

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA
ESCUELA DE POSGRADO
PROGRAMA DE DOCTORADO EN INGENIERÍA CIVIL



UNS
ESCUELA DE
POSGRADO

**Modelo neuro-difuso para el control hidráulico y su
influencia en la distribución de agua del canal de
riego IRCHIM, 2020**

**Tesis para obtener el Grado de
Doctor en Ingeniería Civil**

Autor:

Ms. López Carranza, Atilio Rubén

Asesor:

Dr. Flores Reyes, Gumercindo
DNI. N° 10281891
Código ORCID. 0000-0002-2305-7339

Línea de Investigación
Modelamiento en infraestructura hidráulica

Nuevo Chimbote - PERÚ
2024



UNS
ESCALA DE
POSGRADO

CONSTANCIA DE ASESORAMIENTO DE TESIS

Yo, **Gumercindo Flores Reyes** mediante la presente certifico mi asesoramiento de la Tesis Doctoral titulada: ***“Modelo neuro-difuso para el control hidráulico y su influencia en la distribución de agua del canal de riego IRCHIM, 2020”***, elaborada por el magister Atilio Rubén López Carranza para obtener el Grado Académico de Doctor en Ingeniería Civil en la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional del Santa.

Nuevo Chimbote, marzo del 2024

Dr. Gumercindo Flores Reyes

ASESOR

CODIGO ORCID: 0000-0002-2305-7339

DNI N° 10281891



UNS
ESCUELA DE
POSGRADO

CONFORMIDAD DEL JURADO EVALUADOR

“Modelo neuro-difuso para el control hidráulico y su influencia en la distribución de agua del canal de riego IRCHIM, 2020”

TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE DOCTOR EN INGENIERIA CIVIL

Revisado y Aprobado por el Jurado Evaluador:

Dr. LEON BOBADILLA ABNER ITAMAR

PRESIDENTE

CODIGO ORCID 0000-0003-2949-6591

DNI N° 32942184

Dr. MUÑOZ PEREZ SOCRATES PEDRO

SECRETARIO

CODIGO ORCID 0000-0003-3182-8735

DNI N° 42107300

Dr. FLORES REYES GUMERCINDO

VOCAL

CODIGO ORCID 0000-0002-23005-7339

DNI N° 10281891



UNS
ESCUELA DE
POSGRADO

ACTA DE EVALUACIÓN DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

A los dieciséis días del mes de diciembre del año 2023, siendo las 19.00 horas, en el aula P-01 de la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional del Santa, se reunieron los miembros del Jurado Evaluador, designados mediante Resolución Directoral N° 325-2023-EPG-UNS de fecha 22.11.2023, conformado por los docentes: Dr. Abner Itamar León Bobadilla (Presidente), Dr. Sócrates Pedro Muñoz Pérez (Secretario) y Dr. Gumercindo Flores Reyes (Vocal); con la finalidad de evaluar la tesis titulada: **MODELO NEURO-DIFUSO PARA EL CONTROL HIDRÁULICO Y SU INFLUENCIA EN LA DISTRIBUCIÓN DE AGUA DEL CANAL DE RIEGO IRCHIM, 2020**; presentado por el tesista **Atilio Rubén López Carranza**, egresado del programa de **Doctorado en Ingeniería Civil**.

Sustentación autorizada mediante Resolución Directoral N° 335-2023-EPG-UNS de fecha 12 de diciembre de 2023.

El presidente del jurado autorizó el inicio del acto académico; producido y concluido el acto de sustentación de tesis, los miembros del jurado procedieron a la evaluación respectiva, haciendo una serie de preguntas y recomendaciones a la tesista, quien dio respuestas a las interrogantes y observaciones.

El jurado después de deliberar sobre aspectos relacionados con el trabajo, contenido y sustentación del mismo y con las sugerencias pertinentes, declara la sustentación como BUENO, asignándole la calificación de DIECISIETE (17)

Siendo las 20.00 horas del mismo día se da por finalizado el acto académico, firmando la presente acta en señal de conformidad.


Dr. Abner Itamar León Bobadilla
Presidente


Dr. Sócrates Pedro Muñoz Pérez
Secretario


Dr. Gumercindo Flores Reyes
Vocal - Asesor

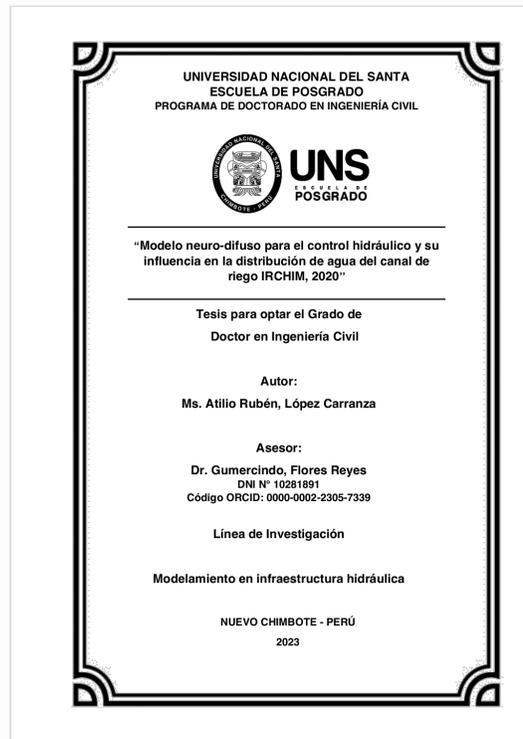


Recibo digital

Este recibo confirma que su trabajo ha sido recibido por **Turnitin**. A continuación podrá ver la información del recibo con respecto a su entrega.

La primera página de tus entregas se muestra abajo.

Autor de la entrega: Ruben Lopez
Título del ejercicio: TESIS
Título de la entrega: Modelo neuro-difuso para el control hidráulico y su influenc...
Nombre del archivo: Tesis_Doctoral_ARLC_UNRS_RF_OK_OK_LISTO.docx
Tamaño del archivo: 16.13M
Total páginas: 89
Total de palabras: 24,021
Total de caracteres: 128,198
Fecha de entrega: 16-feb.-2024 05:49p. m. (UTC-0500)
Identificador de la entre... 2255062382



Modelo neuro-difuso para el control hidráulico y su influencia en la distribución de agua del canal de riego IRCHIM, 2020

INFORME DE ORIGINALIDAD

19%	19%	3%	11%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	tesis.pucp.edu.pe Fuente de Internet	9%
2	repositorio.ucv.edu.pe Fuente de Internet	1%
3	www.researchgate.net Fuente de Internet	1%
4	www.industrialshields.com Fuente de Internet	1%
5	Submitted to Pontificia Universidad Catolica del Peru Trabajo del estudiante	1%
6	www.slideshare.net Fuente de Internet	<1%
7	repositorio.usanpedro.edu.pe Fuente de Internet	<1%
8	repositorio.ana.gob.pe Fuente de Internet	<1%

Dedicatoria

La concepción de este proyecto está dedicada a mis padres, pilares fundamentales en mi vida. Sin ellos, jamás hubiese podido conseguir lo que hasta ahora. Su tenacidad y lucha insaciable han hecho de ellos el gran ejemplo a seguir y destacar, no solo para mí, sino para mis hermanos y familia en general.

También dedico este proyecto a todas las personas que hicieron posible que se desarrolle dicha investigación.

Agradecimiento

Los resultados de este proyecto, están dedicados a todas aquellas personas que, de alguna forma, son parte de su culminación. Mis más sinceros agradecimientos están dirigidos a los funcionarios de la Municipalidad Provincial del Santa, quien, con su ayuda desinteresada, nos brindó información relevante, próxima, pero muy cercana a la realidad de nuestras necesidades.

A mis familiares por siempre brindarme su apoyo, tanto sentimental, como económico.

Principalmente mis agradecimientos están dirigidos hacia el excelentísimo y amigo, Dr. Gumercindo Flores Reyes, sin él no se hubiera hecho posible el desarrollo de esta investigación.

Índice general

Hoja aval del Jurado evaluador	i
Copia de acta de sustentación.....	ii
Dedicatoria	iii
Agradecimiento	iv
Índice general	v
Índice de Tablas	vii
Índice de Figuras	viii
Índice de anexos	ix
Resumen.....	x
Abstract	xi
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1. PROBLEMÁTICA.....	2
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	9
1.3. OBJETIVOS	9
1.3.1. Objetivo general	9
1.3.2. Objetivos específicos.....	9
1.4. FORMULACIÓN DE LA HIPÓTESIS	9
1.5. JUSTIFICACIÓN.....	10
II. MARCO TEÓRICO.....	15
2.1. ANTECEDENTES.....	15
2.2. MARCO CONCEPTUAL.....	16
III. MATERIALES Y MÉTODOS	22
3.1.1. Tipo y diseño de investigación.....	22
3.1.2. Variables y operacionalización	22

3.1.3.	Población, muestra y muestreo.....	23
3.1.4.	Técnicas e instrumentos de recolección de datos, validez y confiabilidad	24
3.1.6.	Método de análisis de datos.....	30
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	31
4.1.1.	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.	31
4.1.2.	Modelo neuro – difuso de la distribución de agua en el tramo km 8+000 – 20+000 del canal de riego IRCHIM, 2020.	44
4.1.3.	Análisis comparativo del modelo neuro – difuso desarrollado vs el control hidráulico convencional, determinando la robustez del modelo obtenido frente a diferentes tipos de perturbaciones.....	56
4.1.4.	Propuesta de implementación practica del modelo neuro – difuso desarrollado en el tramo km 8+000 – 20+000 del canal de riego IRCHIM, 2020.	58
V.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	64
VI.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS Y VIRTUALES	66
VII.	ANEXOS.....	69

Índice de Tablas

Cuadro 1: Operacionalización de las variables

23

Índice de Figuras

Figura 1: Esquema general de identificación	27
Figura 2: Proceso de identificación paramétrica	28
Figura 3: Diagrama equivalente de la bocatoma	29
Figura 4: Diagrama tecnológico de la instalación experimental utilizada en la recolección de datos.	30
Figura 5: Descargas medias mensuales del río Santa	36
Figura 6: Cédula de cultivo del bloque de riego del canal IRCHIM	39
Figura 7: Características hidráulicas y geométricas del canal IRCHIM	40
Figura 8: Características de las tomas del canal	41
Figura 9: Sistema para el control del nivel de agua del canal IRCHIM	43
Figura 10: Esquema PID para la implementación del sistema de control desarrollado en el Bocal.	45
Figura 11: Ubicación del sensor ultrasónico de nivel en el tramo de canal IRCHIM	47
Figura 12: Elementos de la caja reductora.	48
Figura 13 Variación de nivel aguas abajo	49
Figura 14 Variación de la posición de la compuerta aguas arriba	49
Figura 15 Modelo NARX	50
Figura 16 Esquema de estructura NARX serie paralelo	51
Figura 17 Definición y Conjuntos difusos	51
Figura 18 Definición de reglas difusas	52
Figura 19 Definición de funciones de pertinencia de salida	52
Figura 20 Hiperparámetros y métricas de Rendimiento	53
Figura 21 Estructura de la red	54
Figura 22 Salida real y del modelo después de la fase del entrenamiento	55
Figura 23: Respuesta comparativa del sistema de control con variación de parámetros internos.	57
Figura 24: Esquema de comunicación OPC entre el servidor y el cliente.	58
Figura 25: Esquema funcional para la puesta en marcha del sistema de control local.	59
Figura 26: Integración del sistema de control en sitio y la estación de control y supervisión.	61
Figura 27: Realizando el aforado del canal principal Cascajal – Nepeña – Casma – Sechin	70
Figura 28 Instalación de la base para colocar el correntómetro Valeport	70
Figura 29 Vista panorámica donde se va colocando el correntómetro al canal para aforar	71
Figura 30 tomando datos (aforar) con el correntómetro del canal	71
Figura 31 Vista panorámica del molinete con lastre	72
Figura 32 Vista panorámica del contador de señales para las mediciones de los correntómetros	72
Figura 33 Vista panorámica con los técnicos y equipos para aforar (correntómetro)	73
Figura 34: Toma lateral de la compuerta 23; km 26+754	73
Figura 35: Salida de la toma del canal compuerta 23, flujo de régimen turbulento	74
Figura 36: Tramo inicial con fuerte pendiente del canal compuerta 23	74
Figura 37: Canal Carlos Leight de primer orden que abastece al canal de segundo orden	75

Índice de anexos

ANEXO 1: Plano de Red hidrométrica de captación de agua	69
ANEXO 2: Panel fotográfico	70
ANEXO 3 Hoja de cálculo canal IRCHIM tomados a través del correntómetro.	76
ANEXO 4 Relación mira caudal del canal IRCHIM	77

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.

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.

Key words: neuro-fuzzy model, control, irrigation canal, water distribution, instrumentation.

I. 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 meticulosa un modelo neuro-difuso específico, meticulosamente 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.

1.1. PROBLEMÁTICA

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 no 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.

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%.

Schlattmann et al. (2022), con su investigación titulada “Evaluación de la sostenibilidad ecológica de la distribución del agua para el mantenimiento de los ecosistemas, sus servicios y la biodiversidad”, los autores se plantearon como propósito determinar los niveles de cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible utilizando una herramienta de sostenibilidad ecológica en la distribución de agua (ESAW), apoyándose de una metodología básica con un diseño de investigación experimental, la herramienta que utilizaron introduce una evaluación de sostenibilidad a nivel de cuenca que analiza la relación entre la oferta y la demanda de agua, teniendo en cuenta el uso doméstico del agua y las necesidades de los ecosistemas como los principales usuarios de agua, esta herramienta lo probaron experimental en la cuenca del río Danubio mediante la combinación de datos de modelos hidro-agroecológicos de alta resolución (el modelo de procesos de superficie terrestre hidrológica PROMET y el modelo de aguas subterráneas OpenGeoSys) y otros datos de acceso libre (uso del agua, biodiversidad y mapas de humedales), con lo cual obtuvieron resultados que les ayudaron a deducir medidas para una gestión del agua más sostenible, como el fomento de la agricultura de secano cerca de ecosistemas vulnerables o el cambio de cultivos específicos, con lo cual llegaron a la conclusión que esta herramienta puede respaldar la toma de decisiones de las autoridades a nivel local, nacional y de empresas privadas que desean mejorar la sostenibilidad de sus cadenas de suministro.

Alnajjar y Üçüncü (2022), en su trabajo de investigación titulado “Mejora de la predicción de modelos para la eliminación de la contaminación en plantas de tratamiento de aguas residuales mediante un sistema de inferencia neuro-difuso adaptativo”, para lo cual se plantearon como objetivo principal diseñar un modelo de sistema de inferencia difusa basado en redes adaptables (ANFIS) para regular el tratamiento primario y biológico de aguas residuales, y se emplea para modelar las interacciones no lineales entre los factores contaminantes del influente y las variables del efluente en una instalación de tratamiento de aguas residuales. Se desarrollaron modelos para predecir la eficiencia de eliminación de la demanda biológica de oxígeno (DBO), nitrógeno total (NT), fósforo total (PT) y sólidos suspendidos totales (SST) en una planta de tratamiento de aguas residuales utilizando ANFIS. El tiempo de retención hidráulica (TRH), la temperatura (T) y el oxígeno disuelto (OD) se utilizaron como variables de entrada para los modelos de DBO, NT, PT y SST, según las matrices de correlación lineal entre las variables de entrada y salida, como resultados obtuvieron que el sistema desarrollado es capaz de predecir y controlar con precisión los resultados para DBO, NT, PT y SST, ANFIS y lograron obtener errores

cuadráticos medios mínimos de 0.1673, 0.0266, 0.0318 y 0.0523, respectivamente. Los coeficientes de correlación para DBO, NT, PT y SST son todos bastante sólidos, llegaron así a la conclusión que el modelo de predicción tiene un rendimiento de predicción de ANFIS fue satisfactorio y el modelo ANFIS se puede utilizar para predecir la eficiencia en la eliminación de contaminantes de las aguas residuales.

