuerdo a

$$G_{\min}(s) = \frac{0.0359}{(47.3s + 1)(1820s + 1)} e^{-330} \tag{2.44}$$

2.6 Conclusiones preliminares

- Se realizó la identificación del primer tramo del canal principal Imperial de Aragón ubicado en España. Se realizaron los pasos del procedimiento de identificación y diseño de la PA. Posteriormente se desarrolló la identificación paramétrica para la determinación de los coeficientes de las estructuras de modelos seleccionados y la validación de los modelos.
- Se obtuvo el modelo matemático que mejor describe el comportamiento dinámico del canal, consiguiéndose un modelo ARMAX discreto de segundo orden, del cual se obtuvo su equivalente en tiempo continuo que posee un retardo de tiempo de 0 s.
- Los resultados obtenidos de la validación del modelo ARMAX, permitieron una buena descripción del comportamiento dinámico del modelo en comparación con los datos de entrada salida que no fueron utilizados para la estimación de parámetros. Además la correlación cruzada entre la entrada y los residuos y la

autocorrelación de los residuos, permitiendo que la selección de esta estructura sea considerada pese a un FIT inferior respecto de otras estructuras de modelos.

- El modelo ARMAX obtenido se encuentra referenciado a un punto aguas abajo alejado y al final del tramo y se corresponde con un determinado régimen de fluctuación. Sin embargo, cuando las condiciones de operación varían también variarán los parámetros del modelo. Por tanto, en el diseño e implementación de controladores se deberá tomar en cuenta la robustez del sistema de control frente a diferentes regímenes de descarga.
- Los resultados de este capítulo muestran que la derivación de modelos mediante técnicas de identificación de sistemas, posibilita obtener un modelo lineal de la planta de estudio bajo determinadas condiciones y en un punto de referencia, lo cual resulta muy útil para el diseño de controladores, así como de sistemas de predicción.



CAPÍTULO 3: DESARROLLO DE UN SISTEMA DE CONTROL NEURO-DIFUSO DE LA DISTRIBUCIÓN DE AGUA EN UN TRAMO DE UN CANAL PRINCIPAL DE RIEGO

3.1 Introducción

El propósito del presente capítulo consiste en realizar el diseño y propuesta de implementación mediante simulación de un sistema de control neurodifuso de la distribución de agua en un tramo de canal de riego, cuyo comportamiento dinámico fue obtenido en el capítulo anterior. La elección de un controlador neurodifuso con predictor de mit NDP , fue tomada teniendo en cuenta que un controlador inteligente basado en autoaprendizaje y conocimiento, resulta apropiado para una planta cuyos parámetros internos se encuentran continuamente variando, debido a distintos regímenes de descarga de agua en el canal. En trabajos anteriores recientes, principalmente los realizados por Rivas Pere y Felicitas 2014, 2011, 2000, Litrico y Fromion 2000, se propusieron técnicas de control racional robusto y controladores óptimos basados en H_∞ para abordar el problema de la variación de los parámetros internos con resultados satisfactorios. Sin embargo su diseño en algunos casos resulta difícil debido a una elevada carga matemática o a la sintonización de parámetros adicionales. En contraste, un controlador neurodifuso tiene las ventajas de contar con capacidad de autoaprendizaje, robustez y adaptación con un menor costo computacional y un diseño de entendimiento más intuitivo. Por otro lado, el tramo de canal al presentar una gran variación del retardo de tiempo, conduce a la utilización de un predictor de mit en la estructura del controlador neurodifuso, para garantizar una buena respuesta del sistema.

3.2 Fundamentación de la estrategia de control a utilizar

En muchos casos reales, las plantas son efectivamente tan complejas que resulta casi imposible o inapropiado controlarlas utilizando controladores convencionales. El tratamiento de estas plantas con un entorno de incertidumbre, en general imposible de formular en un riguroso marco matemático, ha conducido al desarrollo de los controladores inteligentes Santos, 2011. En este sentido, los controladores neurodifusos han mostrado efectividad en numerosas aplicaciones en el control de procesos Liu et al., 2004.

En general un controlador neurodifuso tiene mejor desempeño que un controlador convencional con parámetros fijos PID, ya que puede adaptarse mejor a los cambios producidos en los parámetros de la planta. Por otro lado un tramo de un canal principal de riego presenta un comportamiento altamente no lineal y con la presencia de perturbaciones descargas laterales y tipos de incertidumbre variación de parámetros internos.

Al combinar la lógica difusa y redes neuronales se aportan las propias ventajas de cada una de ellas. Es así que las reglas Fuzzy pueden expresar fácilmente el conocimiento experto dentro de una forma lingüística. Mientras las redes neuronales poseen una buena habilidad de aprendizaje y pueden aproximar funciones no lineales con precisión. La red neurodifusa y por tanto hereda las propiedades de ambas lógicas, proporcionando la capacidad de incorporar conocimiento experto dentro del controlador y también del entrenamiento con datos experimentales. Por tanto los controladores neurodifusos proveen una herramienta muy útil para el desarrollo de controladores adaptativos no lineales,

puestos que tienen ventaja sobre controladores convencionales como el self-tuning, ya que después de recibir entrenamiento para ciertos puntos de operación, no requieren un reentrenamiento. Además se realiza una suave transición de un modelo local a otro. En contraste, los controladores convencionales self-tuning tienden a ser resintonizados cada vez que el punto de operación cambia y no existe algún mecanismo de almacenamiento y adaptación de parámetros previos que ocasiona un desempeño inferior en el control de sistemas no lineales. Liu et al., 2004 .

A esto se suma el hecho de que no se necesita considerar una zona de incertidumbre limitada por diferentes condiciones de operación regimenes de descarga del tramo de canal, como suele ocurrir en el caso del diseño de un controlador robusto (Rivas Perez et al., 2014a) y que en muchos casos resulta muy conservador en la obtención de controladores de orden elevado que dificultar a su implementación práctica. Otro punto importante a considerar en los controladores neuro-difusos, es su capacidad de procesamiento en paralelo y la distribución de la información a lo largo de toda la red, lo cual permite la rápida obtención de la señal de control.

Todos los aspectos mencionados, permiten establecer que un controlador neuro-difuso, representa una solución al problema de control de la distribución de agua en un tramo principal de riego, con características que lo hacen inteligente y a la vez robusto sin las complicaciones de una pesada carga matemática. Además se mantendrá una acción de control eficiente con capacidad de adaptación que se produce intrínsecamente con la variación de parámetros internos de la planta. Finalmente se utiliza la utilidad complementaria de un predictor difuso para la predicción del retardo de tiempo producido en el transporte de agua en el tramo del canal.

3.3 Conceptos básicos de control neuro-difuso

3.3.1 Redes neuronales

El objetivo de las redes neuronales consiste en modelar las redes de neuronas biológicas del cerebro humano. Desde un punto de vista científico, estos modelos son extremadamente simplificados. Sin embargo proporcionan una visión sobre los principios de la computación biológica. Los modelos de las redes neuronales artificiales tienen muchos nombres en la literatura como modelos conexionistas, modelos de procesamiento distribuido paralelo, sistemas neuromórficos, redes asociativas, etc. Estas estructuras neurobiológicas cerebrales encontradas en la naturaleza, tienen la característica de ser sistemas desordenados capaces de guardar información. La forma en que desarrollan su trabajo es esencialmente distinta de la utilizada por las computadoras convencionales. Los procesadores microscópicos del cerebro (neuronas), operan en paralelo y presentan cualitativamente más ruido que los elementos que conforman a las computadoras. No ejecutan un programa fijo con base en un conjunto previamente especificado de datos, sino que comunican señales a través de retransmisores que llamamos sinápsis, que llegan a centros de conexión llamados los cuerpos de las neuronas y desde los cuales surgen señales eléctricas a través de canales conocidos con el nombre de axones.

La importancia de cada sinápsis en el proceso de retransmisión se actualiza continuamente y lo mismo ocurre con algunas propiedades intrínsecas de las neuronas, proporcionando un sistema de autopropagación y adaptación que sustituye a la programación externa de los sistemas de cómputo comunes. Existe así una dinámica de la sinápsis y de las neuronas en el cual los programas y los datos cambian todo el tiempo.

3.3.1.1 Esquema general de un sistema de red neuronal artificial (RNA)

Los elementos individuales de cálculo que conforman los modelos neuronales artificiales reciben el nombre de elementos de procesamiento o neuronas artificiales. Cada unidad realiza un trabajo muy simple, primero recibe impulsos de otras unidades o de estímulos externos y calcula una señal de salida que propaga a otras unidades y además realiza un ajuste de sus pesos. Este tipo de modelo es inherentemente paralelo en el sentido de que varias unidades pueden realizar sus cálculos al mismo tiempo.

La primera descripción formal de la síntesis del modelo de una neurona basado en consideraciones de alta simplicidad del modelo biológico, fue formulada por Warren McCulloch y Walter Pitts en 1942 Anderson, 1995. Este modelo de neurona caracterizado por su formalismo, elegancia y precisión matemática (ver Fig. 1.1). El modelo de cada neurona estaba dotado de un conjunto de entradas y salidas, donde cada entrada tenía un peso W_i asociado, posteriormente se sumaban todas las entradas que previamente fueron multiplicadas por sus respectivos pesos para luego volver a multiplicar el resultado por una función no lineal llamada función de activación y obtener la salida del sistema (Dávila, 2011).

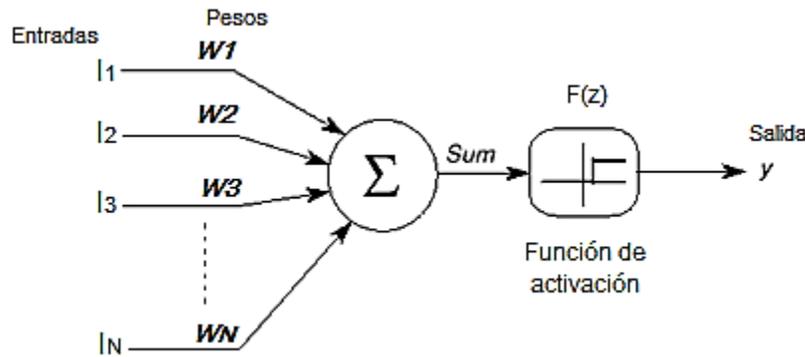


Fig. 1.1. Representación de una neurona.

En la Fig. 1.1, Los distintos i_i son las variables de entrada, y es la salida de la neurona y $f(z)$ es la función de activación proporciona estados binarios de 0 o 1, La función de la salida y función de activación estarán representadas por la expresión 1.1 y 1.2 (Dávila, 2011)

$$y = f\left(\sum_{k=1}^N w_k i_k\right) \tag{1.1}$$

$$f(z) = \begin{cases} 0 & z < 0 \\ 1 & z \geq 0 \end{cases} \tag{1.2}$$

sin embargo, debido a las limitaciones que presentaba la utilización de una sola neurona, se continuaron las investigaciones y en 1969 una publicación de Rumelhart y McClelland mostraba los beneficios del uso de múltiples capas de neuronas acondicionadas, con un modelo de red que se muestra en la Fig. 1.2 (Dávila, 2011)

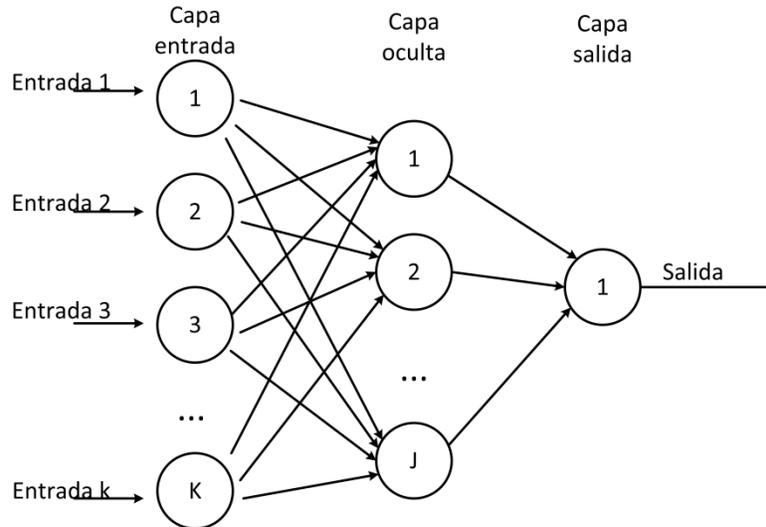


Fig. .2. Es uema de una red neuronal multicapa.

En estos es uemas e isten tipos de neuronas

- Neuronas de la capa de entrada on a uellas ue reciben in ormaci n del e terior.
- Neuronas delas capas ocultas o intermedias Tienen contacto directo con las neuronas de entrada y salida y son las encargas de reali ar el traba o de la red.
- Neuronas de la capa de salida la cual proporciona el resultado del traba o de la red al e terior.

El n mero de capas intermedias y el n mero de neuronas de cada capa dependerá del tipo de aplicaci n al ue se vaya a destinar la red neuronal. Las neuronas de entrada no reali an ning n cálculo, estas simplemente distribuyen las entradas x_k con los pesos w_{jk} acia las neuronas de la capa oculta Dávila, 201 . En cada neurona de la capa oculta, se reali a la sumatoria de todas las entradas ue llegan asta la misma, de acuerdo a . Dávila, 201

$$h_k = \sum_k w_{jk} \cdot x_k ,$$

na unci n de trans erencia no lineal es aplicada sobre el resultado anterior tambi n conocida como unci n de activaci n , de tal orma ue se obtiene a la salida de cada neurona de la capa oculta o capa intermedia la e presi n .4 Dávila, 201

$$X_j = f(z) = f\left(\sum_k w_{jk} \cdot x_k\right), \quad . 4$$

La unci n de activaci n calcula la activaci n de la unidad en unci n de la entrada total y la activaci n previa, aun ue en la mayor parte de los casos es simplemente una unci n no decreciente de la entrada total. Los tipos de unci n de activaci n más empleados son unci n escal n, unciones con umbral lineal, unciones sigmoides y gaussianas. Dic as unciones a aden no linealidad y estabilidad a la red neuronal. En las Fig. . , Fig. .4 Fig. .4 y Fig. . , se muestran las unciones de activaci n más utili adas

sigmoide Tipo 1

$$y = \frac{1}{1 + e^{-p}}$$

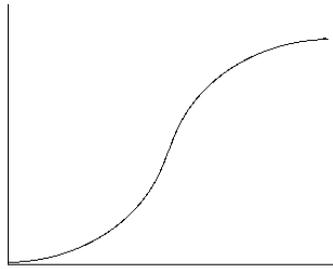


Fig. . . Funci n sigmoide tipo 1.

sigmoide tipo2

$$y = \frac{1}{1 + e^{-p}} - 1$$

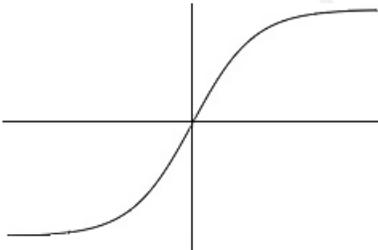


Fig. .4. Funci n sigmoide tipo 2.

aussiana

$$y = e^{-p^2}$$

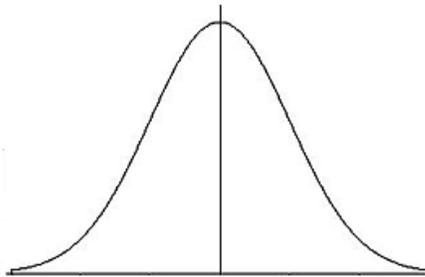


Fig. . . Funci n aussiana.

La salida de la red neuronal se obtiene en la capa de salida ue puede ser del tipo lineal o no lineal. Cada neurona de la capa de salida se encuentra conectada a di erentes entradas ue a su ve , son las salidas de cada neurona de la capa intermedia, obteni ndose como valor total de entrada a cada neurona de la capa de salida Dávila, 201

$$H_i = \sum_j w_{ij} \cdot x_j = \sum_j w_{ij} f\left(\sum_k w_{jk} \cdot x_k\right)$$

entonces, cada variable de salida tendrá la orma de . Dávila, 201

$$Y_i = f(H_i) = f\left(\sum_j w_{ij} f\left(\sum_k w_{jk} \cdot x_k\right)\right)$$

Para el caso de modelamiento de sistemas basados en técnicas de regresión, se suele emplear funciones lineales en esta última capa (Dávila, 2011).

3.3.1.2 Entrenamiento de la red neuronal artificial (RNA)

El entrenamiento de la red neuronal artificial (RNA), es con toda seguridad la característica más importante de una red neuronal. Durante este aprendizaje o entrenamiento de la red y por la aplicación de un conjunto de entradas, se van ajustando adecuadamente internamente todos y cada uno de los pesos asociados a cada rama para obtener la salida deseada o al menos una salida consistente, de forma que la red pueda responder después por sí sola a situaciones diferentes a las aprendidas. Este aprendizaje que tiene lugar en las redes neuronales es el factor que determina las ventajas de estos sistemas. Este proceso sistemático permite el ajuste de los pesos de las conexiones entre unidades de procesamiento w_{jk} y W_{ij} . El número de neuronas en la capa intermedia, interviene directamente en la eficiencia del aprendizaje. Si bien se han escrito varias recomendaciones al respecto, muchas veces se termina de iniciando por prueba y error (Dávila, 2011). Se debe tomar en consideración el número de iteraciones, el error que se pueda alcanzar y el menor tiempo de procesamiento. Cuando la red ya está entrenada y se desea verificar los pesos logrados, se puede correr una única iteración con un ratio de aprendizaje de cero. A este proceso se le denomina "validación" (Dávila, 2011).

Según Chen (1995), 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 (Dávila, 2011).

La 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 (Dávila, 2011). Típicamente la función de costo a minimizar está expresada por (Dávila, 2011)

$$J = \min E_{w,W}^2 = \frac{1}{2} \left(\sum_n \sum_i [y_i(x_n) - Y_i(x_n)]^2 \right) \quad . 10$$

$$J = \frac{1}{2} \left(\sum_n \sum_i \left[y_i(x_n) - f\left(\sum_j W_{ij} f\left(\sum_k w_{jk} \cdot x_{k,n}\right)\right) \right]^2 \right) , \quad . 11$$

donde

$Y_i(x_n)$, es la salida de la red neuronal y $y_i(x_n)$, es la salida deseada que usualmente es un dato conocido (Dávila 2011). El aprendizaje de una red neuronal se realiza mediante el ajuste de los pesos que conectan sus neuronas y es sinónimo de entrenamiento (Dávila, 2011).

3.3.1.3 Acondicionamiento de los datos

Debido a que las funciones de activación que conforman las unidades de procesamiento o neuronas de la capa intermedia, 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 (Dávila, 2011).

Cuando los datos son empleados en sus unidades de ingeniería, si los rangos de los valores numéricos son muy distintos, se corre el riesgo de saturar a las funciones de activación, para evitar esta situación se hace un escalamiento de los datos para llevarlos a valores entre 0 y 1 de tal forma de homogenizar la magnitud de los datos. Luego de obtener las salidas de la red neuronal, se realiza el proceso inverso y allí se obtendrán los valores de salida con las unidades de ingeniería deseada (Dávila, 2011).

3.3.2 Lógica difusa

Los humanos cuando toman decisiones tienden a trabajar con conceptos vagos e imprecisos los cuales pueden ser recuentemente expresados de manera lingüística. Uno de los caminos del modelamiento de la toma de decisiones realizado en un proceso fue propuesto por Zadeh y está basado en la teoría de la aproximación de razonamiento lo cual habilita ciertas clases de sentencias a ser tratadas matemáticamente. Las primeras investigaciones del Prof. Zadeh, fueron respecto a la utilización de herramientas matemáticas para representar un lenguaje humano y un conocimiento humano. Fue el primero en introducir y aplicar la teoría fuzzy en el campo del control automático (Ponce, 2010).

El uso de reglas fuzzy provee un camino que es muy similar al razonamiento humano. En nuestro lenguaje diario nosotros usamos muchos términos que implican gravedad e imprecisión. Resulta de gran importancia representar y manipular inferencias con esta clase de inferencia. Algunos ejemplos son: una persona es alta y es joven. Los términos como alto y joven son difusos ya que no pueden ser exactamente definidos, aun que como humanos nosotros utilizamos esta inferencia para tomar decisiones (Ponce, 2010).

La arquitectura típica de un control lógico difuso de uso FCL se muestra en la Fig. 3.3.1. El cual se compone de cuatro principales componentes: un difusificador, la base de reglas difusa, el motor de inferencia y el desfusificador.

3.3.2.1 Funciones de pertenencia de conjuntos difusos

La función de pertinencia de un conjunto difuso consiste en un conjunto de pares ordenados $F = \{(u, u_f(u)) / u \in U\}$ si la variable es discreta, o una función continua si no lo es. El valor de $u_f(u)$ indica el grado en que el valor u de la variable está incluida en el concepto representado por la etiqueta F . Para la definición de estas funciones de pertenencia ver Fig. 3.3.2 se utilizan convencionalmente ciertas familias de formas estándar, por coincidir con el significado lingüístico de las etiquetas más utilizadas. Las más recurrentes son la función de tipo trapecoidal, singleton, triangular, exponencial y tipo π (Navarro 2011). Las más representativas se muestran en la Fig. 3.3.3.

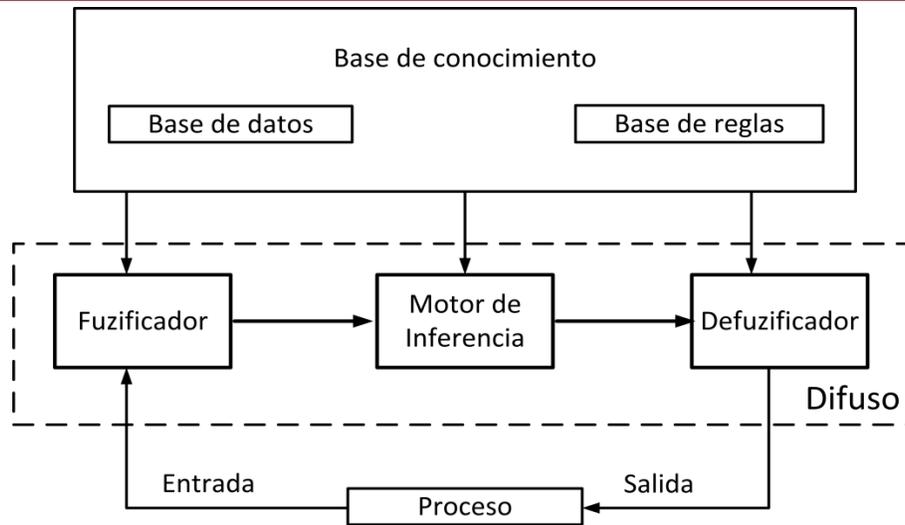


Fig. . . Es uema de sistema de control di uso.

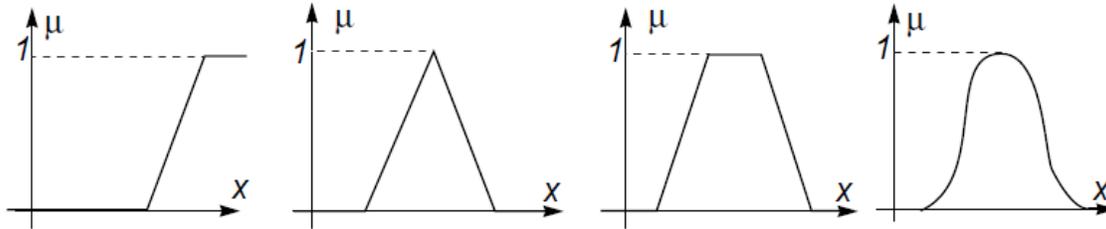


Fig. . . Estructuras de unci ones de miembros a.

3.3.2.2 Fuzificador

La inferencia difusa también como en el caso de la lógica clásica se ocupa del razonamiento formal con proposiciones, pero a diferencia de estas, los valores de las proposiciones pueden tomar valores intermedios entre verdadero y falso. De esta forma, los conjuntos difusos también representan predicados en la lógica proposicional. El objetivo de la lógica difusa es proporcionar un soporte formal al razonamiento basado en el lenguaje natural, que se caracteriza por tratarse de un razonamiento de tipo aproximado, que hace uso de unas proposiciones que a su vez expresan información de carácter impreciso Navarro, 2011 .

- **Fuzificador singleton:** Es el método de difusificación más utilizado, principalmente en sistemas de control, consiste en considerar los valores propios discretos como conjuntos borrosos. De otra manera para cada valor de entrada se define un conjunto A' que lo soporta, con una función de pertinencia $\mu_{A'}(x) = 1, x' = x$ y $\mu_{A'}(x') = 0$, para todos los otros $x' \in U$ en los que $x' \neq x$ Navarro, 2011 .
- **Fuzificador no singleton:** Este método de difusificación utiliza una función exponencial del tipo siguiente Navarro, 2011

$$\mu_{A'}(x') = a * \exp \left[- \left(\frac{x' - x}{\sigma} \right)^2 \right] \quad . 12$$

La función con forma de campana está concentrada en el valor de entrada, dispone de una anchura σ y una amplitud a . El indicador, mapea en conjunto de entradas de uso en la entrada del espacio y el de indicador, mapea agregando la salida del conjunto de uso un simple punto en la cresta de la salida en el espacio Navarro, 201 .

3.3.2.3 Base de reglas difusas

La base de reglas se puede representar bien como una tabla de las reglas que la forman, o bien como una memoria asociativa de uso MAD. Las MAD son matrices que representan la consecuencia de cada regla de entrada para cada combinación de dos entradas. Formalmente una base de reglas de uso es una colección de reglas $R^{(l)}$ con el formato Navarro, 201

$R^{(l)}$ si x_1 es F_1^l y...y x_n es F_n^l luego y es G^l ,
donde F_1^l y G^l son conjuntos de usos en $U_i \subset R$ y $V \subset R$, respectivamente y $x = (x_1, \dots, x_n)^T \in U_1 \times \dots \times U_n$ e $y \in V$ son variables lingüísticas Navarro, 201 .

Este formato de reglas se conoce como de uso puro o de tipo Mamdani, por ser quien primero las propuso en 1974 Navarro, 201 .

3.3.2.4 Desfuzificador

El des indicador asigna un valor numérico a la variable de salida, a partir del conjunto de uso obtenido en el motor de inferencia, e isten aproximadamente dos tipos de técnicas de de indicación que son de indicador por máximos y de indicador de medida de centros, este último utiliza algunos aspectos del primer momento de inercia en tanto el de máximos, e trae el valor para el cual la regla de uso alcanza su máximo valor. Los momentos del centro de área y el peso central de área pertenecen a la primera técnica. Nosotros nos enfocaremos en el método del centro de área o centro de gravedad que se utilizará en el diseño del controlador. Este método procesa el centro de área de la región bajo la curva de entrada por una regla de uso y selecciona el primer componente. Si C es la regla de uso y si es integrable, luego el valor de u indicado de C por este método es

$$z_0 = \frac{\int_a^b C(z) dz}{\int_a^b C(z) dz} \quad . 1$$

donde a, b es un intervalo de variación de C .

La salida de la regla obtenida produce un valor numérico que como ejemplo se muestra en la Fig. . .

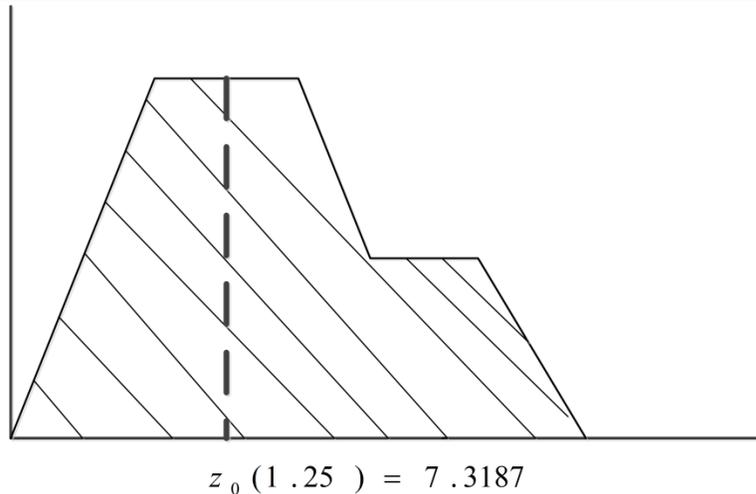


Fig. . . Cálculo de valor numérico por método del centro de área.

3.3.3 Control Neuro-difuso

hasta ahora se discutieron dos distintos métodos para construir controladores de usos y redes neuronales. Frecuentemente la elección del método está relacionada por el dato disponible en la planta bajo estudio. Si los datos están en pares de números, nosotros podremos inclinarnos a usar el método de redes neuronales y si los datos son reglas un método de uso podrá ser apropiado. Las redes neuronales proveen de capacidad de aprendizaje, mientras en los métodos de usos proveen capacidad legible de conocimiento representacional. Integrando estas dos metodologías en un control en particular y en tecnologías inteligentes en general, se puede obtener mejores tecnologías que tienen la ventaja de tomar las fortalezas de cada tecnología y al mismo tiempo sobrepasar algunas de las limitaciones presentes en cada una de ellas con el uso de técnicas individuales. Las redes neuronales pueden ser utilizadas en el modelado y control para proveer a los sistemas de usos capacidades de aprendizaje. Estos métodos conllevan a un sistema de control neuro difuso.

Sualmente los controladores neuro difusos son sistemas de inferencia difusa implementados bajo la estructura de las redes neuronales. La idea del diseño de un sistema neuro difuso es replantar las ventajas de la lógica difusa, como una rama importante de la teoría difusa establecida, que emula el proceso de razonamiento humano y la habilidad de aprendizaje de una red neuronal.

La estructura de un sistema de control neuro difuso es del tipo Mamdani. Para la aplicación de las reglas difusas en este tipo de controladores híbridos, se define un motor de inferencia que tomará en cuenta un operador conocido como norma T. Esto implica que la multiplicación de cada peso sináptico de cada regla dentro del operador norma T proporciona un equivalente dado por

$$\mu_i = \mu_{i1}\mu_{i2} \dots \mu_{in} \tag{14}$$

La parte consecuente de las reglas son valores precisos y la evaluación del centro de gravedad está dado por

$$y = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_i w_i}{\sum_{i=1}^n \mu_i} = \frac{\mu_1}{\sum_{i=1}^n \mu_i} w_1 + \frac{\mu_2}{\sum_{i=1}^n \mu_i} w_2 + \dots + \frac{\mu_n}{\sum_{i=1}^n \mu_i} w_n = \sum_{i=1}^n \bar{u}_i w_i \quad . 1$$

Diagrama general de este sistema con dos entradas y una salida es representado en la Fig. . . .

