



Ciencia Latina
Internacional

Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), enero-febrero 2024,
Volumen 8, Número 1.

DOI de la Revista: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i1

**MODELO NEURO-DIFUSO PARA EL
CONTROL HIDRÁULICO Y SU INFLUENCIA
EN LA DISTRIBUCIÓN DE AGUA DEL CANAL
DE RIEGO IRCHIM, 2020**

**NEURO-FUZZY MODEL FOR HYDRAULIC CONTROL
AND ITS INFLUENCE ON THE WATER DISTRIBUTION
OF THE IRRIGATION CANAL IRCHIM, 2020**

Atilio Rubén, López Carranza
Universidad Nacional del Santa, Perú

DOI: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i1.10345

Modelo Neuro-Difuso para el Control Hidráulico y su Influencia en la Distribución de Agua del Canal de Riego IRCHIM, 2020

Atilio Rubén López Carranza¹

rlopez@uns.edu.pe

<https://orcid.org/0000-0002-3631-2001>

Universidad Nacional del Santa

Perú

RESUMEN

El presente trabajo tuvo como objetivo general desarrollar un modelo de control Neuro – difuso de la distribución de agua en el tramo km 8+000 – 20+000 del canal de riego IRCHIM 2020, que posibilite aumentar la operatividad sobre el canal, así como disminuir las pérdidas de agua por concepto de operación, el tipo de estudio fue aplicada, con diseño experimental en la categoría pre experimental, la población fueron los puntos de distribución de agua del canal IRCHIM, el muestreo fue no probabilístico por conveniencia. De los resultados se obtuvo que el canal principal de riego necesita un control para la correcta distribución de agua para riego, como para el tratamiento para la potabilización, así mismo se desarrolló un modelo de control neuro-difuso a la medida del tramo seleccionado del canal, El PLC utilizado está basado en la tecnología de Arduino diseñado para uso profesional y programado en MATLAB, así mismo El PLC consta de 17 entradas/salidas y también contiene varios puertos de comunicación que proporcionan mayor flexibilidad y control, pues la familia M-DUINO ofrece la posibilidad de expandir hasta 127 módulos a través de I2C, lo que significa que puede tener hasta 7 100 Entradas/Salidas en conexiones Maestro-Esclavo, además de sensores, etc., y el sensor piezométrico presenta un rango de medición de 0 a 10 metros, su fuente de alimentación es de 12 a 24 V, presenta una comunicación RS-485 MODBUS RTU y por último presenta una protección IP68, estas herramientas de sensores, actuadores y controladores, quiere decir que la implementación de un modelo de control neuro-difuso en el canal principal de riego IRCHIM mejora la distribución de agua para riego y para el tratamiento de potabilización para consumo humano.

Palabras clave: modelo neuro-difuso, control, canal de riego, distribución de agua, instrumentación

¹ Autor principal.

Correspondencia: rlopez@uns.edu.pe

Neuro-fuzzy Model for Hydraulic Control and its Influence on the Water Distribution of the Irrigation Canal IRCHIM, 2020

ABSTRACT

The general objective of this work was to develop a neuro-fuzzy control model for water distribution in the section km 8+000 - 20+000 of the IRCHIM irrigation canal, which makes it possible to increase the operability of the canal, as well as to reduce water losses due to operation. The type of study was applied, with experimental design in the pre-experimental category, the population was the water distribution points of the IRCHIM canal, the sampling was non-probabilistic by convenience. From the results it was obtained that the main irrigation canal needs a control for the correct distribution of water for irrigation, as well as for the treatment for the potabilization, likewise a model of neuro-fuzzy control was developed to the measure of the selected section of the canal. The PLC used is based on Arduino technology designed for professional use and programmed in MATLAB, The PLC consists of 17 inputs / outputs and also contains several communication ports that provide greater flexibility and control, as the M-DUINO family offers the ability to expand up to 127 modules through I2C, which means you can have up to 7 100 Inputs / Outputs in Master-Slave connections, plus sensors, etc. , and the piezometric sensor has a measuring range of 0 to 10 meters, its power supply is 12 to 24 V, it has a RS-485 MODBUS RTU communication and finally has an IP68 protection, these tools of sensors, actuators and controllers, means that the implementation of a neuro-fuzzy control model in the main irrigation channel IRCHIM improves the distribution of water for irrigation and for the treatment of drinking water for human consumption.

Keywords: neuro-fuzzy model, control, irrigation canal, water distribution, instrumentation

Artículo recibido 20 enero 2023

Aceptado para publicación: 25 febrero 2023

INTRODUCCIÓN

Actualmente, los sistemas de control hidráulico han avanzado de manera notable, y en esta era, se están adoptando enfoques cada vez más avanzados y tecnológicamente sofisticados. Uno de estos enfoques innovadores es la aplicación de modelos neuro-difusos en el control de canales de riego. Estos modelos combinan la capacidad de los sistemas neuronales para aprender y adaptarse con la lógica difusa para lidiar con la incertidumbre y la variabilidad inherente en los sistemas hidráulicos, es así que, en la cadena de abastecimiento de la agricultura, la gestión eficaz del recurso hídrico es la piedra angular para garantizar cosechas abundantes y un uso responsable del agua, especialmente en regiones donde este recurso es escaso. En este contexto, los canales de riego se convierten en las arterias vitales que transportan y distribuyen el agua hacia las zonas agrícolas. El control preciso y oportuno del flujo de agua en estos canales se torna esencial para asegurar un reparto justo y eficiente entre los agricultores, al mismo tiempo que se minimiza el desperdicio.