Hassanvand et al. (2021), en su trabajo de investigación titulado “Investigación de la aplicación del método adaptativo de sistemas de inferencia neurofuzzy y el software Epanet para modelar la red de distribución de agua en espacios verdes”, para lo cual se plantearon como objetivo general diseñar un sistema de control y predicción de la presión, la velocidad y las características hidráulicas, para prevenir problemas en la red de suministro de agua, y también se utilizaron sistemas de inferencia difusa adaptativa (ANFIS), diseñaron redes de suministro de agua con un período de diseño de 10 años y una población objetivo de 95,000 personas, considerando un riego de 22 horas al día y 29.6 metros cuadrados por habitante al final del período de diseño. Luego, se analizaron la presión y la velocidad de la red utilizando el software EPANET, con ello obtuvieron como resultados que la presión máxima se registró en el nodo 3-3 en la tercera región de presión, estimada en 100 metros de altura de agua, y la velocidad máxima de la red se estimó en 1.4 metros por segundo y que el caudal se ajustó en el modelo en función del diámetro de las tuberías, y las rutas seleccionadas en diferentes regiones se encontraban dentro de un rango adecuado. Luego, utilizando los valores medidos, se entrenó la red neural difusa con la ayuda de algoritmos de enjambre de partículas, algoritmos genéticos, algoritmos diferenciales y algoritmos de colonia de hormigas optimizados, y se obtuvo la red óptima para la predicción de la velocidad a través del algoritmo de colonia de hormigas, mientras que para la pérdida de carga se seleccionó la red neural difusa con el algoritmo de enjambre de partículas como el mejor modelo, llegando así a la conclusión que el ANFIS representa alta capacidad para analizar y predecir las propiedades hidráulicas de las tuberías de suministro de agua.

Kusumastuti et al. (2021), en su trabajo de investigación titulado “Análisis del sistema de distribución de agua en Alang-Alang Lebar”, para lo cual se plantearon como propósito general gestionar la distribución de agua en el "Municipal Waterworks Tirta Musi" y utilizarlo para suministrar agua potable con el fin de identificar las causas de la insuficiencia de agua; prever la evolución del número de clientes en los próximos 20 años y proponer mejoras en el sistema de distribución. Se utilizó el programa informático EPANET para llevar a cabo simulaciones en redes de tuberías. Los resultados muestran que la presión en

la red es el problema principal en Alang-Alang Lebar. La adición de caudales de las estaciones de bombeo y la ampliación de diámetros de tuberías en algunas secciones mejorarán el rendimiento de la distribución. El diseño propuesto del sistema de distribución será capaz de suministrar agua durante los próximos 20 años, incluso para un número creciente de clientes. Llegando a la conclusión que la gestión y análisis de distribución de agua contribuye al desarrollo y mejora de sistemas de distribución de agua municipales.

Hernández, Rivas y Feliu (2020) en su artículo de investigación titulado “Control automático de la distribución de agua en sistemas de riego: revisión y retos”, los autores se plantearon como objetivo realizar 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.

Tavakoli et al. (2020), en su trabajo de investigación titulado “Redes neuronales artificiales y modelos neurodifusos adaptativos para predecir la vida útil restante de las conducciones de agua”, se plantearon como objetivo principal diseñar 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%.

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

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

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo general

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.

1.3.2. Objetivos específicos

1. Utilizar las 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.
2. Desarrollar un modelo neuro – difuso de la distribución de agua en el tramo km 8+000 – 20+000 del canal de riego IRCHIM, 2020.
3. Desarrollar un análisis comparativo del modelo neuro – difuso desarrollado vs el control hidráulico convencional, determinando la robustez del modelo obtenido frente a diferentes tipos de perturbaciones.
4. Realizar una propuesta de implementación práctica del modelo neuro – difuso desarrollado en el tramo km 8+000 – 20+000 del canal de riego IRCHIM, 2020.

1.4. FORMULACIÓN DE LA HIPÓTESIS

El control hidráulico a través de un modelo neuro – difuso, mejora la distribución de agua del canal de riego IRCHIM, 2020.

1.5. JUSTIFICACIÓN

La importancia del presente trabajo de investigación radica en el control hidráulico del canal de distribución de agua de las zonas de Vinzos Pueblo, Pampa de Vinzos, Cascajal Derecho, Cascajal Izquierdo, Lacramarca Baja, Tangay Alto Medio y Tangay Bajo Los Álamos, utilizando para ello la ciencia matemática a través de la herramienta de la neuro – difusa para controlar de forma objetiva las dotaciones adecuadas del recurso hídrico en dichas zonas, las cuales representan una extensión territorial de 3000 hectáreas. Aquí se enfatiza la necesidad de distribuir de manera equitativa el volumen de recurso hídrico necesario para abordar desafíos multidimensionales en la gestión de recursos hídricos en esta vasta región agrícola. Desde una perspectiva social, esta extensión territorial representa una comunidad agrícola considerable que depende del canal para su sustento y desarrollo económico. El acceso equitativo y confiable al agua es esencial para el bienestar y la seguridad alimentaria de estas comunidades, y es fundamental en la justificación social de esta investigación. La gestión eficiente de los recursos hídricos no solo beneficia a los agricultores, sino que también influye en la economía en general. La conservación ambiental, por otro lado, cobra aún más relevancia cuando se examina una extensión de esta magnitud. Proteger los ecosistemas acuáticos y reducir la contaminación ambiental se manifiesta de manera más notoria en este contexto expandido. Respecto a la justificación se tiene una justificación holística que involucra los siguientes aspectos:

La justificación científica de este trabajo se basa en la necesidad de abordar un problema de relevancia en la gestión de recursos hídricos y la ingeniería hidráulica. El canal de riego IRCHIM 2020 desempeña un papel crucial en la agricultura y el abastecimiento de agua en la región, y la optimización de su funcionamiento es esencial para garantizar el acceso a agua de calidad, la sostenibilidad de la agricultura y la conservación de los recursos naturales. El uso de un modelo neuro-difuso para el control hidráulico de este canal representa una aproximación innovadora y multidisciplinaria que combina la capacidad de las redes neuronales para el aprendizaje y la adaptación con la lógica difusa para lidiar con la incertidumbre inherente en sistemas hidráulicos. Este enfoque tiene el potencial de mejorar significativamente la eficiencia de la distribución de agua y reducir las pérdidas en el canal, lo que a su vez impactará positivamente en la disponibilidad de recursos hídricos y en la conservación del ecosistema circundante, asimismo contribuirá al avance del conocimiento en el campo de la ingeniería hidráulica y la gestión de recursos hídricos, al proporcionar un enfoque integral y efectivo para el control de canales de riego. Además, sirve como un caso

de estudio valioso para otros investigadores y profesionales interesados en mejorar la gestión de sistemas de riego y la distribución de agua en regiones agrícolas y, por lo tanto, tiene una relevancia científica y aplicada significativa. A nivel teórico el presente trabajo de investigación brindará conocimientos sólidos sobre el control neuro – difuso en caudales de los principales canales de irrigación, que será utilizado por la comunidad científica, además se dará a conocer resultados relevantes sobre el tema de investigación, el cual se desarrollará a través de la ciencia matemática y las herramientas de control automatizado como es el modelo neuro – difuso, asimismo se seguirá rigurosamente el método científico con el propósito de obtener resultados de calidad que sean válidos y confiables, los mismo que servirán de guía para futuras investigaciones relacionadas al control hidráulico a través de un modelo neuro – difuso.

La justificación metodológica se fundamenta en la necesidad de emplear un enfoque innovador para lidiar con la complejidad de la gestión de la distribución de agua en el canal de riego IRCHIM 2020, en la cual se utiliza herramientas, técnicas e instrumentos relacionados a un nuevo campo de la investigación como es la ciencia básica, la cual se utilizará para solucionar el problema identificado en el objeto de estudio, generando así nuevos procedimientos para el control automatizado de canales, y con ello ayudar a otras investigaciones relacionadas con el control hidráulico a través de un modelo neuro – difuso en los canales de distribución, asimismo si hay investigaciones que quieran utilizar la metodología empleada en esta investigación, podrán utilizar este trabajo como antecedente para dar solución a problemas similares que se pueden presentar en distintas zonas geográficas del país, ya que el esquema y procedimiento servirá de gran referente para el investigador. La metodología propuesta se basa en la implementación de un modelo neuro-difuso que combina el aprendizaje de las redes neuronales con la lógica difusa. Esto permite lograr un control hidráulico más preciso y adaptable en el sistema. Este enfoque se justifica por varias razones esenciales. En primer lugar, la eficiencia y precisión de los modelos neuro-difusos permiten adaptarse a las condiciones cambiantes, lo que se traduce en una gestión más eficaz de la distribución de agua en el canal. Además, dado que los sistemas hidráulicos están sujetos a incertidumbre debido a variaciones en la demanda de agua, las condiciones climáticas y otros factores, la lógica difusa se convierte en una herramienta valiosa para abordar y resolver esta incertidumbre. La interdisciplinariedad es otro motivo importante para la elección de esta metodología, ya que combina fortalezas de diferentes disciplinas y permite abordar la complejidad inherente de los sistemas hidráulicos de manera

más holística. Además, la metodología propuesta tiene aplicaciones prácticas directas en la gestión de canales de riego y la distribución de agua, lo que la hace relevante desde una perspectiva de ingeniería hidráulica y gestión de recursos hídrico, asimismo la metodología plantea el potencial de replicación en otros contextos y ubicaciones con sistemas de riego similares, lo que amplía su relevancia y utilidad. En conjunto, la elección de esta metodología neuro-difusa se justifica por su capacidad para afrontar los desafíos específicos relacionados con la gestión de la distribución de agua en el canal de riego IRCHIM 2020 y su potencial para ofrecer soluciones efectivas y sostenibles en este campo.

Respecto a la justificación económica se sustenta en el análisis de los beneficios financieros derivados de la implementación de un modelo de control neuro-difuso en la distribución de agua del canal de riego IRCHIM 2020. A pesar de la inversión inicial requerida para el desarrollo, la implementación y la formación relacionados con este enfoque, esta inversión se respalda en múltiples razones económicas sólidas. En primer lugar, la reducción de pérdidas de agua es uno de los objetivos clave. Cada litro de agua que se pierde representa un recurso valioso desperdiciado, y al reducir estas pérdidas, se lograrán ahorros sustanciales a largo plazo. Además, se optimizará el uso de los recursos hídricos disponibles, lo que es especialmente crucial en regiones donde el agua es un recurso escaso y valioso. La eficiencia en la gestión de la distribución de agua también conlleva una disminución de los costos operativos. Esto incluye menores gastos relacionados con el mantenimiento y la reparación de la infraestructura del canal, así como una reducción en el consumo energético durante el proceso. Un aspecto económico relevante es el aumento de la productividad agrícola y el suministro de agua más confiable y eficiente puede impulsar la productividad de la agricultura en la región. Este incremento no solo se traduce en mayores ingresos para los agricultores, sino también en un aumento en la producción de alimentos, lo que genera un impacto económico positivo. Además, la inversión en este modelo no solo es beneficiosa a corto plazo, sino que también garantiza la sostenibilidad a largo plazo de la infraestructura de riego. Evitar costosas reparaciones y reemplazos en el futuro es una estrategia financiera sensata. Finalmente, la posibilidad de replicar este modelo en otros canales de riego podría generar ingresos adicionales, ya que podría compartirse o licenciarse a otras entidades de gestión de recursos hídricos, es así que la inversión inicial en el desarrollo y aplicación de este modelo neuro-difuso está respaldada por argumentos económicos sólidos, ya que tiene el potencial de generar ahorros, aumentar la eficiencia y mejorar la sostenibilidad en la gestión de recursos hídricos en la región. Esto, a su vez, podría tener un impacto positivo en

la economía local y regional, lo que justifica plenamente esta investigación desde una perspectiva financiera.

Respecto a la justificación ambiental se sustenta en la necesidad apremiante de abordar cuestiones relacionadas con la gestión sostenible de los recursos hídricos y la protección del entorno natural en el contexto del canal de riego IRCHIM 2020. La implementación de un modelo de control neuro-difuso puede tener un impacto positivo en el medio ambiente, y esto se respalda por diversas razones de peso. En primer lugar, la conservación de los recursos hídricos es esencial. Reducir las pérdidas de agua en el canal de riego equivale a preservar un recurso natural preciado y limitado. Cada gota de agua que se pierde en fugas y derrames es un recurso que podría destinarse a la conservación de ecosistemas acuáticos y la vida silvestre. Este enfoque también protege a los ecosistemas circundantes al canal de riego. Asegura un flujo constante de agua en los hábitats acuáticos, lo que es esencial para la preservación de la biodiversidad y la salud de estos ecosistemas. Además, una distribución de agua eficiente reduce la erosión del suelo y evita la escorrentía de contaminantes hacia fuentes de agua, lo que mejora la calidad del agua y la protección de los ecosistemas acuáticos. En el contexto del cambio climático, una gestión eficaz de los recursos hídricos es crucial. Garantizar un suministro de agua adecuado para la agricultura y otros usos contribuye a la resiliencia ante eventos climáticos extremos, como sequías e inundaciones. La implementación de prácticas agrícolas sostenibles es promovida por un suministro de agua confiable y eficiente, ya que permite una irrigación más precisa y controlada. Esto puede reducir el uso de agroquímicos y fomentar la agricultura de conservación. Además, en muchos lugares, existe una creciente presión para cumplir con regulaciones ambientales más rigurosas. La implementación de un sistema de control respetuoso con el medio ambiente puede ayudar a cumplir con estas normativas y evitar posibles sanciones y todo esto se basa en su capacidad para contribuir a la conservación de los recursos hídricos, la protección de los ecosistemas acuáticos, la reducción de la contaminación y la promoción de prácticas agrícolas sostenibles, lo que resulta en un impacto positivo en el medio ambiente local y regional. La implementación de un modelo de control neuro-difuso puede ayudar a encontrar un equilibrio crucial entre la explotación de recursos naturales y la conservación del medio ambiente, lo que es esencial para un desarrollo sostenible y la preservación a largo plazo de nuestro entorno natural.