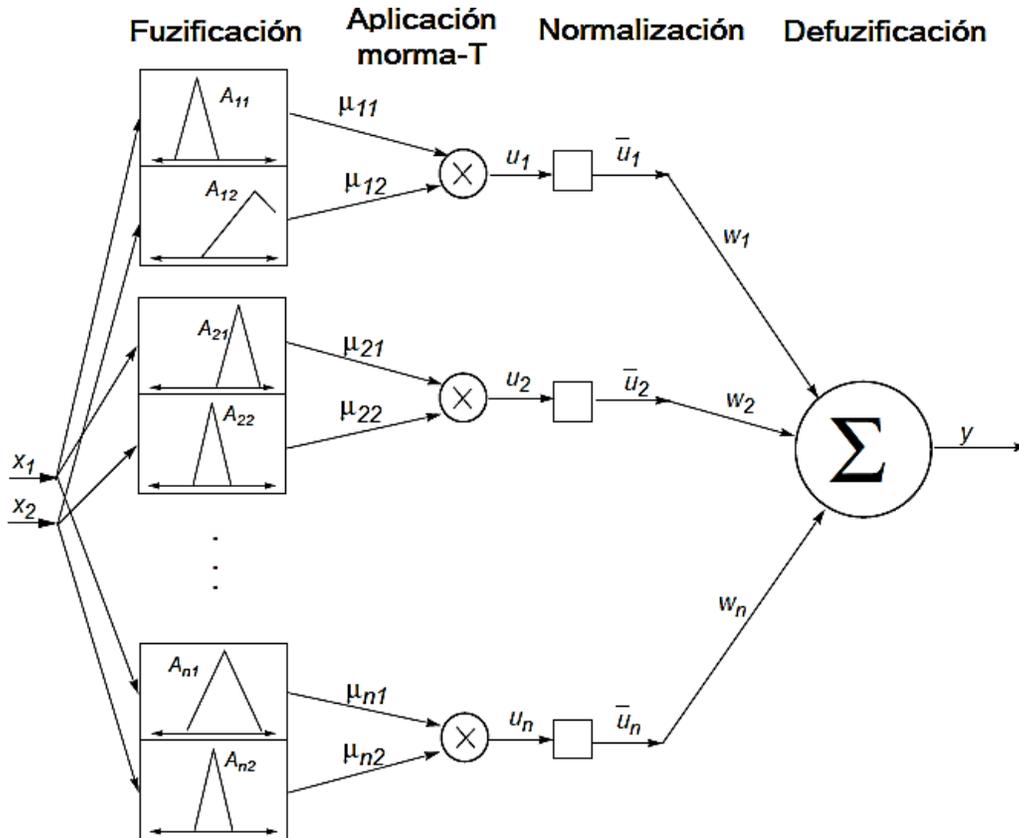


Fig. . . . Es diagrama general de un controlador neuro difuso.

La primera capa realiza una identificación de cada regla lingüística y esto es una capa de neuronas. Las salidas de esta capa son valores de las funciones de membresía y son alimentadas a la siguiente capa, la cual por medio del operador norma T realiza la multiplicación. El resultado es un disparo sináptico lanzado por cada regla y en la siguiente capa estos valores obtenidos son normalizados. La última capa calcula la salida global como la suma ponderada de las señales de entrada.

3.4 Síntesis del sistema de control neuro-difuso de la distribución de agua en un tramo de un canal principal de riego

Para controlar el nivel de agua aguas abajo del tramo del canal objeto de estudio, se tendrán en cuenta los siguientes pasos

- Obtención del modelo discreto de la planta a partir del modelo continuo identificado en el capítulo 2.
- Obtención de una base de reglas para el diseño del controlador neuro difuso.
- Implementación básica de un controlador neuro difuso.
- Diseño de un observador discreto para estimación de variables de estado.

- Implementación de un controlador neuro difuso, basado en el predictor de MIT.

Los pasos mencionados, describen los requerimientos de diseño necesarios para lograr un comportamiento robusto, con buen desempeño ante la presencia de retardos de tiempo variables y variación de parámetros internos como consecuencia de diferentes regímenes de descarga.

3.4.1 Obtención del modelo discreto de la planta para el diseño del controlador neuro-difuso

Cada controlador hoy en día es implementado digitalmente. Esto significa que la salida del sistema es muestreada a un periodo dado T_s . Esta señal muestreada es proporcionada a un controlador de tiempo discreto, el cual está seguido por un retenedor de orden cero para proveer una entrada en cada tiempo al sistema continuo. En este sentido resulta necesario discutir acerca del impacto de la discretización en un sistema continuo y los problemas de efectos de submuestreo que pueden producirse Litrico and Romion, 2000.

Los sistemas de control en tiempo discreto, podrán operar parte en tiempo discreto y parte en tiempo continuo. Es así, que en sistemas de control, algunas señales aparecen como funciones de tiempo discreto y otras señales como funciones de tiempo continuo Ogata, 2000.

Los sistemas de control en tiempo discreto, funcionan con señales muestreadas a intervalos regulares y periódicos de tiempo, lo que se conoce como periodo de muestreo. Dicho de otra manera, la discretización consiste en tomar muestras de una señal analógica a una frecuencia o tasa de muestreo constante, para cuantificarlas posteriormente.

Un muestreador, convierte una señal en tiempo continuo en un tren de pulsos que ocurren en los instantes $t = 0, T, 2T, \dots$, donde T es el periodo de muestreo. Sin embargo, entre dos instantes consecutivos de muestreo, el muestreador no transmite información. La retención de dato es un proceso de generación de una señal en tiempo continuo $h(t)$ de una secuencia de tiempo discreto $x(kT)$. Un circuito retenedor convierte la señal muestreada en una señal en tiempo continuo, el cual de forma aproximada reproduce la señal aplicada al muestreador. La señal $h(t)$ durante el intervalo de tiempo $kT \leq t < (k+1)T$ podrá ser aproximada por un polinomio en τ de la siguiente manera

$$h(kT + \tau) = a_n \tau^n + a_{n-1} \tau^{n-1} + \dots + a_1 \tau + a_0 \tag{3.1}$$

donde $0 \leq \tau < T$. La señal $h(kT)$ debe de ser igual a $x(kT)$. Por tanto, (3.1) puede ser escrita como

$$h(kT + \tau) = a_n \tau^n + a_{n-1} \tau^{n-1} + \dots + a_1 \tau + x(kT) \tag{3.1}$$

Si el circuito retenedor de dato es un interpolador polinomial de orden n , entonces se le denomina retenedor de n orden. Es así, si $n = 1$, se tiene un retenedor de primer orden. El retenedor de primer orden mantiene el valor de la muestra anterior, así como el de la presente y mediante interpolación predice el valor de la muestra siguiente. A medida que

el orden n aumenta se obtiene una mayor exactitud, sin embargo esto implica un mayor costo computacional. En contraste el más simple de los retenedores $n = 0$, denominado retenedor de orden cero ZOH , convierte la señal muestreada en una señal continua de amplitud constante entre dos periodos de muestreo y se encuentra representada por la ecuación

$$G_{ZOH} = \frac{1 - e^{-Ts}}{s} \quad . 1$$

3.4.1.1 Representación espacio-estado de la planta en tiempo continuo y selección del periodo de muestreo

La representación de espacio estado es un modelo matemático de la planta tramo del canal de riego, descrito mediante un conjunto de entradas, salidas y variables de estado relacionadas por ecuaciones diferenciales de primer orden, que se combinan en una ecuación diferencial matricial de segundo orden. Tomando en consideración la función de transferencia obtenida en el capítulo 2, el modelo equivalente en espacio estado, se representa como

$$\begin{bmatrix} \dot{x}' \\ \dot{x}'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1.161 \cdot 10^{-5} & -0.02169 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ x' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 4.165 \cdot 10^{-7} \end{bmatrix} u(t) \quad . 1$$

$$y(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ x' \end{bmatrix}, \quad . 20$$

donde el vector de estado está compuesto por

x variación de nivel de agua aguas abajo

x' velocidad de variación del nivel aguas abajo.

La obtención de la representación espacio estado en tiempo continuo representa un paso previo, para la obtención de su equivalente en tiempo discreto representación espacio estado mediante ecuaciones en diferencias.

Por otro lado se considera que el espectro de frecuencia de un sistema discretizado está limitado. Entonces, el periodo de muestreo puede ser seleccionado de acuerdo al ancho de banda del sistema controlado, el cual está dado por la frecuencia de corte ω_c Litrico and Fromion, 2000. La regla clásica establece que la frecuencia de Nyquist

$$\omega_N = \frac{\pi}{T_s}, \quad . 21$$

tiene que ser a 20 veces más grande que la frecuencia de corte Litrico and Fromion, 2000. Esta regla conlleva a

$$0.15 \leq T_s \omega_c \leq 0.5. \quad . 22$$

Según el teorema de Nyquist o de muestreo, para poder replicar con exactitud la forma de una onda es necesario que la frecuencia de muestreo sea superior al doble de la máxima frecuencia a muestrear. Por otro lado el efecto denominado aliasing se produce cuando la frecuencia de muestreo es inferior a la frecuencia Nyquist y por lo tanto esta es

insuficiente para la realización correcta del muestreo apareciendo frecuencias fantasma que no tienen relación con la frecuencia original.

Si consideramos la expresión

$$f_{Nyquist} \geq N * f_{Corte} \tag{2}$$

donde

$$\begin{aligned} f_{Nyquist} & \text{ Frecuencia de muestreo} \\ f_{Corte} & \text{ Frecuencia de corte planta} \\ N & \geq 2 \end{aligned}$$

se deriva [24]

$$T_s \leq \frac{2\pi}{N * W_c} \tag{24}$$

El periodo de muestreo necesario para garantizar la reconstrucción de la señal analógica tiene que ser menor de acuerdo a [24] además se debe considerar el efecto de que el sistema de control necesita la toma de decisiones que garanticen una reacción apropiada del actuador. Por ello se escoge un periodo de muestreo de $T_s = 0.5$ s, el cual no implica un mayor costo computacional en el diseño e implementación del controlador digital además permitirá acciones rápidas de control suficientes para la planta considerada objeto de estudio.

3.4.1.2 Representación espacio-estado de la planta en tiempo discreto

La representación espacio estado del sistema en tiempo discreto, se expresa mediante ecuaciones en diferencias. Teniendo la representación en espacio estado en tiempo continuo del sistema, se obtiene su equivalente en tiempo discreto mediante el comando “c2d” de Matlab; por defecto queda incluido el retenedor de orden cero ‘ZOH’ a la entrada del sistema.

Para un $T_s = 0.5$ s, se obtiene el equivalente discreto

$$\begin{bmatrix} x(k+1) \\ x(k+2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.999998553982425 & 0.497298284085210 \\ -0.000005773633078 & 0.989212154200617 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k) \\ x(k+1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.051874790692926 * 10^{-6} \\ 0.207124735321490 * 10^{-6} \end{bmatrix} u(k) \tag{2}$$

$$y(k) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k) \\ 0 \end{bmatrix} \tag{2}$$

El modelo discreto de la planta, permite la identificación de las variables de estado, en las cuales se fundamenta el diseño del controlador neuro difuso.

3.4.2 Obtención de una base de reglas para el diseño del controlador neuro-difuso

La obtención de reglas basadas en el conocimiento humano, necesita de los siguientes pasos

3.4.2.1 Determinación del rango de variación de parámetros

El sistema discreto obtenido de segundo orden, posee dos variables de estado. Estas se definen de la siguiente manera

$x(k)$ variación del nivel de agua, aguas arriba o alejado

$x(k+1)$ velocidad de variación del nivel de agua, aguas arriba o alejado

Definimos el rango de variación de nivel aguas arriba o alejado de 7 cm en total 14 cm de variación. Por otro lado, para la determinación del rango de variación de la velocidad, se realizó una prueba de respuesta del sistema en tiempo continuo a una señal escalón en la cual se obtenga la máxima variación de nivel. Entonces, para una variación de nivel máximo de 7 cm , se obtuvo un tiempo de establecimiento de aproximadamente 10000 seg tiempo en lograr alcanzar dicha variación. La velocidad de variación de nivel de flujo depende también de la velocidad del flujo de agua a lo largo del tramo y esta a su vez depende de la variación de los regímenes de descarga regulados mediante la compuerta aguas arriba. Para una aproximación práctica y debido a que la definición de un rango de valores de una variable no necesita ser muy preciso, la velocidad de variación de nivel de agua aguas arriba o alejado, se obtiene como

$$v(t) = V(t) + c(t) \quad . 2$$

$V(t)$ velocidad de variación de nivel aguas arriba o alejado constante

$c(t)$ velocidad variable de las olas de desplazamiento

No se considerará el efecto de las olas, por tal motivo solo se tendrá una velocidad constante aproximada de

$$v(t) = \frac{7 \text{ cm}}{10000 \text{ s}}$$

$$v(t) = 0.0007 \text{ cm/s} \quad . 2$$

La variación de nivel de 7 cm , requiere una mayor apertura de la compuerta y por tanto un mayor flujo de agua también. Consecuentemente un mayor flujo produce un incremento de la velocidad, esto aplica perfectamente a la variación de nivel de agua aguas arriba o alejado. En este sentido la velocidad obtenida representa la máxima velocidad aproximada obtenida cuando el nivel aguas arriba o alejado varía.

Con la definición del rango de valores de cada variable de estado, solo queda definir el rango de variación de la variable de control, que es la apertura de la compuerta equivalente aguas arriba. Para poder obtener una variación de nivel deseado aguas arriba o alejado. Dicha compuerta debe de tener un rango de apertura y cierre que en nuestro caso se estableció en 0 cm .

3.4.2.2 Partición de rango y definición de términos lingüísticos

La partición del rango de valores se realiza en un número impar y buscando la simetría entre sus partes. Para obtener una acción de control efectiva se plantea la división de partes sin embargo este número de particiones inicial puede ser reducido a un número menor y particiones, como se mostrará más adelante. Las uniones de pertinencia o membresía conforman cada una de las divisiones e indican el grado de pertinencia de una variable variable de estado dentro de los conjuntos conformados.

Además cada una de las particiones generadas, tiene asociada una etiqueta lingüística. En el caso de la variación de nivel las etiquetas de cada subconjunto se describen como

NM variación de nivel muy bajo
 N variación de nivel bajo
 NP variación de nivel un poco bajo
 NC variación de nivel en reposo
 NPA variación de nivel poco elevado
 NA variación de nivel elevado
 NMA variación de nivel muy elevado.

En tanto, las particiones de la velocidad de variación de nivel, se describen como

VM velocidad de variación de nivel muy baja
 V velocidad de variación de nivel baja
 VP velocidad de variación de nivel poco baja
 VC velocidad de variación de nivel en reposo
 VPA velocidad de variación de nivel poco elevada
 VA velocidad de variación de nivel elevada
 VMA velocidad de variación de nivel muy elevada.

Por otro lado se definen las uniones de membresía, para el rango de variación de apertura o cierre de la compuerta equivalente aguas arriba del tramo del canal objeto de estudio. El número de particiones, se corresponden con la de las variables de estado obtenidas anteriormente. Las etiquetas de cada unión de membresía, se detallan como sigue

MC muy cerrado
 CE cerrado
 PC poco cerrado
 E estacionario reposo
 PA poco abierto
 A abierto
 MA muy abierto.

Las particiones de cada rango de variación se muestran en la Fig. 10.

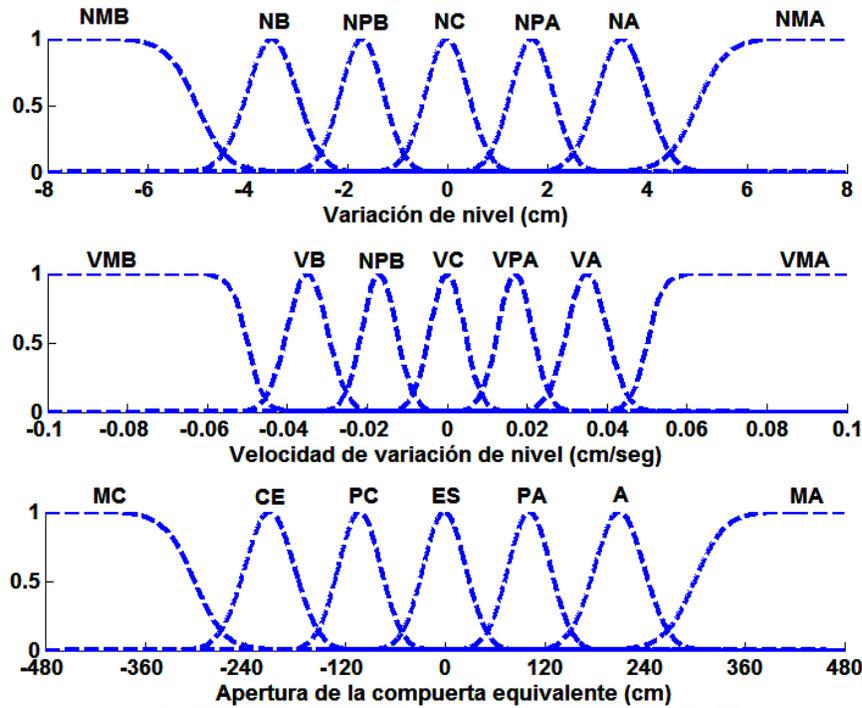


Fig. .10. Particiones de los rangos de variación de parámetros .

De manera complementaria se obtienen las particiones reducidas de los rangos de variación. Por tanto al considerar y particiones, se tienen las Fig. .11 y Fig. .12.

3.4.2.3 Elaboración de base de reglas

La construcción de una base de reglas, se fundamenta en la experiencia y conocimiento humano. Si se tiene en consideración la dinámica del sistema en un punto aguas abajo alejado del tramo de canal de riego. Para mantener la variación de nivel a un valor deseado, se necesita la regulación del flujo de agua que recorre el tramo. Para ello se realiza la apertura o cierre de la compuerta equivalente actuador. Para asegurar una respuesta lo más rápida posible en un sistema de dinámica lenta se requiere una acción de control de cierto modo agresivo. Esto se traduce en la apertura o cierre de la compuerta a valores de variación considerablemente elevados. Sin embargo se deberá tener en cuenta también, la calidad de la respuesta, la cual en lo posible deberá presentar el mínimo sobreimpulso posible. De acuerdo a esto, se tendrá una base de reglas preliminar basada en particiones que se muestra en la Tabla .1.

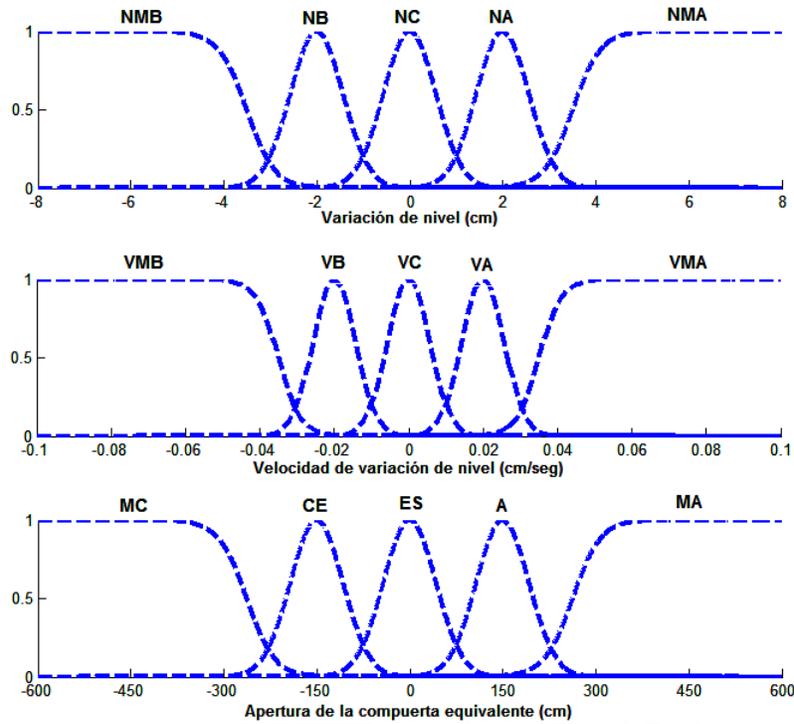


Fig. .11. Particiones de los rangos de variación de parámetros .

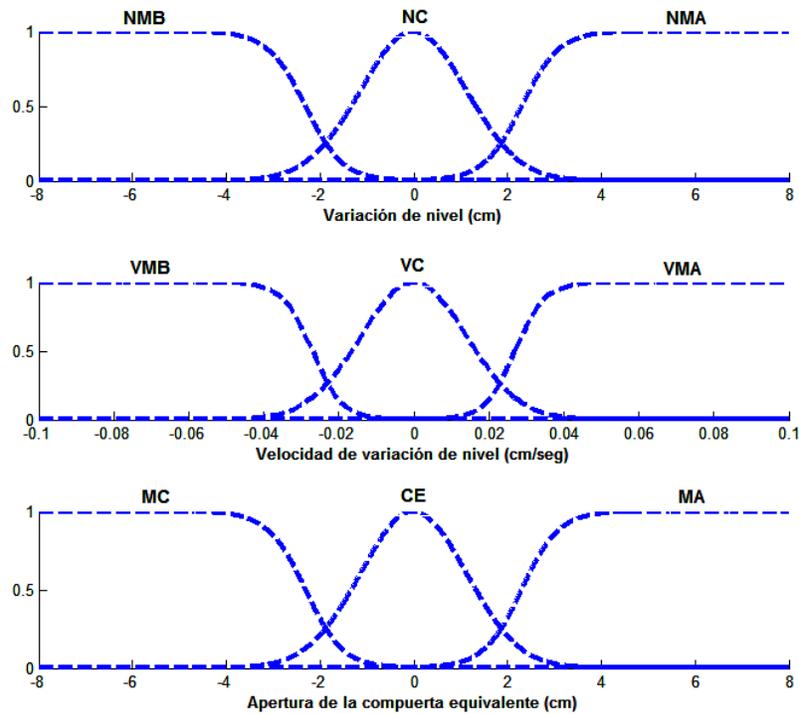


Fig. .12. Particiones de los rangos de variación de parámetros .

Variación de Nivel X

Tabla .1. Base de reglas en términos lingüísticos

Velocidad de variación de nivel = X'		NMB	NB	NPB	NC	NPA	NA	NMA
	VMB	MA	A	A	E	CE	CE	MC
	VB	MA	A	A	E	CE	CE	MC
	VPB	MA	A	A	E	CE	CE	MC
	VC	MA	A	A	E	CE	CE	MC
	VPA	MA	A	A	E	CE	CE	MC
	VA	MA	A	A	E	CE	CE	MC
	VMA	MA	A	A	E	CE	CE	MC

El grado de apertura o cierre de la compuerta equivalente, tiene dependencia directa con la base de reglas establecida. Si asociamos las presiones lingüísticas a cada unción de miembros, entonces podemos escoger valores numéricos dentro de cada rango en concordancia con dichas presiones. De acuerdo a esto se tendrá la Tabla .2, equivalente

Tabla .2. Base de reglas en términos cuantitativos

	MB	B	PB	C	PA	A	MA
MVB	00cm	200cm	200cm	0cm	200cm	200cm	00cm
VB	00cm	200cm	200cm	0cm	200cm	200cm	00cm
PVB	00cm	200cm	200cm	0cm	200cm	200cm	00cm
R	00cm	200cm	200cm	0cm	200cm	200cm	00cm
PVA	00cm	200cm	200cm	0cm	200cm	200cm	00cm
VA	00cm	200cm	200cm	0cm	200cm	200cm	00cm
MVA	00cm	200cm	200cm	0cm	200cm	200cm	00cm

Por otro lado con el planteamiento de la reducción de particiones, en la base de reglas se generará la Tabla .3, Tabla .4, Tabla .5 y Tabla .6.

Tabla .3. Base de reglas con reducción a particiones

	NMB	NB	NC	NA	NMA
VMB	MA	MA	E	MC	MC
VB	MA	MA	E	MC	MC
VC	MA	MA	E	MC	MC
VA	MA	A	E	MC	MC
VMA	MA	MA	E	MC	MC

Tabla 2.4. Base de reglas en términos cuantitativos con reducción a particiones

	NMB	NB	NC	NA	NMA
VMB	00cm	00cm	0cm	00cm	00cm
VB	00cm	00cm	0cm	00cm	00cm
VC	00cm	00cm	0cm	00cm	00cm
VA	00cm	00cm	0cm	00cm	00cm
VMA	00cm	00cm	0cm	00cm	00cm

Tabla 3. Base de reglas con reducción a particiones

	NMB	NC	NMA
VMB	MA	E	MC
VC	MA	E	MC
VMA	MA	E	MC

Tabla 3. Base de reglas en términos cuantitativos con reducción a particiones

	NMB	NC	NMA
VMB	00cm	0cm	00cm
VC	00cm	0cm	00cm
VMA	00cm	0cm	00cm

La reducción de la base de reglas, requiere un menor número de neuronas para su implementación sin embargo se necesitan acciones de control dentro de los límites de operación del actuador. Por ello se escogieron valores lingüísticos e intervalos.

3.4.3 Implementación básica de un controlador neuro-difuso sin retardo de tiempo

El controlador neuro difuso, considerado como un controlador híbrido, el cual combina las propiedades de la experiencia humana y autoaprendizaje no toma en cuenta, para la construcción de una base de reglas, los efectos del retardo de tiempo debido a la dinámica de la planta. Por tanto en una primera instancia, se desarrolla un sistema de control para la planta ficticia sin considerar el retardo de tiempo y las pruebas correspondientes de comportamiento considerando los efectos del retardo.

3.4.3.1 Diagrama de bloques de controlador

Como se vio anteriormente, el controlador neuro difuso tiene la estructura básica tipo Mamdani, la cual tiene la ventaja de tener altos niveles de interpretabilidad para el análisis de datos para la obtención de un conocimiento estructurado del proceso bajo estudio (Mingard y Cai, 2000). La estructura del controlador neuro difuso diseñado se muestra en la Fig. 3.1.

Las uniones de membresía o particiones están constituidas por las uniones de activación de cada neurona ubicada en la capa de entrada no lineales. No se considera la presencia de bias umbral y todos los pesos sinápticos w_{ij} , serán iguales a la unidad. En la capa intermedia se encuentran tantas neuronas como número de reglas establecidas en la Tabla 2.1 pueden ser reducidas también de acuerdo a la Tabla 3.3 y

Tabla . 5 . En el dise ño preliminar se tendrán 4 neuronas con unci ñon de activaci ñon lineal. Cada neurona de la capa intermedia recibe una multiplicaci ñon de las salidas de la “j” ésima neurona por la “j+r” esima neurona, donde r representa al número de particiones o unci ñones de miembros a.

Para obtener el valor normalizado a la salida de cada neurona de la capa intermedia, se requiere determinar primero la suma total de acuerdo a

$$Suma = \sum_{j=1}^{j=r} \sum_{k=1}^{k=r} (Nx(k+r,1) * u(k+r,k+r)) * (Nx(j,1) * u(j,k)) * v(k+(j-1),1) . \quad . 2$$

A la salida de la capa intermedia se encuentra el bloque normalizador, el cual garantiza salidas inferiores a la unidad. Después del bloque normalizador se encuentra un bloque en el cual se obtiene la suma total normalizada, en la forma

$$SumaNormalizada = \frac{\sum_{j=1}^{j=r} \sum_{k=1}^{k=r} (Nx(k+r,1) * u(k+r,k+r)) * (Nx(j,1) * u(j,k)) * v(k+(j-1),1)}{Suma} . \quad . 0$$

A la salida del bloque sumador se encuentra el bloque actor de a uste, que consiste en una constante asignada de manera experimental, la cual es determinada cuando se establece el funcionamiento con unto del controlador y la planta en la o cerrado. Para su determinaci ñon se eval úa el comportamiento experimental del sistema, encontrándose un valor de a uste que permita un buen acercamiento a la salida deseada.

3.4.3.2 Descripción matemática de funciones de membresía y obtención de la variable de control

Cada partici ñon o unci ñon de membresía en un controlador neuro di uso, está constituida por una unci ñon de activaci ñon de una neurona de la capa de entrada. Considerando que dichas particiones están conformadas por unci ñones de activaci ñon sigmoideas en los extremos y gaussianas en la parte intermedia . Las unci ñones no lineales que las representan teniendo en cuenta las diferentes particiones, se muestran en la Tabla . . , Tabla . . y tabla . . .