El propósito central de esta investigación es sumergirse en el terreno de los modelos neuro-difusos aplicados al control hidráulico de canales de riego y desentrañar su influencia en la distribución de agua en estos sistemas. Esta perspectiva armoniza la potencia de la inteligencia artificial con los principios de la hidráulica, abriendo las puertas hacia una administración más precisa y eficiente de los recursos hídricos. Abordando de forma metódica un modelo neuro-difuso específico, metódicamente entrenado, diseñado para el control de un canal de riego, considerando un conjunto complejo de variables y condiciones ambientales siempre cambiantes, combinado con experimentos y simulaciones exhaustivas con el fin de evaluar la capacidad del modelo para mantener un flujo de agua estable y controlado en el canal, incluso cuando se enfrenta a perturbaciones y cambios en la demanda de agua por parte de los agricultores generando un impacto positivo que tiene la implementación de este modelo neuro-difuso en la distribución de agua entre las parcelas agrícolas, evaluando su influencia en la eficiencia del riego y en la disminución de pérdidas de agua.

En última instancia, esta investigación contribuye al desarrollo de estrategias de gestión de agua más eficaces en sistemas de riego, focalizando su atención en la aplicación de modelos de control hidráulico avanzados. La combinación de la inteligencia artificial y la hidráulica encierra la

promesa de un riego más preciso y sostenible, un factor que puede impactar de manera significativa en la producción agrícola y en la preservación de este recurso vital para la humanidad.

En la actualidad, la creciente insuficiencia de suministro de agua potable se está intensificando en diversas regiones de todo el mundo debido al marcado incremento en la demanda de agua proveniente de sectores como la agricultura, la industria y los hogares y el estrés que ejerce una influencia significativa en el ciclo vital (Abbasi et al., 2023). En consecuencia, la gestión eficaz de los recursos hídricos preexistentes se configura como un desafío significativo tanto para la comunidad científica y académica como para los responsables de políticas públicas, además de afectar a la sociedad en su conjunto de manera holística (Quezada et al., 2023). Un rasgo de suma importancia en relación a los recursos hídricos globales reside en su distribución altamente dispar, tanto en términos espaciales como temporales que se presentan (Pan et al., 2023). Esto implica que existen cuencas hidrográficas y áreas geográficas que padecen escasez de agua, ya sea por insuficiencia física de este recurso o por la falta de infraestructuras adecuadas para su eficiente y correcta distribución (Augusto et al., 2021). La sobreexplotación de las fuentes de agua superficial y subterránea en diversas partes del mundo acarrea consecuencias ambientales extremadamente graves para el presente y las futuras generaciones que no podrán gozar de la sostenibilidad del planeta.

Las sequías persistentes y el incremento en la temperatura, factores que han surgido o intensificado debido a estas transformaciones climáticas, presentarán considerables desafíos en el contexto de la producción de cultivos en el futuro (Sun et al., 2023). Los factores ambientales de naturaleza biológica, tales como el calor y la sequía, representan con frecuencia las variables más preponderantes que inciden en la disminución del crecimiento y del rendimiento de los cultivos (Abbasi et al., 2023). Es por ello que la cantidad de agua potable disponible en la Tierra está disminuyendo debido al cambio climático, los glaciares se están derritiendo y el flujo de ríos, lagos, manantiales y pantanos está disminuyendo y también aumenta la contaminación (Sonne et al., 2023). Una parte importante de los recursos hídricos disponibles en la tierra están contaminados o contienen sal y no pueden ser utilizados para el consumo humano, industrial y/o agrícola. Como resultado, el equilibrio hídrico, que permite un suministro adecuado de agua para la industria, la agricultura, el comercio y los hogares, solo pueden lograrse mediante una gestión eficiente de los recursos hidroeléctricos disponibles. Es así que a nivel

internacional la escasez de agua radica en la mejora de los métodos de toma de decisiones relacionados con el agua a nivel sectorial e intersectorial (Sharifi et al., 2021), con ello las grandes obras hidráulicas se ha extendido por todas partes y en ese sentido la ingeniería de ríos y canales trata de operar en óptimas condiciones de diseño las obras fluviales, como canalizaciones, defensas fluviales, puentes, captaciones de agua potable y riego, centrales hidroeléctricas y presas de riego (Calvete et al., 2023), con ello se realiza la maximización así su seguridad contra inundaciones y preservando la funcionalidad ecológica del río donde se encuentran situado, es por ello que desde sus orígenes, la ingeniería hidráulica y de control ha estudiado el movimiento del agua, es decir, la hidráulica, imponiendo condiciones con un flujo constante, aunque en realidad las condiciones impuestas por el caudal variable durante las inundaciones es controlar la mayoría de los problemas asociados con el diseño de obras fluviales.

Entre ellos se encuentran el desborde de ríos e inundaciones, aluviones o el socavamiento de puentes y otras estructuras (Namara et al., 2022). Los desbordes de ríos y la mala distribución del agua generan problemas multidisciplinarios y sistémicos, incluyendo inundaciones con impactos letales, daños materiales y pérdidas económicas, pérdida de vidas humanas, degradación del suelo, escasez de agua, contaminación hídrica, desplazamiento de población, pérdida de biodiversidad y conflictos por recursos, con implicaciones en salud pública, seguridad alimentaria y medio ambiente. Estos fenómenos, a menudo exacerbados por el cambio climático, requieren enfoques integrales y medidas de gestión sostenible para su mitigación y resiliencia. Las inundaciones en la cuenca del río Chikuma, Japón, provocadas por el tifón Hagibis en 2019 (Nihei et al., 2023). Esto debe mejorarse urgentemente, ya que, en contexto de desastres naturales, las inundaciones fluviales representan un amenaza de importancia central para las personas y, por otro, la socavación es la causa más recurrente de fallas de puentes alrededor del mundo y los canales al no ser controlados se origina accidentes o falta de suministro tanto para actividad agrícola como para el consumo humano a través de agua potabilizada, vale la pena citar los lamentables accidentes que ocurrió en nuestro hermano país del sur, en la cual se dio una inundación en la Región del Bío Bío en el año 2006, o también los aluviones ocurridos en la zona norte de Chile en 2015 y 2017, así como los colapsos del Tadcaster Bridge, Reino Unido, en diciembre de 2015, y el puente Pitrufquén en el ferrocarril sobre el río Toltén, en 2016. Además, los escenarios esperados de cambio climático indican que estos que se debe realizar estudios de control

sobre construcciones hidráulicas y distribución de agua que será fundamental para la sostenibilidad del ecosistema y de la vida tal como la conocemos.