Respecto a la justificación social fundamenta en la importancia de abordar aspectos cruciales relacionados con el suministro y la distribución de agua, que repercuten directamente en la

calidad de vida de las comunidades locales que se benefician del canal de riego IRCHIM 2020. La introducción de un modelo de control neuro-difuso en este contexto conlleva el potencial de generar beneficios de índole social que son significativos y altamente relevantes. En primer lugar, esta iniciativa busca asegurar que el acceso al agua sea equitativo para todos, lo que promueve la justicia social al garantizar que todas las personas tengan igualdad de oportunidades para beneficiarse de este recurso esencial. Una gestión más eficaz y confiable del agua impacta directamente en la calidad de vida de las personas en la región. Esto se traduce en la disponibilidad de agua para usos cotidianos como el consumo doméstico, la agricultura y otros usos fundamentales que satisfacen necesidades básicas. La optimización de la distribución de agua beneficia la producción agrícola, lo que a su vez influye en la seguridad alimentaria de la comunidad. Una agricultura más productiva puede asegurar un suministro constante de alimentos, lo que es esencial para el bienestar social. La mejora en la producción de alimentos puede contribuir a la generación de empleo en la región, lo que tiene un impacto directo en la prosperidad económica y social de las personas. Además, una gestión eficaz de los recursos hídricos puede incrementar la resiliencia de las comunidades ante eventos climáticos extremos, como sequías e inundaciones. Esto protege a la población local de posibles desastres y minimiza el impacto social adverso. La implementación de un modelo de control también puede involucrar a la comunidad en la toma de decisiones y en la gestión de los recursos hídricos, fomentando la participación ciudadana y la responsabilidad social, lo que es crucial para una gestión eficaz y transparente, y su importancia radica debido a su potencial para mejorar el acceso al agua, la calidad de vida, la seguridad alimentaria, el empleo y la resiliencia de la comunidad local. Además, promueve la participación ciudadana y la responsabilidad social en la gestión de recursos hídricos, lo que es fundamental para un desarrollo social y comunitario sostenible. A nivel práctico la presente investigación dará solución al problema relacionado a la mala distribución del recurso hídrico, utilizando para ello las herramientas de la ingeniería civil para realizar las mediciones de caudal que demanda la zona geográfica donde se lleva a cabo la investigación, asimismo se utilizará la ciencia matemática para controlar las dotaciones del recurso hídrico para lo cual se utilizará un modelo neuro difuso y así poder cumplir con los mantenimientos de operación programados que contribuyan a aumentar la eficiencia de la distribución y control del caudal de la unidad hidráulica, con ello se beneficiará la dotación de agua para el sector agrícola y para la potabilización del recurso hídrico.

II. MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES

El fundamento teórico del modelo de control neuro-difuso en la distribución de agua en el canal de riego IRCHIM 2020, se convierte en la brújula que guía la comprensión y aplicación de teorías y conceptos relacionados con la gestión del agua, la operación de redes de distribución, la tecnología de control, la sostenibilidad, la hidrología, las redes neuronales, la ingeniería hidráulica y las regulaciones legales. Cada uno de estos componentes teóricos se integra con el propósito de lograr una comprensión profunda y coherente de la gestión de recursos hídricos en un contexto específico, con un enfoque en lograr un equilibrio integral entre los aspectos sociales, económicos y ambientales en la búsqueda de un futuro sostenible en la administración del agua.

La gestión de recursos hídricos, se enfoca en ir desde la parte de las teorías y prácticas relacionadas con la gestión de recursos hídricos, que incluyen conceptos de asignación eficiente de agua, conservación de recursos y acceso equitativo (Astuti et al., 2022). Los sistemas de recursos hídricos tienen límites definidos y se ajustan a la definición de sistema como una disposición de partes o elementos que, juntos, exhiben un comportamiento o significado que los constituyentes individuales no tienen por separado. Estos sistemas pueden ser definidos en escalas que van desde pequeñas hasta grandes, y atraviesan diversas etapas de su ciclo de vida, desde la etapa inicial de reconocimiento hasta la resolución de conflictos durante las operaciones. Aunque los problemas hídricos de alto perfil, como los relacionados con grandes ríos y problemas ecológicos graves, atraen la atención global, es probable que los sistemas de menor escala sean candidatos más adecuados para la aplicación de métodos sistémicos (Grigg, 2023).

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.

2.2. MARCO CONCEPTUAL

Las redes de distribución de agua: Se exploran las teorías relacionadas con la operación de redes de distribución de agua, incluyendo la optimización de la presión, el caudal y la minimización de pérdidas. Las redes de distribución de agua son complejos sistemas de infraestructura diseñados con el propósito fundamental de llevar agua potable desde sus fuentes de suministro, que pueden ser plantas de tratamiento o pozos, hasta los usuarios finales, ya sean hogares, empresas o instituciones. Estas redes se componen de una intrincada red de tuberías, válvulas, bombas y otros componentes necesarios para asegurar un suministro eficiente y seguro de agua potable en áreas urbanas y rurales. Estos sistemas de distribución son responsables de proveer agua que cumple con estrictos estándares de calidad y potabilidad, asegurando que sea segura para el consumo humano. Entre sus elementos más notables se encuentran las tuberías de diferentes tamaños y materiales, válvulas para regular el flujo de agua, bombas para mantener una presión adecuada, tanques de almacenamiento y medidores para registrar el consumo.

El diseño y la planificación de estas redes son cruciales para su funcionamiento eficiente. Esto implica considerar factores como la demanda de agua, las características topográficas del área de servicio, la capacidad de las tuberías y la ubicación estratégica de los puntos de suministro. El mantenimiento regular es esencial para prevenir fugas y asegurar un suministro confiable. Las reparaciones se llevan a cabo tan pronto como se detectan problemas en las tuberías, válvulas o equipos de bombeo. Las pérdidas de agua, ya sean debidas a fugas en las tuberías o a otros factores, pueden representar un desafío importante en las redes de distribución. La gestión de estas pérdidas y la detección temprana de fugas son aspectos críticos para mantener la eficiencia del sistema. La presión del agua es otro aspecto crucial para asegurar que el agua llegue a todos los usuarios, incluso en áreas con variaciones de elevación. Las bombas y las válvulas de control son esenciales para mantener la presión adecuada en toda la red. En la era moderna, muchas redes de distribución incorporan sistemas de automatización y telemetría que permiten el monitoreo en tiempo real y el control remoto de la red. Esto ayuda a optimizar la operación y a responder rápidamente a problemas. Finalmente, además de la cantidad de agua, la calidad es un elemento vital en la distribución. Se realizan pruebas y análisis periódicos para garantizar que el agua cumple con los estándares de potabilidad y salud

Respecto a la tecnología de Control: Se examinan teorías y enfoques relacionados con la tecnología de control, incluyendo redes neuronales y lógica difusa. Esto abarca la teoría detrás de estos métodos y su aplicación en la gestión de sistemas. La tecnología de control es un campo esencial en el que se emplean herramientas y métodos para supervisar y regular sistemas y procesos. Su objetivo central es mantener o ajustar el funcionamiento de estos sistemas de acuerdo con criterios y especificaciones predefinidas. Esta tecnología encuentra aplicaciones en campos tan diversos como la ingeniería, la automatización industrial y la electrónica. En el núcleo de la tecnología de control se encuentran componentes clave, como los sensores, que recopilan datos sobre las variables del sistema, y los actuadores, que ejecutan acciones basadas en la información proporcionada por los sensores. Los controladores son responsables de procesar estos datos y tomar decisiones para mantener el sistema en un estado deseado. La retroalimentación es un concepto fundamental en esta disciplina, ya que implica utilizar la información en tiempo real sobre el estado del sistema para tomar decisiones de control. En aplicaciones críticas, como el control de vuelo o la robótica, el sistema se ajusta continuamente en respuesta a la retroalimentación.

La simulación y el modelado son herramientas esenciales en el diseño de sistemas de control, permitiendo comprender cómo se comportará el sistema en diversas condiciones y cómo responderá a las acciones de control, así la tecnología de control se está volviendo cada vez más digital, utilizando sistemas basados en algoritmos de software y microcontroladores para realizar operaciones de control, es por ello que la tecnología de control desempeña un papel vital en una amplia gama de aplicaciones, mejorando la eficiencia y la seguridad de sistemas y procesos complejos en campos tan variados como la industria, la electrónica, la ingeniería y la robótica.

Sostenibilidad y desarrollo Sostenible: Se incorpora la teoría de la sostenibilidad y el desarrollo sostenible, destacando la importancia de equilibrar aspectos económicos, sociales y ambientales en la gestión de recursos hídricos. La sostenibilidad cobra relevancia al garantizar que la distribución de agua en el canal de riego se lleve a cabo de manera eficiente y responsable, asegurando que las necesidades de la agricultura y otras partes interesadas se satisfagan sin agotar los recursos hídricos disponibles. La gestión adecuada de la cantidad y calidad del agua es esencial para mantener la producción agrícola a lo largo del tiempo y no comprometer la disponibilidad de agua para las generaciones futuras.

Por otro lado, el desarrollo sostenible entra en juego al buscar un equilibrio entre el uso de recursos hídricos, el desarrollo agrícola y la preservación del ecosistema circundante. Asegurarse de que el control hidráulico sea sostenible implica considerar no solo los aspectos económicos y de producción agrícola, sino también los impactos ambientales y la equidad social en la distribución del agua. En este contexto, la tecnología de control que tu tesis investiga, el "modelo neuro-difuso", tiene un papel crítico al permitir una gestión precisa y eficiente de los recursos hídricos. Al optimizar el uso del agua en el canal de riego, contribuye a la sostenibilidad al reducir el desperdicio y garantizar que el agua se destine de manera efectiva a las áreas necesarias. El modelo neuro-difuso también puede ser un instrumento valioso en la toma de decisiones basadas en datos, considerando tanto la cantidad de agua necesaria como los efectos a largo plazo en el entorno. Esto se alinea con los principios del desarrollo sostenible, que buscan asegurar que el progreso actual no ponga en peligro las futuras generaciones.

Respecto a la hidrología y ciencias ambientales: Se utiliza la teoría de la hidrología y las ciencias ambientales para comprender cómo los cambios en el flujo de agua y la calidad del agua afectan a los ecosistemas acuáticos y a la disponibilidad de recursos hídricos. En el

ámbito de la hidrología, encontramos un pilar fundamental en la distribución de agua. Esta disciplina se dedica al estudio detallado de los recursos hídricos, abarcando aspectos como la distribución, el flujo y la disponibilidad del agua, es así que la hidrología se convierte en un componente clave para comprender cómo el agua fluye y se reparte en el canal de riego. La medición de variables hidrológicas, como el caudal del agua, el nivel y la calidad del agua, se torna esencial para la implementación de tu modelo de control y para evaluar su influencia en la distribución del recurso hídrico. Además, la hidrología también se relaciona con la gestión de los recursos hídricos y la planificación de sistemas de riego, lo que guarda relevancia en tu investigación al considerar cómo se logra una distribución eficiente del agua en el canal.

Por otro lado, las ciencias ambientales desempeñan un papel crucial en tu tesis, dado que se dedican a evaluar y comprender los efectos ambientales de las actividades humanas, como la gestión del agua en canales de riego, contribuyen a evaluar cómo el control hidráulico y la distribución de agua en el canal afectan el entorno circundante, incluyendo la calidad del agua, la flora y la fauna de la región. También tienen relevancia en el contexto de la sostenibilidad y el desarrollo sostenible, ya que abordan la necesidad de equilibrar el desarrollo económico con la preservación del medio ambiente. Es así que tanto la hidrología como las ciencias ambientales aportan una perspectiva integral a tu tesis, al proporcionar la base para comprender la dinámica del agua en el canal de riego y evaluar sus efectos en el entorno. Estas disciplinas respaldan y complementan tu investigación al abordar de manera efectiva los desafíos relacionados con el control hidráulico y la distribución de agua, con un enfoque en la sostenibilidad y el cuidado del entorno natural en la región del canal IRCHIM.

Respecto a las redes neuronales y lógica difusa: Se profundiza en la teoría de las redes neuronales y la lógica difusa, incluyendo cómo estas metodologías se aplican en la modelización y control de sistemas hidráulicos. Las redes neuronales, inspiradas en el funcionamiento del cerebro humano, representan una pieza central de tu modelo neuro-difuso. Estas estructuras son utilizadas para analizar y procesar datos, como los relacionados con la hidrología y el control en el canal de riego. Su capacidad para aprender y reconocer patrones a partir de datos es de gran valor en tu tesis. Las redes neuronales permiten modelar relaciones complejas entre variables, lo que es esencial en la gestión y control del flujo de agua en el canal. Además, tienen la habilidad de adaptarse y aprender de la retroalimentación, lo que las convierte en un instrumento ideal para la toma de decisiones en tiempo real y la optimización de la distribución de agua.

Por otro lado, la lógica difusa es un componente esencial en tu modelo neuro-difuso. Esta rama de la inteligencia artificial es utilizada para abordar la incertidumbre y la imprecisión en los datos y en la toma de decisiones, es así que la lógica difusa desempeña un papel crucial al lidiar con la naturaleza variable e incierta de las condiciones hidráulicas en el canal de riego. Esta lógica ayuda a traducir la información en reglas lógicas que guían el control hidráulico de manera efectiva. La lógica difusa se revela especialmente valiosa en situaciones donde las decisiones deben basarse en términos "difusos" como "alto" o "bajo", en lugar de valores binarios, por ello las redes neuronales y la lógica difusa son herramientas fundamentales en tu tesis, ya que permiten la modelación de relaciones complejas, el aprendizaje a partir de datos y la gestión de incertidumbres en el control hidráulico de los canales de riego. Estas tecnologías juegan un papel esencial en la mejora de la eficiencia y la sostenibilidad en la distribución de agua, lo cual está alineado con los objetivos de tu investigación.

Respecto a la ingeniería hidráulica: Se analizan las teorías de la ingeniería hidráulica, que se centran en la optimización de sistemas de distribución de agua y la gestión eficiente de recursos hídricos. La ingeniería hidráulica es una disciplina central, ya que se enfoca en el estudio y diseño de sistemas relacionados con el flujo, la distribución y la gestión del agua, esta rama de la ingeniería desempeña un papel fundamental para comprender cómo se maneja y controla el agua en los canales de riego, algunos aspectos clave vinculados a la ingeniería hidráulica contribuye al diseño de estructuras esenciales, como canales, presas, compuertas y tuberías, que son cruciales para la gestión del agua en el canal de riego. Esta disciplina se ocupa de cómo se regula y controla el flujo de agua, lo cual está directamente relacionado con tu investigación sobre el control hidráulico.

Por otro lado, la ingeniería hidráulica se enfoca en la optimización de la distribución del agua, la cual aborda la gestión sostenible de los recursos hídricos, lo cual se alinea con la preocupación por la sostenibilidad en la distribución de agua y suele apoyarse en la hidrología y en modelos matemáticos para comprender cómo se comporta el agua en sistemas como el canal de riego es así que, la ingeniería hidráulica es un componente esencial en tu tesis, ya que proporciona el marco teórico y práctico para comprender cómo se gestiona y controla el agua en el canal de riego. Esta disciplina juega un papel crucial en la optimización de la distribución de agua y en la búsqueda de soluciones eficientes y

sostenibles en la gestión de recursos hídricos en la zona de impacto para el control de los canales principales de riego.

Legislación y normativas: Se consideran las teorías y regulaciones en torno a la gestión del agua, incluyendo leyes y normativas relacionadas con la conservación de recursos hídricos y la calidad del agua, esto es fundamental pues destaca por la importancia de la legislación y las normativas. Las leyes y regulaciones desempeñan un papel central en cualquier proyecto relacionado con la gestión de recursos hídricos y la infraestructura, como un canal de riego. Estas normativas son fundamentales por varias razones. El cumplimiento normativo es esencial para garantizar que la distribución de agua y el control hidráulico en el canal de riego se lleven a cabo de manera adecuada, abarcando aspectos como los derechos de agua, las restricciones medioambientales y las políticas de uso sostenible. El impacto ambiental es una preocupación relevante en proyectos que involucran la gestión del agua. El control hidráulico puede influir en el entorno y cómo se deben cumplir las normativas para proteger los recursos naturales y el medio ambiente.