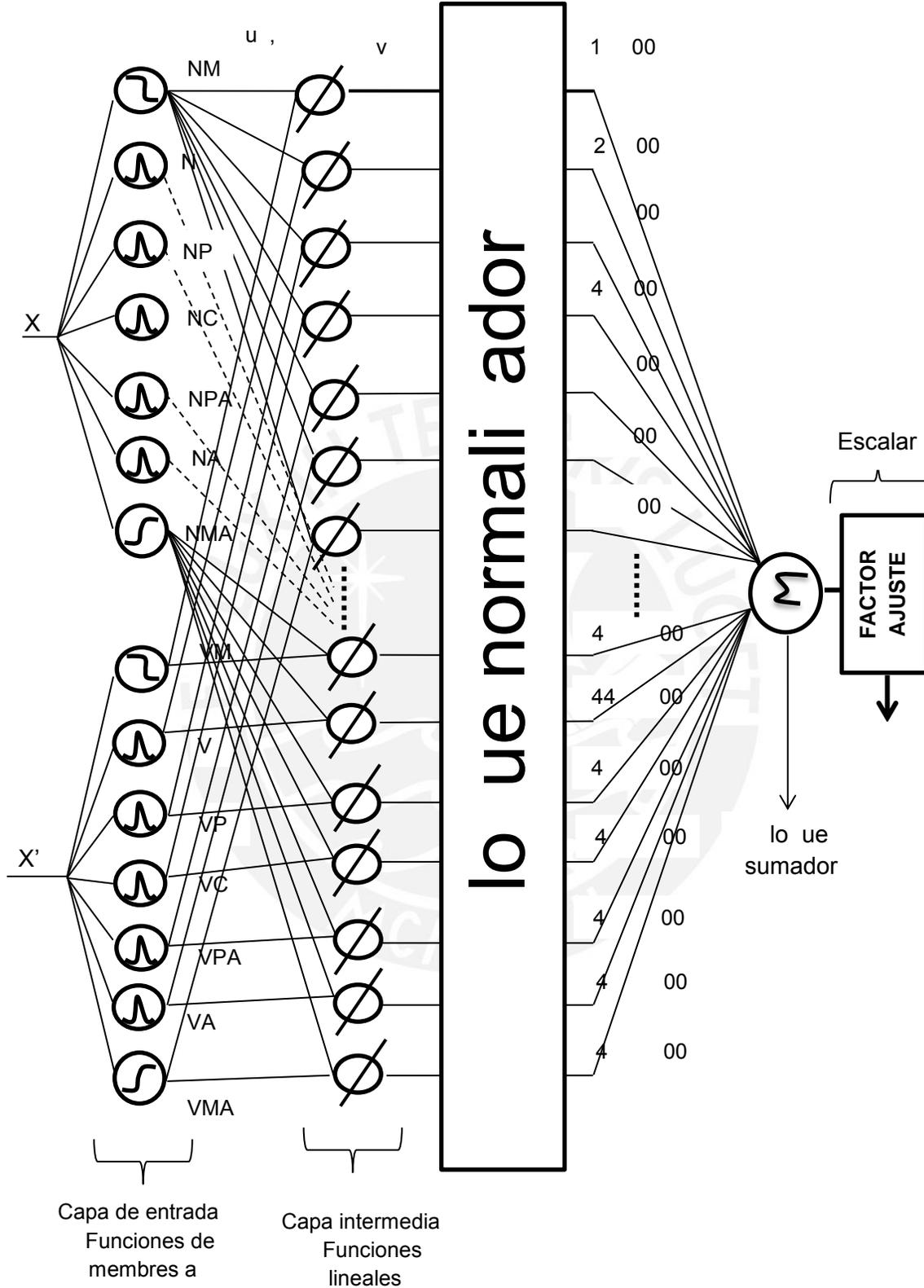


Fig. .1 . Estructura de controlador neuro di uso desarrollado.

Tabla . . . Funciones de activación de cada neurona de la red neuro di usa particiones

Función de activación	Representación matemática
Para rango de posición	$fpx_1 = \frac{1}{1 + e^{\frac{x+5}{0.3}}}$ $fpx_2 = e^{-\left(\frac{x+3.5}{0.7}\right)^2}$ $fpx_3 = e^{-\left(\frac{x+1.7}{0.6}\right)^2}$ $fpx_4 = e^{-\left(\frac{x}{0.6}\right)^2}$ $fpx_5 = e^{-\left(\frac{x-1.7}{0.6}\right)^2}$ $fpx_6 = e^{-\left(\frac{x-3.5}{0.7}\right)^2}$ $fpx_7 = \frac{1}{1 + e^{-\left(\frac{x-5}{0.3}\right)}}$
Para rango de velocidad	$fpx'_1 = \frac{1}{1 + e^{\frac{xp+0.05}{0.002}}}$ $fpx'_2 = e^{-\left(\frac{xp+0.035}{0.007}\right)^2}$ $fpx'_3 = e^{-\left(\frac{xp+0.017}{0.006}\right)^2}$ $fpx'_4 = e^{-\left(\frac{xp}{0.006}\right)^2}$ $fpx'_5 = e^{-\left(\frac{xp-0.017}{0.006}\right)^2}$ $fpx'_6 = e^{-\left(\frac{xp-0.035}{0.007}\right)^2}$ $fpx'_7 = \frac{1}{1 + e^{-\left(\frac{xp+0.05}{0.002}\right)}}$

Tabla . . . Funciones de activación de cada neurona de la red neuro di usa particiones

Función de activación	Representación matemática
Para rango de posición	$fpx_1 = \frac{1}{1 + e^{\frac{x+3.5}{0.3}}}$ $fpx_2 = e^{-\left(\frac{x+2}{0.8}\right)}$ $fpx_3 = e^{-\left(\frac{x}{0.8}\right)}$ $fpx_4 = e^{-\left(\frac{x-2}{0.8}\right)}$ $fpx_5 = \frac{1}{1 + e^{-\left(\frac{x-3.5}{0.3}\right)}}$
Para rango de velocidad	$fpx_1 = \frac{1}{1 + e^{\frac{x+0.035}{0.003}}}$ $fpx_2 = e^{-\left(\frac{x+0.02}{0.008}\right)}$ $fpx_3 = e^{-\left(\frac{x}{0.008}\right)}$ $fpx_4 = e^{-\left(\frac{x-0.02}{0.008}\right)}$ $fpx_5 = \frac{1}{1 + e^{-\left(\frac{x-0.035}{0.003}\right)}}$

Tabla . . . Funciones de activación de cada neurona de la red neuro di usa particiones

Función de activación	Representación matemática
Para rango de posición	$fpx_1 = \frac{1}{1 + e^{\frac{x+2.3}{0.4}}}$ $fpx_2 = e^{-\left(\frac{x}{1.6}\right)}$ $fpx_3 = \frac{1}{1 + e^{-\left(\frac{x-2.3}{0.4}\right)}}$
Para rango de velocidad	$fpx_1 = \frac{1}{1 + e^{\frac{x+0.027}{0.004}}}$ $fpx_2 = e^{-\left(\frac{x}{0.02}\right)}$ $fpx_3 = \frac{1}{1 + e^{-\left(\frac{x-0.027}{0.004}\right)}}$

3.4.3.3 Sistema de control en lazo cerrado y pruebas de funcionamiento

hasta a ora, se estableci la estructura básica del controlador neuro di uso. Cada neurona tendrá por unci n de activaci n una unci n de membres a. Cada unci n de activaci n puede ser insertada en el bloque “FCN” de Simulin constituyendo una neurona. Con la implementaci n de los blo ues sumador normalizador y actor de a uste, se obtiene una completa representaci n de nuestro controlador en imulin .

si consideramos en una primera etapa, un sistema sin la inclusi n del retardo sistema iticio entonces se puede evaluar una respuesta inicial y en base a ello calcular el actor de a uste, asta obtener la respuesta deseada.

El sistema de control para esta primera apro imaci n, se representa por el diagrama de blo ues mostrado en la Fig. .14.

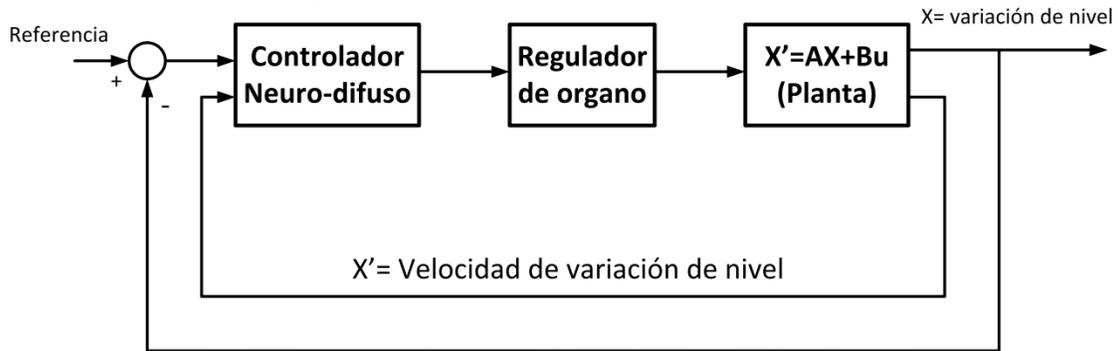


Fig. .14. Diagrama de blo ues de controlador neuro u y sin retardo.

si se establece un valor de la re erencia igual a 4cm para variaci n de nivel , para el cálculo del actor de a uste entonces luego de algunas pruebas ue implicaron la eliminaci n del error en estado estacionario, se establece el valor de 12 000 cantidad adimensional . El actor de a uste obtenido, permite un buen comportamiento de la respuesta. De esta manera se obtiene la respuesta temporal del sistema de control mostrado en la Fig. .1 .

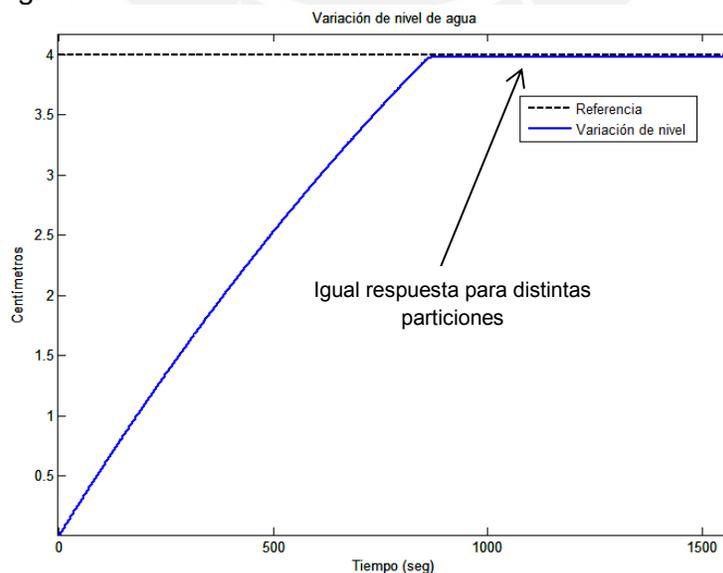


Fig. .1 . Respuesta temporal del sistema de control para la planta sin retardo de tiempo.

La Fig. .1 obtenida es la misma para diferentes particiones y bases de reglas establecidas , y particiones . Por tanto, resulta suficiente el empleo de tres neuronas en la capa de entrada para garantizar la buena dinámica del sistema de control. Teniendo en cuenta lo anterior, se tiene el diagrama simplificado de acuerdo a la Fig. .1 .

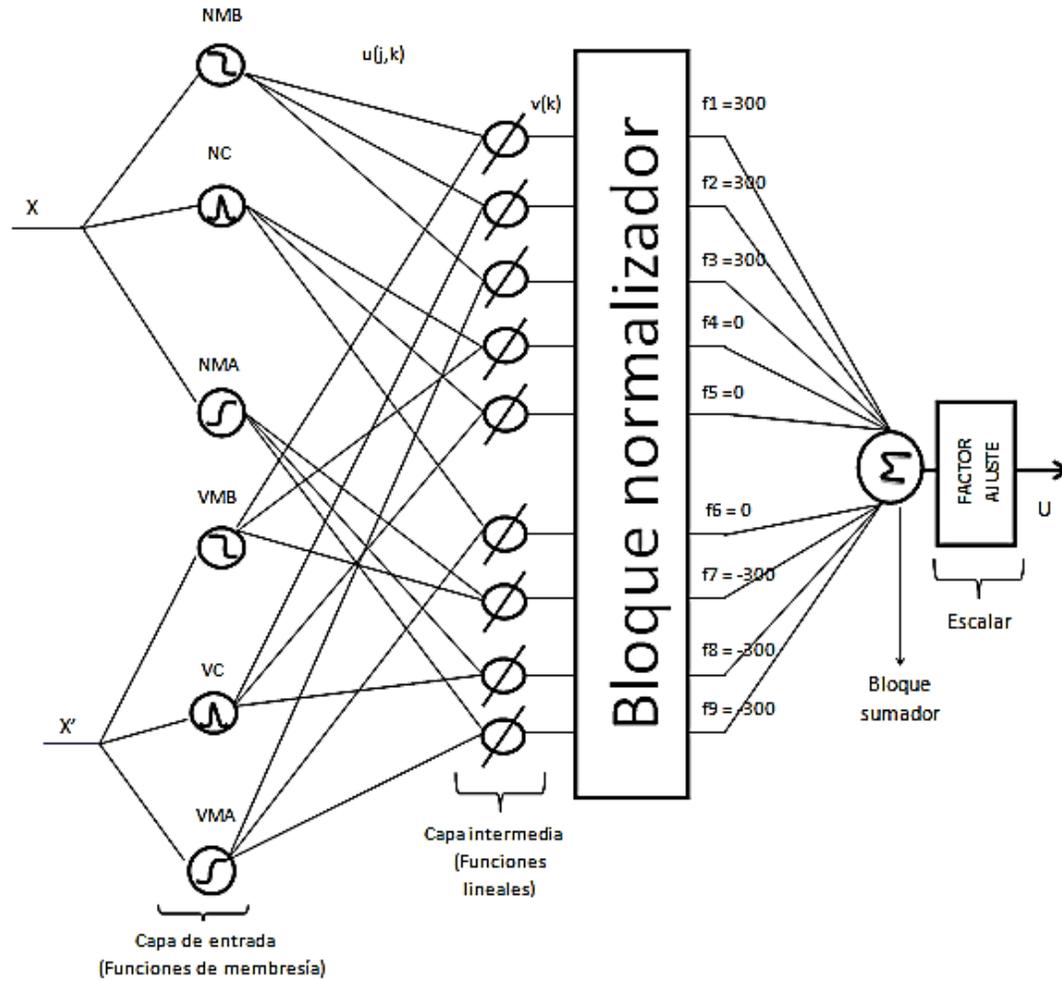


Fig. .1 . Estructura del controlador neuro de uso reducido (tres neuronas en la capa de entrada).

La respuesta del sistema de control presenta un buen comportamiento, lo que se traduce en un sobreimpulso menor al 1% y un tiempo de establecimiento inferior a los 1000 s. El sistema de control planteado tiene una representación de espacio estado discreto (ecuaciones en diferencias) que es el equivalente de un retenedor de orden cero más la planta en tiempo continuo, de acuerdo a la Fig. .1 .

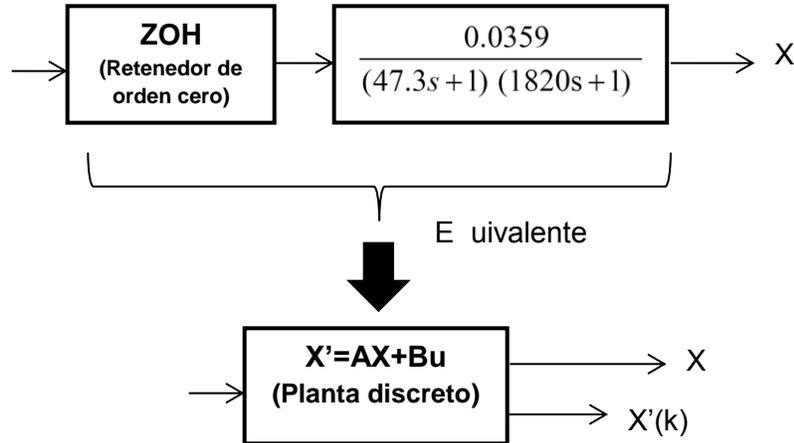


Fig. .1 . Representaci n en espacio estado e uivalente en tiempo discreto.

En la representaci n en espacio estado en tiempo discreto, las variables de estado necesitan ser medidas para de esta manera el controlador neuro di uso, pueda tomar acciones de control al conocer el comportamiento de dic as variables. i consideramos el sistema de control en la o cerrado de la Fig. .14 se obtiene la gr á ica de la velocidad de variaci n de nivel ue se muestra en la Fig. .1 .

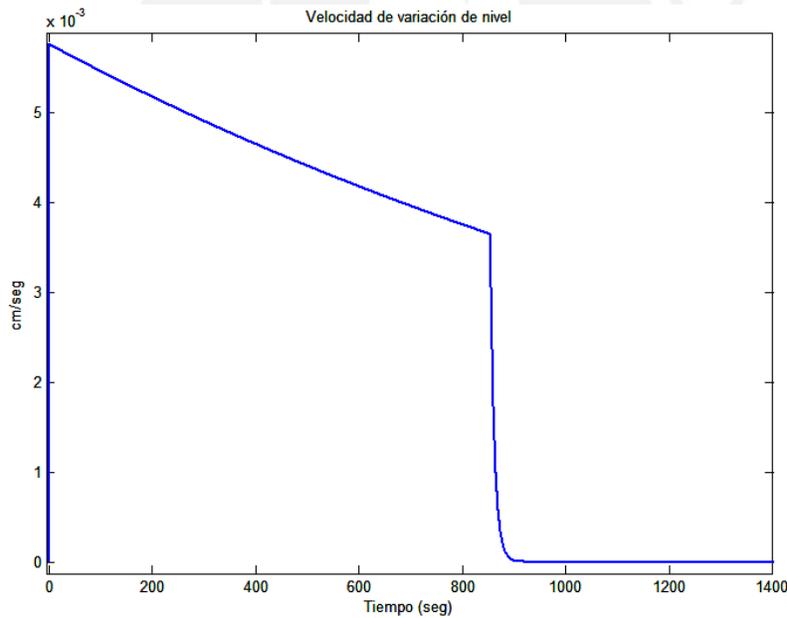


Fig. .1 . Velocidad de variaci n de nivel segunda variable de estado .

La velocidad de variaci n de nivel es muy ba a, ya ue la tasa de cambio de la variaci n de agua aguas aba o ale ado y al inal del tramo presenta un despla amiento vertical parsimonioso. Cuando la variaci n del nivel de agua alcanza el valor de referencia deseado, esta se mantiene constante, entonces la velocidad de la variaci n de nivel se ace cero.

Tambi n resulta conveniente anali ar el comportamiento del actuador. La compuerta e uivalente interact a directamente con la cantidad y lu o de agua presente en el tramo

del canal. Si se considera su alta inercia y operación a baja frecuencia, entonces la compuerta tendrá que realizar movimientos de apertura y cierre, en tiempos no pequeños y con movimientos suaves. Esto garantizará también la durabilidad de sus partes móviles incluyendo el motor de accionamiento y mecanismos asociados. En la Fig. 1, se muestra la respuesta de la compuerta equivalente

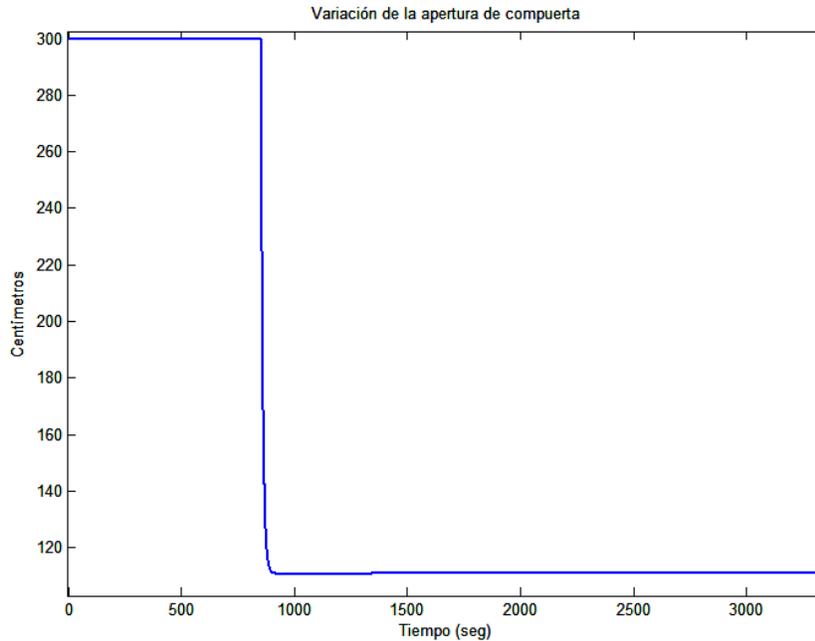


Fig. 1. Grado de apertura de compuerta equivalente.

La compuerta equivalente se mantiene abierta hasta su valor tope durante casi 800 seg, después de los cuales se genera un movimiento de descenso y se estabiliza aproximadamente a 111 cm, necesarios para alcanzar los 4cm de variación de nivel de agua, aguas abajo o alado.

El desarrollo planteado sin la consideración inicial del retardo de tiempo de la planta, permite evaluar el comportamiento inicial de la red neuronal de uso para la determinación del actor de ajuste. Sin embargo, la consideración del retardo que constituye la parte intrínseca de la planta, necesita ser analizada. El diagrama de bloques mostrado en la Fig. 20, contempla dicho retardo

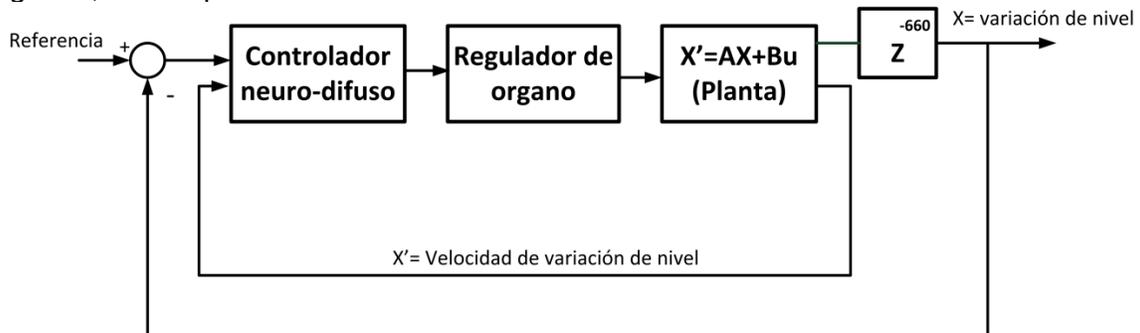


Fig. 20. Diagrama de bloques de sistema de control Neuro-fuzzy con retardo.

Considerando el tiempo de muestreo $T_s = 0.1$ s el retardo en tiempo discreto, está representado por 10 periodos de retardo equivalente a 1 s. Si se establece la misma

se al de referencia para la variación de nivel aguas abajo aleado 4 cm, la respuesta obtenida para dicho sistema real, se muestra en la Fig. .21.

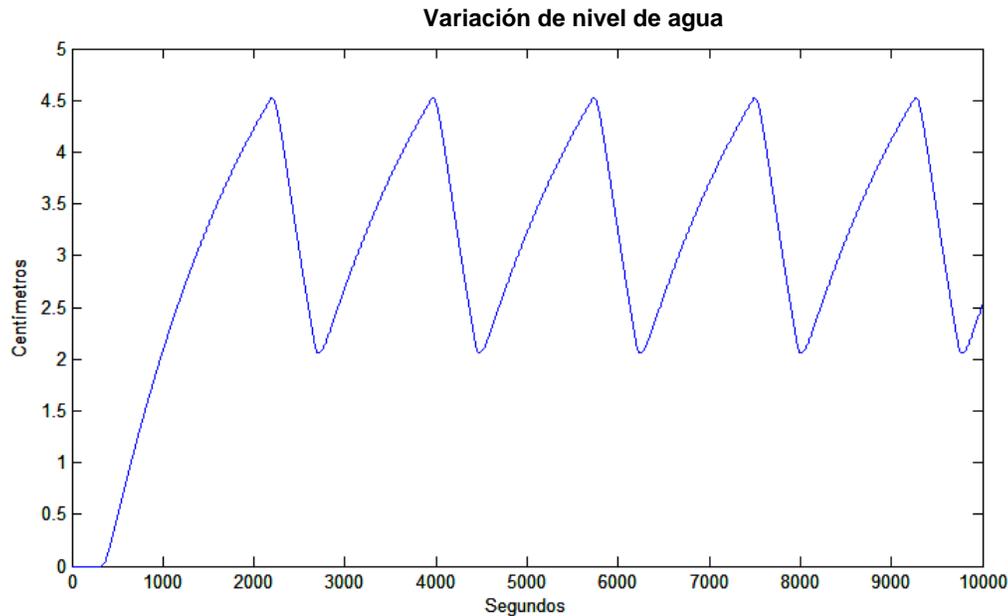


Fig. .21. Respuesta del sistema de control neuro di uso con retardo de tiempo en la planta.

La respuesta obtenida, presenta una gran variación a la salida. Con un comportamiento oscilatorio sostenido en el tiempo y sobreimpulsos positivos y negativos. Por tal motivo queda demostrado, que el controlador neuro di uso con estructura Mamdani frente a un gran retardo de tiempo de la dinámica de la planta no es capaz de regular la salida de manera efectiva. Entonces se tendrá que plantear algún método que elimine los efectos del retardo, para ello se considerará el predictor de Smith como alternativa de solución, que se detalla más adelante.

3.4.3.4 Diseño de un observador discreto para la estimación de variables de estado

El sistema discreto obtenido, necesita de la medición de sus dos variables de estado para la determinación de acciones de control por parte del controlador neuro di uso. Sin embargo, en el canal principal de riego solo se cuenta con un sensor, que mide la variación de nivel aguas abajo aleado. Ahora bien, la velocidad de variación del agua en el tramo del canal aguas abajo aleado se considera una variable no medible pero si observable, entonces para su estimación se hará uso de un observador de variables de estado, el cual estima todas las variables de estado, independientemente de si algunas variables de estado se encuentran disponibles para su medición directa observador de orden completo.

Un observador de estado, estima las variables de estado en base a la medición de las variables de salida y de control. Su diseño es posible solo si se establece la condición de observabilidad. La observabilidad se ocupa del problema de determinar el estado de un sistema dinámico a partir de las observaciones de los vectores de salida y de control en un número finito de periodos de muestreo.

La observabilidad de un sistema puede ser calculada de acuerdo a

$$V = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \\ \vdots \\ \vdots \\ CA^{n-1} \end{bmatrix} \quad . \quad 1$$

donde A y C , son las matrices de transición y salida de la planta discretizada. V debe ser una matriz cuadrada $n \times n$ orden del sistema y no singular para que el sistema pueda ser completamente observable. De acuerdo a esto, y considerando las matrices en tiempo discreto para el tramo principal de canal de riego

$$A = \begin{bmatrix} 0.999998553982425 & 0.497298284085210 \\ -0.000005773633078 & 0.989212154200617 \end{bmatrix} \quad . \quad 2$$

$$C = [1 \quad 0]. \quad .$$

La matriz de observabilidad se obtiene como

$$V = \begin{bmatrix} C \\ CA \end{bmatrix} \quad . \quad 4$$

si sustituimos los valores numéricos respectivos, se tiene

$$V = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0.4973 \end{bmatrix}, \quad .$$

El cálculo de la determinante es
 $\det(V) = 0.4973$

el cual es diferente de cero y por tanto es no singular, además posee un rango igual a 2. Con el valor obtenido concluimos que la planta es completamente observable. Por tanto es posible la estimación de todas las variables de estado.

3.4.3.4.1 Diseño de un filtro de kalman

El filtro de Kalman, es un algoritmo desarrollado por Rudolf E. Kalman que sirve para poder identificar el estado no medible de un sistema dinámico lineal. Al igual que el observador de Luenberger, pero sirve además cuando el sistema está sometido a ruido blanco aditivo. La diferencia entre ambos es que en el observador de Luenberger, la ganancia de realimentación del error debe ser elegido arbitrariamente, mientras que el filtro de Kalman es capaz de escogerlo de forma óptima cuando se conocen las varianzas de los ruidos que afectan al sistema asume la presencia de una perturbación y de un ruido.

Considerando la representación en espacio estado en tiempo discreto del observador

$$\hat{x}(k+1) = A\hat{x}(k) + Bu(k) + L(y(k) - C\hat{x}(k)),$$

donde

L = matriz de pesos "Q"

La matriz L, se calcula teniendo en consideración la influencia de la perturbación y del ruido.

Si consideramos ruidos gaussianos ruido térmico en el cual están incorporadas todas las frecuencias, w y η , cuyo valor medio es igual a cero $\mu_w = 0$ y $\mu_\eta = 0$ y con desviaciones estándar diferentes de cero $G_w \neq 0$ y $G_\eta \neq 0$.

Teniendo en consideración que la desviación estándar es una medida del grado de dispersión de los datos con respecto al valor promedio y que puede ser interpretado como una medida de la incertidumbre. La desviación estándar en tiempo discreto estar representada como

$$G = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2},$$

donde

x_i Valor de muestra en el instante i

\bar{x} : Media aritmética de "n" muestras medidas.

Considerando el cálculo de la desviación estándar. La matriz L, se obtiene como

$$L = SC^T$$

donde C^T , es la transpuesta de la matriz C de la representación espacio estado de la planta. Por otro lado, la matriz S se deriva de la solución de la ecuación de Riccati

$$AS + SA^T - SC^T G_\eta^2 CS + WG_w^2 W^T = 0, \tag{40}$$

donde

A matriz de transición de estados

G_η^2 desviación estándar al cuadrado del ruido escalar

G_w^2 desviación estándar al cuadrado de la perturbación escalar

W matriz de la perturbación

El valor de W, representa un disturbio considerado en

$$x'(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + W. \tag{41}$$

Dicha matriz representada por valores constantes, no es conocida puesto que la perturbación es no medible no se deberá confundir con la dinámica de la perturbación obtenida en el modelo ARMAX. Por tal motivo, se asume que

$$W = \begin{bmatrix} 0 \\ -0.08 \end{bmatrix}. \quad . 42$$

El valor de la segunda fila de la matriz W , afecta a la salida y como una perturbación se manifiesta con la descarga lateral en un tramo del canal objeto de estudio, por lo que se asume un valor negativo. Este valor no puede ser muy grande, para el cálculo de los parámetros del filtro de Kalman que permitan una buena estimación de valores.

Además las desviaciones estándar, necesitan ser no muy significativas pero lo suficientemente influyentes para ser consideradas en la dinámica del observador, para obtener un buen desempeño pese a las perturbaciones y ruidos presentes.