Esta problemática no es ajena a nivel nacional, es así que, en las tierras del Perú, donde la abundancia de recursos hídricos debería ser un regalo de la naturaleza, se enfrentan serios desafíos en la distribución de agua. En numerosas regiones, tanto urbanas como rurales, la escasez de agua es una realidad que pesa sobre la población. A menudo, esto se debe a la falta de infraestructura adecuada para captar y distribuir el recurso de manera equitativa. La falta de acceso a agua potable y servicios de saneamiento básicos afecta a un gran número de peruanos, especialmente en las áreas rurales, donde la salud de la población se ve amenazada. La pérdida de agua es un problema adicional, ya que se desperdicia debido a fugas en la infraestructura de distribución y al riego agrícola ineficiente.

La contaminación del agua es una preocupación constante, con fuentes superficiales y subterráneas afectadas por sustancias nocivas. Esto no solo pone en peligro la salud de la población, sino que también dificulta la disponibilidad de agua potable segura. El cambio climático, con sequías más frecuentes e intensas, exacerba los problemas de distribución de agua. La gestión de recursos hídricos en el país enfrenta desafíos adicionales, como la falta de coordinación entre diferentes entidades y la necesidad de una planificación más efectiva para garantizar un acceso sostenible al agua. En este escenario, se requiere una acción concertada a nivel gubernamental y comunitario para abordar estos desafíos y asegurar que el acceso al agua sea equitativo y sostenible en todo el país.

En Chimbote, el Comité de Usuarios del Sector Riego de IRCHIM requiere que sus miembros participen activa y continuamente en la operación y mantenimiento de la infraestructura de riego y drenaje. Infraestructura de riego y drenaje adecuada para el sector mini hidroeléctrico IRCHIM mediante el desarrollo, conservación, conservación, uso eficiente de los recursos hídricos, y la participación activa y permanente de la Ley de Recursos Hídricos, su reglamento y sus integrantes Otras aplicaciones para asegurar la operación, mantener , asegurar el desarrollo, y así garantizar el desarrollo del agua, la conservación, la conservación y el uso racional, lo que redundará en mayor y mejor producción agrícola. Posibles leyes y recursos de la tierra son los usuarios. Te permite mejorar tu nivel Puedes mejorar tu nivel de vida viviendo más y con mejor producción agrícola.

De acuerdo con la Ley de Recursos Hídricos N° 29338, el propósito de la organización es fomentar la participación organizada de los usuarios en la gestión multisectorial y en la utilización sostenible de los recursos hídricos. Además, de conformidad con lo dispuesto en el numeral 20.4 del Artículo 20° del Reglamento de Organizaciones de Usuarios de Agua, se otorga a las juntas de usuarios un reconocimiento administrativo como organización. Este reconocimiento incluye la autorización del Estado para prestar un servicio público, administrar la infraestructura pública menor en un sector hidráulico, realizar la operación y el mantenimiento de dicha infraestructura, establecer tarifas de agua y llevar a cabo la distribución del recurso hídrico. En el caso específico de la Junta de Usuarios del Sector de Riego IRCHIM, que cumple el rol de Operador de Infraestructura Hidráulica Menor, recibe el respaldo de siete (07) Comisiones de Usuarios: Vinzos Pueblo, Pampa de Vinzos, Cascajal Derecho, Cascajal Izquierdo, Lacramarca Baja, Tangay Alto Medio y Tangay Bajo Los Álamos. Estas comisiones intervienen en los subsectores hidráulicos bajo su responsabilidad, cada una con su propia organización autónoma, pero están vinculadas a la Junta de Usuarios del Sector Hidráulico Menor IRCHIM. Su función principal es brindar el servicio de suministro de agua de riego de manera eficiente y coordinada. La planificación para operación, mantenimiento y desarrollo de la infraestructura hidráulica del POMDIH para el año 2020 incluye actividades de planificación e inversiones, así como un presupuesto con las fuentes de financiamiento correspondientes. Cada actividad del POMDIH significa metas, indicadores, medidas de verificación y presupuestos para asegurar la mejora de los recursos hídricos y la gestión técnica de los recursos hídricos en el 2020 para lograr el abastecimiento eficiente de los recursos hídricos. Es agua para la sustentabilidad del sistema hidráulico del IRCHIM y además debe ejercer el rol de Operador de la Infraestructura Hidráulica Menor, en mérito al numeral 26.2 del art. 26° del Reglamento de Organizaciones de Usuarios, por lo que las actividades correspondientes a la distribución del agua, operación, mantenimiento y desarrollo de la infraestructura hidráulica, se consideran en el presente POMDIH del año 2020.

Como problema se planteó: ¿Cómo influye el control hidráulico a través de un modelo neuro – difuso en la distribución de agua del canal de riego IRCHIM, 2020?

Luego como objetivo general se propuso: 1. Desarrollar un modelo de control Neuro – difuso de la distribución de agua en el tramo km 8+000 – 20+000 del canal de riego IRCHIM 2020, que posibilite

aumentar la operatividad sobre el canal, así como disminuir las pérdidas de agua por concepto de operación.