Asimismo, la legislación influye en la planificación y el diseño de proyectos de infraestructura hídrica, estableciendo requisitos específicos que deben ser seguidos en la construcción y operación del canal de riego. También se preocupa por la seguridad de la infraestructura y la calidad del agua, lo cual es fundamental para asegurar que el agua distribuida sea segura para el consumo y cumpla con los estándares de calidad. En muchos lugares, los derechos de agua están regulados por leyes específicas, y eso está determinado por los administradores del recurso hídrico, y de acuerdo a ello cómo se asignan y gestionan estos derechos en el contexto de un canal de riego, con ello la legislación y las normativas son elementos clave para la distribución y dotación efectiva del agua, ya que influyen en la gestión, diseño y operación del canal de riego, así como en la sostenibilidad y en asegurar que se cumplan los estándares de calidad y seguridad requeridos. Estas regulaciones son cruciales para garantizar que el control hidráulico se realice de manera responsable y de acuerdo con los requisitos legales y medioambientales establecidos.

La creación de un sistema de control eficaz demanda la formulación de un modelo matemático que logre describir de manera precisa el comportamiento dinámico del proceso bajo control. En términos de su dinámica, los canales de riego primarios se caracterizan por exhibir propiedades no lineales, presentar notables retrasos temporales, tener parámetros dinámicos que varían con el tiempo y están sujetos a influencias medioambientales, así como manifestar interacciones significativas entre estas diversas variables. Estas características se

traducen en una dinámica del proceso compleja, que debe ser abordada y comprendida de manera integral para el diseño de un sistema de control efectivo.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1.1. Tipo y diseño de investigación

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:



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)

3.1.2. Variables y operacionalización

La variable independiente fue el control hidráulico: La cual se define como la gestión eficiente del uso del recurso hídrico utilizando el control automático a través de la lógica neuro – difusa, para el manejo de los canales de riego logrando mejorar la eficiencia.

La variable dependiente fue la distribución de agua: La cual se define como la eficiente distribución de caudal de agua en los canales principales de riego, para satisfacer las demandas de los volúmenes extraídos desde la fuente de abasto hacia los canales secundarios.

Cuadro 1: Operacionalización de las variables

Variable	Definición conceptual	Definición operacional	Indicadores	Escala de medición
Independiente (X) Control Hidráulico	Se define como la gestión eficiente del uso del recurso hídrico utilizando el control automático a través de la lógica neuro – difusa, para el manejo de los canales de riego logrando mejorar la eficiencia.	Este control hidráulico se realizará a través de un modelo neuro difuso, tomado para ello puntos estratégicos del canal principal	Caudal= Volumen /Tiempo	Razón
Dependiente (Y) Distribución de Agua	Se define como la eficiente distribución de caudal de agua en los canales principales de riego, para satisfacer las demandas de los volúmenes extraídos desde la fuente de abasto hacia los canales secundarios.	La distribución de agua en los canales se va a medir a través de caudalímetros y la dotación asignada a cada canal secundario	Área de riego = Volumen/ m ²	Razón

FUENTE: Elaboración propia, basado en la metodología del proyecto

3.1.3. Población, muestra y muestreo

Población:

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.

Criterios de exclusión

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.

3.1.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos, validez y confiabilidad

Técnicas:

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.

Instrumentos:

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 compresión 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.

Validez:

En relación a la validez, de acuerdo a las afirmaciones de Hernández et al. (2014), es fundamental que los instrumentos utilizados en la investigación sean sometidos a un proceso de validación. La validez se refiere, de manera más precisa, a la capacidad de medir el grado de relación y representación del instrumento en el análisis de una variable particular que ha sido objeto de estudio. En otras palabras, la validez se centra en determinar si el instrumento utilizado realmente evalúa con precisión la variable que se está investigando y si proporciona una representación fiel de la misma.

En el proceso del estudio no fue necesario realizar el proceso de validación, puesto que al ser datos que arrojan el correctometro, las anotaciones realizadas en la ficha de observación fueron datos certificados que no requirieron ser validados por el juicio de expertos.

Confiabilidad:

Respecto a la confiabilidad Hernández et al. (2014) afirmaron que todo instrumento aplicado para la recolección de datos de una investigación debe tener repetitividad en el tiempo, del objeto o sujeto estudiado, esta repetitividad lo mide la confiabilidad del instrumento.

En el estudio al utilizar una ficha de observación, donde se anotaron los datos recogidos del correctometro, no fue necesario desarrollar el proceso de confiabilidad, debido a que se desarrolla cuando el instrumento presenta opciones dicotómicas o politómicas y en el caso del estudio no presenta las características mencionadas.

3.1.5. Procedimiento

El procedimiento que se llevó a cabo en el presente trabajo de investigación, inició con el diagnóstico situacional del canal de riego IRCHIM, en donde se analizó la dotación de agua y su respectiva distribución además de los principales métodos de control en dicho sistema hidráulico, se cuantificó los datos recolectados y se identificó el nivel de distribución y las principales causas que intervienen en el control, como son los parámetros de operación del canal de riego IRCHIM en los sectores hidráulicos pertenecientes al canal de riego, luego se diseñó un modelo neuro-difuso incluyendo todos los parámetros que intervienen en dicha variable que realice un correcto control del caudal de agua en cada toma de distribución que se realiza, también se implementó el modelo neuro – difuso para el control hidráulico en el canal de riego IRCHIM y finalmente se realizó la evaluación de la influencia del modelo neuro – difuso para el control hidráulico en la distribución de agua del canal de riego IRCHIM.

La utilización de un modelo matemático de tipo "entrada-salida" SISO (Single Input Single Output) en este contexto implica la consideración exclusiva de los valores de las variables manipuladas y controladas, sin tomar en cuenta las interacciones y dinámicas internas del sistema. Si se parte del supuesto de que el modelo de una sección de un canal principal de riego puede ser simplificado al considerarse un sistema causal, lineal e invariante en el tiempo, dicho modelo puede ser representado mediante una función de transferencia. La obtención de un modelo matemático simplificado se logra a través de la medición de la variable de proceso en un punto específico, sin requerir un conocimiento detallado de su

comportamiento dinámico a lo largo de toda la sección del canal. Por consiguiente, el modelo matemático obtenido está referido al punto de medición de la variable dinámica analizada. Además, el modelo matemático debe incorporar un término de retardo de tiempo, ya que este elemento es esencial para una adecuada caracterización del comportamiento dinámico del sistema.

La identificación de sistemas se refiere al proceso experimental de obtener un modelo matemático que pueda reproducir, con suficiente precisión para los propósitos deseados, las características dinámicas del sistema bajo estudio. Esto se logra utilizando las variables observadas (medidas) del proceso, que incluyen la señal de salida o variable controlada ($y(t)$), la señal de entrada o variable de control ($u(t)$), y en algunos casos, las perturbaciones ($v(t)$). Los modelos generados mediante estas técnicas se denominan "caja negra" debido a que no necesariamente describen el funcionamiento interno del sistema, sino que se enfocan en su comportamiento observable.

En la Figura 1 se presenta una representación esquemática del proceso de identificación de sistemas.

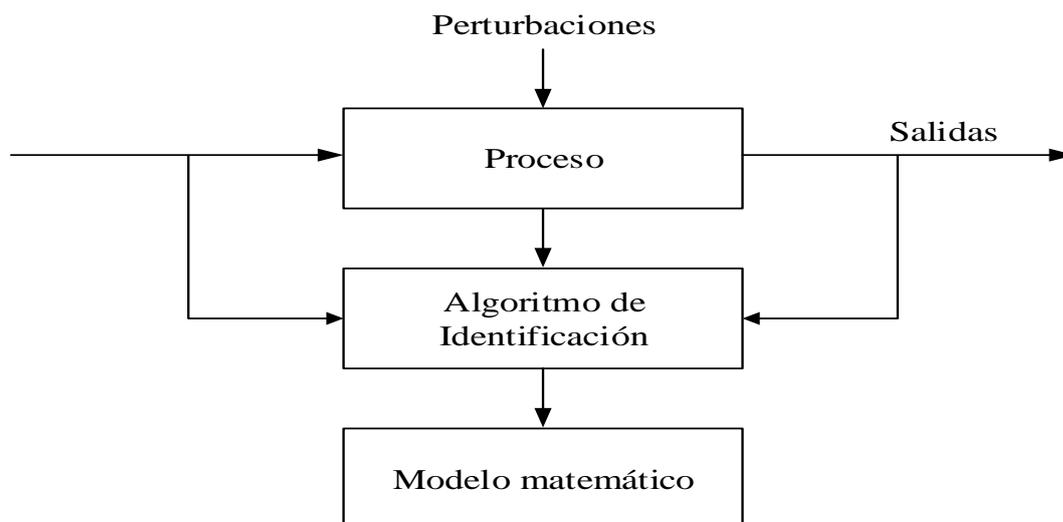


Figura 1: Esquema general de identificación

En el contexto de la planificación experimental y la identificación no paramétrica, el primer paso es llevar a cabo un experimento sobre el sistema en cuestión. Este experimento tiene como objetivo principal obtener datos de entrada y salida que servirán como base para la posterior obtención del modelo matemático final. Para que el proceso de identificación sea efectivo, es esencial que los datos utilizados contengan información sustancial acerca del comportamiento dinámico del sistema. Esto implica la necesidad de diseñar cuidadosamente

el experimento de adquisición de datos. La premisa fundamental del experimento radica en la obtención de datos informativos de entrada-salida después de haber excitado el tramo del canal con una señal de entrada específica, lo que resulta en una variación significativa en el nivel del agua. La calidad y la relevancia de los datos recopilados en esta etapa son esenciales para el éxito del proceso de identificación, ya que servirán como base para la construcción del modelo matemático final que refleje con precisión el comportamiento dinámico del sistema.

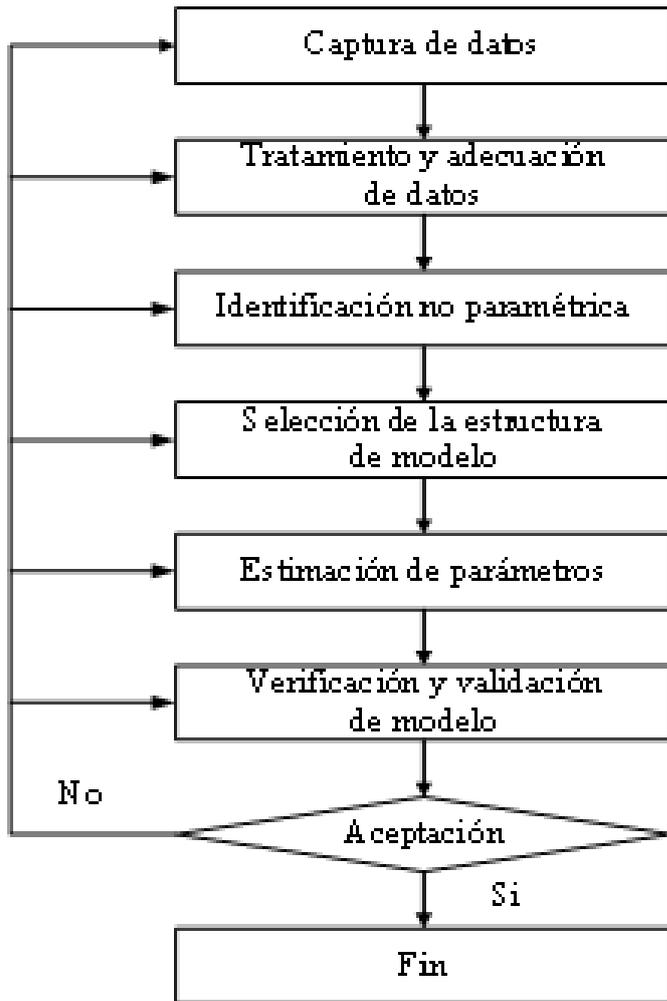


Figura 2: Proceso de identificación paramétrica

Los datos empleados en esta investigación corresponden al tramo 1, que es el punto de inicio del canal principal de riego IRCHIM. Este tramo se caracteriza por su infraestructura hidráulica compleja. En términos de especificaciones técnicas, el tramo abarca una longitud de 12 kilómetros, con una profundidad variable que oscila entre 3.1 metros y 3.6 metros, y un ancho también variable, llegando a alcanzar hasta 7.5 metros en diferentes secciones.

Además, tiene la capacidad de transportar un caudal máximo de 30 metros cúbicos por segundo. Para asegurar el suministro adecuado de agua a los diversos usuarios, se utiliza un sistema de compuertas aguas arriba ubicado en la Casa de Compuertas. La apertura de estas compuertas y sus niveles respectivos están directamente vinculados al caudal que se necesita entregar, el cual proviene del río Santa.

En este contexto, se logra representar las diez compuertas de control mediante una única compuerta equivalente, lo que simplifica la gestión. La bocatoma, el punto de entrada de agua al canal, opera mediante el método de regulación aguas abajo alejado y se controla a través de un sensor de nivel situado en el extremo del tramo de canal. La Figura 3 ilustra un diagrama equivalente de la bocatoma, en el cual se representa la consolidación de las diez compuertas de control (ubicadas en la Casa de Compuertas) como una sola compuerta equivalente.

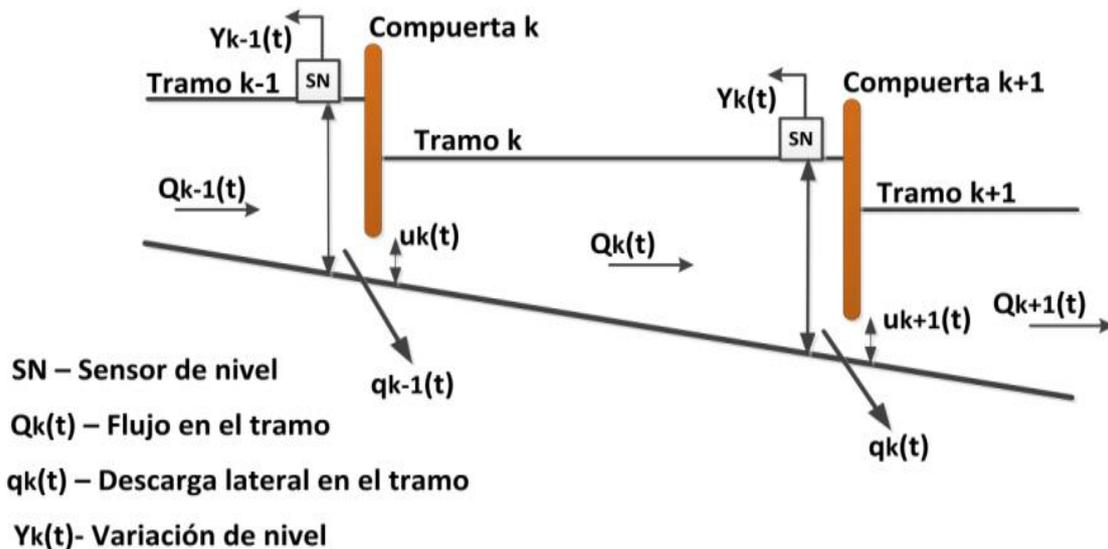


Figura 3: Diagrama equivalente de la bocatoma

Dado que en el canal principal de riego "IRCHIM", la variable controlada se refiere al nivel del agua aguas abajo ($y_k(t)$), y la variable de control corresponde a la posición de las compuertas aguas arriba ($u_k(t)$), donde "k" denota el número de tramo ($k=1, 2, \dots, n$, siendo "n" el número total de tramos), el modelo matemático a desarrollar para el primer tramo, conocido como Bocatoma, presentará el nivel del agua aguas abajo en dicho tramo ($y_1(t)$) como señal de salida, y la magnitud total de apertura de las compuertas aguas arriba ($u_1(t)$) como señal de entrada.