Para este caso se considera

$$G_w = 0.8$$

$$G_\eta = 0.005.$$

Al resolver (4.40), se obtiene la matriz la matriz S (utilizando el comando "are" de Matlab y al reemplazarla en (4.39), se obtiene la matriz de pesos L

$$L = \begin{bmatrix} 1 \\ 0.005562 \end{bmatrix}. \quad . 4$$

Finalmente, la ecuación de estado para el filtro de Kalman obtenido, viene dado por las expresiones

$$\hat{x}(k+1) = (A - LC)\hat{x}(k) + Bu(k) + L*y(k) \quad . 44$$

$$\begin{bmatrix} \hat{x}(k+1) \\ \hat{x}(k+2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0.0021 \\ -0.005 & 0.9861 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}(k) \\ \hat{x}(k+1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.0005 * 10^{-6} \\ 0.2068 * 10^{-6} \end{bmatrix} u(k) + \begin{bmatrix} 1 \\ 0.0055 \end{bmatrix} y(k) \quad . 4$$

Para comprobar el funcionamiento del filtro de Kalman obtenido, se realizó su implementación. Además se considera una entrada sinusoidal que permita evaluar el desempeño a la salida del observador filtro de Kalman. En la Fig. 4.22 se muestra el diagrama de bloques del filtro de Kalman diseñado

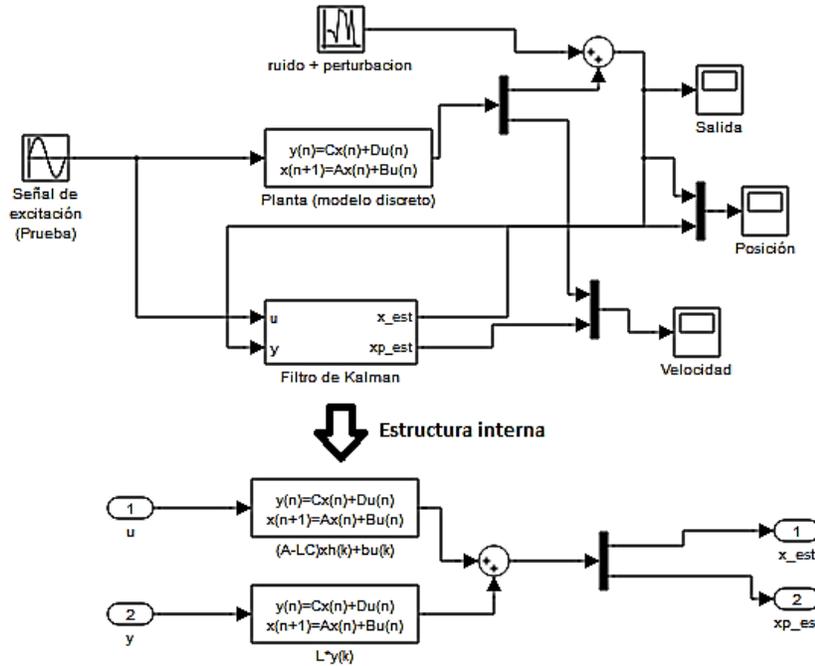


Fig. .22. Diagrama de bloques en Simulink del filtro de Kalman de la estructura del controlador.

La amplitud de la señal de entrada es de 100cm, una frecuencia angular de $\omega = 0.01 \text{ rad/s}$ y un ruido a la salida del sistema con variancia igual a 0.00001. El diseño en tiempo discreto se realizó, teniendo en cuenta el periodo de muestreo de 0.1 s. Mediante simulación se obtienen los resultados mostrados en las Fig. .2 y Fig. .24.

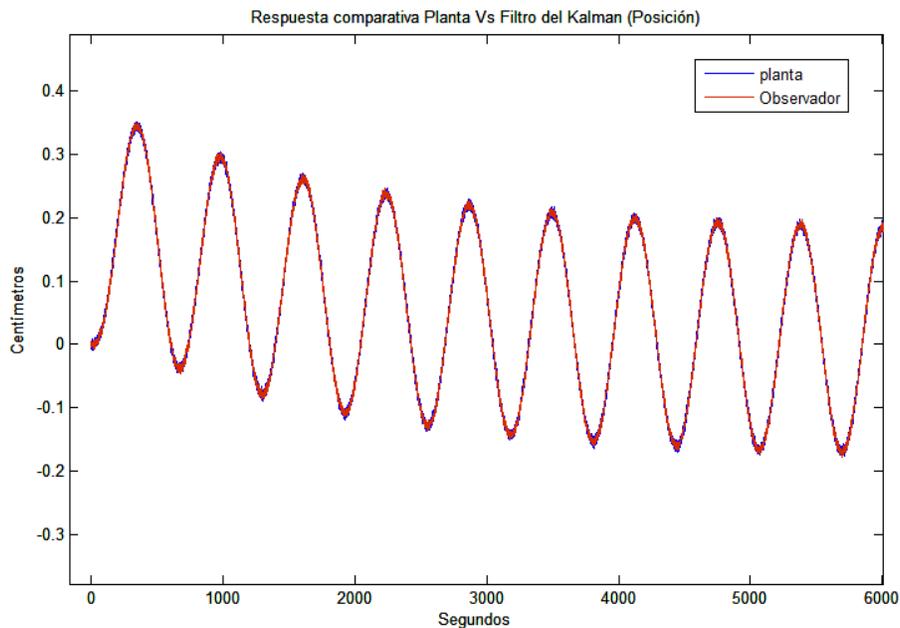


Fig. .23. Estimación de la variable de estado de la variación de nivel.

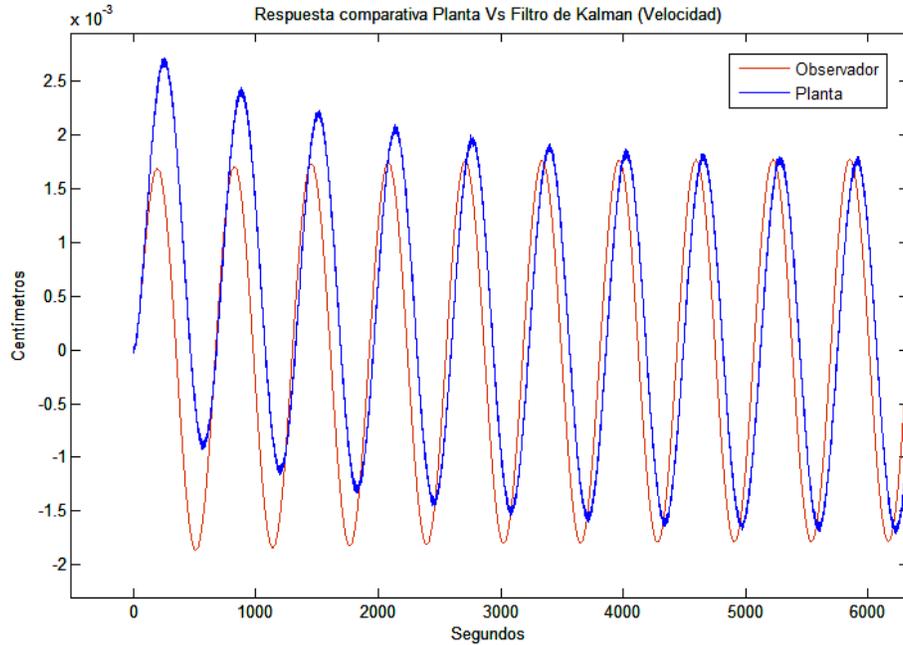


Fig. .24. Estimación de la variable de estado de la velocidad de variación de nivel.

Como se observa de las Fig. .2 y Fig. .24, el observador filtro de Kalman, realiza una buena estimación de la variable de estado posición. En cuanto a la estimación de la variable de estado velocidad se obtiene una señal con un leve desfase y menor amplitud pero convenientemente filtrada respecto a ruido.

Las pruebas del observador, con una señal de excitación sinusoidal demostraron su buen funcionamiento dentro de un rango de frecuencias bajas. Con este paso previo, se procede con su integración dentro del sistema de control en lazo cerrado. Como resultado se obtiene el diagrama de bloques que se muestra en la Fig. .2.

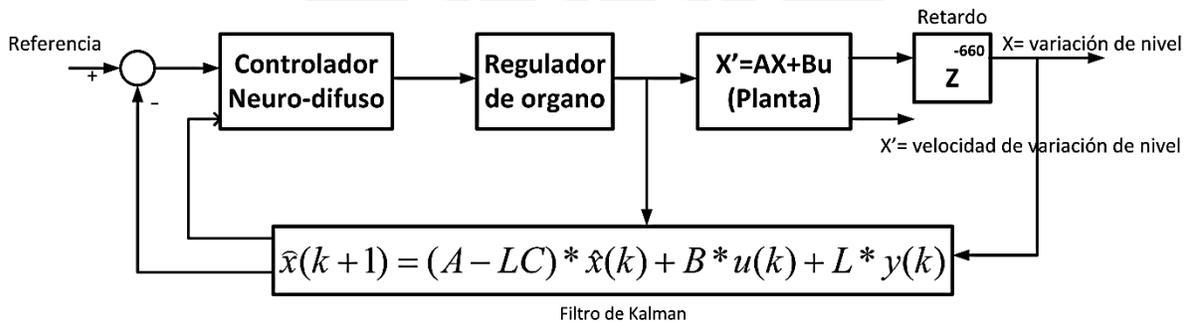


Fig. .2. Diagrama de bloques del sistema de control de la planta objeto de estudios con filtro de Kalman.

El observador no será afectado por el tiempo de retardo presente en la planta real, puesto que la estimación depende de los valores de entrada y salida de la planta en este caso la salida ya considera el retardo de tiempo.

3.4.4 Desarrollo de un controlador neuro-difuso, basado en el predictor de Smith

El controlador neuro difuso diseñado, resulta efectivo para la regulación de plantas que no presentan retardo de tiempo. Sin embargo la dinámica del tramo de canal de riego incorpora un retardo dominante grande y donde el controlador neuro difuso solo no puede generar una acción de control efectiva. Por ello se recurre a la utilización de un predictor de Smith, el cual resulta muy efectivo para el control de sistemas con retardo dominante. Dentro de la estructura del predictor de Smith, se incorpora el controlador neuro difuso desarrollado previamente.

Cuando una determinada planta posee un retardo de tiempo dominante se tiene en el mejor de los casos un margen de fase relativamente estrecho. Por tanto al realizar acciones de control no se pueden trabajar con ganancias altas si se desea mantener la estabilidad. En este sentido, la acción de control se ve considerablemente degradada. El predictor de Smith evita la pérdida de la estabilidad del sistema de control a illustrated. El diagrama de bloques de un sistema de control con predictor de Smith, de una planta con retardo de tiempo se muestra en la Fig. 2.

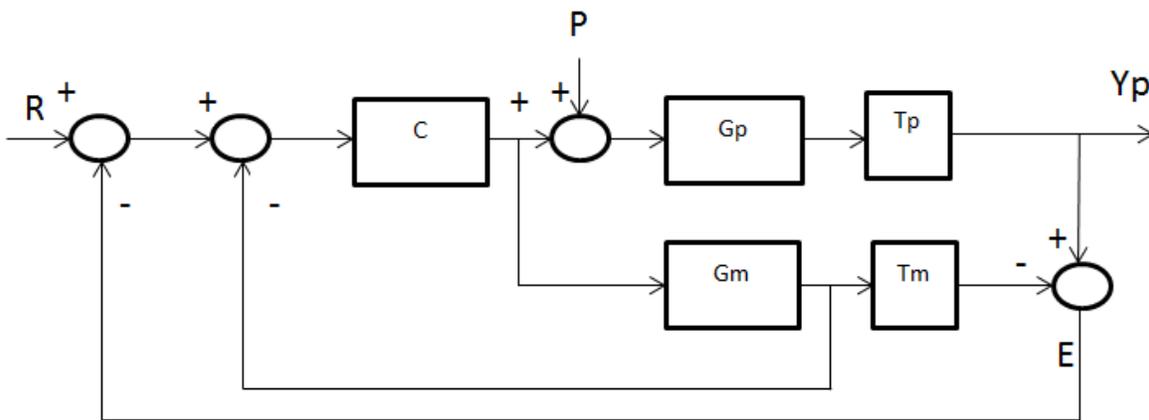


Fig. 2. Diagrama de un sistema de control con predictor de Smith de una planta con retardo.

donde

R señal de referencia

Y_p salida

E señal de error

C controlador

G_p planta

T_p retardo de tiempo de la planta

G_m modelo de la planta sin retardo

T_m modelo de retardo

P perturbación.

Si no se considera la perturbación, la función de transferencia en lazo cerrado es

$$\frac{Y_p(s)}{R(s)} = \frac{CG_p T_p}{1 + CG_m - CG_m T_m + CG_p T_p} \quad .4$$

Si $G_m = G_p$ y $T_m = T_p$ entonces .4 se reduce a

$$\frac{Y_p(z)}{R(z)} = \frac{CG_p T_p}{1 + CG_m} \quad . 4$$

Los efectos del retardo de tiempo T_p fueron removidos del denominador de la función de transferencia y por tanto el comportamiento del sistema se mejora.

Esto equivale a separar virtualmente el retardo de tiempo, sacándolo fuera del lazo de realimentación, como se muestra en la Fig. .2 .

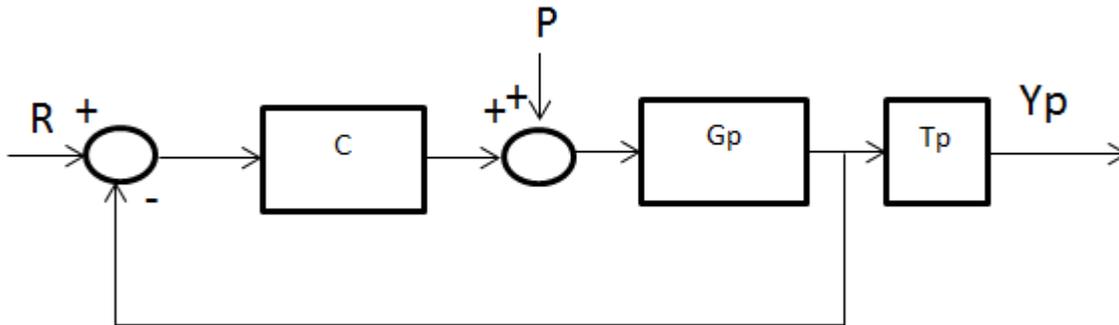


Fig. .2 . Diagrama equivalente de sistema de control con predictor de Smith .

Por otro lado, si consideramos la perturbación presente, entonces la función de transferencia entre la perturbación y la salida del sistema se representa como

$$\frac{Y_p(z)}{L(z)} = \frac{G_p T_p [1 + G_m C (1 - T_m)]}{1 + CG_m} \quad . 4$$

No existe retardo de tiempo en el denominador. Sin embargo el sistema sigue las perturbaciones con un retardo de tiempo. Con el análisis anterior, el controlador neuro difuso con predictor de Smith que se obtiene, se muestra en la Fig. .2 .

En este sistema existen dos lazos de realimentación. El lazo interno a la salida del modelo sin retardo, conocido también como lazo de realimentación negativa, permite que el controlador pueda predecir el futuro comportamiento del sistema. En tanto, el lazo externo conocido como lazo de realimentación positiva, permite la compensación del sistema frente a perturbaciones no medibles. El sistema tendrá una pobre dinámica de respuesta a menos que la perturbación esté restringida a frecuencias bajas $2/\tau_p$, donde τ_p es la magnitud del tiempo de retardo de la planta en segundos ≈ 1 .

Considerando $\tau_p = 0s$, entonces se tiene $f \leq 0.00606Hz$, que es una frecuencia baja. Bajo esta condición el sistema no debe ser afectado por perturbaciones a frecuencias elevadas.

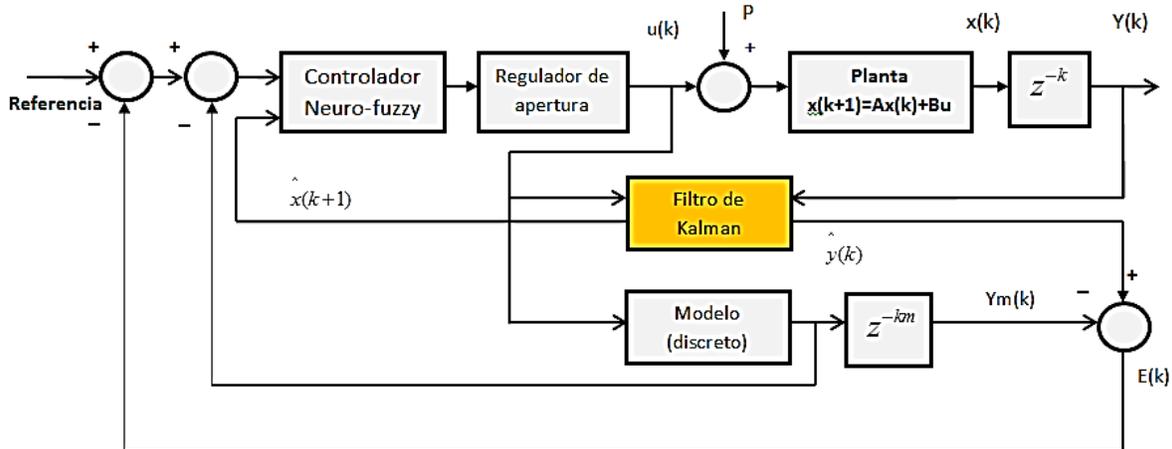


Fig. .2 . Diagrama del controlador Neuro de uso con predictor de mit y filtro de alman.

Con estas consideraciones, se reali a la implementaci n del diagrama de blo ues del sistema de control en imulin , el cual se muestra en la Fig. .2 .

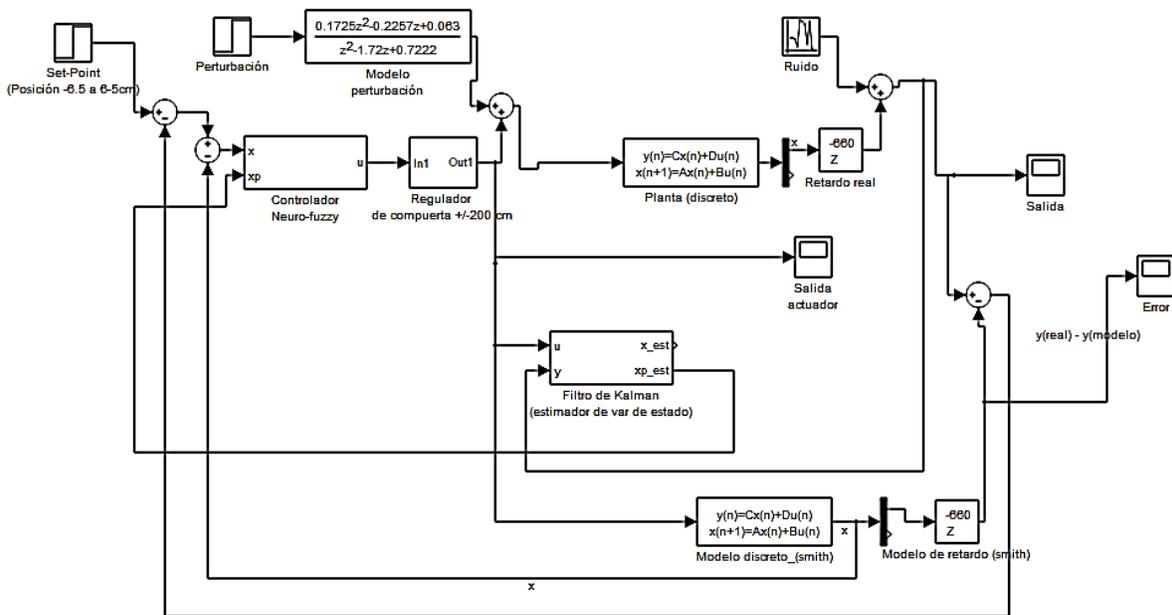


Fig. .2 . Diagrama en imulin del controlador neuro de uso con predictor de mit y filtro de alman.

3.4.5 Resultados de simulación y variación de parámetros

Se evalúa la respuesta nominal del sistema de control sin variación de parámetros internos de la planta, además no se considera una perturbación inicial. Al considerar una referencia de 4cm en la variación de nivel, se obtiene la respuesta temporal que se muestra en la Fig. . 0.

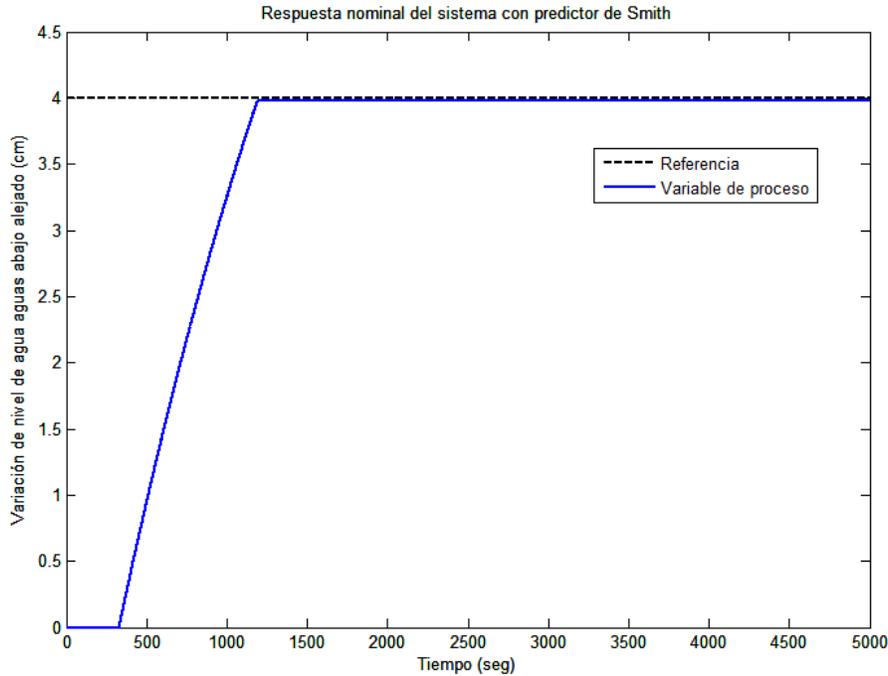


Fig. . 0. Respuesta temporal del sistema de control con controlador Neuro di uso y predictor de mit .

En la Fig. . 0 se puede apreciar un tiempo de establecimiento de apro imadamente 1200 s 20 min , un sobreimpulso má imo menor a 0.2 . La respuesta ba o el sistema de control con predictor de mit , tiene un buen comportamiento y es un soporte fundamental para el buen uncionamiento del controlador neuro di uso implementado dentro de su estructura. Algo importante a notar, es la capacidad de reacci n del sistema, el cual se ace muc o más rápido en comparaci n con la respuesta en la o abierto apro imadamente 10000s . i consideramos una condici n inicial de cm de la variaci n de nivel y deseamos obtener una variaci n de nivel a la salida de cm, entonces se obtiene la Fig. . 1.

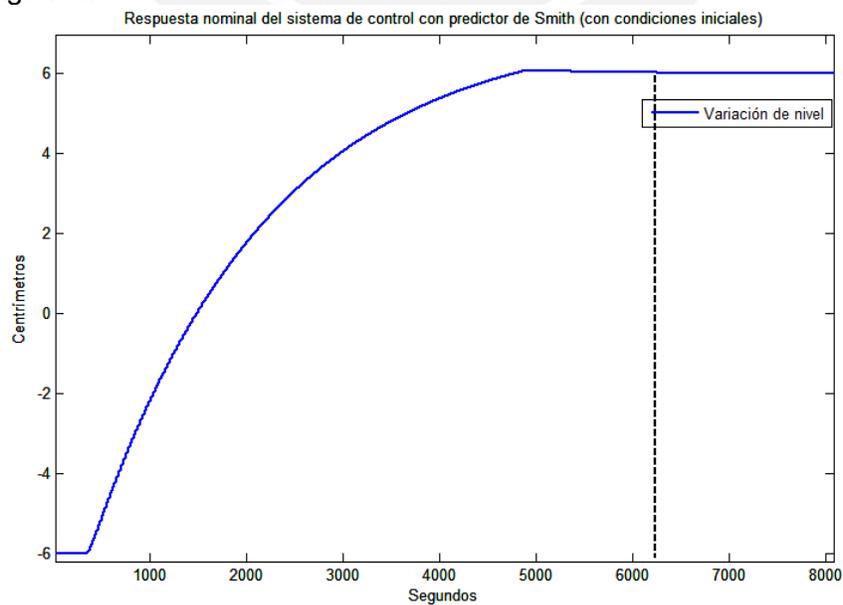


Fig. . 1. Respuesta temporal del sistema de control con condiciones iniciales.

En este caso la variación total de nivel fue de 12 cm. El tiempo de establecimiento aumenta proporcionalmente a 200 s. También existe un sobreimpulso proporcional de 1. No solo la evaluación de la respuesta es importante sino también el desempeño del actuador, en este sentido resulta necesario evaluar la evolución de la señal de salida, la cual se muestra en la Fig. 2.

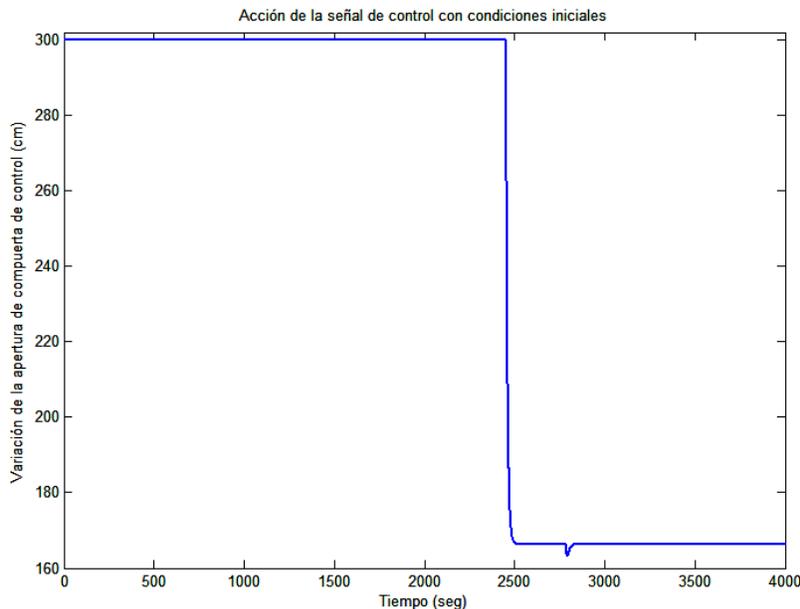


Fig. 2. Apertura de compuerta equivalente bajo condiciones iniciales.

Ahora bien a la salida del controlador existe un sistema interno que regula la apertura de la compuerta regulador de rgano, el cual tiene como límite 300cm de rango de apertura ver Fig. 2. En un primer instante, se observa la apertura total de la compuerta para luego pasados los 200 s, llegar a un valor estacionario de 165 cm de apertura.

Hasta el momento no existen oscilaciones y el desplazamiento de la compuerta de control presenta movimientos suaves. Si se considera una secuencia binaria de baja frecuencia a la entrada de referencia, con periodo de 1000 s y amplitud de 4cm de referencia para variación de nivel con ancho de pulso al 50% se obtiene la respuesta temporal que se muestra en la Fig. 3.

La salida es capaz de seguir a la referencia con cierta inercia debido a la dinámica lenta del sistema, los sobreimpulsos tanto en el lanzamiento de subida y bajada son no significantes. En tanto, la variación de la apertura de la compuerta, cumple con los requerimientos de baja frecuencia y sin oscilaciones permanentes que garantiza la durabilidad de los componentes mecánicos inmersos en el movimiento de la compuerta equivalente.

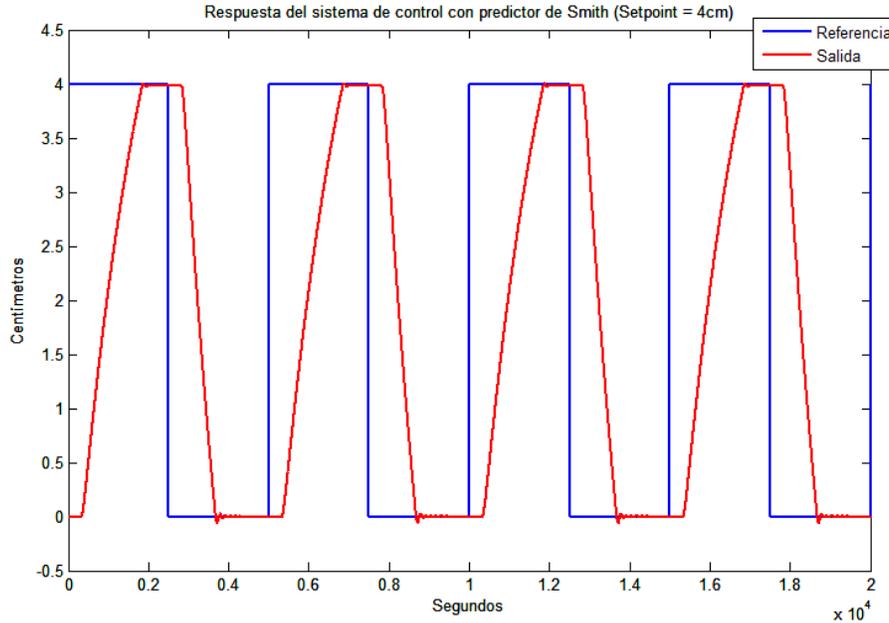


Fig. . . Respuesta de sistema de control a ciclos de la se ñal de referencia.

Por otro lado si el sensor de nivel presenta un ruido aditivo en la medici3n de la variaci3n de nivel de flu3o aguas abajo alejado del tramo de canal de riego. Entonces se tiene que evaluar su desempe1o analizando la respuesta de la Fig. . 4.

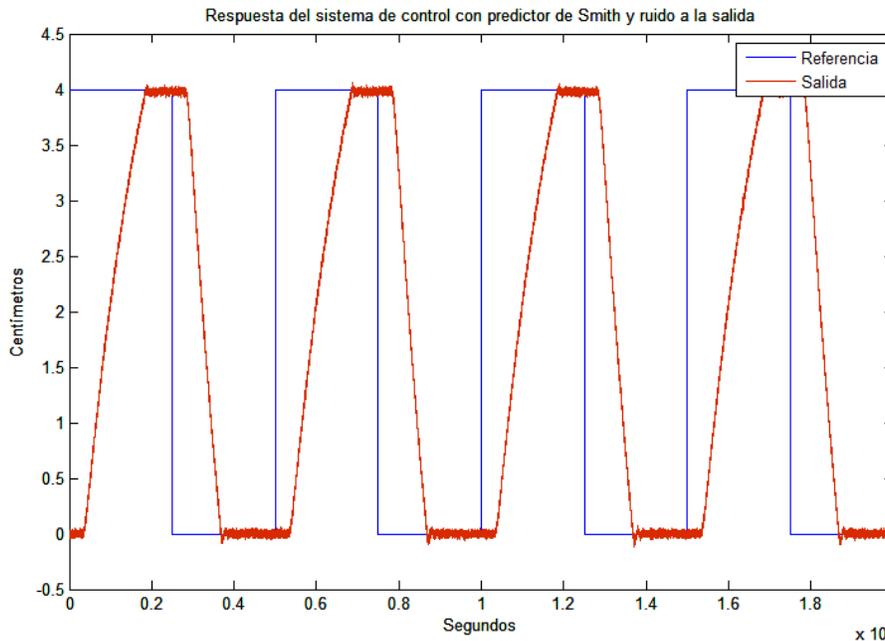


Fig. . 4. Respuesta del sistema de control con ruido a la salida.