En el ámbito internacional se puede citar los estudios realizados por investigadores de diferentes áreas, como es Peña et al. (2023), en su artículo sobre “Modelo de red neuronal artificial para la predicción del fenómeno "El Niño" en la región de Piura (Perú)”, para ello se plantearon como objetivo general determinar un modelo de predicción en base a las redes neuronales e identificar los factores más influyentes, para ello utilizaron una metodología tipo básica con un diseño experimental, como técnicas utilizaron las redes neuronales artificiales y con ello llegaron los resultados indican que la temperatura superficial del mar es la variable más influyente y con lo cual concluyeron que el modelo presenta una precisión del 82%.

Así mismo un sistema de recursos hídricos puede abarcar únicamente la infraestructura y el equipamiento, o bien se pueden agregar elementos del entorno natural y/o aspectos sociales, un sistema de distribución de agua puede ser modelado considerando únicamente la infraestructura y el equipo de control (Algaba et al., 2023). Si el modelo también pretende analizar si las fallas afectarán a las personas y al entorno natural, entonces estos elementos pueden ser incorporados como parte del sistema, si la entidad encargada de la gestión responde de manera rápida a una falla, las pérdidas tanto para las personas como para la naturaleza serán menores en comparación con una respuesta más lenta o la ausencia de respuesta (Li et al., 2021). Las diversas situaciones, perspectivas y complejidades de los sistemas de agua plantean desafíos de gestión del ciclo de vida distintos a los que enfrentan la mayoría de los sistemas técnicos. Las situaciones se pueden clasificar en etapas de planificación, desarrollo y operaciones, pero la etapa de desmantelamiento normalmente se reflejará como renovación y modificación, en lugar de reemplazo. La identificación de los puntos de inicio y finalización de las situaciones de gestión del agua es un desafío especial, ya que algunos proyectos y problemas operativos perduran durante mucho tiempo, con puntos de decisión inciertos.

Estas realidades de la gestión de recursos hídricos han impulsado una búsqueda constante de un marco para métodos de solución integrativa generalizables. La gestión del agua se refiere a las actividades directamente relacionadas con el control de recursos (materiales, financieros o humanos), como el monitoreo, análisis, planificación, construcción y mantenimiento (Morán-Valencia et al., 2023). El

sector urbano del agua es un sistema complejo que conlleva problemas de baja sostenibilidad, una gestión deficiente de recursos y diversas necesidades de los interesados. Por esta razón, es importante utilizar procesos transdisciplinarios para mitigar conflictos en los objetivos de toma de decisiones. Existen numerosos métodos cuantitativos y estadísticos para evaluar la eficiencia y el rendimiento. En cuanto a las técnicas de comparación, el análisis de frontera se ha convertido en el enfoque más destacado. El enfoque no paramétrico basado en el Análisis Envolvente de Datos (DEA) es el método más utilizado para evaluar la eficiencia y productividad, con una amplia variedad de aplicaciones exitosas en diversas industrias.

METODOLOGÍA

El tipo de investigación lo definió Hernández, Fernández y Baptista (2014), que los datos se cuantifican y se usan con el propósito de probar la hipótesis de investigación, además de aplicar los conocimientos teóricos de una de las variables para la solución de un problema, es por ello que el presente trabajo de investigación tuvo un tipo de investigación **aplicada**, para el diseño de investigación Hurtado y Toro (2005) afirmaron que en un diseño de investigación experimental se controla o manipula deliberadamente una variable con la finalidad de tener influencia o impacto, pero que también se presentan investigaciones que se manipulan las variables y además se controlan parámetros externos para obtener una incidencia; es por ello que en el presente trabajo de investigación se presentó un diseño experimental en la categoría **pre-experimental** del tipo descriptivo. Para ello se presentó el siguiente esquema de investigación:

G: O1 → X → O2

Donde:

G : Objeto de estudio, el cual fue el canal IRCHIM

O1 : Distribución de agua en el sector hidráulico (Medida inicial)

X : Modelo neuro – difuso para el control hidráulico

O2 : Distribución de agua en el sector hidráulico (Medida al implementar el estímulo)

Respecto a la población los autores Hernández et al. (2014) afirmaron que es un conjunto completo y representativo de elementos necesarios para un estudio detallado que es de interés para el o los investigadores. Para el presente trabajo de investigación la población fue el canal de riego IRCHIM, 2020.

Criterios de inclusión

Los criterios de inclusión son las características que se debe analizar u observar en los elementos de la población que les haga representativos para el estudio de las características con la finalidad de elegir menos elementos. Para el presente trabajo de investigación los criterios de inclusión fueron los puntos que están habilitados para la dotación respectiva de agua, los cuales consta del tramo km 8+000 – 20+000 del canal de riego IRCHIM.

Los criterios de exclusión son las características que se debe analizar u observar en los elementos de la población que los haga diferentes y no expresen representatividad para el estudio de las características con la finalidad hacer pasar inferencia estadística y trabajar con menos elementos que representen a toda la población. Para el presente trabajo de investigación los criterios de exclusión fueron los puntos que no se encuentran en el canal IRCHIM y que no están habilitados para la dotación respectiva de agua.

Muestra: Respecto a la muestra Tamayo y Tamayo (2013) afirmo que la muestra es el subconjunto de elementos comunes y representativos que se pueden utilizar para tener inferencia sobre la población. Para el presente trabajo de investigación la muestra fueron los puntos de distribución de agua del tramo km 8+000 – 20+000 del canal IRCHIM tomados a través del correctometro.

Muestreo: Respecto al muestreo Castro (2003) afirmo que el muestreo no probabilístico es el proceso de selección de datos que consiste en tomar una proporción de la unidad de análisis según el alcance que se presente en la investigación. Para el presente trabajo de investigación se utilizó un muestreo no probabilístico por conveniencia de acuerdo a la finalidad del investigador.