Las descargas laterales ($q_1(t)$), junto con los efectos derivados de las interacciones entre los tramos adyacentes aguas arriba (conexión al río Santa) y aguas abajo, representan las perturbaciones fundamentales ($v_1(t)$) que influyen en el comportamiento del tramo del canal. En el gráfico 4 se presenta un diagrama técnico que ilustra la configuración experimental utilizada para la recolección de datos relacionados con las variaciones del nivel de agua aguas abajo en la porción final del tramo del canal de riego.

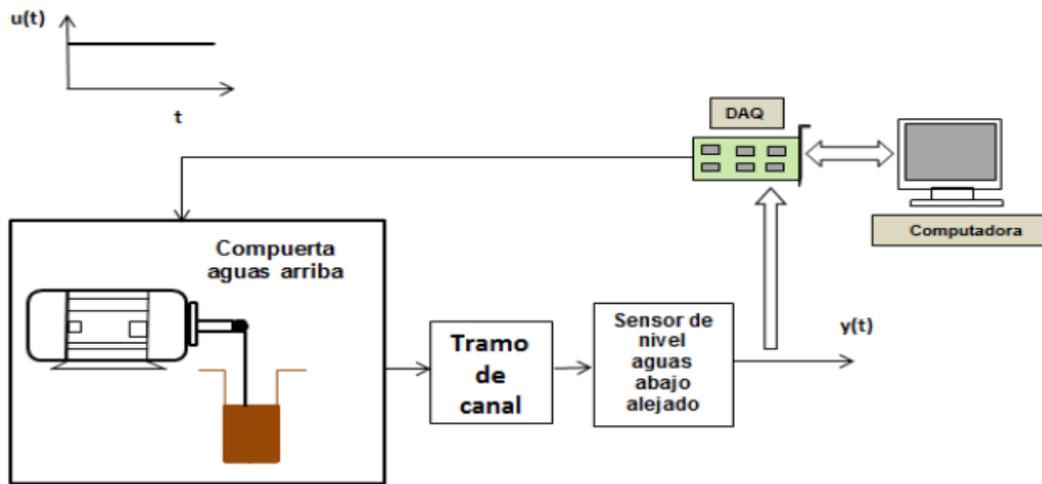


Figura 4: Diagrama tecnológico de la instalación experimental utilizada en la recolección de datos.

El muestreo de las magnitudes pertinentes, que incluyen el nivel del agua en la parte aguas arriba y aguas abajo al final del tramo, así como la apertura total de las compuertas aguas arriba, se llevó a cabo de manera uniforme con un intervalo de muestreo constante de 15 segundos.

3.1.6. Método de análisis de datos

Los datos obtenidos relacionados con las variables centrales de la investigación, específicamente el modelo neuro-difuso, se procesaron utilizando MATLAB. En lo que concierne a la distribución de agua en el canal de riego IRCHIM. En este análisis, se abordaron dos vertientes: la estadística descriptiva, que se empleó para una descripción minuciosa de las dos variables de estudio, y la estadística inferencial, que se utilizó para examinar la relación entre el modelo de control neuro-difuso y la distribución de agua en el canal IRCHIM. Para cumplir con el rigor del método científico, se llevó a cabo una prueba de hipótesis, un procedimiento que, implica la formulación de hipótesis de investigación que deben ser evaluadas mediante técnicas estadísticas, se aplicaron al conjunto de datos con el objetivo de abordar la problemática de investigación. Esto se realizó en base a las

predicciones establecidas en la enunciación de las hipótesis de investigación, y puede involucrar pruebas que abordan la totalidad del problema en cuestión. El proceso consistió en una serie de pasos secuenciales, comenzando con la formulación o enunciado de las hipótesis de investigación, seguido de la definición del nivel de significancia para el estudio.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. RESULTADOS