A primera vista la salida es capaz de seguir a la referencia y el ruido aditivo no perjudica la acci3n de control. Sin embargo se debe considerar tambi3n la salida de controlador, ya que esta se ñal debe ser de baja frecuencia y realizable por el actuador compuerta. Con esta consideraci3n se obtiene la respuesta de la Fig. . . .

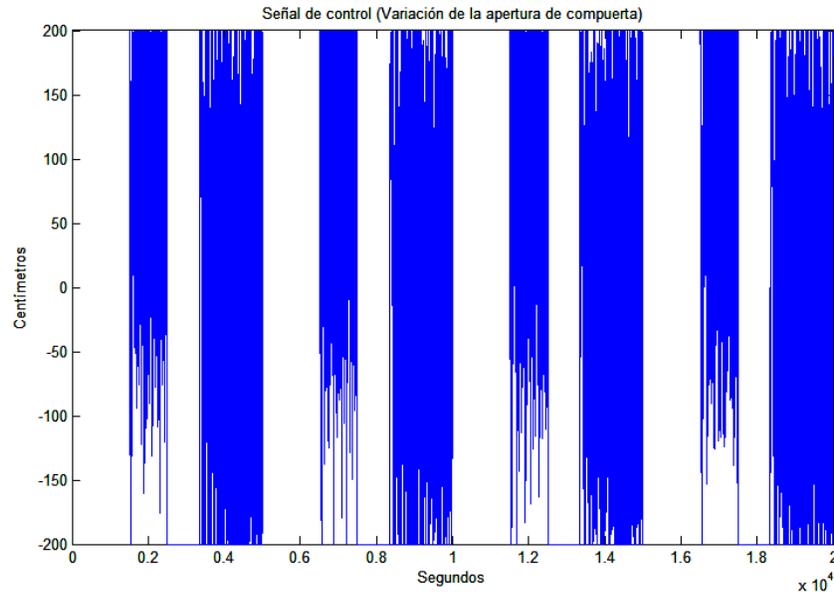


Fig. . . Variación de la apertura de compuerta equivalente ante presencia de ruido.

El ruido aditivo en la medición afecta la salida del controlador neuro difuso, ya que tiene que realizar conmutaciones de alta frecuencia para mantener la salida al estado deseado. En sistemas electrónicos esto no representa gran inconveniente, sin embargo al trabajar con un sistema hidráulico de dinámica lenta alta inercia, el accionamiento de la compuerta solo se puede efectuar a baja frecuencia y con movimientos suaves.

Por otro lado, si consideramos una posible discrepancia presente entre el retardo del modelo y el retardo real, debido a una variación en el régimen de descarga. Considerando un valor de θ por encima de su valor nominal. Además de someterlo a condiciones de perturbación θ cm y ruido aditivo a la salida. Al evaluar el comportamiento del sistema bajo estas condiciones críticas en la señal del error de diferencia entre la salida real y salida de modelo se genera una señal oscilatoria de alta frecuencia superando al ancho de banda intrínseco del sistema, donde presenta un buen comportamiento. Esto origina que el lazo de realimentación interno del predictor de Smith proporcione una señal degradada de alta frecuencia afectando el buen funcionamiento del controlador neuro difuso y como consecuencia la variable de proceso controlada (ver Fig. . . y Fig. . .).

En este sentido, se necesita contar con algún elemento adicional que elimine las componentes de la señal de realimentación interna a alta frecuencia. Además se debe considerar los beneficios de obtener una señal filtrada a la salida del filtro de Kalman de las dos variables de estado estimadas. Para solucionar este problema se tuvo en cuenta la utilización de un filtro paso bajo discreto de segundo orden con una frecuencia de corte $f_c = 0.001\text{Hz}$. El ancho de banda estrecho se encuentra en congruencia con los parámetros de operación de la planta y se adecúa a la dinámica del sistema.

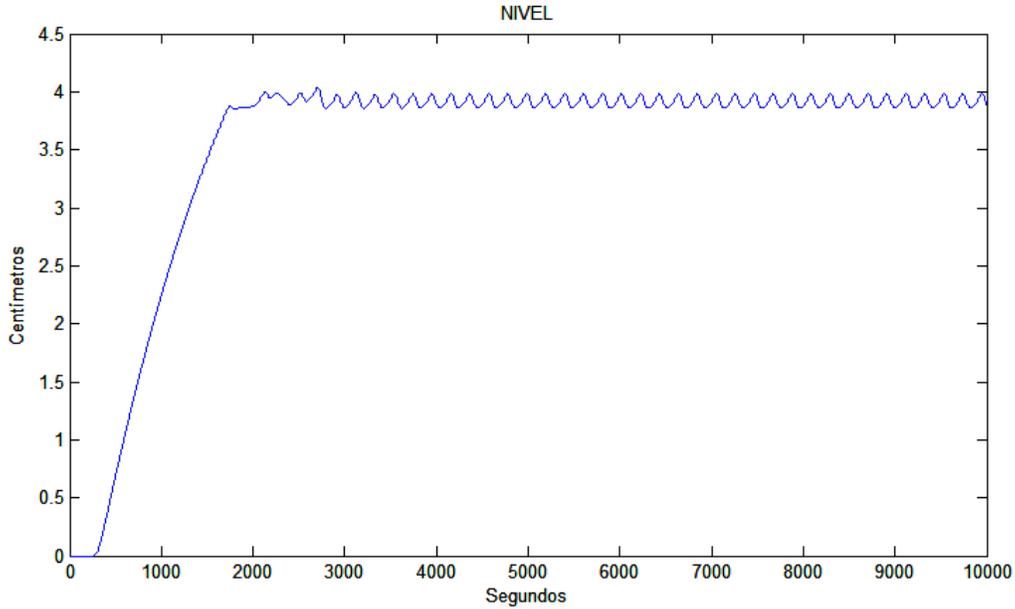


Fig. . . . Respuesta de sistema de control con variación de parámetros de la planta.

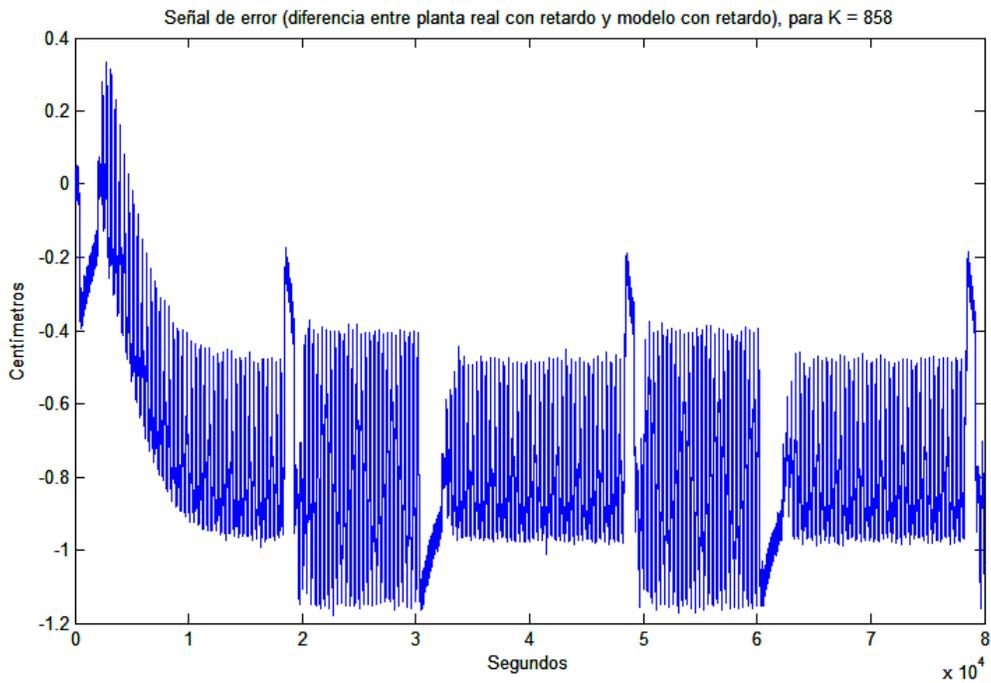


Fig. . . . Señal de error entre la planta real y el modelo.

La incorporación de las salidas observadas en el lazo de realimentación y el filtro de segundo orden discreto, originan un nuevo diseño del sistema de control. Cuyo diagrama se muestra en la

Fig. . . .

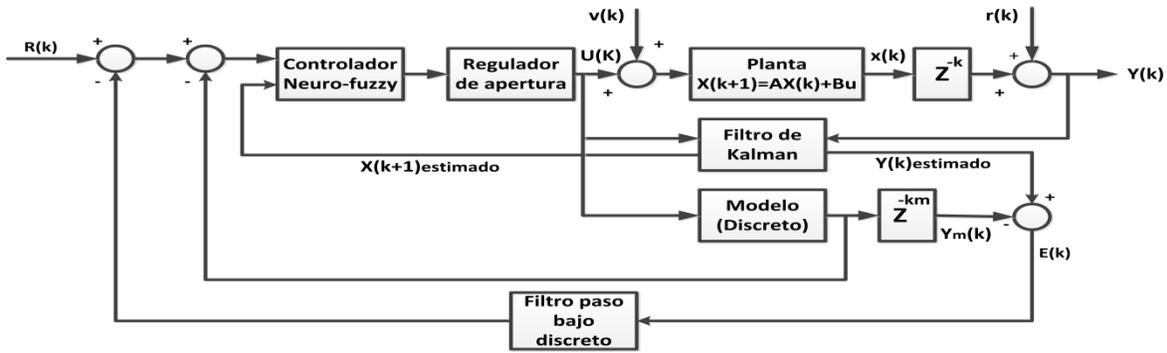


Fig. . . Diagrama del sistema de control neuro di uso con predictor de mit y filtro en el la o e rterno de realimentaci n.

La implementaci n en simulin del diagrama de la

Fig. . . se muestra en la Fig. . .

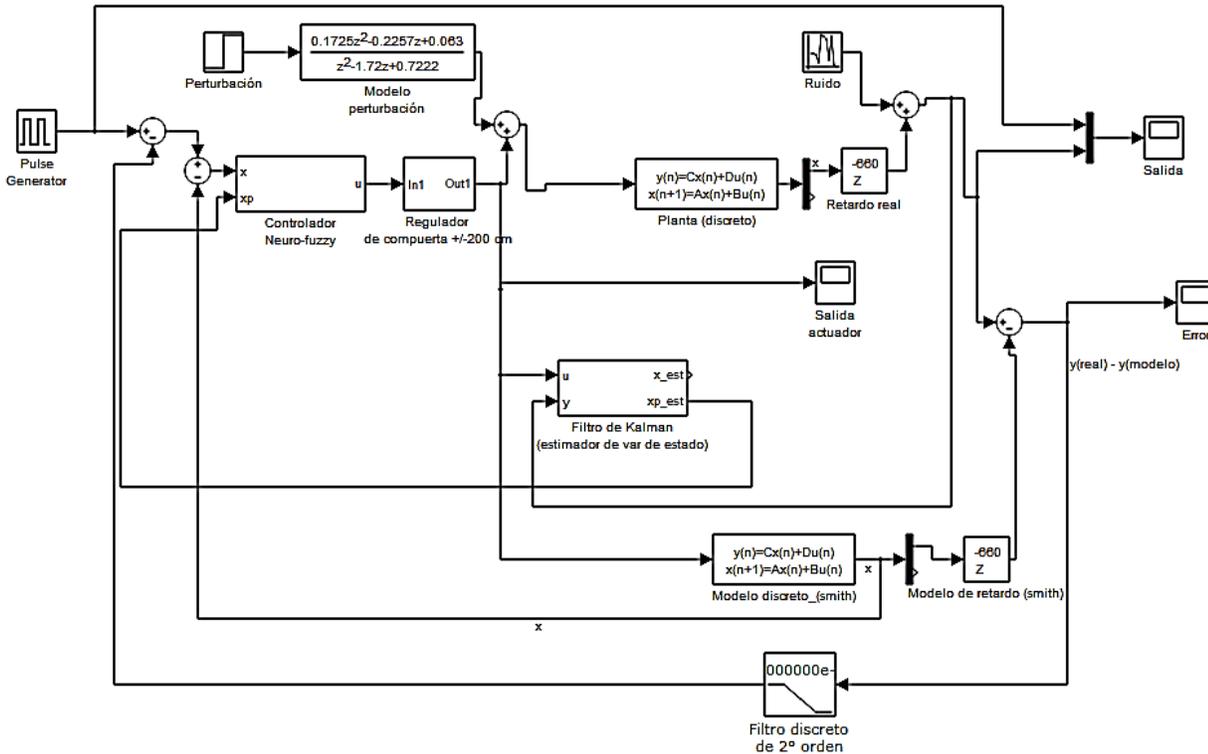


Fig. . . Diagrama de blo es en simulin del sistema de control Neuro di uso con predictor de mit inal.

El filtro discreto inalmente asegura el comportamiento deseado del sistema de control ue m s adelante se aborda con detalle al comparar su comportamiento con un controlador tradicional PI.

e a considerado en el sistema de control dise ado la presencia de ruido aditivo, variaciones de retardo de la planta respecto al retardo del modelo. Tambi n se consider la influencia de la perturbaci n. in embargo, si entramos en detalle respecto a este

ltimo punto, tendremos ue la perturbaci n en un tramo de canal de riego, esta dada por la descarga de un ramal de canal de riego, por tanto la perturbaci n siempre será negativa. i sometemos al sistema a di erentes intensidades de perturbaci n constante en el tiempo , entonces se obtienen las respuestas temporales ue se muestran en la Fig. .40.

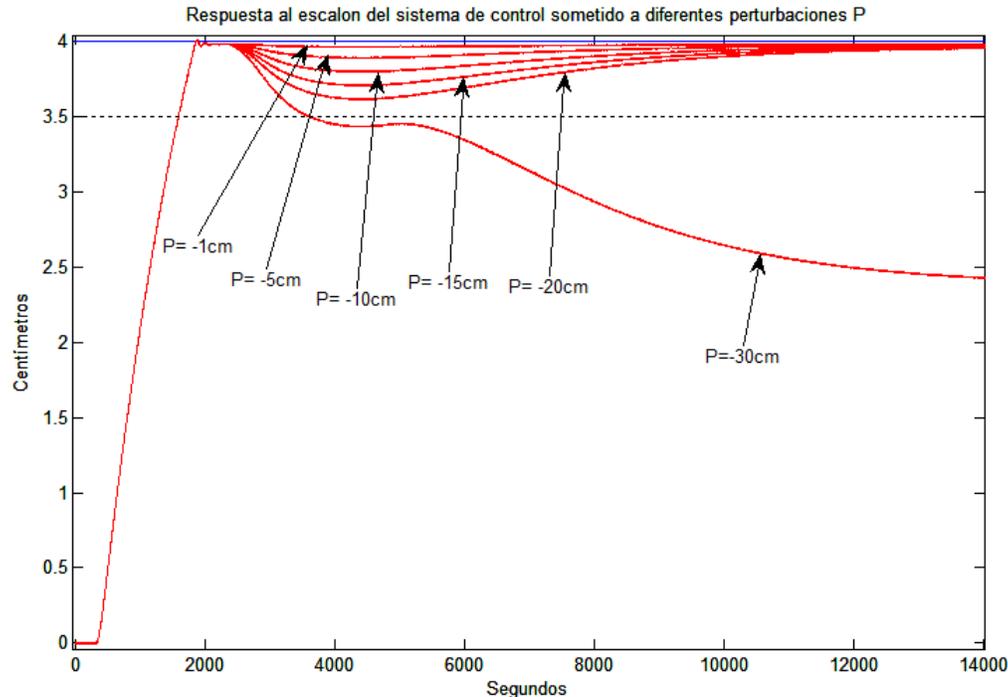


Fig. .40. Respuestas temporales comparativas del sistema de control con distintas perturbaciones.

La perturbación “P”, se inicia a los 2000 s y su efecto dura hasta aproximadamente los 10000 s. El sistema responde bien ante perturbaciones de 1, 5, 10, 15 y 20 cm. Sin embargo, una perturbación de 30 cm hace al sistema no controlable, para contrarrestar esto se tendría que aumentar el rango de apertura e equivalente de compuerta mayor a 300 cm, pero debido a las características de diseño planteadas, esta se mantendrá inalterable.

3.4.6 Pruebas de simulación y comparación con un controlador PID

3.4.6.1 Variación de parámetros internos

La variación de parámetros internos, es un problema que afecta el desempeño de los sistemas de control. Más arriba se consideró la variación del retardo de tiempo de la planta para los efectos de diseño del sistema de control. A ora se aborda su comportamiento para ello se tiene en cuenta la variación de todos sus parámetros: ganancia, constantes de tiempo y retardo. En el capítulo 2 se obtuvo el modelo continuo de la planta nominal la cual está representada por la función de transferencia de la ecuación 2.44. Sin embargo, la identificación del modelo nominal, no es precisamente el comportamiento dinámico de la planta, sino más bien que los parámetros de dicho modelo varían con distintos regímenes de descarga. En este sentido, existen límites de operación que deben ser considerados. En mínimo régimen de operación de descarga a través de la compuerta e equivalente de control aguas arriba

$Q_{\min} < Q_{nom}$ apro imadamente 1 m s Rivas et al., 2014a , es obtenido cuando la demanda de agua del usuario retiro de agua , decrece en relaci n al r gimen nominal como resultado de una reducci n en las necesidades de agua para irrigaci n. En este caso ocurre un m nimo volumen de lu o de agua a trav s de las compuertas de control aguas arriba, el coe iciente de aceleraci n decrece y los parámetros dinámicos del tramo de canal por tanto e perimentan cambios considerables Rivas et al., 2014a . n r gimen de descarga m nimo será logrado con apertura de las compuertas de control aguas arriba, a un valor por deba o del ue se utili para la obtenci n del modelo nominal menor a 200cm sin embargo, al no poseer datos para la identi icaci n de un nuevo modelo ba o estas condiciones solo nos uedará asumir una variaci n porcentual de los parámetros internos nominales. De acuerdo a lo anterior estableceremos un r gimen de descarga m nimo con una variaci n positiva en los parámetros internos del modelo nominal Rivas et al., 2014a . Considerando una variaci n de 20 de valor nominal de cada uno de los parámetros internos y en la variaci n del retardo de tiempo nominal. De acuerdo a esto se obtiene

$$G_{\min}(s) = \frac{0.043}{(56.76s + 1)(2184s + 1)} e^{-347} \quad . 4$$

Por otro lado el má imo r gimen de descarga de operaci n a trav s de las compuertas de control aguas arriba tiene la caracter stica de $Q_{\max} > Q_{nom}$ Rivas et al., 2014a . Este r gimen de descarga es usualmente logrado con la total apertura de la compuerta e uivalente de control ue será mayor a la apertura utilizada para la identi icaci n del modelo nominal mayor a 200cm . En este caso, la variaci n de parámetros internos tiene un sentido decreciente y por tanto una variaci n negativa respecto al modelo nominal Rivas et al., 2014a estableci ndose 20 de variaci n para parámetros internos y para el tiempo de retardo del modelo nominal. De acuerdo a esto se obtiene

$$G_{\max}(s) = \frac{0.0287}{(37.84s + 1)(1456s + 1)} e^{-314} \quad . 0$$

Es bien conocido ue los parámetros idrúulicos el coe iciente de ricci n, la geometr a del canal, la elevaci n del agua aguas abao, la velocidad, etc. y o el r gimen de descarga t de tramos principales de canales de riego, pueden cambiar aleatoriamente con los rangos de operaci n, originando incertidumbre en los parámetros dinámicos del modelo nominal Rivas et al., 2014a . Por tanto el e acto comportamiento dinámico de estos tramos de canal es desconocido en m ltiples ocasiones Rivas et al., 2014a . En este sentido, los modelos obtenidos $G_{\min}(s)$ y $G_{\max}(s)$, representan los l mites de operaci n del sistema. Estos l mites determinan el rango de variabilidad de cada uno de los parámetros dinámicos.

i empleamos la t cnica de control desarrollada asta el momento, para regular la salida del sistema, considerando ue la planta real se describe mediante los modelos ue var an dentro del rango de los modelos de descarga m nima y má ima respectivamente. Entonces, obtenemos la salida variaci n de nivel de agua , ba o estas consideraciones, como se muestra en la Fig. .41.

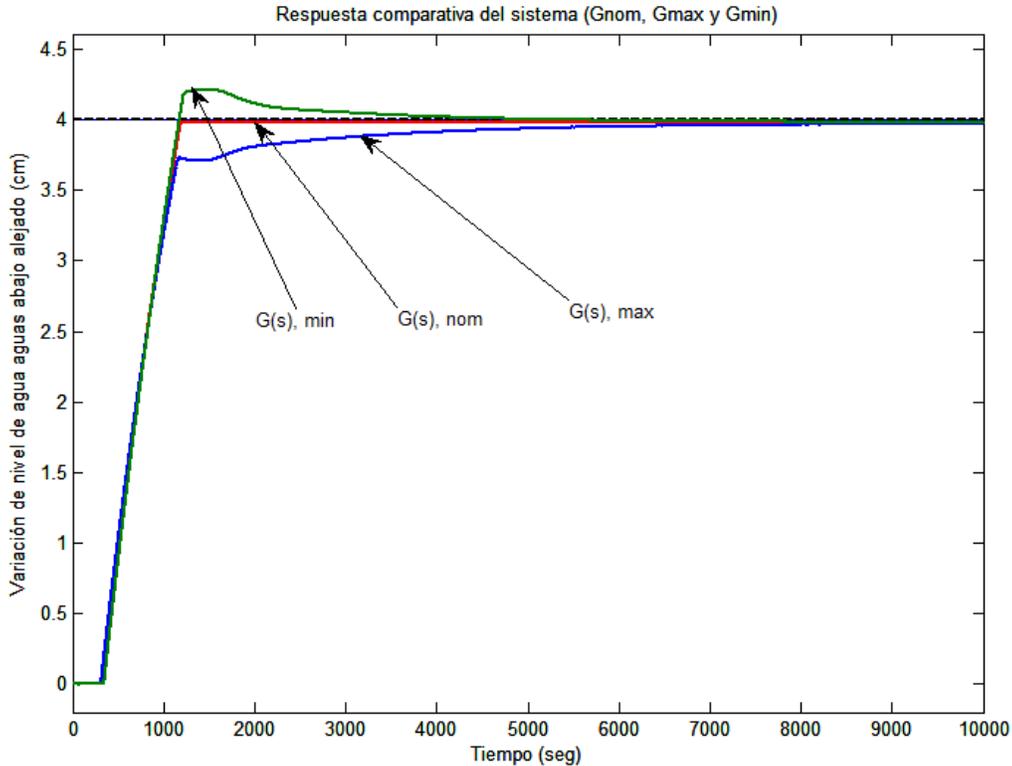


Fig. .41. Respuesta comparativa del sistema de control con variación de parámetros internos de la planta.

Las respuestas del sistema se encuentran un poco degradadas bajo los diferentes modelos de regímenes de descarga mínimo y máximo. Es así, que para $G_{\min}(s)$, la respuesta tiene una tendencia subamortiguada, y es más veloz pero con sobreimpulso elevado menor a tanto para $G_{\max}(s)$, la respuesta se hace más lenta con un comportamiento sobreamortiguado, carente de sobreimpulso.

3.4.6.2 Respuesta comparativa de controladores

El sistema de control neuro di uso con predictor de mit NDP necesita ser comparado con un controlador PI con predictor de mit para analizar su comportamiento y efectividad frente a este método tradicional de solución.

En este sentido se considera el diseño de un sistema de control en tiempo continuo del controlador para efectos de comparación. Para un buen funcionamiento del controlador PI no se considera la parte derivativa debido a un posible entorno ruidoso, dentro de la estructura del predictor de mit, se necesitará la sintonización de sus parámetros proporcional e integral. Es por ello que después de algunas pruebas de simulación se determinan

- D 42. proporcional
- I 0.0 2 derivativo .

La respuesta del sistema de control PI con predictor de mit y bajo condiciones nominales de operación con señal de referencia para variación de nivel de agua igual a

4cm alcan a la se al de re erencia por primera ve a los seg. y el tiempo de establecimiento a los 10 000 s. El sobreimpulso má imo presentado es de 2.

Para el análisis del comportamiento del sistema se necesita tambi n la inclusi n de perturbaci n y ruido aditivo a la salida del sistema . Para efectos de simulaci n en el cual el sistema ueda sometido a una situaci n cr tica se considera una perturbaci n de 20cm. Los resultados comparativos se muestran en la Fig. .42.

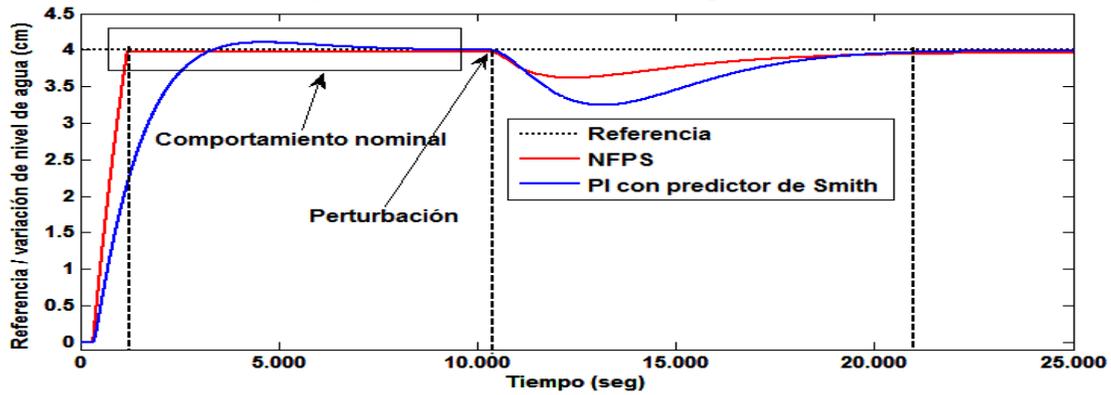


Fig. .42. Respuesta comparativa de sistema de control NDP vs PI con predictor de Smith .

De la Fig. .42 se observa ue cuando el proceso objeto de estudio se encuentra operando en r gimen nominal, las respuestas temporales del sistema de control con ambos controladores di eren puesto ue la respuesta con NDP no presenta sobreimpulso y es muc o más rápida con tiempo de establecimiento de 1 respecto del PI con predictor de Smith . Adicionalmente en la atenuaci n de los efectos de las perturbaciones por descargas laterales de agua presenta una mejor performance con un sobrepico negativo 0 menor ue el ue se obtiene con PI con predictor de Smith .

Por otro lado, para evaluar su comportamiento ba o la variaci n dinámica de los parámetros del proceso, se consider un rango de variaci n de 20 para las constantes de tiempo y ganancia y para la variaci n de retardo de tiempo, teniendo los resultados ue se muestran en las Fig. .4 y Fig. .44.

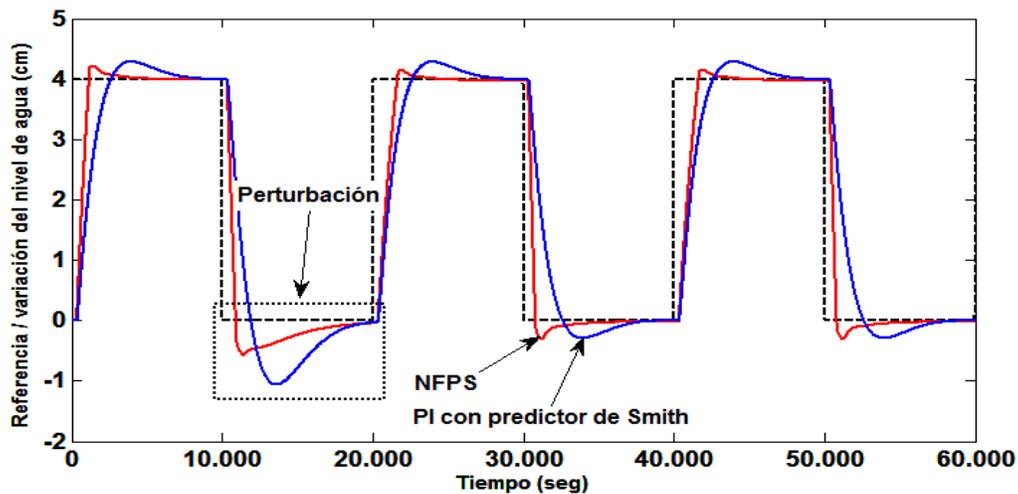


Fig. .4 . Respuesta comparativa con 20 de variaci n interna de parámetros y de variaci n de retardo.

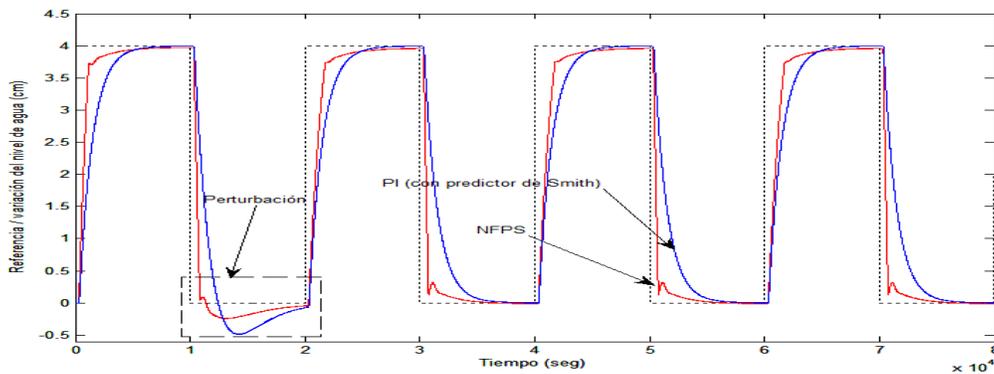


Fig. .44. Respuesta comparativa con 20 de variación interna de parámetros y de variación de retardo.