Unidad de análisis: La unidad de análisis del presente trabajo de investigación fue el tramo de canal de riego IRCHIM, Los Álamos, Nuevo Chimbote.

Respecto a las técnicas e instrumentos de recolección de datos Hernández et al. (2014) afirmaron que el diseño de investigación es el que marca el rumbo de la investigación y los datos deben recolectarse a través de técnicas e instrumentos que contribuyan al análisis sistémico de la información con la finalidad de interpretar y sacar conclusiones congruentes y que indiquen lo que se ha planteado inicialmente en el trabajo de investigación. En el contexto de este estudio de investigación, se implementó la técnica de recopilación de datos mediante la observación. A través de una ficha de observación, se obtuvo la

información requerida de la muestra con el propósito de obtener datos precisos relacionados con la distribución de agua. Es importante destacar que, debido a la estructura de diseño de la investigación, se optó por la observación como la técnica exclusiva para ambas variables de estudio, y esta observación se aplicó de manera selectiva a los elementos que conforman la muestra.

Respecto a los instrumentos para la recolección de datos Bueno (2008) afirmó que son documentos que son necesarios y fundamentales para la recolección de los datos que llevan al análisis de estos y dan como resultado una conclusión válida. Para el presente trabajo de investigación se utilizó la ficha de observación para el estudio de ambas variables, la observación directa, la cual sirvió para la descripción de los fenómenos a través de la inspección directa de las principales actividades de dotación y distribución de agua que se realiza en el canal de riego IRCHIM, el análisis de datos la cual sirvió para la recolección de los datos de forma cuantitativa y ordenada, y se realiza el estudio del modelo neuro-difuso para su comprensión y optimización de los servicios que se realizan en el canal de riego IRCHIM y por último se utilizó el análisis de resultados de forma secuencial y con los softwares tales como el MATLAB.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Utilización de herramientas de identificación de sistemas a fin de obtener un modelo matemático adecuado de la distribución de agua en el tramo km 8+000 – 20+000 del canal de riego IRCHIM, 2020. Al desarrollar un sistema para obtener un modelo matemático consideramos la relación entre la apertura total de las compuertas agua arriba ($u_1(t)$) y el nivel del agua abajo en el tramo 1 ($y_1(t)$). Y definimos las variables que son:

- Variable de entrada ($u_1(t)$): Apertura total de las compuertas aguas arriba.
- Variable de salida ($y_1(t)$): Nivel del agua abajo en el tramo 1 (Bocatoma).

Al formular el modelo matemático utilicé un modelo de función de transferencia para describir la relación entrada-salida:

$$G(s) = \frac{Y_1(s)}{U_1(s)}$$

Donde $Y_1(s)$ es la transformada de Laplace de $y_1(t)$, $U_1(s)$ es la transformada de Laplace de $u_1(t)$, y $G(s)$ es la función de transferencia del sistema.

Para identificar los parámetros durante el experimento, se recopilan datos de apertura de compuertas y niveles de agua, y se utilizaron para identificar los parámetros de la función de transferencia. Para la validación del modelo se dividió los datos en conjuntos de entrenamiento y prueba. Ajustando los parámetros utilizando el conjunto de entrenamiento y valida la precisión del modelo utilizando el conjunto de prueba.

Muestra de la implementación en Matlab

Imagen 1

```
matlab Copy code

% Datos de entrada y salida
u1 = datos_apertura_compuertas; % entrada
y1 = datos_nivel_aguas_abajo;    % salida

% Ajuste del modelo de función de transferencia
modelo = tfest(iddata(y1, u1, 15), 1, 0, 1); % Estimación de función d
y_pred = lsim(modelo, u1);           % Predicción

% Gráficos
figure;
subplot(2,1,1);
plot(y1, 'b', 'LineWidth', 2, 'DisplayName', 'Datos Observados');
hold on;
plot(y_pred, 'r--', 'LineWidth', 2, 'DisplayName', 'Predicción');
legend('Location', 'Best');
title('Nivel de Agua - Datos vs. Predicción');
xlabel('Muestras');
ylabel('Nivel de Agua');
grid on;

subplot(2,1,2);
plot(u1, 'g', 'LineWidth', 2, 'DisplayName', 'Apertura de Compuertas');
title('Apertura de Compuertas');
xlabel('Muestras');
ylabel('Apertura');
grid on;
```

Este código utiliza la función “tfest” de MATLAB para ajustar un modelo de función de transferencia a los datos de entrada y salida. Luego, utiliza la función “lsim” para predecir el nivel de agua abajo en función de la apertura de las compuertas.

Para la utilización de herramientas a la medida se realizó un diagnóstico de la situación actual del canal principal de riego IRCHIM, en el cual se tiene diferentes compuertas, y es un canal lateral de segundo orden que se origina en la margen derecha del Canal de primer orden Carlos Leight, en la progresiva km 26+754, M.D. y nace de una toma lateral con cruce de camino de servicios de concreto con compuerta de metal plana deslizante que se encuentra en regulares condiciones de funcionamiento, así como la alcantarilla que cruza el camino de servicios del canal Carlos Leight cuyo caudal de diseño es de 0,65 m³/s con una longitud total de 3,37 km pero en el presente estudio se estudió 12 km del canal principal de riego IRCHIM. , mediante el revestimiento de este canal y construcción de Obras de Arte conexas, que incluyó el análisis del caudal y control de la distribución de agua. Este canal presenta pérdidas sobre toda su longitud, pérdidas producidas en el perímetro húmedo de la caja del canal debido a la edad del revestimiento, el mismo que tiene más de treinta años de servicio.