4.1.1. 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

```
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 ambas 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 ambas 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.

El aporte de abastecimiento del caudal del río se da a través de los deshielos de los nevados de la Cordillera Blanca que son fuente de agua importante en el ámbito de la cuenca. El relieve general del río muestra un descenso sostenido y rápido del nivel de cumbres, presentando en su parte superior un sin número de lagunas y la fuente de agua para uso agrícola en todo el valle es el río Santa, siendo el caudal máximo registrado 1100 m³/s (marzo-98), pero en épocas de avenidas normales el caudal varía de 500 a 800 m³/s; las descargas desde 1956 al 2014 han sido proporcionadas por P.E. CHINECAS y se presenta seguidamente:

		CUADRO N°04.-DESCARGAS MEDIAS MENSUALES EN m³/s. DEL RIO SANTA													
RIO	:	SANTA											UTM-WGS 84 - Z-17L		
ESTACION	:	CONDORCERRO											ESTE 801,808.0		
AREA	:	11,956.5 Km ² .											NORTE 9,042,315.0		
													ALTITUD : 470 msnm		
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	MEDIA ANUAL	ACUMULADO	
1956	166.12	216.11	356.27	366.02	105.68	64.39	45.17	45.89	46.05	71.51	66.87	74.62	135.39	135.39	
1957	116.70	139.54	295.32	538.80	135.05	95.92	59.84	53.48	62.97	86.95	66.90	119.73	147.60	282.92	
1958	136.98	195.25	289.98	239.88	80.68	58.29	47.86	48.42	76.01	95.97	108.91	124.39	125.22	408.21	
1959	132.20	137.19	336.41	252.82	83.56	61.95	48.56	50.61	50.68	91.60	95.14	191.83	127.71	535.92	
1960	194.27	243.15	318.96	314.97	117.80	68.13	49.56	48.96	48.34	61.19	97.18	102.39	138.74	674.66	
1961	233.18	197.44	390.16	313.06	114.72	82.06	42.04	39.97	55.80	61.09	166.90	288.00	165.37	840.03	
1962	253.58	241.34	515.44	370.23	106.29	72.56	56.26	53.90	67.71	59.68	81.40	87.40	163.82	1,003.84	
1963	153.96	291.65	471.65	290.62	100.77	53.49	42.30	42.02	48.79	63.55	130.15	237.50	160.54	1,164.38	
1964	196.47	252.72	312.22	277.68	118.79	61.56	65.41	47.68	44.35	73.94	103.64	144.05	141.54	1,305.92	
1965	115.43	126.65	415.48	223.60	97.23	50.33	42.13	44.83	34.17	95.04	99.02	139.99	123.66	1,429.57	
1966	235.32	208.38	176.72	124.52	89.98	57.39	53.54	52.04	57.34	115.66	125.78	124.40	118.42	1,548.09	
1967	185.49	168.32	449.40	173.27	96.04	60.46	49.75	47.53	49.31	116.63	102.37	110.08	134.05	1,682.93	
1968	136.71	143.39	180.28	109.03	63.14	46.61	33.23	37.39	50.32	82.44	94.76	100.00	89.78	1,771.93	
1969	111.05	137.76	212.72	216.16	100.00	68.58	51.74	49.53	53.21	95.85	106.32	150.51	111.95	1,883.79	
1970	254.79	171.61	184.54	224.46	77.51	59.45	48.10	52.77	66.25	104.42	164.89	285.66	141.20	2,024.95	
1971	344.96	294.38	811.19	483.22	126.06	89.69	59.74	53.35	60.95	84.59	66.87	84.80	211.65	2,236.65	
1972	172.49	262.41	511.84	548.07	96.54	51.74	67.83	60.17	60.55	70.78	93.52	134.58	177.54	2,414.18	
1973	220.60	295.85	403.18	415.39	158.92	84.48	68.97	61.30	72.04	131.70	164.83	233.00	192.52	2,606.71	
1974	298.89	224.81	412.72	253.96	99.98	76.40	57.87	52.44	68.24	98.04	229.84	431.27	192.04	2,798.74	
1975	228.83	235.39	377.61	324.59	97.71	71.66	52.50	51.89	66.77	95.04	160.97	276.75	169.98	2,968.72	
1976	232.62	304.99	352.13	166.25	73.89	63.33	48.43	43.71	46.24	68.22	75.53	85.92	130.11	3,098.82	
1977	159.71	424.44	297.80	186.69	93.76	68.68	52.04	53.24	53.86	66.73	113.72	127.00	141.47	3,240.30	
1978	111.81	192.81	152.44	124.34	85.03	57.77	53.43	45.40	63.55	64.78	93.34	108.76	96.12	3,336.42	
1979	128.86	226.86	386.26	195.24	96.44	61.64	50.42	49.55	57.59	68.66	93.77	104.39	126.64	3,463.06	
1980	117.39	128.93	118.26	117.67	53.66	48.26	37.00	39.29	67.51	102.68	128.33	221.14	98.34	3,561.40	
1981	159.38	477.12	394.02	177.74	86.75	66.86	54.73	47.59	44.09	89.26	171.02	195.03	163.63	3,725.09	
1982	175.78	316.33	190.04	192.78	97.74	65.56	48.87	43.04	48.69	107.13	181.83	257.07	143.74	3,868.77	
1983	338.18	202.61	386.13	330.83	153.50	89.48	63.78	53.36	53.96	70.46	94.29	176.88	167.79	4,036.56	
1984	137.39	711.05	599.96	346.45	171.98	93.50	58.63	45.04	45.14	106.68	78.79	144.01	211.55	4,248.11	
1985	142.56	158.51	172.45	174.42	83.50	46.65	36.26	34.40	52.22	53.21	63.00	89.88	92.17	4,340.28	
1986	169.67	165.61	198.15	269.23	105.86	52.48	40.77	38.22	39.74	57.01	82.96	132.62	112.69	4,452.93	
1987	301.59	292.71	215.41	159.07	113.71	55.17	46.30	41.37	48.88	62.40	114.26	173.58	135.37	4,588.35	
1988	258.42	314.40	191.03	243.25	124.02	62.16	46.13	41.38	31.38	48.48	61.81	85.66	125.34	4,713.69	
1989	203.24	339.42	345.22	312.69	106.01	61.29	39.88	33.78	37.45	100.53	90.54	67.33	144.78	4,858.47	
1990	133.24	131.26	116.60	88.70	52.03	47.96	38.81	38.36	37.77	84.72	143.37	114.30	85.59	4,944.07	
1991	120.50	134.77	355.97	134.75	89.98	49.21	38.80	38.48	39.34	54.20	61.61	85.25	100.24	5,044.31	
1992	92.15	76.18	131.18	108.77	59.13	38.50	30.50	29.69	29.25	48.15	47.57	60.06	62.59	5,106.90	
1993	104.79	324.14	724.26	616.70	169.70	60.10	45.38	38.81	57.65	95.52	193.34	277.41	225.65	5,332.54	
1994	369.20	471.45	390.88	262.42	46.03	41.42	47.85	40.63	37.61	41.35	70.27	92.57	159.31	5,491.86	
1995	141.88	151.90	227.95	230.10	77.82	46.70	38.65	41.12	43.00	47.31	94.78	114.10	104.61	5,596.47	
1996	219.99	309.73	257.57	318.30	103.22	54.47	42.65	41.82	41.21	63.55	73.22	69.69	132.95	5,729.42	
1997	103.60	192.15	135.58	73.21	57.95	39.40	37.55	37.57	48.52	52.47	112.27	279.13	97.45	5,826.87	
1998	390.38	522.25	617.25	341.27	142.20	70.05	52.34	50.44	50.21	97.77	106.32	83.29	210.31	6,037.18	
1999	163.15	508.92	315.50	209.68	118.99	83.02	44.98	43.57	55.90	60.17	86.31	148.45	149.89	6,187.07	
2000	110.13	332.25	333.37	231.63	145.97	83.30	43.83	43.84	45.52	53.09	61.25	93.73	129.83	6,316.98	
2001	367.91	296.68	500.88	227.11	77.96	56.63	47.84	44.47	49.76	57.37	172.96	180.73	173.36	6,490.25	
2002	154.35	202.81	383.80	283.62	95.01	55.49	49.32	39.83	41.92	71.37	166.60	179.14	143.61	6,633.86	
2003	165.07	221.18	258.16	196.64	85.06	58.22	46.92	44.25	43.93	63.10	62.83	135.42	115.07	6,748.92	
2004	104.54	167.17	137.96	123.91	66.44	44.81	36.43	34.90	33.85	81.86	149.15	167.65	95.72	6,844.64	
2005	148.38	162.39	294.19	179.15	78.22	54.34	48.30	45.87	47.28	62.57	65.51	115.82	108.50	6,953.15	
2006	129.55	221.92	392.90	374.60	98.70	63.91	47.13	43.01	44.36	57.88	88.25	178.89	145.09	7,098.24	
2007	218.34	196.79	320.96	330.61	117.02	59.68	46.00	43.38	38.30	64.30	104.32	84.37	134.34	7,233.58	
2008	228.63	254.23	281.60	247.93	104.90	57.36	44.22	39.46	39.32	82.27	106.49	95.51	131.83	7,365.40	
2009	422.30	309.00	533.50	196.40	81.50	64.70	44.20	46.20	51.30	140.30	361.35	231.13	206.82	7,572.23	
2010	232.52	267.34	265.71	228.05	121.49	59.61	48.43	48.06	45.00	52.93	90.37	169.82	135.78	7,708.01	
2011	184.20	252.66	331.26	247.53	99.26	60.23	47.08	44.27	48.12	74.58	116.66	151.37	138.10	7,846.11	
2012	228.91	261.72	334.88	235.78	99.27	58.42	47.35	44.51	44.90	66.93	157.58	155.54	144.65	7,990.76	
2013	189.52	263.31	492.13	237.59	93.24	56.89	46.63	45.33	47.70	99.31	104.16	220.44	158.02	8,148.78	
2014	212.53	282.51	464.80	208.08	183.61	89.67	50.15	45.64	48.85	59.78	84.10	156.20	155.48	8,304.26	
Suma	11,456.38	14,953.84	20,020.24	14,989.54	5,977.00	3,622.06	2,829.41	2,657.05	2,949.52	4,544.75	6,630.09	9,030.23	7,708.01		
Media	194.18	253.46	339.33	254.06	101.31	81.39	47.96	45.04	49.84	77.03	112.37	153.06	140.75		
D.S.	79.04	113.65	146.63	111.77	29.42	12.53	8.07	6.30	10.36	22.07	51.47	72.65	40.72		
C.Var.	0.41	0.45	0.43	0.44	0.29	0.20	0.17	0.14	0.21	0.29	0.46	0.48	0.25		
Maximo	422.30	711.05	811.19	616.70	183.61	95.92	68.97	61.30	76.01	140.30	361.35	431.27	225.65		
Minimo	92.15	76.18	116.60	73.21	46.03	38.50	30.50	29.69	29.25	41.35	47.57	60.06	62.59		
N° Datos	59	59	59	59	59	59	59	59	59	59	59	59	59	59	

Figura 5: Descargas medias mensuales del río Santa

Respecto al relieve topográfico el río Santa tiene un recorrido aproximado de 316 km desde su nacimiento en el Nevado de Tuco (Laguna de Conococha), hasta su desembocadura en el Océano Pacífico. Fisiográficamente se le ha dividido en tres zonas: La zona alta: con una

pendiente 1.21%, desde su nacimiento en la Laguna de CONOCOCHA, hasta aguas abajo de Caraz, con una longitud de 165 km, la zona intermedia: esta zona tiene una longitud de 70km comprendida entre Caraz y Tablones, tiene una pendiente promedio de 2.7%, en esta zona se encuentra el Cañón del Pato y la zona baja: comprendida entre Tablones (450 m.s.n.m) y la desembocadura al mar, la cual tiene una longitud aproximada de 65 km. Este tramo se ha convertido en una zona de deposición de materiales que arrastra el río a lo largo de su curso formando islas o meandros de material, que en épocas de avenidas originan un cauce trezado con desplazamiento lateral del agua hacia ambos márgenes, y un cauce errático en épocas de bajo caudal, lo cual produce pérdidas de terrenos de cultivo y pone en peligro a los poblados rurales aledañas al cauce, teniendo que encauzar el río en épocas de estiaje hacia las tomas rústicas existentes para asegurar el abastecimiento de agua a los terrenos de cultivo y la población.

La topografía que se presenta al inicio y al final del canal se han dejado BMs (control vertical) al inicio se encuentra marcado el BM1 sobre muro cabecera de alcantarilla existente (cota:86.45 msnm.) y al final el BM2 sobre el muro del canal existente(cota:53.80msnm.). Ha sido necesario efectuar la limpieza del terreno (eliminación de ramas) para los trabajos topográficos debido a la vegetación arbustiva existente y en el control vertical se ha efectuado con el nivel topográfico o del ingeniero (marca Nikon) en tramos de cada 20 m habiendo estacado previamente el eje del canal, además de puntos importantes requeridos como son la ubicación de tomas parcelarias, estructuras de concreto existentes y desniveles significativos existentes de tramos donde se proyectaran obras de arte, y para el trazo de la poligonal abierta y del relleno taquimétrico de la faja de canal se ha utilizado el teodolito Nikon de precisión; tomando las deflexiones existentes en cada PI.

En cuanto a las características de los suelos en las zonas de riego, estos suelen consistir principalmente en limos arenosos y francos arenosos en la capa superficial del suelo, mientras que, a partir de una profundidad de aproximadamente 100 centímetros, predominan los suelos de grava arenosa sin presencia de bolones. En el valle de Chimbote, se encuentran los denominados suelos costeros "Yermo soles," que abarcan la franja costera, el valle irrigado, amplias llanuras sedimentarias, colinas y cerros bajos, así como terrazas marinas ubicadas a altitudes superiores a los 1000 metros sobre el nivel del mar. Además, se incluyen formaciones de laderas más bajas conocidas como lomas. En estas áreas, también se encuentran suelos denominados "Fluvisoles," que son de carácter sedimentario, con profundidades y texturas variables, topografía mayoritariamente plana y un buen sistema de

drenaje. Sin embargo, en las regiones más bajas, suelen surgir problemas relacionados con la salinidad y un drenaje deficiente. En general, estos suelos presentan una capa superficial poco profunda, de color oscuro y bajo contenido de materia orgánica, con un carácter alcalino, y se les conoce como "Verti soles."

Así mismo el análisis químico del suelo de acuerdo al ensayo de laboratorio realizado a una muestra de suelo extraído de la calicata C-01 km 0+612; Muestra M-01 de 0.00 a 2.80 m. se determinó:

Sales solubles totales	:	994 ppm	NORMA AASHTO T291
Sulfatos solubles	:	643 ppm	NORMA AASHTO T290
Cloruros solubles	:	237 ppm	NORMA USBR E-8
pH	:	7.0 ppm	NORMA ASTM D4972

La concentración de cloruros ni sulfatos no serán agresivo a las estructuras enterradas expuestas, pero si ligeramente a las estructuras de acero de estos resultados se recomienda el uso del Cemento Pórtlan Tipo I en el canal y obras de artes conexas.

Respecto a las condiciones geotécnicas el material del terreno donde se cimenta el canal y las obras de arte se encuentran sobre suelo limo arenoso y arenoso. La identificación del material se realizó directamente en campo mediante calicata (determinación del perfil estratigráfico, granulometría, límites de consistencia, etc.) y auscultaciones (determinación de la resistencia del suelo, ángulo de fricción interna, peso unitario y capacidad portante) realizada en el km 0+500 y en el km 0+612 hasta una profundidad de 0.85 m y 2.80 m respectivamente. por presencia de rocas tonalitas duras y resistentes en los estratos superiores se detectó arenas limosas (SM); de este estrato (SM) dos auscultaciones se determinaron los siguientes datos geotécnicos:

Peso unitario del material seco	:	1,620 kg/m ³
Capacidad portante del terreno	:	2.10 kg/cm ²
Angulo de fricción interna	:	31.9°

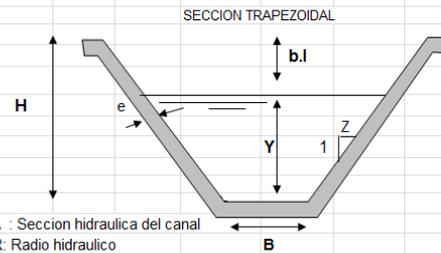
Así mismo los cultivos que son beneficiados en la zona que es netamente agrícola, siendo la agricultura su principal fuente de ingreso. Los cultivos predominantes en el ámbito del

el concreto armado $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$, la capacidad portante del terreno asumido es 2.10 kg/cm^2 , ángulo de fricción interna de 31.9° y peso unitario del material de $1,620 \text{ kg/m}^3$ y los recubrimientos mínimos del acero de refuerzo son: 7.5 cm cuando el concreto es colocado directamente sobre el suelo, 5 cm cuando el concreto está expuesto a la intemperie o en contacto con el agua y así las juntas de contracción irán distanciados cada 3.50 m y las juntas de dilatación cada 14.00 m . sellado con material elastomérico de poliuretano. Estas características hidráulicas que presenta el canal se presentan a continuación:

Kilometraje (km)	Longitud (m)	Q (m ³ /s)	n (-)	S (m/m)	b (m)	Z	Y (m)	A (m ²)	V (m/s)	Nº de Froude	H (m)
ESTRUCTURA DE DESNIVEL RÁPIDA DE 04 PENDIENTES											
0+000 - 0+510	510										
0+510 - 0+640	130	0.65	0.015	0.0099	1.00	0.50	0.26	0.300	2.17	1.42	0.40
0+640 - 0+840	200	0.65	0.015	0.0032	1.00	0.50	0.37	0.445	1.46	0.82	0.50
0+840 - 0+940	100	0.65	0.015	0.0020	1.00	0.50	0.43	0.527	1.23	0.65	0.60
0+940 - 1+000	60	0.65	0.015	0.0108	1.00	0.50	0.26	0.289	2.25	1.50	0.40
1+000 - 1+100	100	0.65	0.015	0.0573	1.00	0.50	0.16	0.167	3.89	3.26	0.40
1+100 - 1+280	180	0.65	0.015	0.0025	1.00	0.50	0.40	0.486	1.34	0.73	0.60
1+280 - 1+460	180	0.65	0.015	0.0029	0.75	0.50	0.46	0.452	1.44	0.75	0.60
1+460 - 1+510	50	0.65	0.015	0.0025	0.75	0.50	0.48	0.477	1.36	0.70	0.60
1+510 - 2+000	490	0.65	0.015	0.0017	0.75	0.50	0.54	0.548	1.19	0.58	0.70
2+000 - 2+600	600	0.65	0.015	0.0019	0.75	0.50	0.52	0.530	1.23	0.61	0.80

ECUACION DE MANNING

$$Q = \frac{A \cdot R^{2/3} S^{1/2}}{\eta}$$



A : Sección hidráulica del canal
R : Radio hidráulico
S : Pendiente del canal
n : coeficiente de rugosidad de manning

e = 0.075m
Y : tirante normal
bl : Borde libre (recomendable mínimo Y/3)

Figura 7: Características hidráulicas y geométricas del canal IRCHIM

Para el tramo estudiado (km 8+000-km 20+000) se ha considerado la construcción de 13 tomas (entre tomas laterales y parcelarias) de material concreto armado $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$ con espesores de muros de 15 cm . Se ha contemplado dos tipos de tomas:

Toma C/CCI, compuesto por una caja de sección rectangular abierta en el talud de la caja de canal, en su diseño se ha contemplado un conducto cerrado entubado de diámetro de $12''$ PVC SAL Pesada con sus muros de cabecera y salida respectivamente. La estructura cruza el camino carrozable de servicios ubicado en la margen del canal a remodelar. En total son 07 tomas de este tipo a construirse. Toma S/CC, compuesto por una caja de sección rectangular abierta en el talud de la caja de canal, una compuerta deslizante de regulación y la zona de protección. En total son 06 tomas a construirse, es así que a la salida de las tomas del canal en el empalme con el canal de tierra se ha contemplado colocar la una de

empedrado de protección, esta zona estará conformado por una capa de piedra acomodada de $\varnothing=0.20$ m sobre una cama de piedra zarandeada de $\varnothing=1/2''$ por 0.05 m de espesor asimismo rellenado en los intersticios entre piedras. El área a colocar es de 1.15 m de ancho x 1.00 m de longitud. Las compuertas metálicas a instalarse en las tomas serán las mismas que fueron desmontadas en las tomas demolidas; previo mantenimiento respectivo según especificación técnica. Estas estructuras de control contarán con compuertas tipo tarjeta y con izaje T/V de metal. En la figura adjunta se indican las características de las tomas consideradas en el proyecto:

Toma N°	Tipo Toma	Canal	Tipo de Salida	Progres. km	COTA 1 msnm	COTA 2 msnm	COTA 3 msnm	COTA 3-A msnm	COTA 4 msnm	COTA 5 msnm	B msnm	D m	h m	O pulg.
1	T.PARC. S/CC	COMP.23	I	0+815.30	57.700	57.40	57.40	-	58.20	-	0.30	0.000	0.50	-
2	T.LAT.C/CC	COMP.23	I	0+828.60	57.690	57.59	57.27	57.37	-	57.35	0.30	0.320	0.50	12.00
3	T.LAT.C/CC	COMP.23	II	1+175	46.890	46.87	46.47	46.57	-	46.55	0.30	0.400	0.60	12.00
4	T.LAT.C/CC	COMP.23	II	1+244	46.720	46.70	46.20	46.30	-	46.28	0.30	0.500	0.60	12.00
5	T.LAT.C/CC	COMP.23	II	1+255	46.690	46.67	46.17	46.27	-	46.25	0.30	0.500	0.60	12.00
6	T.LAT.C/CC	COMP.23	II	1+268	46.660	46.64	46.10	46.20	-	46.22	0.30	0.540	0.60	12.00
7	T.PARC. S/CC	COMP.23	II	1+475	44.330	44.45	43.85	-	44.93	-	0.30	0.600	0.60	12.00
8	T.PARC.C/CC	COMP.23	II	1+476	44.310	44.29	43.79	43.89	-	43.87	0.30	0.500	0.60	12.00
9	T.PARC.C/CC	COMP.23	II	1+500	44.250	44.23	43.73	43.83	-	43.81	0.30	0.500	0.60	12.00
10	T.PARC. S/CC	COMP.23	II	1+815	41.470	41.60	41.05	-	42.17	-	0.30	0.550	0.70	-
11	T.PARC. S/CC	COMP.23	II	2+060	41.040	41.17	40.52	-	41.84	-	0.30	0.650	0.80	-
12	T.PARC. S/CC	COMP.23	II	2+247	40.680	40.81	40.16	-	41.48	-	0.30	0.650	0.80	-
13	T.PARC. S/CC	COMP.23	II	2+400	40.390	40.52	39.87	-	41.19	-	0.30	0.650	0.80	-

Figura 8: Características de las tomas del canal