Para el caso de variación positiva de parámetros mediante el control NDP, se obtiene un sobrepico menor en t_1 y una mejor atenuación del efecto de la perturbación respecto al obtenido con controlador PI con predictor de Smith. Para el caso de variación negativa de parámetros también se obtiene mejor atenuación al efecto de las perturbaciones, sin embargo la respuesta se hace más lenta pero mantiene cierta ventaja sobre el PI con predictor de Smith.

Estos resultados muestran que el controlador NDP exhibe un mejor comportamiento dinámico en el sentido de garantizar una mayor velocidad de respuesta con mejor atenuación al efecto de perturbaciones. Se verificó también la robustez del sistema dentro de un moderado rango de variación establecido de los parámetros del proceso objeto de estudio, donde logró una mejor performance respecto al controlador PI con predictor de Smith.

Ahora se debe demostrar de manera explícita las mejoras que introduce cada controlador. Para realizar esta evaluación se utilizará un índice de desempeño, cuyo valor oscilará inversamente sobre la calidad y efectividad del controlador evaluado. Mientras menor sea el valor del índice escogido, mejor será el desempeño del controlador. Para ello se tienen diferentes índices de desempeño entre ellos I.E, IAE, IT.E, ITAE. En todos ellos se integra el error.

Para nuestro análisis escogeremos el índice IAE. Este índice es más sensible al error que el I.E, tiende a dar tiempos largos de establecimiento y sobre picos más altos y se recomienda para evaluación de sistemas en simulación por computador. Este índice es calculado mediante la expresión

$$IAE = \int |e(t)| dt \quad . \quad 1$$

cuando es equivalente en tiempo discreto será la sumatoria de valores tomados en cada periodo de muestreo, entonces se tendrá

$$IAE = \sum_{k=1}^n |e(k)|$$

. 2

Si utilizamos dicho algoritmo también a la salida del controlador, tendremos resultados que se presentan en la Tabla .10 y Tabla .11

Tabla .10. Índice de desempeño de controlador NFP bajo condiciones de operación nominal

Tipo de controlador	IAE
NDP Medición del error	.0004 10^4 sin perturbación .412 10^4 con perturbación
NDP Medición de la señal de control	1. 10^4 sin perturbación 1. 10^4 con perturbación

Tabla .11. Índice de desempeño de controlador PI con predictor deimit bajo condiciones de operación nominal

Tipo de controlador	IAE
PI con predictor deimit Medición del error	.000 10^4 sin perturbación .41 10^4 con perturbación
PI con predictor deimit Medición de la señal de control	2.4 10^4 sin perturbación . 10^4 con perturbación

Los resultados cuantitativos muestran una ventaja en la señal de control del sistema NDP respecto al sistema de control PI con predictor deimit. La aplicación de una perturbación aumenta de manera considerable el índice IAE. Sin embargo al realizar la medición del error con la aplicación del índice IAE, los valores comparativos con ambos controladores, se mantienen similares y no presentan gran variación con una perturbación presente.

3.6 Conclusiones preliminares

- Se realizó el diseño e implementación de un controlador neuro de uso de acuerdo a diferentes particiones y bases de reglas establecidas y mediante pruebas de simulación se determinó que la base de reglas resultante de tres particiones en el rango de valores de las variables de estado, es suficiente para controlar la planta. Por tanto se simplificará el número de neuronas en la capa de entrada y se tendrá un menor costo computacional en la implementación práctica del controlador neuro de uso.

- Se demostró que un controlador neuro di uso basado en la estructura Mamdani por sí solo, no es capaz de realizar de manera efectiva una acción de control sobre la planta tramo de canal de riego, que presenta un gran retardo de tiempo. Esto debido a que en su propia estructura y en la base de reglas establecida, no se considera dicho efecto.
- Se realizó el diseño e implementación de un filtro de Kalman el cual realiza la estimación de las variables de estado de manera óptima tomando en consideración los efectos de las perturbaciones y ruido del sistema. De esta manera se obtiene una buena estimación de las variables de estado ante perturbaciones y filtradas de ruido. Sin embargo si se tiene un ruido considerable, la estimación de la velocidad de variación de nivel sufre una pérdida de precisión respecto a la señal real. No obstante se determinó que el controlador neuro di uso desarrollado es más dependiente de la estimación de la variación de nivel de acuerdo a las pruebas realizadas en Simulink por tanto no se necesita una estimación precisa de la velocidad de variación de nivel.
- Se diseñó e implementó un sistema de control NDP, el cual presenta un mejor desempeño frente a un controlador PI con predictor de Smith. Los beneficios de una mejor atenuación a las perturbaciones, robustez a la variación de parámetros y la rápida respuesta se revierten de forma inmediata en el aumento de la eficiencia de la distribución del agua evitando su pérdida y satisfaciendo las necesidades de los usuarios con entregas puntuales en menor tiempo.
- El sistema de control NDP obtenido es dependiente de la estimación de un buen modelo matemático. Un sistema de control neuro di uso por sí solo, a su vez sus parámetros internos en base al conocimiento previo y autoaprendizaje. Sin embargo al ser parte del predictor de Smith se genera una fuerte dependencia del modelo principalmente cuando los parámetros internos de la planta varían.
- Se obtuvo que el sistema de control NDP, resulta sensible al ruido y a la variación de parámetros internos de la planta ello implica que la señal de realimentación positiva la cual el sistema tenga componentes de alta frecuencia, que se filtraron mediante la utilización de un filtro discreto paso bajo de segundo orden con frecuencia de corte en armonía con el ancho de banda de operación de la planta. Adicionalmente, se utilizó la señal estimada filtrada proporcionada por el filtro de Kalman para la eliminación del ruido a la entrada del controlador neuro di uso.
- La robustez lograda en el sistema de control NDP, se encuentra limitada dentro de un rango de variación de parámetros internos moderado. Si la variación es mucho mayor dicho desempeño se degrada. Por tanto, se tendrá que establecer técnicas de diseño adaptativas complementarias, mediante la adición de un bloque de estimación recursiva en línea y un mecanismo de ajuste de los parámetros internos del modelo de la planta.

CAPÍTULO 4: PROPUESTA DE IMPLEMENTACIÓN PRÁCTICA DEL SISTEMA DE CONTROL NEURO-DIFUSO DESARROLLADO

4.1 Introducción

En el presente capítulo se presenta una propuesta de implementación práctica para el control y monitoreo del primer tramo del canal principal de riego local. Se establecerán dos estaciones: una de control local servidor y otra global para monitoreo y control cliente. La propuesta incluye una interfaz de comunicación OPC entre el computador cliente y el controlador local para la transferencia de información de la respuesta de la señal de control obtenida mediante la implementación del controlador NDP en Simulink y lectura de variables. Además se establecerá una comunicación a un nivel más bajo entre una representación MI en LA VIE y Simulink a través de la interfaz Tool it. Los protocolos de comunicación establecidos entre los distintos instrumentos estarán fundamentados en base a la distancia con la estación local y la estación base. Además resulta fundamental el acceso a datos de manera remota por usuarios autorizados. Por ello se plantea la selección de sensores de nivel y módulos que en conjunto puedan tener acceso a una red de telefonía celular para transmisión de datos.

4.2 Propuesta de instrumentación

Para la instrumentación de un tramo principal de canal de riego, se requiere la identificación de componentes involucrados en el proceso de automatización. Considerando la medición de nivel de agua, aguas abajo y aguas arriba y la medición adicional de la posición de la compuerta equivalente aguas arriba. En este sentido el sistema de automatización tendrá los siguientes componentes:

- Dos sensores para identificación de variación de nivel aguas arriba y aguas abajo.
- Un sensor de posición de compuerta.
- Tres transmisores de señal a la salida de los sensores.
- Un controlador local PLC.
- Un servidor.
- Caja reductora de engranes para activación de la compuerta.
- Un motor trifásico.

El servidor es un ordenador para la administración de datos proporcionados por el sistema de automatización local: nivel de variación de agua, posición de compuerta, límite de operación de la compuerta, alarmas, etc. El diagrama funcional de una propuesta de automatización del canal, se muestra en la Fig.4.1.

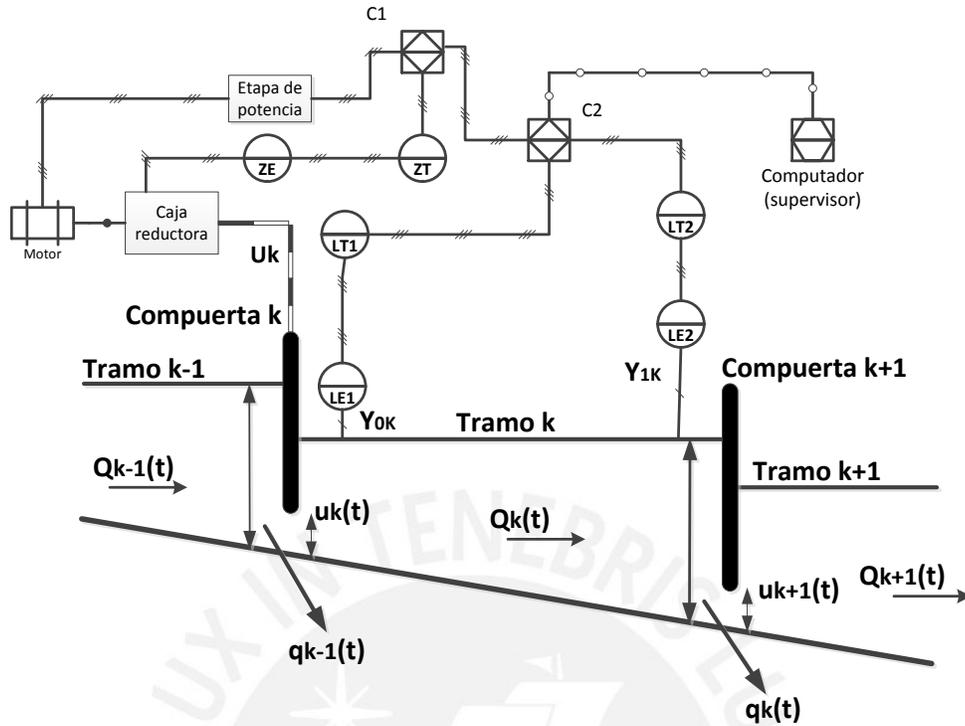
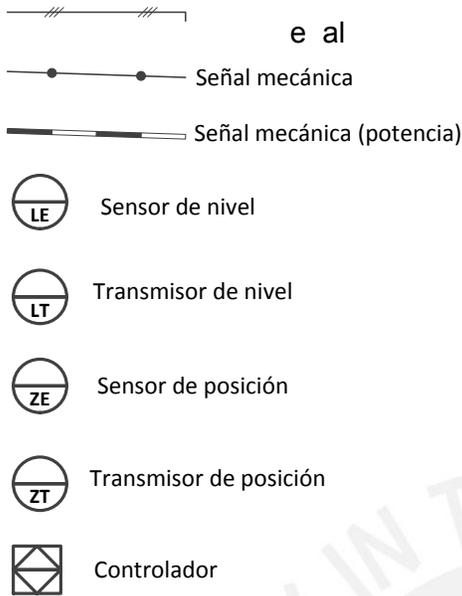


Fig.4.1. Es uema P ID para la implementaci n del sistema de control desarrollado en el ocal.

donde 0 y 1 representan los niveles de variaci n de agua aguas arriba y aguas abajo respectivamente. La medici n de la posici n de la compuerta se determina por medio de la variaci n de la resistencia interna de un potenci metro dentro de un mecanismo de caja reductora. La se al de control $u_k(t)$, es el despla amiento de la compuerta aguas arriba. En este sentido, se reali ará la implementaci n de dos controladores $C1$ y $C2$ en una configuraci n de control en cascada para mantener niveles precisos de la variaci n de la apertura de la compuerta equivalente. Teniendo en cuenta lo anterior, la determinaci n del flujo a lo largo del tramo de canal, es calculado de manera indirecta con la determinaci n de los niveles y la apertura de la compuerta $u_k(t)$ mediante la soluci n de la ecuaci n 2.1, abordada en el segundo cap tulo.

Además se deberá considerar el ancho L y coeficiente de descarga de la compuerta C_d . La notaci n utilizada en el diagrama P ID de sistema de control tiene la siguiente de inici n de la simbolog a



4.2.1 Selección de instrumentos:

La selección de instrumentos necesita adecuarse a los requerimientos de diseño planteados y de acuerdo a las condiciones de operación del tramo de canal de riego. Debido a los casos de corte intempestivo de energía eléctrica o las limitadas condiciones de su accesibilidad se plantea una fuente auxiliar alimentada para los instrumentos de campo, mediante una fuente de energía fotovoltaica que está ubicada en la parte superior de la estructura aguas arriba del tramo de canal. En base a estas consideraciones se tendrá la siguiente selección:

4.2.1.1 Sensor/ transmisor de nivel

Para la medición de la variación de nivel de agua, se propone el empleo de un sensor de ultrasonido, que presenta las ventajas de una fácil instalación y bajo mantenimiento al no entrar en contacto directo con el agua dentro del tramo de canal. Los dispositivos de medición de nivel básicamente emplean ondas de sonido para la detección del nivel de líquido. Ellos frecuentemente trabajan en un rango de frecuencias entre 20 kHz a 200 kHz.

El principio de trabajo de un típico sensor de ultrasonido se ilustra en la Fig.4.2. El sensor de nivel es localizado en la parte superior del canal emitiendo ondas de sonido en forma intermitente y en dirección a la superficie de agua. Tan pronto como las ondas de sonido golpean dicha superficie, la onda reflejada retorna al sensor. El tiempo tomado por la onda de sonido de regreso, es directamente proporcional a la distancia entre el sensor piezoeléctrico y la superficie del agua. El tiempo de duración es medido por el sensor y utilizado para calcular el nivel de líquido en el canal. La velocidad de las ondas de sonido pueden algunas veces ser afectadas debido a las variaciones en la temperatura y se necesitará una adecuada compensación provista en el diseño del sensor.

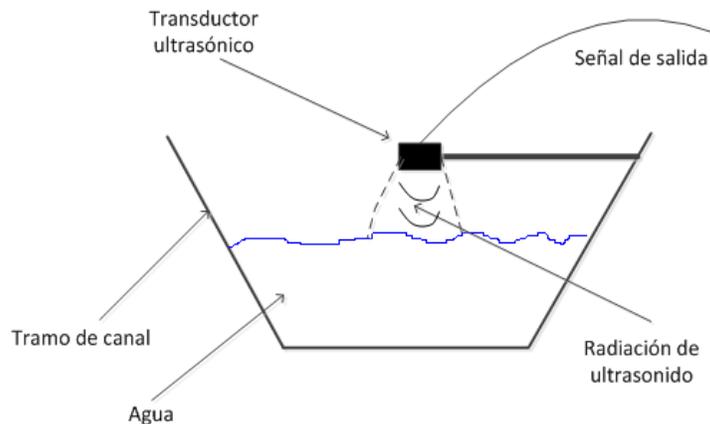


Fig.4.2. Posicionamiento del sensor ultrasónico de nivel en el tramo de canal.

Por tanto, se escogió el auger sme que es una integración de un sensor de nivel ultrasónico y un transmisor celular GSM. El auger sme es empleado en aplicaciones de monitoreo remoto de nivel. La medición es continua y mide de manera precisa superficies estáticas o agitadas. Opera a 400 kHz y mide distancias de 1 m hasta 10 m, adicionalmente mide la temperatura del medio ambiente. Es alimentado en un rango de 12 volt en DC. El sistema está equipado con un visualizador y un teclado permitiendo una simple configuración del sistema. Además mide el nivel, considerando una zona de separación mínima entre el sensor y la superficie del agua zona muerta de 1 cm. Si se pasa la zona muerta las mediciones podrán ser no predecibles. Por tanto es recomendable guardar una brecha de margen entre el nivel máximo deseado y el borde de la zona muerta.

El sensor auger sme debe ser instalado sobre el tramo de canal a ser medido sin tomar contacto con la superficie de agua. Típicamente este estará instalado en la parte superior y atado a un brazo de metal que se extiende sobre el tramo de canal. Además deberá ser localizado tan lejos como sea posible de las paredes verticales, guardando una brecha mínima de 30 cm más 10 cm por cada metro de rango de medición. El auger sme deberá ser perpendicular a la superficie del líquido objeto de medición y el desplazamiento angular deberá ser menor de 5° del eje vertical. En la Fig.4.3, se puede observar su instalación física.



Fig.4.3. Vista general del posicionamiento de sensor ultrasónico en el tramo del canal.

4.2.1.2 Sensor / transmisor de posición

La posición de compuerta será determinada, mediante la localización de un potenciómetro dentro de la caja de engranajes utilizada para convertir las RPM del motor en torque y proporcionar un movimiento lineal. Considerando una entrada analógica a un controlador de 10vol. se escogerá una variación de 0-100 Ohm en la resistencia del potenciómetro. El eje del potenciómetro estará sujeto al desplazamiento del pivote que transmite el torque y mediante su movimiento se producirá la variación de la resistencia, como se muestra en la Fig.4.4.

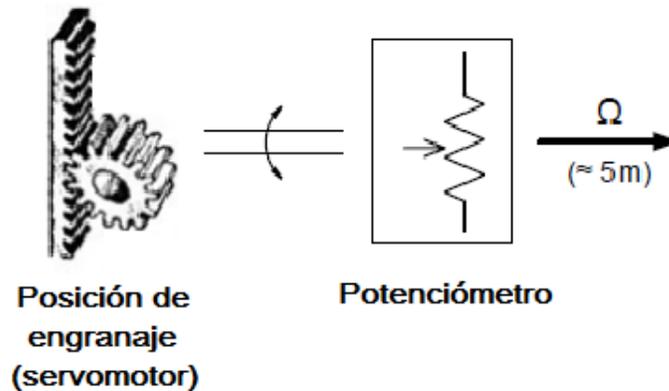


Fig.4.4. Acoplamiento del sensor analógico de posición.

4.2.1.3 Actuador (etapa de potencia + motor + caja reductora)

La etapa de potencia se encuentra a la salida del controlador y permite una adecuación de la señal para la activación de un motor de inducción triásico. Para ello se implementará un sistema electrónico en base a transistores de potencia y mediante su conmutación se permitirá el equivalente de la señal de control a niveles adecuados de tensión que permita la activación del motor. Además incorporará la conversión de energía DC a su equivalente AC y adecuación de niveles de bajo voltaje 24 volt, para la alimentación de los instrumentos locales además de contar con un switch activado mediante relé para la conmutación con el soporte auxiliar de energía.

EL actuador como se mencionó en los capítulos 2 y 3, está constituido por la compuerta equivalente resultado de la acción conjunta de un grupo de compuertas localizadas en la casa de compuertas que por simplicidad, se considerará en todo el proceso de diseño. El flujo a través de una compuerta equivalente es función del nivel del agua, por tanto resulta crítico mantener la posición deseada de las compuertas. Generalmente la compuerta de un canal es muy pesada de operar. Por tanto en adición a un motor, una caja reductora de engranajes es utilizada para reducir la velocidad e incrementar el torque. Para convertir el movimiento circular a la salida de la caja reductora en lineal se utiliza una cremallera que sujeta a la compuerta permite el desplazamiento deseado. El mecanismo del actuador se muestra en la Fig.4.5.

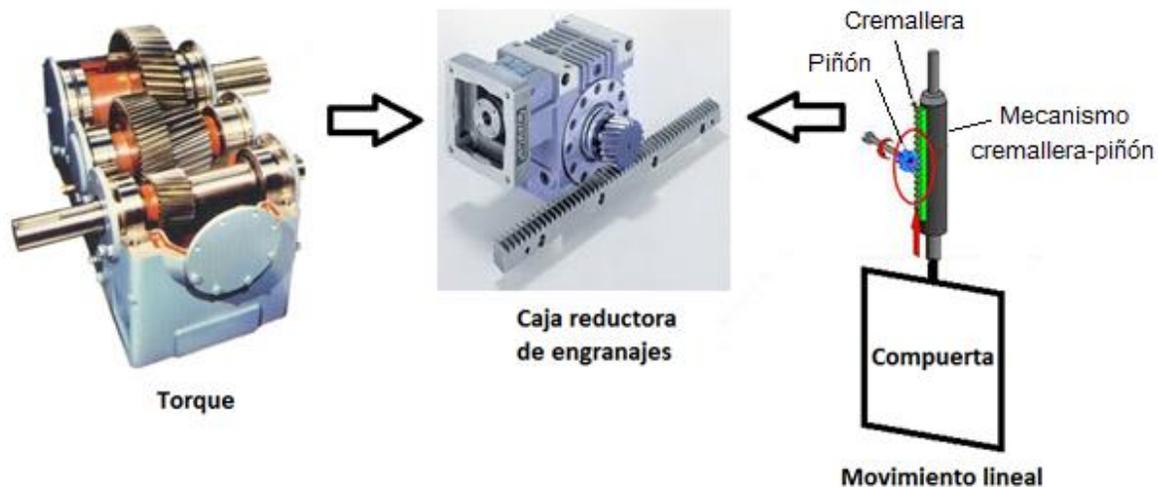


Fig.4. . Elementos de la ca a reductora.

El elemento más importante de movimiento, es el motor AC asncrono tri ásico ue puede ser de un 1 P , donde la potencia suministrada al rotor se produce por inducci n electromagn tica. El motor de inducci n es una má uina rotativa alterna AC , donde un conjunto de electromagnetos están constituidos en el estator con alimentaci n AC en los mismos. La naturaleza alterna del voltaje de suministro, induce una uer a electromagn tica FEM en el rotor Mas , 201 , originando movimiento. Para el presente propuesta se considerará la velocidad del motor constante.

4.2.1.4 PLC

Se escogerá el PLC IMATIC 00 ver Fig.4. , ue es un controlador modular para soluciones de sistema en el rango medio de automatizaci n discreta y optimizaci n de la productividad en todas las áreas y sectores. Para nuestro sistema de control utilizaremos el controlador tipo compacto, el cual posee alta y media velocidad con acceso inmediato a contadores hardware un control PID integrado con el bloque de unci n y posicionamiento simple. Además cuenta con inter a de comunicaci n ET ERNET, PROFINET, PROFIBUS DP y punto a punto. El PLC IMATIC 00, contiene los siguientes m dulos

- Fuente de alimentaci n de 2A.
- M dulos de se al para se ales digitales y anal gicas y con figuraci n centralizada y descentralizada.
- M dulos de comunicaci n Punto a Punto para dispositivos periféricos de todo tipo incluyendo 1 inter a de 11.2 bits seg y protocolos estándar de comunicaci n.
- M dulos de unci n para conteo de alta velocidad, posicionamiento, control en la o cerrado y control de cámara.



Fig.4. . Módulo del PLC SIMATIC 57-300.

En síntesis el PLC seleccionado dispone de una alta velocidad de respuesta en tiempo real, presenta una alta conectividad y ofrece diferentes facilidades en el manejo de software y del hardware. Además presenta alta inmunidad a las interferencias producidas por motores y puede trabajar en condiciones ambientales adversas, tales como altas temperaturas y elevada humedad Rivas Pere et al 2014 .

4.2.1.5 Computador

Se implementará una sala de control sobre el canal. Para leer los estados de las variables de proceso nivel y posición y el cálculo del flujo de agua mediante la Ec. 4.1 será implementada en el computador. Además contendrá la estrategia de control neurofuzzy, lo que le permitirá realizar la acción de control deseada sobre el proceso. La estación maestra constituida por la PC, será de 100M y 1 M de memoria RAM y conexión Ethernet para operar a distancia, monitorear, analizar y registrar la situación de las variables involucradas en el sistema de control.

4.2.1.6 Fuente de energía auxiliar

El suministro de energía auxiliar para el sistema de control local instrumentos de campo, será proporcionado por un panel solar ubicado en la estructura superior de la compuerta eólica aguas arriba y con dirección hacia el mayor punto de captación de luz solar. La elección del panel solar deberá ser tomada en base a la dimensión y número de celdas. Se encuentran disponibles paneles de 60 o 72 celdas ver Fig.4. . Los paneles con una cantidad superior de celdas necesitan sistemas de regulación del voltaje de salida.

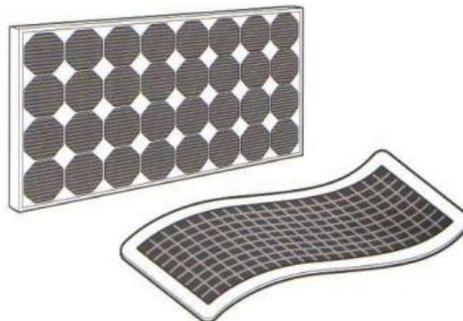


Fig.4. . División de celdas de panel solar.

4.3 Propuesta de implementación del controlador desarrollado

El **OPC** (OLE for process control) es un estándar de comunicación en el campo de control y supervisión de procesos industriales, basado en una tecnología Microsoft, que ofrece una interacción común para la comunicación que permite que componentes software individuales interactúen y compartan datos. La comunicación OPC se realiza a través de una arquitectura cliente-servidor. El servidor OPC es la fuente de datos como un dispositivo hardware a nivel de planta y cualquier aplicación basada en OPC puede acceder a dicho servidor para leer/escribir cualquier variable que exista en el servidor. Es una solución abierta y libre al clásico problema de los drivers propietarios. Los costos de trabajar con el estándar OPC son menores. Como otras ventajas se pueden ver la interoperatividad entre aplicaciones de automatización y control, interoperatividad entre aplicaciones de gestión y oficina, elimina el problema de compatibilidad, eficiente acceso a los datos del proceso, facilidad de operación y otras. La medición de niveles de variación de agua y posición de compuerta en el canal de riego, recolectadas por el controlador local SIMATIC 300 tendrán que ser enviadas a la PC cliente, donde se encontrará activa la aplicación en Simulink con la implementación del controlador neuronal y con predictor de MIT desarrollado en el capítulo. Con las señales de entrada se calculará la salida de control que será enviada de regreso al controlador para su ejecución. En la Fig.4., se observa el diagrama de comunicación OPC entre el servidor y el cliente.

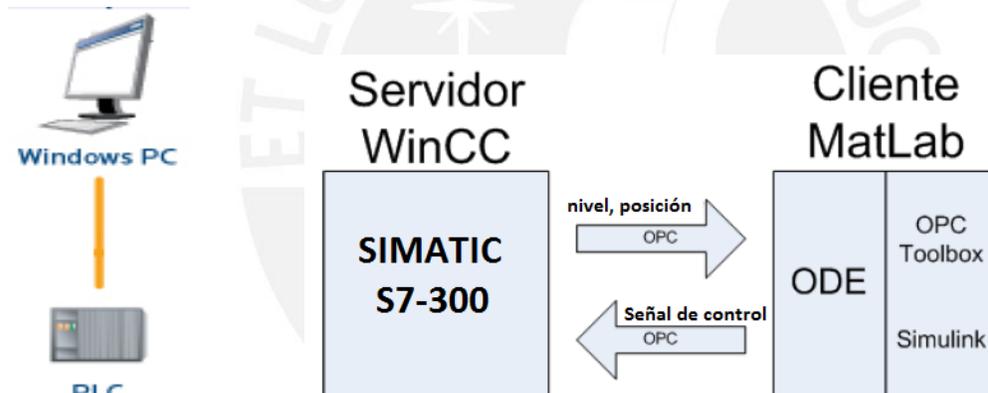


Fig.4. Diagrama de comunicación OPC entre el servidor y el cliente.

4.4 Propuesta del sistema de control

- Control de compuerta y supervisión de variación de nivel de agua y localización de compuerta.
- Sistema de monitoreo y control e indicación de variación de nivel de agua.
- Fácil programación y edición a cambiar el nivel de agua y compuerta.
- Implementos del operador CADA, interacción dinámica MI.

Una estación de automatización puede incluir la fuente de corriente Power Supply P, la unidad central de procesamiento Central Processing Unit CP, el procesador de comunicación Communication Processor CP así como los módulos de entrada y de salida I/O Modules.