El problema principal es que la sección de la caja del canal es insuficiente para conducir el caudal de diseño mencionado y presenta rajaduras en los taludes y fondo del canal debido a la fuerte pendiente no se han construido estructuras de disipación de energía lo cual amerita un nuevo revestimiento con una remodelación de la caja del canal y diseño de obras de arte a efectos de conducir 0,65 m³/s, debido a que la sección es insuficiente produciendo desbordamiento del agua sobre el canal debido que ante esta situación la Junta de Usuarios y la Comisión de usuarios han estado gestionando hace varios años el mejoramiento del control de la distribución de agua, la cual está ubicada en:

Paralelos de Latitud Sur : 9°02' y 9° 37'.

Meridianos de Longitud Oeste : 78°30'08' y 78° 50'10'.

Coordenadas UTM WGS 84

Este : 768,000 y 776,000

Norte : 9,000,000 y 8,992,000

Así mismo, también que la cuenca hidrográfica es el Río Santa, la cual pertenece a la región Ancash, provincia del Santa, distrito de Chimbote, y el distrito de riego es Santa – Lacramarca – Nepeña, que pertenece y esta administrado por la junta de usuarios IRCHIM, y los límites cardinales con los distritos de riego:

Norte	:	Cuenca del río Santa
Sur	:	Cuenca del río de Nepeña
Este	:	Cuenca del río Santa
Oeste	:	Océano Pacífico

El valle en cuestión se caracteriza por su clima cálido y relativamente húmedo, con una precipitación prácticamente inexistente a lo largo de todo el año. Las condiciones climáticas muestran una temperatura máxima promedio de 31.4 °C y una temperatura mínima promedio de 11.80 °C. La temperatura media anual se sitúa en torno a los 21.60 °C, acompañada de una Humedad Relativa media anual de aproximadamente 89.69%. La velocidad del viento promedio alcanza los 82.8 km/día, y la región disfruta de un promedio de 8.70 horas de sol al día. Además, la Radiación Solar promedio es de alrededor de 19.35 MJ/m²/día. Estos datos corresponden a la Estación Meteorológica de Tangay Bajo. En cuanto a la hidrología, el río Santa, ubicado en el norte del Perú, destaca como el río de la costa con el caudal más elevado. Se registra una masa media anual del río en el orden de los 4,500 millones de metros cúbicos (MMC). Durante los últimos 25 años, se ha observado un caudal anual máximo de 6,000 MMC y un mínimo de 2,700 MMC.

Asimismo, el río Santa se extiende desde las elevadas cimas de la Cordillera Blanca, situada a una altitud de aproximadamente 4,000 metros sobre el nivel del mar, hasta su desembocadura en el Océano Pacífico. Esto implica una pendiente general media para el río de alrededor del 1.4%. El río sigue un curso de sur a norte entre ambas cordilleras en un tramo que abarca unos 221 kilómetros, para luego girar hacia el oeste en una sección de 95 kilómetros. Posteriormente, atraviesa la Cordillera Negra antes de llegar a su desembocadura en el Océano Pacífico. En la primera parte de la cuenca, el río Santa presenta una pendiente de aproximadamente 1.5%. El relieve de esta área se caracteriza por la presencia

de valles profundos y empinados, así como terrazas amplias y planas que se encuentran a lo largo de las riberas. En este tramo, la cuenca se distingue por una cadena de nevados perpetuos en su margen derecha, que se extiende a lo largo de unos 170 kilómetros, comprendidos entre los nevados Rajatuna y Champara. Entre estos, destaca el nevado Huascarán, con una altitud de 6,768 metros sobre el nivel del mar. En las zonas inferiores de los picos nevados, que se sitúan por encima de los 4,000 metros sobre el nivel del mar, se encuentran diversas lagunas, entre las cuales las más relevantes son Conococha, Querococha, Llanganuco y Parón. Estas lagunas y nevados son la fuente de los afluentes principales de esta sección del río, todos los cuales se ubican en la margen derecha del cauce.

Esto implica que, en estas secciones específicas del río, las características físicas y geográficas son semejantes en ambos márgenes del cauce a partir de una altitud de 3,800 metros sobre el nivel del mar. Las diferencias más notables en el relieve se atribuyen a la presencia de nevados y los efectos de la deglaciación. En el segundo tramo del río, se desvanecen las disparidades geográficas entre ambos márgenes, y se hace evidente la aridez del terreno debido a las bajas precipitaciones y a la presencia de quebradas empinadas. En la parte final de esta sección, el valle se amplía y la pendiente del río disminuye. El cauce del río se caracteriza por su comportamiento errático, principalmente debido a la acumulación de material sólido arrastrado desde la cuenca alta. En esta área, se encuentran numerosas lagunas y nevados que no siempre se mantienen estables, lo que los convierte en fuentes potenciales de riesgo para las estructuras construidas aguas abajo en el lecho del río. En el caso de la ruptura de una laguna, se produce una súbita liberación de agua y sólidos, que puede ser de gran intensidad. Estas dinámicas específicas de la cuenca son las principales fuentes de sedimentos, y los fenómenos asociados se caracterizan por su violencia. Estos eventos no se originan como parte de un proceso de erosión normal, sino más bien como consecuencia del arrastre repentino de grandes cantidades de sólidos hacia el cauce del río.

Esto es de importancia económica pues presenta un área total de la cuenca del río Santa hasta su desembocadura en el mar, se estima en 12,300 km², esto equivale al 1% de la extensión total del Perú. Estudios del P.E. CHINECAS y de ello la cuenca húmeda, la que contribuye al escurrimiento, es bastante menor (del orden de los 9,000 km²). Es interesante señalar que todas las alternativas de obra de Bocatomas presentadas en el estudio, se encuentran más abajo de la cuenca húmeda, de modo que la

disponibilidad de agua en cualquiera de ellas, dependerá de las extracciones, más no de los aportes de la cuenca y el aporte hídrico se origina tanto en las precipitaciones pluviales como en los deshielos de los nevados. Estos últimos ocupan un área de 600 km², durante las avenidas, la cuenca aportará todo el rango de tamaño de partículas sólidas: desde arcillas hasta rocas. Las características en calidad, cantidad y persistencia de los aportes sólidos dependerán de la naturaleza de los eventos geodinámicos que se presentan en la cuenca y las descargas máximas ocurren durante 4 meses del año, principalmente entre diciembre y marzo y las medias y mínimas en el resto del año.