Para el control del desnivel del terreno y para disipar la energía de agua se ha contemplado la construcción de cinco (05) estructuras de desnivel denominadas caídas verticales. Se han diseñado para controlar la pendiente en el canal para su funcionamiento y mantener un régimen subcrítico en los tramos correspondientes de distribución. La estructura consta de una transición de entrada, una poza de disipación de energía de sección rectangular y una transición de salida para el empalme con el canal aguas arriba y aguas abajo. Se han proyectado caídas con alturas tipos, en total son 05 caídas de los cuales son de desnivel $H=1.40$ m y $H=0.75$ m, con longitudes total de poza de disipación (L_p) que es de 5.00 m sin incluir las transiciones de salida y entrada que empalman con el canal existente. La longitud de la poza es de 5.00 m. y las longitudes de las transiciones son de 2.00m. La estructura es de material concreto armado $f'c=210$ kg/cm² con espesor de muros y piso de 0.15 m, sin dados disipadores.

Para llevar a cabo la monitorización del canal de riego en este contexto, se ha empleado un sistema de medición hidrométrica que integra componentes esenciales. Este sistema se compone de un controlador lógico programable (PLC) con capacidad de comunicación en

red y/o GPRS (utilizando una red celular) que puede funcionar tanto con energía de batería como con alimentación directa de red eléctrica. Además, incluye un sensor piezométrico diseñado para medir la altura de la columna de agua en el canal principal del riego IRCHIM. En caso de que se presente una falta de suministro eléctrico convencional, este sistema se alimenta mediante energía limpia, como la energía solar. El PLC empleado se basa en la tecnología de Arduino, adaptado para aplicaciones profesionales y se programa utilizando MATLAB. Este PLC cuenta con un total de 17 entradas/salidas y múltiples puertos de comunicación que proporcionan un alto grado de flexibilidad y control. La familia M-DUINO, a la que pertenece, ofrece la posibilidad de expandirse con hasta 127 módulos mediante el protocolo I2C, lo que permite tener hasta 7,100 entradas/salidas en configuraciones Maestro-Esclavo, además de la capacidad para conectar sensores adicionales y otros dispositivos. Por otro lado, el sensor piezométrico tiene un rango de medición que abarca desde 0 hasta 10 metros, y opera con una fuente de alimentación de 12 a 24 voltios. Adicionalmente, dispone de comunicación a través del protocolo RS-485 MODBUS RTU y presenta un alto grado de protección, certificado con una clasificación IP68.

En términos de operación y mantenimiento, el sistema funciona utilizando un sensor de piezómetro que recibe el nivel de flujo en tiempo real registrado por el controlador lógico programable (PLC) enviando una señal a través de Internet (red inalámbrica móvil). Para hacer. Aplicador web para consultoría de información. El poder se suministra a través de un sistema de paneles solares. La arquitectura de la computadora permite una comunicación inalámbrica segura confiable que puede cambiar la frecuencia de enviar el monitoreo de sensores en tiempo real a la red de Internet (de forma predeterminada, la frecuencia del destinatario es de 1 minuto). Cuando se envía la información al host de alojamiento en Internet, se almacena desde una base de datos y un sistema de control de hardware y software si se almacena en una base de datos y hardware y software. El dispositivo IOT se complementa con MQTT del protocolo de comunicación M2M (MachineTomachine), ya que el equipo, el consumo y el ancho de banda son limitados.

Además, el proceso de recepción de información de la autoridad competente comienza con el PLC y se realiza señalizando la aplicación para obtener la información directamente en tiempo real a través de Internet (red móvil). También se espera que limite su uso. Porque la

información solo puede ser recibida por los servicios de red de Internet (celular). De lo contrario, puede solucionarlo utilizando el sistema de comunicación por satélite.

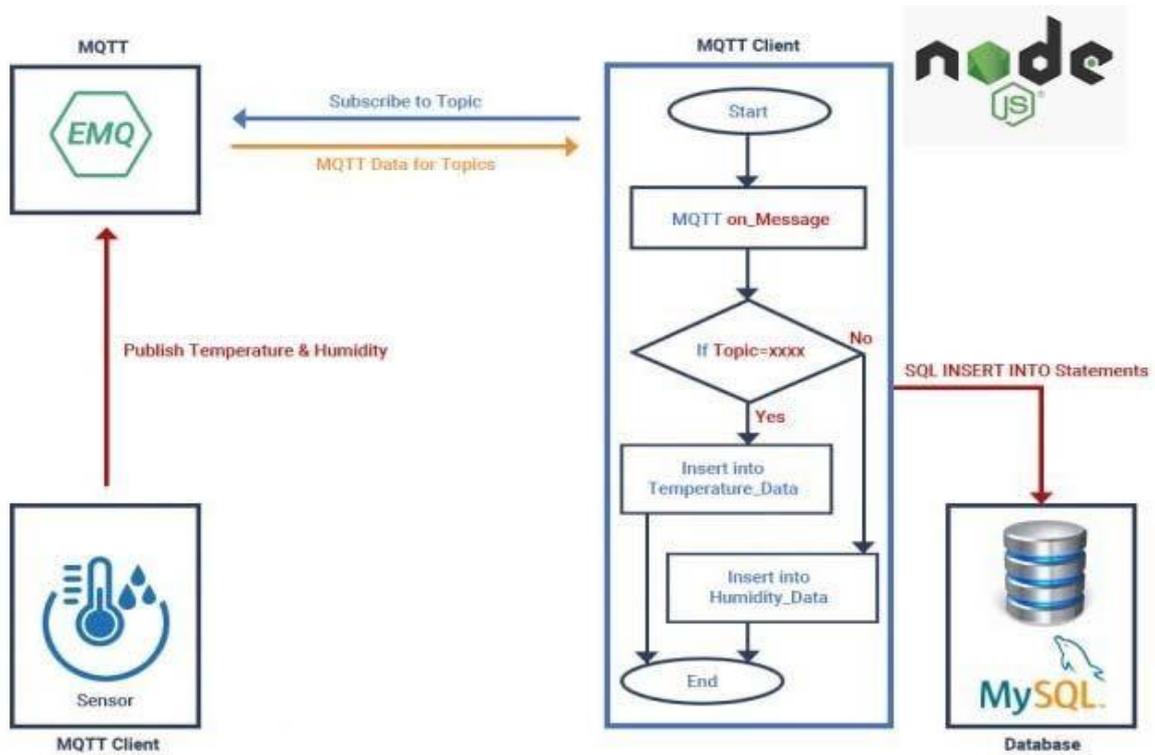


Figura 9: Sistema para el control del nivel de agua del canal IRCHIM

Mediante la implementación de un dispositivo de medición hidráulica, es posible obtener información de caudal a nivel de tiempo, que es el valor de una gran cuenca de Ancash como lo es el río Santa, similar a la estación de Requena. Las pruebas de funcionamiento del proyecto HYBAM y del proyecto piloto de este equipo serán con el fin de permitir la autogestión en la instalación, operación, mantenimiento y supervisión. Esto reduce los costos de implementación y ahorra recursos humanos. Derechos de uso de agua a nivel de intersección, deslinde inminente, ejecución de obras de ingeniería hidráulica, detección de alertas tempranas, campañas de medición para determinar curvas de costo QH para avenidas máximas y mínimas en sequía, relevamientos del Consejo de Aguas de Cuenca La correcta distribución del agua en lo planificado, y por lo que los tramos relevados km8+000-km 20+000, que se espera de todos, pueden ser utilizados reiteradamente no solo en estructuras hidráulicas, sino también en el propio río Santa y otros ríos del estado.

4.1.2. Modelo neuro – difuso de la distribución de agua en el tramo km 8+000 – 20+000 del canal de riego IRCHIM, 2020.

Para diseñar el modelo neurodifuso, se consideraron los aspectos matemáticos de mayor relevancia y se llevaron a cabo un análisis detallado de las ventajas y desventajas de cada estructura de control. El objetivo principal de este diseño es lograr un uso más eficiente del agua, asegurando un suministro acorde a las necesidades de los usuarios. En este sentido, se optó por una estrategia de control que involucra la lógica de control remoto aguas abajo. Desde esta perspectiva, el diseño del controlador se caracteriza por tener un rango de operación de baja frecuencia, limitado por la complejidad de la dinámica del sistema en operación dinámica. El controlador no posee un control exhaustivo sobre las perturbaciones impredecibles que operan a frecuencias más altas que las previstas en su diseño. Esto permite que el controlador cuente con una descripción matemática del sistema en estudio, es decir, un modelo matemático que lo represente adecuadamente. Como parte de la estrategia para modelar este sistema complejo a partir de sus principios fundamentales, se evaluaron los aspectos relacionados con la dinámica del actuador a utilizar, el área de la sección transversal del canal, el caudal que atraviesa dicha sección, la velocidad promedio del flujo de agua, la longitud del tramo del canal, la influencia de la gravedad, y el coeficiente de fricción que se genera debido a la interacción del agua con la superficie del canal.

Además, es necesario considerar la influencia de factores como el caudal lateral (que corresponde a la escorrentía lateral del canal principal de riego), la variación temporal, así como los aspectos relacionados con la dinámica y el transporte del agua a distancias significativas. Estos factores generan considerables retardos en el tiempo de distribución del agua y su entrega efectiva a los usuarios finales. Para implementar propuestas prácticas de gestión y supervisión del primer tramo del canal principal de riego IRCHIM, se han instalado dos estaciones: una se encarga del control local (actuando como servidor) y la otra está dedicada al monitoreo y control global (actuando como cliente). La propuesta incluye la implementación de una interfaz de comunicación OPC entre la computadora cliente y el controlador local. Esto permite la ejecución de un controlador NDPS en MATLAB Simulink y facilita la transferencia de información relacionada con las respuestas de las señales de control, que se obtienen a partir de la lectura de variables específicas. Adicionalmente, la interfaz del kit de herramientas establece una comunicación de bajo nivel entre la representación HMI (Interfaz Hombre-Máquina) de LabVIEW y Simulink. Los protocolos de comunicación empleados entre los diversos dispositivos se seleccionan en función de la

distancia que separa la estación local de la estación base. Es fundamental permitir el acceso remoto a los datos por parte de usuarios autorizados. Por esta razón, se recomienda la elección de sensores de nivel y módulos que cuenten con capacidades de acceso a la red celular para la transmisión eficiente de datos.

La instrumentación de segmentos específicos del canal principal de riego IRCHIM requiere una identificación minuciosa de los elementos involucrados en el proceso de automatización. Esto implica la realización de mediciones de los niveles de agua en la parte aguas abajo, así como mediciones adicionales de las posiciones de las compuertas equivalentes en la parte aguas arriba. El sistema de automatización en cuestión incorpora una serie de componentes, que incluyen dos sensores de detección de nivel (uno en la zona aguas arriba y otro en la zona aguas abajo), un sensor de posición de la puerta, tres dispositivos de señalización (que generan señales de salida a partir de la información captada por los sensores), un controlador PLC local, un servidor, un reductor utilizado para activar la apertura y cierre de la puerta, y un motor trifásico. El servidor se encarga de gestionar los datos generados por el sistema de automatización local, que incluyen información sobre el nivel del agua, la posición de la puerta, restricciones de operación de la puerta, alarmas y otros aspectos relevantes. La figura que se presenta a continuación muestra un diagrama funcional que ilustra la propuesta de automatización de los canales.

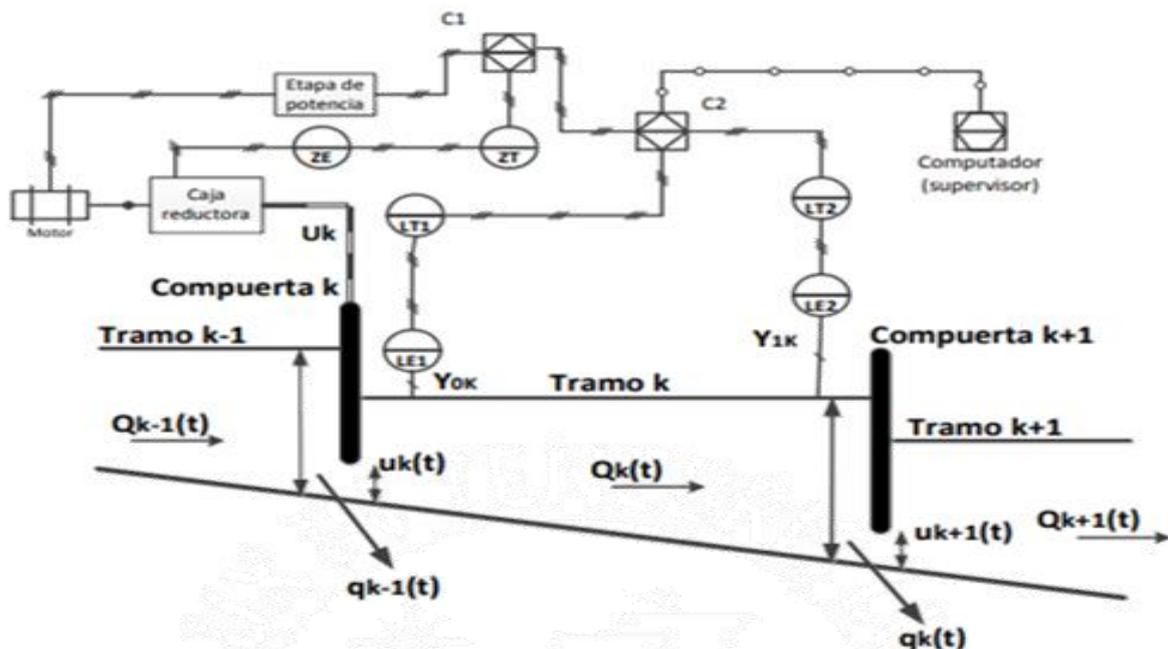


Figura 10: Esquema PID para la implementación del sistema de control desarrollado en el Bocal.

De acuerdo con la Figura 10, podemos observar que $Y0k$ y $Y1k$ hacen referencia a las variaciones en los niveles de agua en la zona aguas arriba y aguas abajo alejadas, respectivamente. La medición de la posición de la compuerta se basa en la variación de la resistencia interna de un potenciómetro ubicado dentro de un mecanismo de caja reductora. La señal de control, representada como U_k , corresponde al desplazamiento de la compuerta en la zona aguas arriba. En este contexto, se llevará a cabo la implementación de dos controladores, denominados C1 y C2, en una configuración de control en cascada. Esto se realiza con el propósito de mantener niveles precisos en la variación de la apertura de la compuerta equivalente. Considerando lo anterior, la determinación del flujo a lo largo del tramo del canal se calcula de manera indirecta mediante la evaluación de los niveles de agua y la apertura de la compuerta $u_k(t)$. Además, es esencial tener en cuenta el ancho (L) del canal y el coeficiente de descarga de la compuerta (C_d) en dicho cálculo.

En la selección de los instrumentos, es crucial ajustarse a los requisitos de diseño establecidos, teniendo en cuenta las condiciones operativas del tramo de canal de riego. Dado que pueden presentarse situaciones como cortes inesperados en el suministro de energía eléctrica o limitaciones en la accesibilidad, se plantea la implementación de una fuente de alimentación auxiliar para los instrumentos de campo. Esta fuente de energía auxiliar se basaría en la tecnología fotovoltaica y se ubicaría en la parte superior de la estructura aguas arriba del tramo de canal. El principio de funcionamiento de un sensor de nivel típico implica la emisión intermitente de ondas de sonido desde la parte superior del canal en dirección a la superficie del agua. Cuando estas ondas de sonido alcanzan la superficie del agua, se reflejan y regresan al sensor. El tiempo que tarda la onda de sonido en regresar es directamente proporcional a la distancia entre el sensor piezoeléctrico y la superficie del agua. El sensor mide este tiempo y lo utiliza para calcular el nivel de líquido en el canal. Es importante destacar que la velocidad de las ondas de sonido puede verse afectada en ocasiones por las fluctuaciones de temperatura, por lo que es necesario incorporar una compensación adecuada en el diseño del sensor.

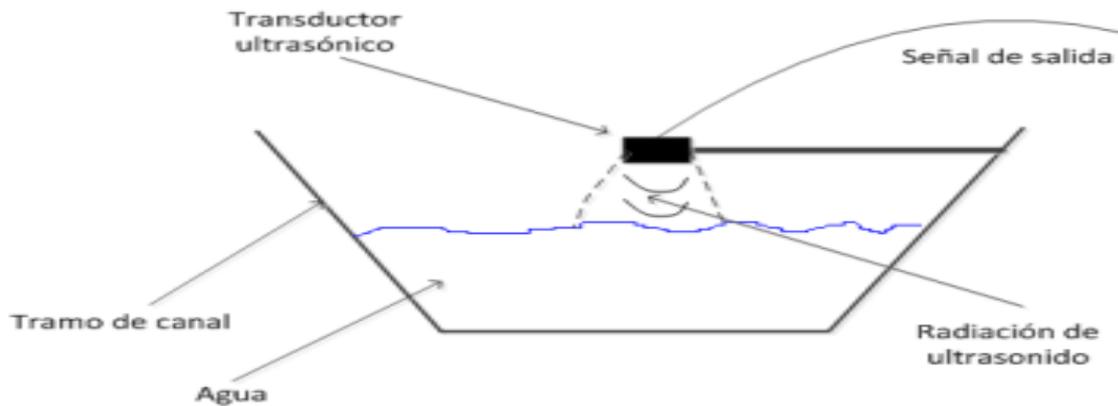


Figura 11: Ubicación del sensor ultrasónico de nivel en el tramo de canal IRCHIM

El sensor mencionado anteriormente se complementa con un actuador, que constituye la etapa de potencia ubicada en la salida del controlador. Su función es adaptar la señal para la activación de un motor de inducción trifásico. Para lograr esto, se implementará un sistema electrónico basado en transistores de potencia. A través de la conmutación de estos transistores, se ajustará la señal de control a niveles de tensión adecuados que permitirán la activación del motor. Además de esta función, el sistema electrónico realizará la conversión de energía de corriente continua (DC) a su equivalente en corriente alterna (AC) y ajustará los niveles de voltaje a un valor más bajo, concretamente 24 V. Esto es fundamental para la alimentación de los instrumentos locales. El sistema también contará con un interruptor que se activará mediante un relé, permitiendo la conmutación con el respaldo de energía auxiliar cuando sea necesario.

El actuador en cuestión se compone de una compuerta equivalente, que es el resultado de la acción conjunta de un grupo de compuertas ubicadas en la casa de compuertas. Por simplificación, en todo el proceso de diseño se considerará esta compuerta equivalente. El flujo a través de esta compuerta equivalente es una función del nivel del agua, por lo que resulta crucial mantener la posición deseada de las compuertas. En general, las compuertas de un canal son pesadas y difíciles de operar. Por lo tanto, además de un motor, se utiliza una caja reductora de engranajes para disminuir la velocidad y aumentar el torque. Para convertir el movimiento circular en la salida de la caja reductora en movimiento lineal, se emplea una cremallera que, al estar conectada a la compuerta, permite el desplazamiento deseado de esta última.



Figura 12: Elementos de la caja reductora.

En cuanto al controlador lógico programable (PLC), se ha optado por el PLC SIMATIC S7-300, que se clasifica como un controlador modular diseñado para aplicaciones de sistema en el rango medio de automatización discreta. Este controlador se destaca por su capacidad para mejorar la productividad en diversas áreas y sectores industriales. En el contexto de nuestro sistema de control, hemos elegido la variante compacta de este PLC, que ofrece tanto alta como media velocidad de procesamiento. Además, proporciona acceso inmediato a contadores hardware y cuenta con un controlador PID integrado junto con un bloque de función y capacidades de posicionamiento simples. El PLC SIMATIC S7-300 también incluye interfaces de comunicación como ETHERNET, PROFINET, PROFIBUS-DP y punto a punto. Para el monitoreo y control del sistema, se establecerá una sala de control en la ubicación del canal. Esta sala de control estará equipada con una computadora que permitirá la lectura de los estados de las variables de proceso, como el nivel y la posición, así como el cálculo del flujo de agua. Además, esta computadora albergará la estrategia de control neuro-difuso, lo que le posibilitará llevar a cabo la acción de control deseada en el proceso.

La estación maestra, representada por la PC, contará con un procesador de 100MHZ y 16MB de memoria RAM. También estará equipada con una conexión Ethernet que facilitará las operaciones a distancia, el monitoreo, el análisis y el registro de las variables relacionadas con el sistema de control. Además, se brindará la posibilidad de realizar el monitoreo y control a través de dispositivos móviles, como los teléfonos celulares. Para tener un funcionamiento sostenido la fuente de energía auxiliar para este sistema de control local (instrumentos de campo), sería proporcionado por un panel solar ubicado en la estructura superior de la compuerta equivalente 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 36, 33 o 30 células, para lo cual los paneles con una cantidad superior de células necesitan sistemas de regulación del voltaje de salida.

Los datos empleados para el entrenamiento de la red neuronal son aquellos presentados en la Figura 13 y 14, los cuales indican el nivel del agua en la sección aguas abajo y la ubicación de la compuerta en la sección aguas arriba. En consecuencia, el modelo matemático que se busca debe tomar en cuenta el nivel de agua en la sección aguas abajo como la salida deseada y la posición de la compuerta en la sección aguas arriba como la entrada del sistema.

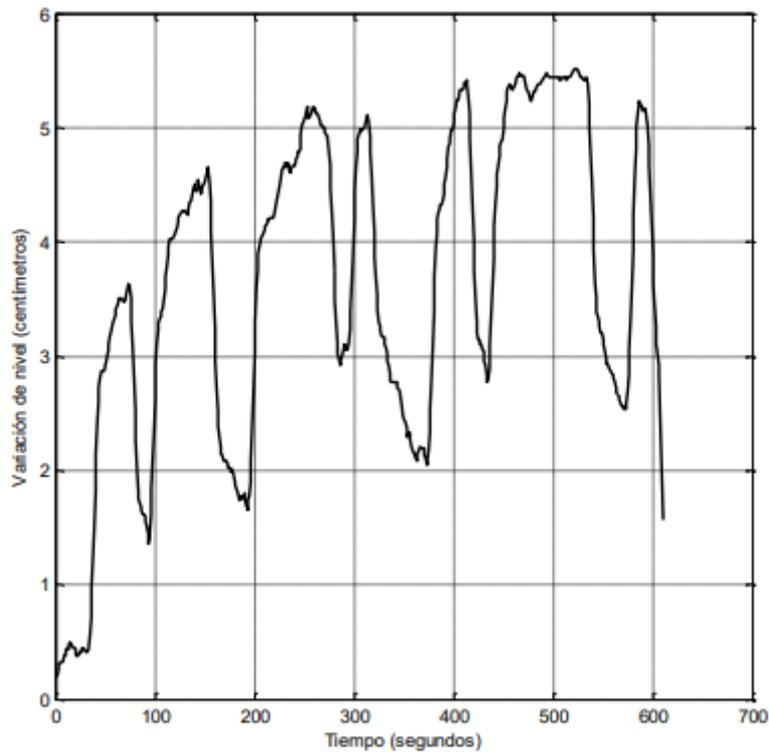


Figura 13 Variación de nivel aguas abajo

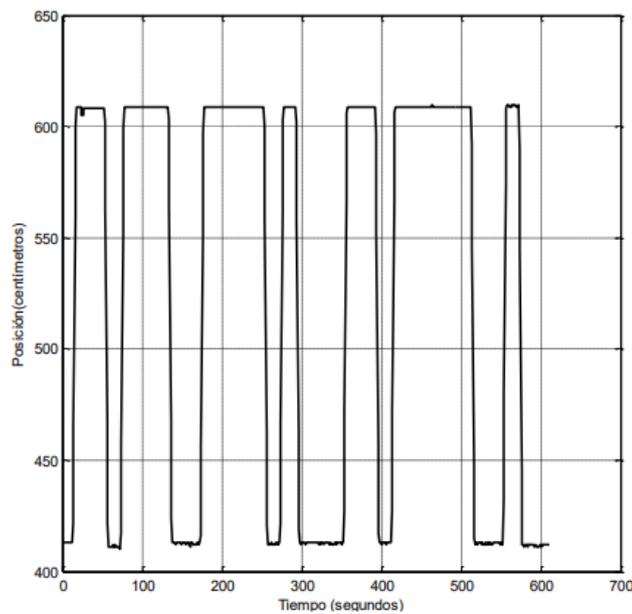


Figura 14 Variación de la posición de la compuerta aguas arriba

Escoger la configuración del modelo es una decisión crucial y desafiante en el proceso de identificación de sistemas, ya que la complejidad del modelo puede influir en la precisión con la que se describe el proceso real.

Esta red neuronal produce un modelo NARX no lineal auto-regresivo, que utiliza observaciones pasadas como referencia para predecir futuros valores, incorporando además entradas externas. Se basa en el modelo lineal ARX, de ahí su denominación, y se utiliza comúnmente en la identificación de sistemas tipo caja negra. La ecuación que define el modelo NARX es la siguiente:

$$y(t) = f(y(t-1), y(t-2), \dots, y(t-n_y), u(t), u(t-1), u(t-2), \dots, u(t-u_n)), \quad (1)$$

el valor actual o siguiente de la señal de salida se determina en función de los valores previos tanto de la salida como de la entrada. La variable 'ny' indica la cantidad de valores anteriores de la salida que se considerarán, mientras que 'nu' indica la cantidad de entradas.

La disposición de la red se visualiza en la figura 15, caracterizada principalmente por conexiones unidireccionales, también conocidas como feedforward. Este diseño refleja la función f descrita en la ecuación (1).

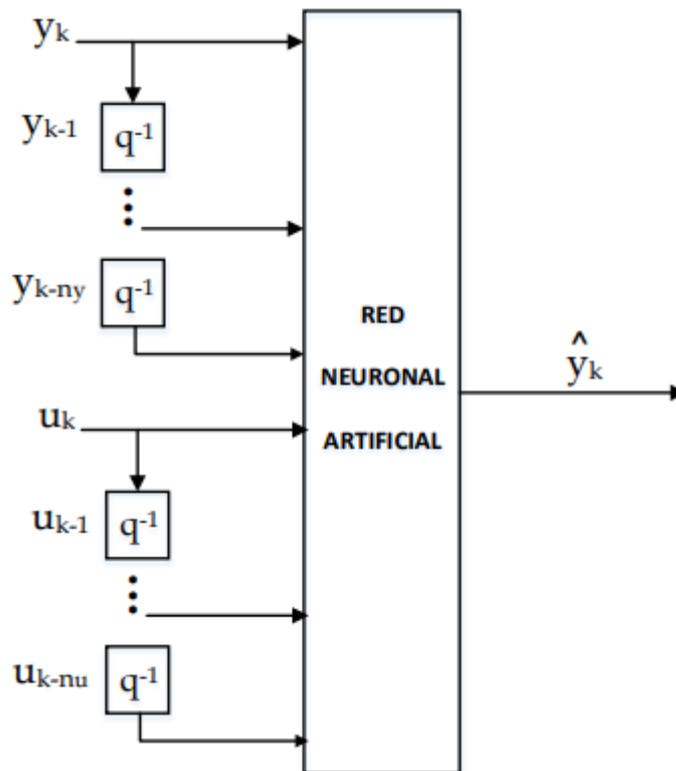


Figura 15 Modelo NARX

La estructura de la red se ilustra en la figura 16, donde el componente TD simboliza las unidades de retraso para tanto la señal de entrada como la de salida. Estas unidades de retraso son fundamentales para que la red NARX pueda capturar las características dinámicas del proceso.

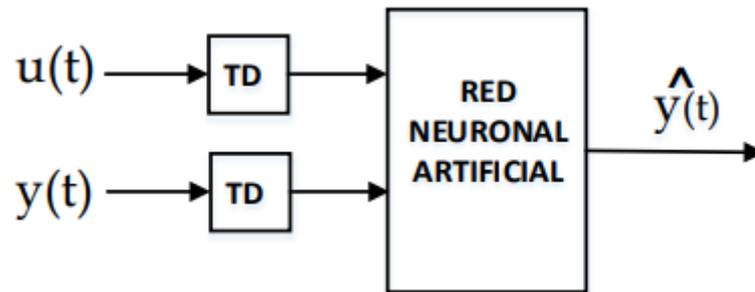


Figura 16 Esquema de estructura NARX serie paralelo

Los parámetros del modelo se obtienen utilizando la funcionalidad proporcionada por la caja de herramientas para redes neuronales disponible en el software MATLAB.