En el sistema de control local, los instrumentos deben de ser conectados mediante protocolos de comunicación que permitan la transferencia de datos. Este es un controlador piloto que entrega su señal de control como referencia interna a otro controlador interno

denominado regulador de rgano , encargado de obtener el posicionamiento apertura real del grupo de compuertas aguas arriba situadas en la casa de compuertas . De esta orma se logra ue las compuertas no est n continuamente en movimiento y se reduce el desgaste mecánico de un movimiento continuado. En el diagrama de blo ues uncional del sistema de control local de la distribuci n de agua en el bocal ver Fig.4. , es posible observar la interacci n e istente entre el regulador piloto y el regulador de rgano as como tambi n los elementos adicionales para su uncionamiento

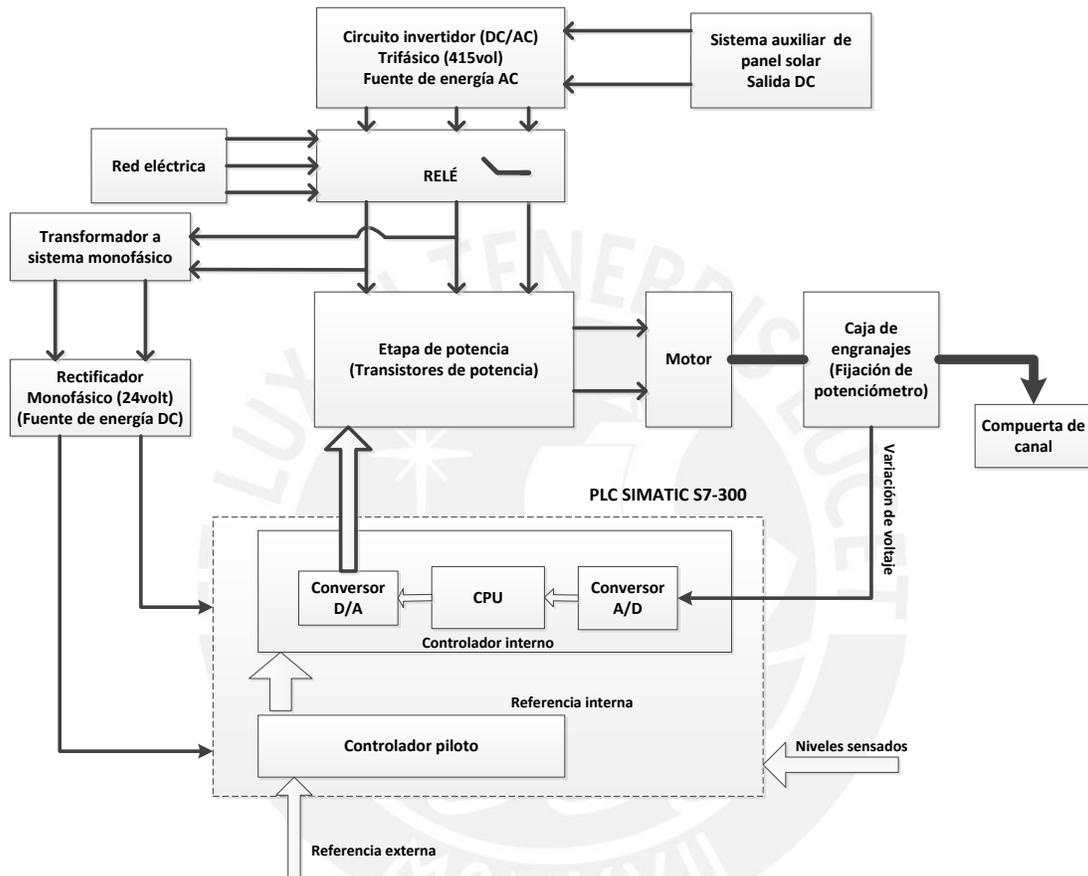


Fig.4. . Diagrama de blo ues uncional para la implementaci n de sistema de control local.

Este es un componente importante de electrónica de potencia inmerso en la transformación de la energía de la fuente auxiliar solar DC, a su equivalente trifásico mediante un circuito convertidor y que a su salida permitirá activar el motor en caso de corte de suministro de energía eléctrica convencional. La señal analógica voltaje a la salida del potenciómetro, permite una medición indirecta de la apertura de la compuerta y mediante la utilización de convertidor A/D del PLC, que será procesada y luego aplicada a la entrada del motor mediante la conversión D/A. El control de este la o dentro del la o principal de control se denomina un control en cascada.

El controlador piloto toma en cuenta la medición de la variación de los niveles de agua aguas arriba y aguas abajo alejado. En este sentido el protocolo de comunicación para la transferencia de datos será el bus de sistema de desarrollo PC Industrial Ethernet que se basa en el estándar IEEE 802.3 con una tasa de transmisión de 10 o 100 Mbit/s. Con Industrial Ethernet es posible conectar hasta 1024 estaciones los medios de transmisión pueden ser

- un cable triaxial o un cable coaxial blindado
- ITP Industrial Twisted Pair
- POC Fiber Optic Cable o un Conductor de fibra óptica

Considerando que el PLC SIMATIC 300, estará ubicado aguas arriba y junto a la estructura de la casa de compuertas y panel solar entonces, para la transmisión de señales de sensor de variación de nivel aguas abajo además se utilizará un adaptador de conexión y fibra óptica, debido a la gran distancia de separación y longitud del tramo de canal. En tanto para el sensor de variación de nivel aguas arriba, se utilizará el cable ITP. El PLC recogerá las señales de los sensores de variación de nivel y del sensor de posición del controlador interno y comunicará mediante conexión inalámbrica con la estación remota de esta manera se realizará la transferencia bidireccional de datos mediante OPC.

También se considerará un sistema de alerta para previsión de fallos, aprovechando las características de transmisión celular GSM de los sensores de nivel ultrasónicos que en integración con la estación SIMATIC 300 de forma independiente y basándose en el sistema de mensajes cortos SMS, enviará información importante sobre el estado de la planta, mensajes de alarma o mensajes de aviso a un ingeniero de mantenimiento o un centro de control. A la inversa, la estación deberá ser capaz de recibir e interpretar mensajes. La transmisión de datos a través de GSM usando una red celular GSM es una alternativa simple, viable y económica.

Para conectar un SIMATIC 300 a una red GSM, se necesita conectar la interfaz serie de comunicaciones con el MODEM PRISM MD 20. En la Fig.4.10, se muestra el esquema de conexión del sistema de control propuesto

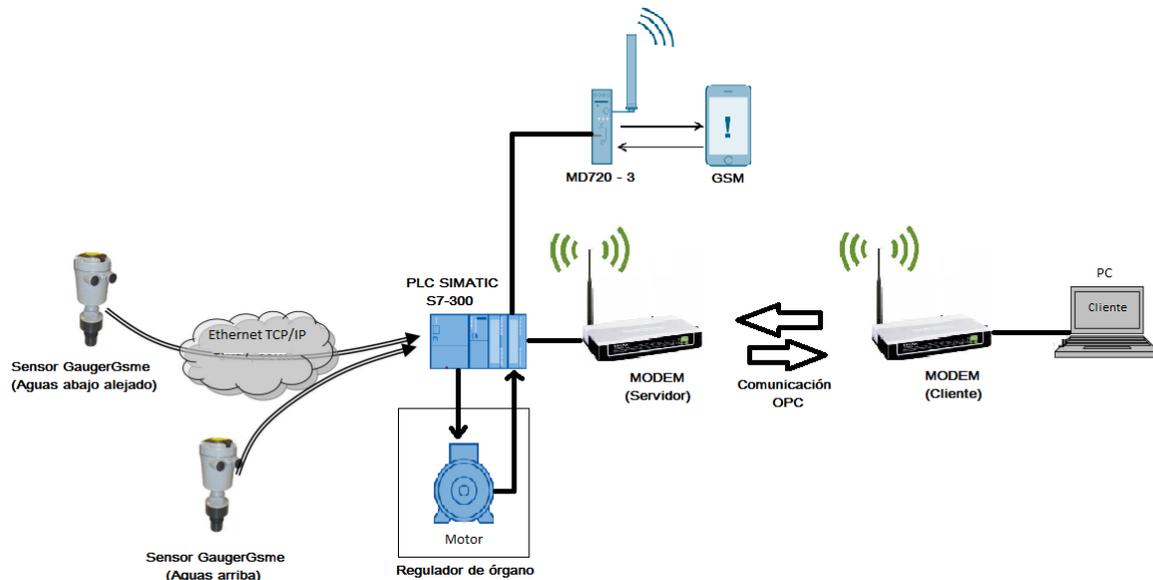


Fig.4.10. Integración del sistema de control local y estación de control y supervisión.

Finalmente la estación remota cliente, contará con una interfaz MI, diseñada para el monitoreo y control de la apertura de la compuerta además de incorporar con un registro de datos históricos de la evolución de la variación del nivel de agua aguas abajo además. En la propuesta de diseño, se pretende lograr la comunicación entre el sistema de control en simulación y una aplicación MI. Para ello se considera la aplicación MI en windows,

puesto que se tiene una gran accesibilidad, información y fácil manejo resultando conveniente para aplicaciones de poca complejidad. Además le deberá seguir la simplicidad en la programación, ya que el tiempo que tarda en lograr la comunicación entre el sistema de control y la MI depende en gran medida de este punto. Finalmente, el nivel de información del que se dispone y la redundancia de la plataforma de la aplicación tienen cierto nivel de importancia, pero no son críticos.

La forma fácil y práctica de crear un MI es mediante Labview que mediante la interfaz de simulación Tool it provee métodos para generar un enlace con el sistema de control desarrollado en Simulink, convirtiéndolo en una librería dinámica DLL. Al combinar las capacidades de Simulink y un Real Time Workshop con Labview, la interfaz de simulación Tool it ayuda a importar modelos de simulación en Labview.

Labview es un lenguaje de programación gráfico que utiliza iconos en vez de líneas de texto para crear aplicaciones. Las aplicaciones en Labview recientemente son llamadas instrumentos virtuales VIs. En tanto Simulink provee un ambiente gráfico para el diseño y una ejecución interactiva de sistemas de control y modelos dinámicos. En tanto el Real Time Workshop es un paquete para Simulink que genera código C de modelos Simulink. Real Time Workshop luego utiliza un compilador C para compilar el código C para la ejecución de varios objetivos en tiempo real. En esta perspectiva, la interfaz de simulación Tool it provee un camino a crear una interfaz de usuario Labview para interactuar con el sistema de control neurodiagnóstico desarrollado en Simulink. Con una interfaz de usuario Labview, se pueden manipular los parámetros sistema de control en Simulink. Para la utilización de la interfaz de simulación Tool it, se debe tener Labview y MATLAB corriendo en la misma computadora cliente. Además de contar con el sistema operativo Windows y el protocolo de comunicación TCP/IP. Cuando se inicia Matlab, se puede comenzar también la interfaz de simulación Tool it IT server, lo cual habilita la comunicación entre Labview y Matlab para comunicación entre ambos. En la computadora se crea un VI de cabecera, que en este caso será la representación cada del tramo de canal de riego y que provee al usuario una interfaz para el acceso al sistema de control en Simulink. Este panel frontal contiene los controladores e indicadores que corresponde a los parámetros del sistema de control en Simulink. Se podrán cambiar los valores de la señal de control e inmediatamente ver los resultados de los cambios en los indicadores. Utilizando un bloque IT Connection manager, se puede especificar la relación entre controles e indicadores en el panel frontal en Labview y los parámetros de Simulink. Después de configurar el bloque IT Connection Manager, la interfaz de simulación Tool it automáticamente genera el código de diagrama de bloques necesario para establecer la relación entre Labview y el modelo en Simulink.

Se debe tener cuidado en no generar ninguna clase de conflicto entre la interfaz de simulación Tool it y la comunicación OPC de la PC cliente al controlador local servidor. Por tanto se tendrá una sincronización, donde la transmisión de datos será más lenta entre Labview y Simulink en comparación con la transmisión OPC entre Simulink y el PLC IMATIC 00.

En la Fig.4.11, se muestra el sistema CADA propuesto, donde se pueden apreciar de manera dinámica las variables inmersas en el control, indicadores y registrador histórico.

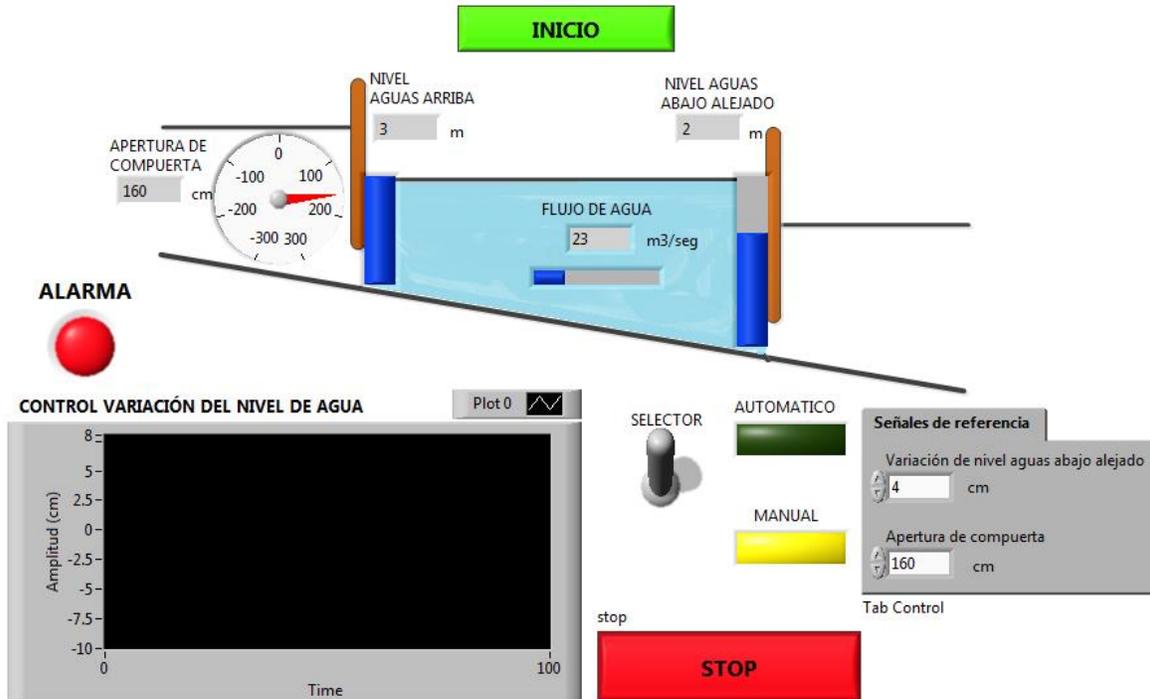


Fig.4.11. Inter a de comunicaci n para la supervisi n y el control.

4.5 Conclusiones preliminares

- se seleccionaron los instrumentos necesarios para la medici n de nivel y posici n as como tambi n se establecieron los protocolos de comunicaci n para la transmisi n de datos. En este sentido los sensores ultras nicos poseen un sistema de comunicaci n adicional M el cual mediante una cone i n a una inter a de comunicaciones puede transmitir datos en un entorno de tele on a celular acceso a datos desde un tel fono .
- En la implementaci n pr ctica se propuso un sistema auiliar de energ a constituido por un panel solar y un sistema electrnico de potencia para la adecuaci n de niveles de potencia y orma de onda necesaria para la alimentaci n del motor tri f sico de inducci n ue activar a la compuerta e uivalente.
- se propuso la implementaci n pr ctica un sistema de control local mediante el PLC IMATIC 00 y un sistema de control y monitoreo estaci n base , las cuales interact an mediante la comunicaci n OPC.
- n sistema CADA es propuesto mediante el enla amiento de LA VIE y imulin por medio de la inter a de comunicaci n Tool it. La velocidad de comunicaci n debe de ser menor a la establecida entre por OPC entre imulin y el controlador local.

CONCLUSIONES

- Se estudió el comportamiento dinámico del flujo de agua en un punto de un tramo principal de canal de riego aguas abajo. Determinándose que la variación del flujo de agua requerida puede ser lograda mediante la apertura o cierre de la compuerta equivalente aguas arriba. Con la identificación de la variable de proceso y variable de control se realizó la determinación de un modelo ARMAX de segundo orden y con un tiempo de retardo de 0 seg mediante la identificación de sistemas. Para su posterior validación y aplicación.
- Con el modelo matemático obtenido se realizó el diseño en tiempo discreto de un controlador Neuro difuso con predictor de MIT para manejo de retardos de tiempo elevados. Además la implementación de un filtro de Kalman para estimación de variables de estado y filtrado de las mismas. Adicionalmente se incorporó un filtro discreto de segundo orden en el lazo de realimentación eterna realimentación positiva, para atenuación de frecuencias originadas por discrepancias entre el modelo y el comportamiento dinámico real de la planta.
- Se realizaron las pruebas de simulación bajo distintas condiciones de perturbación y variación de parámetros de la planta estableciéndose de manera cualitativa una rápida respuesta del sistema de control y sin la presencia de sobreimpulso respecto a un controlador PI con predictor de MIT tiempo de establecimiento 1 respecto del PI con predictor de MIT, 0 menor del sobreimpulso del PI con predictor de MIT y menor en la atenuación de la perturbación del PI con predictor de MIT. Además se realizaron pruebas comparativas con la determinación de un índice de desempeño cuantitativo IAE que otorga una mayor ventaja al controlador NDP desarrollado, puesto que bajo las diferentes condiciones de operación logra una mejor señal de control a la entrada del actuador IAE 1. 10 sin perturbación e IAE 1. 10 con perturbación.
- La robustez del sistema de control NDP, es tolerante hasta un rango máximo de 20% de la variación de parámetros internos y de la variación de retardo presentando mejor performance en comparación con un controlador PI con predictor de MIT. Pasados estos límites se necesitaría de un mecanismo adicional adaptativo que incluya la estimación en línea de los parámetros de la planta permitiendo su autoajuste. Esto permitiría ampliar el rango de operatividad del controlador NDP propuesto. La variación de parámetros internos siempre estará presente en la dinámica de la planta estudiada, debido a los distintos regímenes de descarga bajo diferentes condiciones de explotación del recurso hídrico.
- Se realizó una propuesta de implementación práctica mediante la selección de instrumentos y equipos, además protocolos de comunicación entre los distintos dispositivos para el sistema de control. En este sentido se estableció un controlador local servidor para el control local de acciones de apertura y cierre de compuerta equivalente que a su vez recibe la señal de control calculada por la PC de la estación base cliente por medio de la interfaz de comunicación OPC. Finalmente se propuso un diagrama de bloques en el cual se describe la interfaz de potencia necesaria para la activación del motor AC trifásico y un soporte de energía auxiliar con la incorporación de un panel solar.

RECOMENDACIONES

- Implementar el controlador NDP desarrollado en canales principales de riego en el Perú.
- Entender la aplicación de la red neuro di uso para la identificación del comportamiento dinámico de la planta mediante la utilización de una red ANFI sistema de inferencia neuro di uso adaptativo. De esta manera se logra a la identificación del comportamiento de la planta en el rango no lineal.
- Implementar técnicas adaptativas para el ajuste de parámetros del modelo utilizado en la estructura del predictor de mit.



BIBLIOGRAFÍA

- uyals i, D., E ler, ., Falvey, ., Rogers, D., and er o o E. 1 1 . *Canal systems automation manual. A water resources technical publication*. Vol. I., Denver, A.
- Castillo arcia, F. , Feliu atlle, V., Rivas Pere , R., and anc e Rodrigue , L. 2011 . Time domain tuning o a ractional order Pla controller combined wit a mit predictor or automation o water distribution in irrigation main c annel pools. In *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*, 1 PART 1 , 1 04 1 0 4.
- C ow, V.T. 1 . *Open-channels hydraulics*. Mc raw ill oo Company, N. , A.
- Clemmens, A. ., and c uurmans, . 2004 . imple optimal downstream eedback canal controllers A CE test case results. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 1 0 1 , 4 .
- Cuenca Tinitana, .C. y Rivas Pere R. 2012 . Desarrollo de un sistema de control predictivo para la distribuci n de agua en un tramo de un canal principal de riego. *Revista Estudios Universitarios Universidad Nacional de Loja*, 11 1 0.
- Feliu atlle, V., Rivas Pere , R., Castillo arcia, F. ., an c e Rodrigue , L., and Linares ae , A. 2011 . Robust ractional order controller or irrigation main canal pools wit time varying dynamical parameters. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2 , 20 21 .
- Linares, A., Rivas Pere , R., and Feliu, V. 200 . New ad vanced management and control strategies applied to y draulic In rastructures or water transport and distribu tion. *Abengoa*, No December, 41 42.
- Litrico, X. and Fromion, V. 200 . *Modeling and control of hydrosystems*. pringer Verlag, London, .
- Malaterre, P.O. and Rogers, D.C. 1 . Classification o canal control algorit ms. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 124 1 , 10.
- Mo an, Reddy, . 1 . alman filtering in t e control o irrigation canals. *Appl. Math. Modelling*, 1 , 201 20 .
- Ni on, ., Trent, . y Marcuello, C. 2004 . *El agua en Europa; una evaluación basada en indicadores*. Agencia Europea de Medio Ambiente, Copen ague.
- Pedregal, D. ., Rivas Pere , R., Feliu V., anc e L., and Li nares, A. 200 . A non linear orecasting system or t e Ebro River at arago a, pain. *Environmental Modelling & Software*, 24 4 , 02 0 .
- Rivas Pere , R., Feliu atlle, V., Castillo arcia, F. . and Linares ae , A. 2014a . Mat ematical model or robust control o an irrigation main canal pool. *Environmental Modelling & Software*, 1 1 , 20 220.

- Rivas Pere , R., Feliu atlle, V., Castillo arcia, F. ., an c e Rodrigue , L. and Linares ae , A. 2014b . Robust ractional order controller implemented in t e first pool o t e Imperial de Aragon main canal. *Water Technology and Sciences*, 1 , 2 42.
- Rivas Pere , R., Feliu atlle, V., anc e Rodrigue , L., Pe dregal Tercero, D. ., Linares ae , A., Aguilar Mari osa, .V. and Langarita arcia, P. 200 a . Identi cation o t e first pool o t e Imperial de Aragon main irrigation canal. *Hydraulic Engineering in Mexico*, 2 1 , 1 .
- Rivas Pere , R., Feliu atlle, V., Castillo arcia, F., and Li nare ae , A. 200 b . ystem identi cation or control o a main irrigation canal pool. In *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*, 1 Part 1 , 4 4.
- antos, M. 2011 . n en o ue aplicado del control inteligen te. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 4 , 2 2 .
- i Meng, T. and io C ai, . 200 . Adaptive traning sc ema in Mamdani type neuro u y models or data analysisin dynamic system orecasting. *International Joint Conference on neural Netwoks*, 1 1 .
- u, . 200 . *Recent advances in intelligent control systems*. pringer Verlag, London, .
- Litrico, X. and Fromion, V. 2004 . Analytical appro imation on open c annel low or controller design. *Applied mat ematical modeling*, 2 , .
- Lo ano, D. and Arran a, C. 2010 . imulation o automatic control o an irrigation canal. *Agricultural Water Mana-gement*, , 1 100.
- Ri o, M. and Arran a, C. 200 . ydraulic per ormance o a downstream controlled irrigation canal e uipped wit di erent o ta es types. *Agricultural Engineering International T e CI R ournal o cientific Researc and Development II Marc .*
- eyer, E. 2001 . ystem identi cation o an open water c annel. *Control engineering practice*, , 12 12 .
- ovalen o, P.I. 1 . Automation o land reclamation systems. Moscow olos, 0 pp.
- Mareels, I. and eyer, E. 2004 . ystems engineering or irrigation systems. *Proceeding of IFAC Symposium on Large ScaleSystems*, Osa a,apan, 2 40.
- Arregu n, F. 1 . El uso e iciente del agua y la tecnolog a. *Ingeniería hidráulica en México*. 12 1 , 1 .
- Rivas, R., peran, R., Pineda, . y P re , . 200 . Control distribuido ba o supervisi n inteligente centrali ada en el istema de riego ira de Melena. *Ingeniería hidráulica en México*, 1 2 , .

- Rivas, R. 1990. Automatic control of water distribution in irrigation systems D. c. t esis . *Land Reclamation and Hydraulic Scientific Research Institute of Ukraine*, Kiev, Ukraine, 20pp.
- Urrut, C.M. and Piao, X. 2004 . Advances in PLC based irrigation canal automation. *Irrigation and Drainage*, 29, 2 .
- Goussard, J.(1993). L'Automatisation des Réseaux d'Irrigation en Canau . *Commission Internationale des Irrigations et du Drainage*, New Delhi, India.
- Litrice, X., Fromion, V. 2000 . Tuning of robust distant downstream PI controllers for an irrigation canal pool. I. Theory. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 124, 1 .
- Lung, L. 1997 . *System identification-theory for the user*. Second edition, Prentice Hall PTR, New Jersey, 10pp.
- Malin, . 2004 . Performance of model predictive control on ACE test canal 1. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 130, 22-24 .
- Malin, . and Clemmens, A. 2000 . Automatic downstream water level feedback control of branching canal networks theory. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 126, 20-21 .
- Deltour, J.L., and Gillo, F., 1991 . Introduction of Smith predictor into dynamic regulation. *J. Irrig. Drainage Eng. Asce*, 117, 4-5 .
- Dorf, R.C., and Bishop, R. . 2000 . *Modern Control Systems*. Pearson Education, Madrid.
- Ogata, . 2000 . *Ingeniería de Control Moderna*, Cuarta Edición, Pearson Education S.A., Madrid.
- Rivas Pere , R., Prada Moraga, C. and Peran González , J.R. 2002 . Robust adaptive predictive control of water distribution in irrigation canals. *In: Proceedings of XV world IFAC congress*, Barcelona, Spain, 2002.
- Corrigan, J., Hanna, J., and Sai, . 1997 . Estimation of uncertainty in an open channel network mathematical model. *Appl. Math. Modell*, 11, 1 .
- Litrice, X. and Georges, D. 1997 . Robust continuous time and discrete time flow control of a dam river system II . *Controller design. Appl. Math. Modell*, 11, 2-4 .
- Cooremans, . 1997 . Control of water levels in open channels. Ph.D. Thesis. *Delft University of Technology*, Delft, The Netherlands.
- Lung, L. and Lad, T. 1994 . *Modeling of dynamic systems*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 100 pp.

- Åström, R. 1997. *System modeling and identification*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1997.
- Martinez, N. 2011. A Review Paper on Automatic Canal Gate Control of ϕ Induction Motor with PLC and VFD, Powered by Solar System and Monitoring by SCADA. *International Journal of Emerging Trends in Electrical and Electronics (IJETEE)*, 1(1), 2011.
- Smith, L. 1992. A simple Adaptive Smith Predictor for Controlling Time Delay Systems. *Biomedical Engineering Program, Department of Electrical Engineering, Carnegie-Mellon University, Pittsburgh*, 1992.
- Anderson, J. 1995. *An Introduction to Neuronal Networks*. Library of Congress Cataloging in publication Data MIT.
- Overloop Van, P. and Van den Boeis, X. 2012. Identification of Properties of Open Water Channels for Controller Design. *IFAC Symposium on System Identification*, Brussels, 101-1024.
- Feliu Atlle, V., Rivas Pere, R. and Castillo Garcia, F. 2009. Fractional order controller robust to time delay variations for water distribution in an irrigation main canal pool. *Computer and Electronics in Agriculture*, 1(1) 2009.
- Montañar, A. and Van Overloop, P. 2009. Centralized controller for the Narmada main canal. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 4, 2009.
- Dávila, F. 2011. *Diseño de un Sistema de Control Neural para el Monitoreo y Control de Calidad en una Columna de Destilación Multicomponentes*. Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Navarro, R. 2011. *Diseño de un Controlador Neurodifuso para la Conducción Autónoma de un Camión Minero de dos Cuerpos*. Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Rodríguez, J. 2009. *Desarrollo de un Sistema de Control Avanzado de la Presión del Vapor en una Caldera de Tubos de Fuego*. Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Morán, A. 2011. *Apuntes del curso de Redes Neuronales*. Pontificia Universidad Católica del Perú – Maestría en Ing. de Control y Automatización.
- Comisión Técnica Multisectorial. 2009. *Política y estrategia nacional de recursos hídricos del Perú*. Autoridad Nacional del Agua ANA. Lima. Disponible en http://www.ana.gob.pe/media/2/politicas_estrategias_r.pdf.

ANEXOS

Desarrollo de un Controlador Neuro-Difuso para el control de la Distribución de Agua en un Tramo de un Canal Principal de Riego

Calderón-Mendoza E.*, Rivas-Perez R.***, Sotomayor-Moriano J.*

*Programa de Maestría en Ingeniería de Control y Automatización, Pontificia Universidad Católica del Perú, Avenida Universitaria 1801, San Miguel, Lima, Perú (Tel: 51-1 6262000, Anexo 4716;
(e-mail: edwin.calderon@pucp.pe, jsotom@pucp.edu.pe)

**Programa de Maestría en Ingeniería de Control y Automatización, Pontificia Universidad Católica del Perú, Universidad Politécnica de la Habana, CUJAE, Cuba (e-mail: rivas@electrica.cujae.edu.cu)

Resumen: Se desarrolló un controlador neuro-difuso con predictor de Smith (NDPS) para el control efectivo de la distribución de agua en un tramo de un canal principal de riego (planta), con el objeto de mejorar la eficiencia y reducir las actuales pérdidas de agua por concepto de operación en los sistemas de riego. Se obtuvo un modelo matemático con un aceptado grado de adecuación del tramo de canal de riego objeto de estudio. Se diseñó un controlador neuro-difuso, el cual integra conocimiento y auto-aprendizaje y dispone en su estructura interna de un predictor de Smith (PS), para compensar el efecto del retardo de tiempo dominante de la planta. Finalmente, se muestran los resultados experimentales comparativos de funcionamiento del controlador NDPS con otro controlador PI con PS, ambos diseñados bajo las mismas especificaciones de respuesta temporal, con el objetivo de evaluar sus respectivos desempeños frente al efecto de perturbaciones y de variaciones de los parámetros dinámicos de la planta objeto de estudios. Los resultados obtenidos de estos experimentos muestran una respuesta temporal mucho más rápida, con una mejor atenuación del efecto negativo de las perturbaciones, así como con un grado de robustez superior del controlador NDPS desarrollado.

Palabras claves: Controlador neuro-difuso, predictor de Smith, canal de riego, control de la distribución de agua, modelo matemático, uso eficiente de los recursos hidráulicos.

1. INTRODUCTION

En la actualidad el agua se está convirtiendo en un recurso escaso y en el futuro inmediato la escasez de dicho elemento constituirá uno de los grandes retos que la sociedad moderna deberá enfrentar (Nixon et al., 2004). Es por ello, que en el ámbito internacional se observa un incremento en la aplicación de controladores automáticos en la distribución de agua en los canales principales de riego (Clemmens and Schuurmans, 2004; Litrico and Fromion, 2009). Sin embargo, es necesario señalar que las investigaciones destinadas a lograr una gestión eficiente de los recursos hidráulicos disponibles en los sistemas de riego, no han sido suficientemente impulsadas, debido entre otros factores a las dificultades tecnológicas y de infraestructuras que presentan estos sistemas (Rivas-Perez et al., 2008a).

El aprovechamiento del agua en los sistemas de riego demanda una atención especial debido a que la agricultura es la rama que consume la mayor cantidad de este líquido y probablemente con la menor eficiencia. Por consiguiente, un incremento en la eficiencia de la distribución de agua en los canales principales de riego puede traducirse en volúmenes adicionales de agua para atender mayores áreas de cultivo (Rivas-Perez et al., 2014a). En este sentido, el control automático se muestra como una posible estrategia para mejorar la operatividad de los canales de riego, así como el servicio a los usuarios con tiempos mínimos de respuesta (Litrico and

Fromion, 2009; Rivas-Perez et al., 2014b).