En la presente investigación se pudo evidenciar que el diseño de un modelo neuro-difuso a la medida de un canal de riego como es el caso del canal principal de riego IRCHIM, influye positivamente la distribución de agua, con fines de riego y abastecimiento para la población, es así que Hernández, Rivas y Feliu (2020) realizaron un estudio del arte de los nuevos retos en el control y distribución del agua de un canal de riego, utilizando para ello información teórica y práctica en los distintos proyectos dedicados al control y distribución del agua, a su vez realizaron los modelos matemáticos que se basan en análisis de series temporales, como ARMA, ARIMA y SARIMA, fueron empleados en este estudio con el objetivo de evaluar su eficacia en la predicción precisa de la demanda de agua a largo plazo en sistemas de riego. Los resultados obtenidos indican que el empleo de series temporales con fines predictivos en este contexto representa un desafío significativo para la comunidad científica. Como conclusión, se plantea que el desarrollo de controladores inteligentes y/o híbridos se presenta como una de las posibles soluciones para abordar la compleja problemática asociada al control de la distribución de agua en sistemas de riego.

En cuanto a las herramientas utilizadas para la identificación del sistema y la obtención de un modelo matemático apropiado para el tramo que abarca desde el kilómetro 8+000 hasta el 20+000 del canal de riego IRCHIM, se llevó a cabo una identificación de la línea de base. Para este propósito, se emplearon herramientas de medición esenciales. El sistema de medición hidrométrica se compone de un Controlador Lógico Programable (PLC) con capacidades de comunicación de red y/o GPRS (Red Celular) que puede funcionar tanto con alimentación a través de batería como con alimentación directa de red eléctrica. Además, se utiliza un sensor piezométrico que mide la columna de agua en el lecho del canal principal de riego IRCHIM. Dado que se pueden presentar cortes de energía eléctrica, se ha

implementado una fuente de energía sostenible, como la energía solar a través de paneles solares, para alimentar el sensor piezométrico. El PLC empleado se basa en la tecnología de Arduino, diseñada para aplicaciones profesionales, y se ha programado utilizando MATLAB. Este PLC consta de 17 entradas/salidas y dispone de múltiples puertos de comunicación que proporcionan una mayor flexibilidad y control. La familia de productos M-DUINO ofrece la capacidad de expandir su funcionalidad mediante hasta 127 módulos a través de la interfaz I2C, lo que significa que se pueden conectar hasta 7,100 entradas/salidas en configuraciones maestro-esclavo, además de sensores y otros dispositivos. El sensor piezométrico utilizado tiene un rango de medición que abarca desde 0 hasta 10 metros, su fuente de alimentación es de 12 a 24 V, presenta una comunicación RS-485 MODBUS RTU y por último presenta una protección IP68, y en ese sentido se coincide con los autores Tavakoli et al. (2020) diseñaron modelos de redes neuronales artificiales y neurodifusos en los miles de millas de tuberías construidas con diversos materiales, tamaños y edades en los Estados Unidos, utilizaron una metodología básica con un diseño experimental, para ello estudiaron las tuberías que están sometidas a diversas tensiones físicas, ambientales, estructurales y operativas, lo que provoca su deterioro y, en última instancia, su fallo, como resultados diseñaron un modelo computacional que pronostica la vida útil restante (RUL) de las tuberías de agua mediante la aplicación de redes neuronales artificiales (ANN) y el sistema de inferencia difusa neural adaptativa (ANFIS), estos modelos se entrenan y prueban utilizando datos de campo adquiridos para identificar los parámetros significativos que influyen en la predicción de la RUL, con ello llegaron a la conclusión que, en promedio, con aproximadamente un 10% de pérdida de espesor de la pared en tuberías existentes de hierro fundido, hierro dúctil, cemento de amianto y acero, la reducción de la vida útil restante es de aproximadamente un 50%.

En relación al desarrollo del modelo neuro – difuso de la distribución de agua en el tramo km 8+000 – 20+000 del canal de riego IRCHIM, se realizó modelado matemático para un tramo de un canal de riego, se debe tener en cuenta las tres estrategias de control empleadas para regular un tramo específico de un canal principal de riego. La evaluación de los aspectos críticos de cada una de estas estrategias nos brindó una comprensión de sus beneficios y limitaciones. Dado que nuestro objetivo primordial es lograr la conservación del agua y garantizar su entrega de manera eficiente en respuesta a las necesidades de los usuarios, optaremos por la estrategia de control que integre la lógica de control aguas

abajo alejado. Bajo esta perspectiva el diseño del controlador tendrá un rango de operación a bajas frecuencias (limitación establecida por el comportamiento dinámico difícil del sistema) sin mucho control sobre perturbaciones no predecibles a frecuencias mayores a las del diseño del controlador, en ese mismo sentido los autores Peña et al. (2023), diseñaron un modelo de predicción en base a las redes neuronales e identificar los factores más influyentes, para ello utilizaron una metodología tipo básica con un diseño experimental, como técnicas utilizaron las redes neuronales artificiales y con ello llegaron los resultados indican que la temperatura superficial del mar es la variable más influyente y con lo cual concluyeron que el modelo presenta una precisión del 82%.

CONCLUSIONES

Se emplearon técnicas de identificación para analizar el comportamiento dinámico del flujo de agua en un punto específico de un tramo principal de canal de riego, aguas abajo alejado. El resultado de este análisis indicó que es factible alcanzar la variación deseada en el flujo de agua mediante la modulación de la apertura o cierre de la compuerta equivalente ubicada aguas arriba. Esto se logró mediante la identificación de las variables de proceso y control pertinentes.

Se diseñó un modelo neuro-difuso, especialmente adaptado para abordar demoras de tiempo significativas. Este modelo se estableció inicialmente considerando la distribución del agua destinada tanto a la irrigación como al suministro para el consumo humano.

Se llevaron a cabo pruebas de simulación en diversas situaciones que involucraban perturbaciones y cambios en los parámetros de la planta. En términos cualitativos, se observó que el sistema de control respondió de manera rápida y no presentó sobreimpulso en comparación con un controlador proporcional-integral.

Se elaboró una propuesta de implementación práctica que abarcó la selección de instrumentación y equipos, así como la definición de protocolos de comunicación entre diversos dispositivos para el sistema de control. En este contexto, se estableció un controlador local (servidor) encargado de controlar las operaciones de apertura y cierre de la compuerta equivalente. Este controlador local recibe la señal de control generada por la PC de la estación base (cliente) a través de la interfaz de comunicación OPC. Además, se presentó un diagrama de bloques que describe la infraestructura de potencia requerida para

activar el motor AC trifásico y un sistema de respaldo de energía mediante la incorporación de un panel solar.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Abbasi, N., Sohrabi, Y., & Kiani, H. (2023). Using tragacanth gum mitigated the effects of drought stress on the black cumin (*Nigella sativa*) plant. *Agricultural Water Management*, 287. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108406>
- Algaba, M. H.-P., Huyghe, W., van Leeuwen, K., Koop, S., & Eisenreich, S. (2023). Assessment and Actions to Support Integrated Water Resources Management of Seville (Spain). *Environment, Development and Sustainability*. <https://doi.org/10.1007/s10668-023-03011-8>
- Augusto, H., Moreira, M., Gomes, H. P., Villanueva, J. M. M., & de Tarso Marques Bezerra, S. (2021). Real-time neuro-fuzzy controller for pressure adjustment in water distribution systems. *Water Science and Technology: Water Supply*, 21(3), 1177–1187. <https://doi.org/10.2166/ws.2020.379>
- Li, F., Yan, W., Zhao, Y., & Jiang, R. (2021). The regulation and management of water resources in groundwater over-extraction area based on ET. *Theoretical and Applied Climatology*, 146(1–2), 57–69. <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03713-x>
- Morán-Valencia, M., Flegl, M., & Güemes-Castorena, D. (2023). A state-level analysis of the water system management efficiency in Mexico: Two-stage DEA approach. *Water Resources and Industry*, 29. <https://doi.org/10.1016/j.wri.2022.100200>
- Namara, I., Hartono, D. M., Latief, Y., & Moersidik, S. S. (2022). Policy Development of River Water Quality Governance Toward Land Use Dynamics Through a Risk Management Approach. *Journal of Ecological Engineering*, 23(2), 25–33. <https://doi.org/10.12911/22998993/144717>
- Nihei, Y., Oota, K., Kawase, H., Sayama, T., Nakakita, E., Ito, T., & Kashiwada, J. (2023). Assessment of climate change impacts on river flooding due to Typhoon Hagibis in 2019 using nonglobal warming experiments. *Journal of Flood Risk Management*, 16(3). <https://doi.org/10.1111/jfr3.12919>
- Pan, Y., Peng, D., Chen, J. M., Myneni, R. B., Zhang, X., Huete, A. R., Fu, Y. H., Zheng, S., Yan, K., Yu, L., Huang, J., & Wu, C. (2023). Climate-driven land surface phenology advance is

overestimated due to ignoring land cover changes. *Environmental Research Letters*, 18(4).

<https://doi.org/10.1088/1748-9326/acca34>

Peña Cáceres, O. J. M., More More, M. A., Nima, R. E., & Marchan, H. S. (2023). Artificial neural network model for the prediction of the “El Niño” phenomenon in the region of Piura (Peru) | MODELO DE RED NEURONAL ARTIFICIAL PARA LA PREDICCIÓN DEL FENÓMENO “EL NIÑO” EN LA REGIÓN DE PIURA (PERÚ). *TECHNO Review. International Technology, Science and Society Review / Revista Internacional de Tecnología, Ciencia y Sociedad*, 13(4). <https://doi.org/10.37467/revtechno.v13.4815>

Quezada, N. I. C., Mijahuanca, M. E. M., Dongo, A. J. G., González, G. F. L., & Sotelo, C. G. M. (2023). Public policies on climate change | Políticas públicas sobre mudanças climáticas | Políticas públicas sobre el cambio climático. *Produccion y Limpia*, 18(1), 154–172. <https://doi.org/10.22507/pml.v18n1a10>

Sharifi, H., Roozbahani, A., & Hashemy Shahdany, S. M. (2021). Evaluating the Performance of Agricultural Water Distribution Systems Using FIS, ANN and ANFIS Intelligent Models. *Water Resources Management*, 35(6), 1797–1816. <https://doi.org/10.1007/s11269-021-02810-w>

Sonne, C., Jenssen, B. M., Rinklebe, J., Lam, S. S., Hansen, M., Bossi, R., Gustavson, K., & Dietz, R. (2023). EU need to protect its environment from toxic per- and polyfluoroalkyl substances. *Science of the Total Environment*, 876. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162770>

Sun, J., Niu, W., Du, Y., Zhang, Q., Li, G., Ma, L., Zhu, J., Mu, F., Sun, D., Gan, H., Siddique, K. H. M., & Ali, S. (2023). Combined tillage: A management strategy to improve rainfed maize tolerance to extreme events in northwestern China. *Agricultural Water Management*, 289. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108503>