Los controladores PID han sido muy utilizados y expandidos en el control de la distribución de agua en los canales principales de riego (Buyalsky et al., 1991; Clemmens and Schuurmans, 2004; Litrico and Fromion, 2009; Malaterre and Rogers, 1998). Sin embargo, diferentes estudios muestran que los canales principales de riego pueden presentar parámetros dinámicos variables en el tiempo en un amplio rango, por lo que la aplicación de controladores PID convencionales no siempre resulta efectiva (Rivas-Perez et al., 2014b). Por tal motivo, una de las tendencias tecnológicas actuales consiste en el desarrollo de controladores con un mayor grado de robustez, entre los que se destacan los controladores: H_∞ , CPBM, predictor de Smith (PS), PID de orden fraccional, etc. (Linares et al., 2008). Entre las principales desventajas que presentan estos controladores se encuentran: mayor complejidad matemática de los algoritmos de control, necesidad de ajustar parámetros adicionales y/o de disponer de un modelo interno, razonablemente bueno, de la planta a controlar, etc. (Cuenca-Tinitana y Rivas-Perez, 2012).

En los últimos años se vienen aplicando en diferentes ramas de la ciencia y la tecnología, con resultados satisfactorios, los controladores inteligentes, los cuales representan una opción alternativa de solución de problemas de control de plantas caracterizadas por presentar comportamientos dinámicos complejos (Yu, 2009). En muchos casos reales, las plantas indus-

triales son realmente tan complejas que resulta casi imposible o inapropiado controlarlas utilizando controladores convencionales. La caracterización de estas plantas con un entorno de incertidumbre, en general imposible de formular en un riguroso marco matemático, ha conducido al desarrollo de los controladores inteligentes (Santos, 2011).

En este sentido, considerando el complejo comportamiento dinámico que presentan los sistemas de riego (dinámica no lineal y con parámetros distribuidos, retardo de tiempo dominante, parámetros dinámicos variantes en el tiempo, etc.) surge la necesidad de desarrollar controladores inteligentes para el control efectivo de la distribución de agua en canales principales de riego, que se distingan por su robustez, confiabilidad y fácil entendimiento.

Una alternativa de esta clase de controladores consiste en el diseño de controladores neuro-difusos, los cuales se caracterizan por combinar la capacidad de aprendizaje de las redes neuronales artificiales (RNA) con el poder de interpretación lingüística de los sistemas de inferencia difusos, obteniéndose los siguientes resultados: aplicabilidad de los algoritmos de aprendizaje desarrollados para las RNA; integración de conocimientos implícitos, adquiridos a través del aprendizaje, y explícitos, los cuales pueden ser explicados mediante reglas; extracción de conocimientos para una base de reglas difusas a partir de un conjunto de datos, etc.

El presente trabajo tiene como objetivo el desarrollo de un controlador neuro-difuso con predictor de Smith (NDPS) para el control efectivo de la distribución del agua en un tramo de un canal principal de riego (planta), que posibilite el aumento de la operatividad sobre el canal, así como la disminución de las pérdidas por concepto de operación.

Este trabajo ha sido estructurado de la siguiente forma. En la Sección 2 se presentan las características fundamentales de un tramo de un canal principal de riego. En la Sección 3, mediante la aplicación de las herramientas de identificación de sistemas, se obtiene un modelo matemático que describe el comportamiento dinámico de dicho tramo. En la sección 4 se realiza el diseño del controlador NDPS. En la sección 5 se muestran los resultados comparativos de las respuestas temporales del sistema de control del proceso objeto de estudio con controladores NDPS vs PI. Finalmente, en la última sección se ofrecen las conclusiones.

2. DESCRIPCIÓN DEL CANAL PRINCIPAL DE RIEGO

Un canal principal de riego es un sistema hidráulico abierto, cuyo objetivo fundamental consiste en transportar agua desde una fuente (río, lago, represa, etc.) hasta los usuarios finales (agricultores) (Litrico and Fromion, 2009). Los canales principales se encuentran integrados por varios tramos separados por compuertas, las cuales generalmente se utilizan para controlar el nivel de agua o las descargas (Rivas-Perez et al., 2008a).

El tramo de canal objeto de estudio pertenece al canal Imperial de Aragón (España), el cual forma parte de la confederación Hidrográfica del Ebro y constituye una de las obras hidráulicas más importantes de Europa (Pedregal et al., 2009).

El agua pasa desde el río Ebro al primer tramo del canal a través de una casa de compuertas, la cual posibilita la entrega de un caudal máximo de 30 m³/s (en el origen). El canal tiene 108 km de longitud, una profundidad variable entre 3 m y 4 m y una sección transversal trapezoidal. Además, presenta un total de 10 tramos de diferentes longitudes, separados mediante compuertas sumergibles (Rivas-Perez et al., 2008a).

En la Fig. 1. se muestra un diagrama funcional del canal objeto de estudio, en el cual es posible observar los tramos, las compuertas que regulan las descargas, las entregas laterales de agua, así como los puntos de medición de nivel aguas abajo al final de cada tramo.

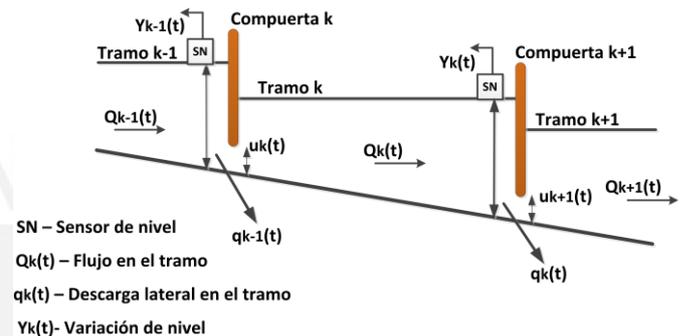


Fig. 1. Diagrama funcional del canal de riego objeto de estudio.

El canal se encuentra electrificado y automatizado de forma íntegra. De la Fig. 1 se observa que el método de regulación utilizado en el canal es el de aguas abajo con sensor alejado. Los controladores instalados en cada tramo para el control de la distribución del agua son del tipo convencional (PI y PID), los cuales como es conocido no garantizan un efectivo control cuando las plantas presentan comportamientos dinámicos complejos (Feliu-Batlle et al., 2011).

3. IDENTIFICACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UN TRAMO DEL CANAL DE RIEGO

El diseño de controladores generalmente requiere de modelos matemáticos que describan de forma adecuada el comportamiento dinámico como objeto de control de las plantas bajo estudio (Rivas-Perez et al., 2008b).

En el caso de los canales principales de riego, tradicionalmente el modelado matemático se realiza mediante las ecuaciones de Saint-Venant (Chow, 1988). Estas ecuaciones son no lineales en derivadas parciales del tipo hiperbólicas con restricciones complejas, por lo que su utilización directa en el diseño de controladores presenta serias dificultades (Castillo-García et al., 2011).

En los últimos años se vienen aplicando de forma exitosa los métodos de identificación de sistemas para la obtención de modelos matemáticos adecuados de la distribución de agua en los canales principales de riego (Litrico and Fromion, 2009). Los modelos matemáticos que se obtienen mediante estas herramientas se derivan directamente de los datos observados de entrada y salida de la planta y pueden ser utilizados con fines de diseño de controladores efectivos de la distribución de agua (Rivas-Perez et al., 2014a).

En este trabajo se aplican los métodos de la identificación de sistemas para la obtención del modelo matemático del tramo de canal objeto de estudio. Los datos utilizados corresponden al primer tramo (origen) del canal principal Imperial de Aragón, el cual presenta una infraestructura hidráulica compleja. Cuenta con un largo de 8 Km, una profundidad variable entre 3.1 m y 3.6 m, un ancho variable de hasta 30 m y conduce un caudal máximo de 30 m³/s (Rivas-Perez et al., 2008a).

Como resultado del experimento de identificación no paramétrica con señal escalón se obtuvieron los valores aproximados del retardo de tiempo y del orden del modelo de la planta. En base a estos resultados se diseñó una secuencia binaria pseudo-aleatoria (SBPA), con el fin de excitar de forma persistente las compuertas aguas arriba de la planta, posibilitando que

estas alternen entre dos niveles de variación de sus magnitudes de apertura, con el objeto de obtener una significativa, aunque no muy grande, variación del nivel de agua en el tramo del canal (identificación paramétrica). Para ello, cuatro compuertas recibieron un incremento simultáneo en sus magnitudes de apertura de ±50 cm, equivalente a una variación en la magnitud de apertura total de las compuertas de ±200 cm, lo cual se corresponde con el régimen de operación habitual del tramo de canal.

Los datos fueron muestreados con un periodo de muestreo de 15 s. El experimento tuvo una duración de 2:52 h. Los datos adquiridos se muestran en la Fig. 2. Un procedimiento adicional consistió en la división de los datos en datos para la identificación y datos para la validación del modelo.

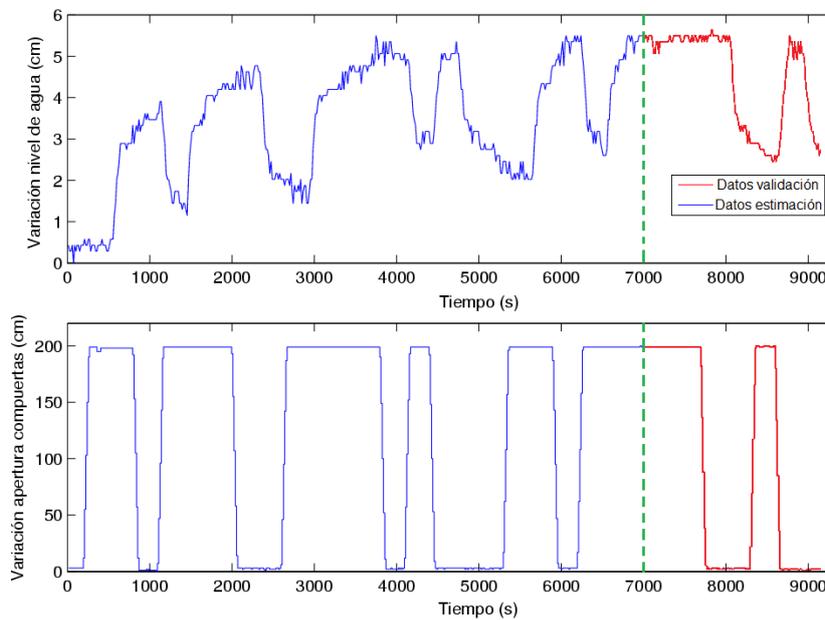


Fig. 2. Registro de datos obtenidos de la planta objeto de estudios con la secuencia binaria pseudo-aleatoria (SBPA).

Se seleccionó una estructura de modelo ARMAX, debido a las ventajas que la misma ofrece para modelar la parte determinística y la parte estocástica del comportamiento dinámico del tramo del canal objeto de estudio. Se desarrolló la estimación de los parámetros de dicha estructura utilizando el método del error de predicción con criterio cuadrático.

Un último paso de la identificación es la validación del modelo obtenido. Para ello se utilizó el método de validación cruzada, el cual consiste en comparar la salida del modelo derivado con los datos que no fueron utilizados en la estimación de parámetros. Como resultado se obtuvo que el modelo derivado discreto de segundo orden con estructura ARMAX describe el comportamiento dinámico de la planta objeto de estudio con un índice de ajuste (FIT) de 85.27 %. Este FIT del modelo se considera aceptado para fines de diseño de sistemas de control. Los resultados de validación del modelo obtenido se muestran en la Fig. 3.

El modelo derivado de segundo orden discreto, estimado bajo condiciones nominales de operación del tramo de canal objeto de estudio, tiene su equivalente en tiempo continuo, el cual

se representa mediante las siguientes expresiones:

$$G_u(s) = \frac{\Delta y(s)}{\Delta u(s)} = \frac{0.0359}{(47.3s + 1)(1820s + 1)} e^{-330s}, \quad (1)$$

$$G_v(s) = \frac{\Delta y(s)}{\Delta v(s)} = \frac{0.1725s^2 + 0.008897s + 5.086 * 10^{-5}}{s^2 + 0.02169s + 1.161 * 10^{-5}}. \quad (2)$$

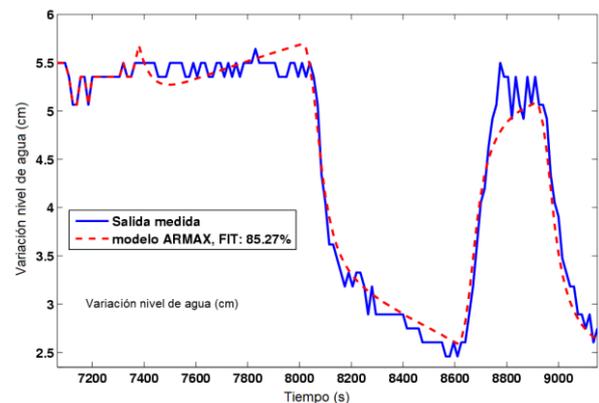


Fig. 3. Resultados de validación del modelo obtenido.

4. DISEÑO DEL CONTROLADOR NEURO-FUZZY

El enfoque desarrollado en este trabajo consiste en diseñar un controlador que muestre un mejor comportamiento que un controlador PI frente al efecto de perturbaciones medibles y no medibles. Para ello, nuestra propuesta novedosa consiste en el diseño de un controlador neuro-difuso con predictor de Smith (NDPS). Este controlador híbrido se caracteriza por integrar conocimientos y auto-aprendizaje en una red neuronal. Además, es un controlador en tiempo discreto, cuyo periodo de muestreo ($T_s=0.5$) se seleccionó en base al teorema de estabilidad de Nyquist.

Para el diseño del controlador NDPS se requiere representar el modelo de la planta objeto de estudio (1), (2) en espacio de estado en tiempo discreto. Un método clásico de discretizar el comportamiento dinámico de la planta consiste en utilizar un retenedor de orden cero "ZOH". El modelo en espacio de estado en tiempo discreto de la planta objeto de estudio se representa mediante la expresión:

$$\begin{bmatrix} x(k+1) \\ x(k+2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.9997 & 0.0005 \\ -0.0005 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k) \\ x(k+1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.096 * 10^{-4} \\ 0.1922 * 10^{-4} \end{bmatrix} u(k); \quad (3)$$

$$y(k) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k) \\ 0 \end{bmatrix}; \quad (4)$$

donde $x(k)$ es la variación de nivel de agua aguas abajo alejado, $x(k+1)$ es la velocidad de variación de nivel de agua aguas abajo alejado, $u(k)$ es la variación de apertura de la compuerta equivalente.

Para el diseño del controlador NDPS se definieron 7 funciones de membresía (pertenencia), sobre cada uno de los posibles rangos de variación de las variables del modelo (3). En este sentido, se estableció un rango de variación de nivel de agua aguas abajo alejado de ± 6.5 cm y un rango de la velocidad de variación de nivel de 0.0007 cm/s (sin considerar los efectos de la velocidad de olas generadas en la superficie libre). Adicionalmente, se consideró un rango de variación de la apertura de la compuerta equivalente aguas arriba de ± 300 cm. Las funciones de membresía indican el grado de pertinencia referido a un valor lingüístico. En la Fig. 4. Se muestran las particiones con la asignación de sus respectivas etiquetas lingüísticas.

Se realizó la construcción de una tabla de base de reglas (ver Tabla 1) para mantener la variación de nivel de agua en un punto de operación deseado, regulando el flujo de agua mediante la apertura o cierre de la compuerta equivalente y asegurando una respuesta lo más rápida posible de la planta con dinámica parsimoniosa.

El controlador NDPS tiene la estructura básica tipo Mamdani, la cual tiene la ventaja de tener altos niveles de interpretabilidad para el análisis de datos para la obtención de un conocimiento estructurado de la planta objeto de estudio (Wi-Meng and Hiok-Chai, 2008). Las funciones de membresía están constituidas por las funciones de activación de cada neurona ubicada en la capa de entrada (sigmoides y gaussianas de tipo 1). En las capas de neuronas no se consideró la presencia de

bias, y todos los pesos sinópticos se tomaron igual a la unidad y normalizados.

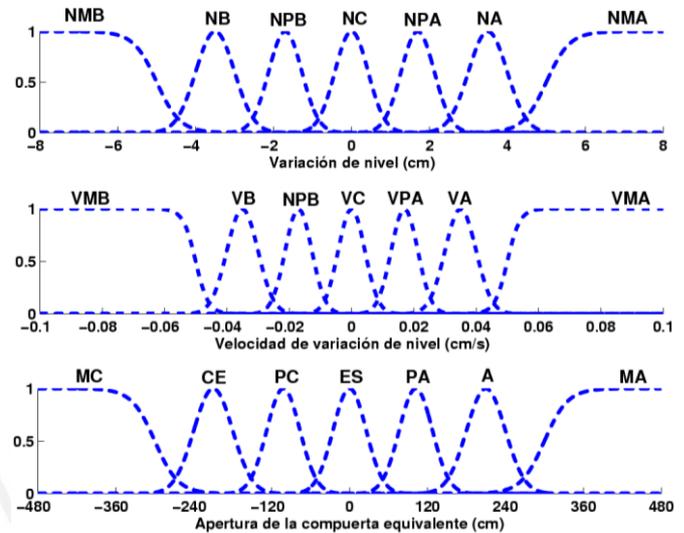


Fig. 4. Asignación de funciones de membresía

Tabla 1. Base de reglas del controlador NDPS.

	NMB	NB	NPB	NC	NPA	NA	NMA
VMB	MA	A	A	ES	CE	CE	MC
VB	MA	A	A	ES	CE	CE	MC
VPB	MA	A	A	ES	CE	CE	MC
VC	MA	A	A	ES	CE	CE	MC
VPA	MA	A	A	ES	CE	CE	MC
VA	MA	A	A	ES	CE	CE	MC
VMA	MA	A	A	ES	CE	CE	MC

donde: MA - muy abierto, A - abierto, ES - en reposo, CE - cerrado y MC - muy cerrado.

Como no se dispone de sensor para la medición de la velocidad de la variación de nivel, se utilizó un filtro de Kalman, el cual posibilita estimar esta variable. Además, esta clase de filtro presenta un buen desempeño, cuando el sistema está sometido al efecto de ruido blanco aditivo (considera parámetros estadísticos de las perturbaciones y del ruido).

En este sentido, la naturaleza aleatoria de las perturbaciones y del ruido, deben ser incorporadas dentro de la ecuación de estimación de estado del observador (Mohan, 1995). La ecuación en espacio-estado en tiempo discreto del filtro de Kalman se representa como:

$$\hat{x}(k+1) = (A-LC)\hat{x}(k) + Bu(k) + Ly(k), \quad (4)$$

donde, L es una matriz de pesos que se determina mediante un proceso de optimización que implica la solución de la ecuación de Riccati. La ecuación (4) puede ser representada en la forma:

$$\begin{bmatrix} \hat{x}(k+1) \\ \hat{x}(k+2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0.002 \\ -0.005 & 0.986 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}(k) \\ \hat{x}(k+1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.0005 * 10^{-6} \\ 0.2068 * 10^{-6} \end{bmatrix} u(k) + \begin{bmatrix} 1 \\ 0.0055 \end{bmatrix} y(k). \quad (5)$$

5. RESULTADOS

Para compensar el efecto del retardo de tiempo de la planta bajo estudio a la estructura del controlador diseñado se le incorporó un predictor de Smith (PS), el cual resulta muy efectivo frente a este tipo de comportamiento dinámico.

En la Fig. 5. se muestra el diagrama de bloques del sistema de control de la planta objeto de estudio con el controlador NDPS diseñado. El sistema cuenta con un filtro discreto paso bajo de segundo orden para la atenuación del ruido de alta frecuencia.

Se realizaron diferentes simulaciones del sistema de control de la distribución de agua en el tramo del canal principal de riego objeto de estudio con controladores NDPS y PI con PS, ambos diseñados bajo las mismas especificaciones de respuesta temporal. En las Fig. 6. y Fig. 7. se muestran los resultados comparativos de simulación de las respuestas temporales del sistema de control con ambos controladores.

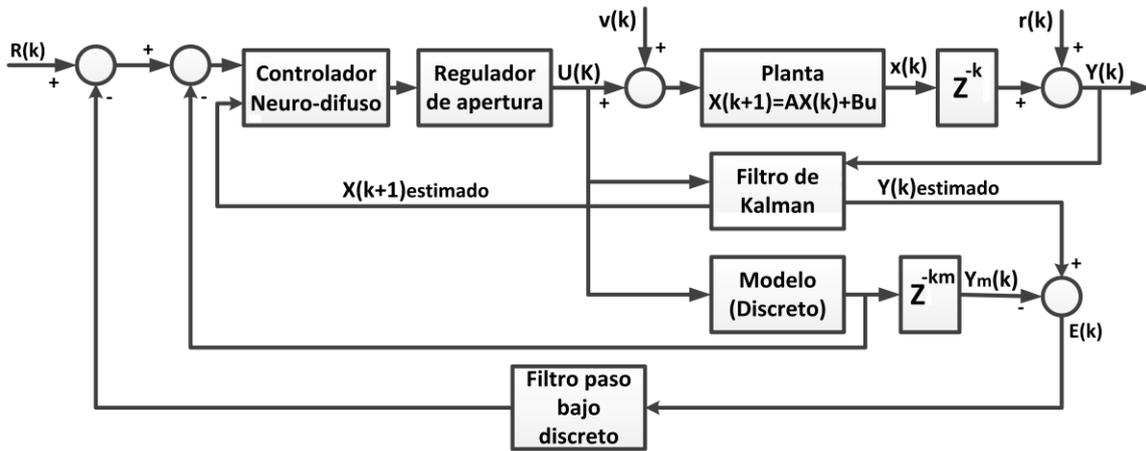


Fig. 5. Diagrama de bloques de sistema de control de la planta objeto de estudio con controlador NDPS.

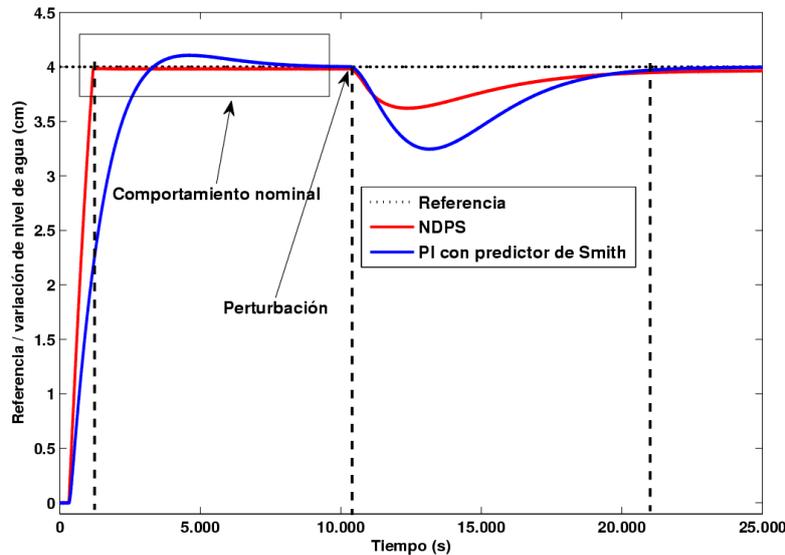


Fig. 6. Respuestas temporales comparativas del sistema de control con controladores NDPS y PI con PS.

De la Fig. 6. se observa que cuando el proceso objeto de estudio se encuentra operando en régimen nominal, las respuestas temporales del sistema de control con ambos controladores difieren. La respuesta con el controlador NDPS no presenta sobreimpulso y es mucho más rápida (tiempo de establecimiento 18 % menor respecto a la obtenida con el controlador PI con PS). Adicionalmente, la atenuación de los efectos negativos de las perturbaciones (descargas laterales) presenta un mejor desempeño con el controlador NDPS que con el PI con PS (máximo sobreimpulso negativo 50 % menor).

Para evaluar el comportamiento de los controladores bajo el

efecto de variaciones de los parámetros dinámicos de la planta se consideró un rango de variación de +20 % de las constantes de tiempo y de la ganancia y de +5 % del retardo de tiempo. Los resultados obtenidos se muestran en la Fig. 7. De la figura se observa que la respuesta temporal del sistema de control con el controlador NDPS presenta un menor sobreimpulso (51 % menor) y una mejor atenuación del efecto de la perturbación (53%) que la obtenida con el PI con PS.

Estos resultados muestran que el controlador diseñado NDPS exhibe un mejor comportamiento, en el sentido de garantizar una mayor velocidad de respuesta con una mejor atenuación

del efecto de las perturbaciones. Se verificó también la robustez del controlador diseñado dentro de un moderado rango de variación de los parámetros dinámicos de la planta objeto de estudio, demostrándose un mejor desempeño del controlador NDPS en relación con el PI con PS.

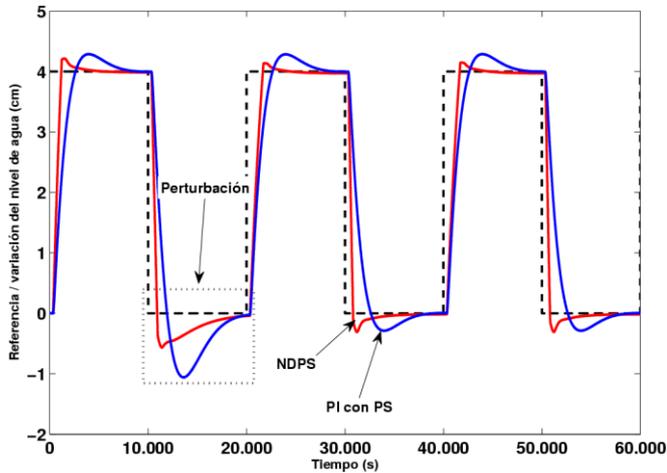


Fig. 7. Resultados comparativos frente a variaciones de los parámetros dinámicos de la planta objeto de estudio.

6. CONCLUSIONES

Se obtuvo un modelo matemático que describe de forma adecuada el comportamiento dinámico de la planta objeto de estudio.

Se desarrolló el diseño de un controlador NDPS para el control efectivo de la distribución de agua en el tramo de canal de referencia. Los resultados de simulación del sistema de control con el controlador diseñado mostraron resultados satisfactorios.

Es importante resaltar que en este trabajo se presentan solamente los resultados relacionados con el diseño de un controlador neuro-difuso para el control efectivo de la distribución de agua en un tramo de un canal principal de riego. Por consiguiente, se requiere en la siguiente etapa de nuestra investigación implementar los resultados en la planta objeto de estudio y verificar el cumplimiento de los resultados obtenidos basados en simulación.

REFERENCIAS

Buyalski, D., Ehler, H., Falvey, H., Rogers, D., and Serfozo E. (1991). *Canal systems automation manual. A water resources technical publication*. Vol. I., Denver, USA.

Castillo-Garcia, F.J., Feliu-Batlle, V., Rivas-Perez, R., and Sanchez-Rodriguez, L. (2011). Time domain tuning of a fractional order PI α controller combined with a Smith predictor for automation of water distribution in irrigation main channel pools. In: *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*, 18(PART 1), 15049-15054.

Chow, V.T. (1988). *Open-channels hydraulics*. McGraw-Hill Book Company, N.Y, USA.

Clemmens, A.J., and Schuurmans, J. (2004). Simple optimal downstream feedback canal controllers: ASCE test case results. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*,

130 (1), 35-46.

Cuenca-Tinitana, J.C. y Rivas-Perez R. (2012). Desarrollo de un sistema de control predictivo para la distribución de agua en un tramo de un canal principal de riego. *Revista Estudios Universitarios Universidad Nacional de Loja*, 119-130.

Feliu-Batlle, V., Rivas-Perez, R., Castillo-Garcia, F.J., Sanchez-Rodriguez, L., and Linares Saez, A. (2011). Robust fractional order controller for irrigation main canal pools with time-varying dynamical parameters. *Computers and Electronics in Agriculture*, 76(2), 205-217.

Linares, A., Rivas-Perez, R., and Feliu, V. (2008). New advanced management and control strategies applied to hydraulic Infrastructures for water transport and distribution. *Abengoa*, No December, 41-42.

Litrico, X. and Fromion, V. (2009). *Modeling and control of hydrosystems*. Springer-Verlag, London, UK.

Malaterre, P.O. and Rogers, D.C. (1998). Classification of canal control algorithms. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 124 (1), 3-10.

Mohan, Reddy, J. (1995). Kalman filtering in the control of irrigation canals. *Appl. Math. Modelling*, 19, 201-209.

Nixon, S., Trent, Z. y Marcuello, C. (2004). *El agua en Europa; una evaluación basada en indicadores*. Agencia Europea de Medio Ambiente, Copenhagen.

Pedregal, D.J., Rivas-Perez, R., Feliu V., Sanchez L., and Linares, A. (2009). A non-linear forecasting system for the Ebro River at Zaragoza, Spain. *Environmental Modelling & Software*, 24(4), 502-509.

Rivas-Perez, R., Feliu-Batlle, V., Castillo-Garcia, F.J. and Linares-Saez, A. (2014a). Mathematical model for robust control of an irrigation main canal pool. *Environmental Modelling & Software*, 51(1), 207-220.

Rivas-Perez, R., Feliu-Batlle, V., Castillo-Garcia, F.J., Sanchez-Rodriguez, L. and Linares Saez, A. (2014b). Robust fractional order controller implemented in the first pool of the Imperial de Aragon main canal. *Water Technology and Sciences*, 5(1), 23-42.

Rivas-Perez, R., Feliu-Batlle, V., Sanchez Rodriguez, L., Pedregal Tercero, D.J., Linares Saez, A., Aguilar Mariñosa, J.V. and Langarita Garcia, P. (2008a). Identification of the first pool of the Imperial de Aragon main irrigation canal. *Hydraulic Engineering in Mexico*, 23(1), 71-87.

Rivas-Perez, R., Feliu Batlle, V., Castillo Garcia, F., and Linares Saez, A. (2008b). System identification for control of a main irrigation canal pool. In: *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*, 17(Part 1), 9649-9654.

Santos, M. (2011). Un enfoque aplicado del control inteligente. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 8(4), 283-296.

Wi-Meng, T. and Hiok-Chai, Q. (2008). Adaptive training schema in Mamdani-type neuro-fuzzy models for data-analysis in dynamic system forecasting. *International Joint Conference on neural Networks*, 1733-1738.

Yu, W. (2009). *Recent advances in intelligent control systems*. Springer-Verlag, London, UK.