```
matlab Copy code

% Definición de variables
u1 = linspace(0, 30, 100); % Apertura de compuertas
u2 = linspace(0, 150, 100); % Caudal de agua
y = linspace(0, 100, 100); % Nivel de agua

% Funciones de pertenencia
u1_alta = trimf(u1, [10, 20, 30]);
u1_media = trimf(u1, [5, 15, 25]);
u1_baja = trimf(u1, [0, 5, 10]);

u2_alto = trimf(u2, [50, 100, 150]);
u2_medio = trimf(u2, [25, 75, 125]);
u2_bajo = trimf(u2, [0, 25, 50]);

y_alto = trimf(y, [50, 75, 100]);
y_medio = trimf(y, [25, 50, 75]);
y_bajo = trimf(y, [0, 25, 50]);
```

Figura 17 Definición y Conjuntos difusos

```
matlab Copy code

% Reglas difusas
regla1 = min(u1_alta, u2_alto);
regla2 = min(u1_media, u2_medio);
regla3 = min(u1_baja, u2_bajo);

% Inferencia difusa (mínimo como operador AND)
salida_alta = max(min(regla1, y_alto), min(regla2, y_alto), min(regla3,
salida_medio = max(min(regla1, y_medio), min(regla2, y_medio), min(regl
salida_bajo = max(min(regla1, y_bajo), min(regla2, y_bajo), min(regla3,
```

Figura 18 Definición de reglas difusas

```
matlab Copy code

% Funciones de pertenencia de salida
salida = max(salida_alta, salida_medio, salida_bajo);

% Visualización de resultados
figure;
subplot(3, 1, 1);
plot(u1, regla1, 'b', u2, regla1, 'g', y, salida_alta, 'r');
title('Regla 1 - Salida Alta');
legend('Apertura de Compuertas', 'Caudal de Agua', 'Salida');

subplot(3, 1, 2);
plot(u1, regla2, 'b', u2, regla2, 'g', y, salida_medio, 'r');
title('Regla 2 - Salida Media');
legend('Apertura de Compuertas', 'Caudal de Agua', 'Salida');

subplot(3, 1, 3);
plot(u1, regla3, 'b', u2, regla3, 'g', y, salida_bajo, 'r');
title('Regla 3 - Salida Baja');
legend('Apertura de Compuertas', 'Caudal de Agua', 'Salida');
```

Figura 19 Definición de funciones de pertinencia de salida

```

% Visualización del sistema de lógica difusa
figure;
subplot(3, 1, 1);
plotmf(fis, 'input', 1);
title('Apertura de Compuertas');

subplot(3, 1, 2);
plotmf(fis, 'input', 2);
title('Cantidad de Compuertas');

subplot(3, 1, 3);
plotmf(fis, 'output', 1);
title('Nivel de Agua');

% Entrenamiento del modelo
opciones_entrenamiento = anfisOptions('Epochs', 50, 'DisplayANFISInform
modelo_entrenado = anfis([apertura_compuertas cantidad_lluvia nivel_agu

% Evaluación del modelo
nivel_agua_predicho = evalfis([apertura_compuertas cantidad_lluvia], mo

% Métricas de rendimiento
rmse = sqrt(mean((nivel_agua_real - nivel_agua_predicho).^2));
r_squared = 1 - sum((nivel_agua_real - nivel_agua_predicho).^2) / sum((

disp(['RMSE: ' num2str(rmse)]);
disp(['R^2: ' num2str(r_squared)]);

```

Figura 20 Hiperparámetros y métricas de Rendimiento

El número de capas y neuronas por capa en la red, así como los retardos para la señal de entrada, fueron establecidos de forma empírica a partir de los datos disponibles. Dado que no hay una teoría precisa que defina el dimensionamiento exacto de la topología de este tipo de redes, se determinó mediante pruebas y ajustes, ya que se basa en un enfoque de prueba y error.

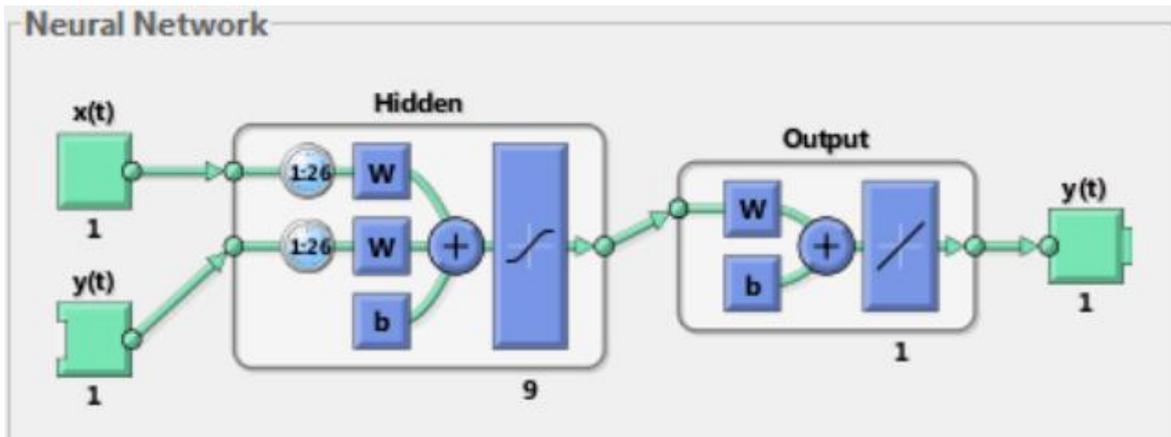


Figura 21 Estructura de la red

La figura 21 muestra la configuración de la red, que se fundamenta en una estructura neuronal NARX identificada como la más efectiva entre varias opciones analizadas. Este modelo de red neuronal es una estructura recurrente que incluye 26 retardos tanto para las señales de entrada como para las de salida. La capa oculta cuenta con 9 neuronas, mientras que la capa de salida tiene una sola neurona. En la capa oculta, se emplea la función de activación tansig, ampliamente utilizada en el entrenamiento de redes neuronales por su naturaleza no lineal, también conocida como función tangente sigmoidea hiperbólica. En contraste, en la capa de salida se utiliza una función lineal denominada purelin.

Esta configuración fue elegida por dos razones específicas. En primer lugar, la red que utiliza la función de activación "tansig" en la capa oculta y una función lineal en la capa de salida se reconoce por su capacidad para modelar cualquier relación no lineal estática. Además, se dividieron los conjuntos de datos de entrada y salida, asignando una parte para el entrenamiento de la red neuronal y reservando la otra parte para su validación.

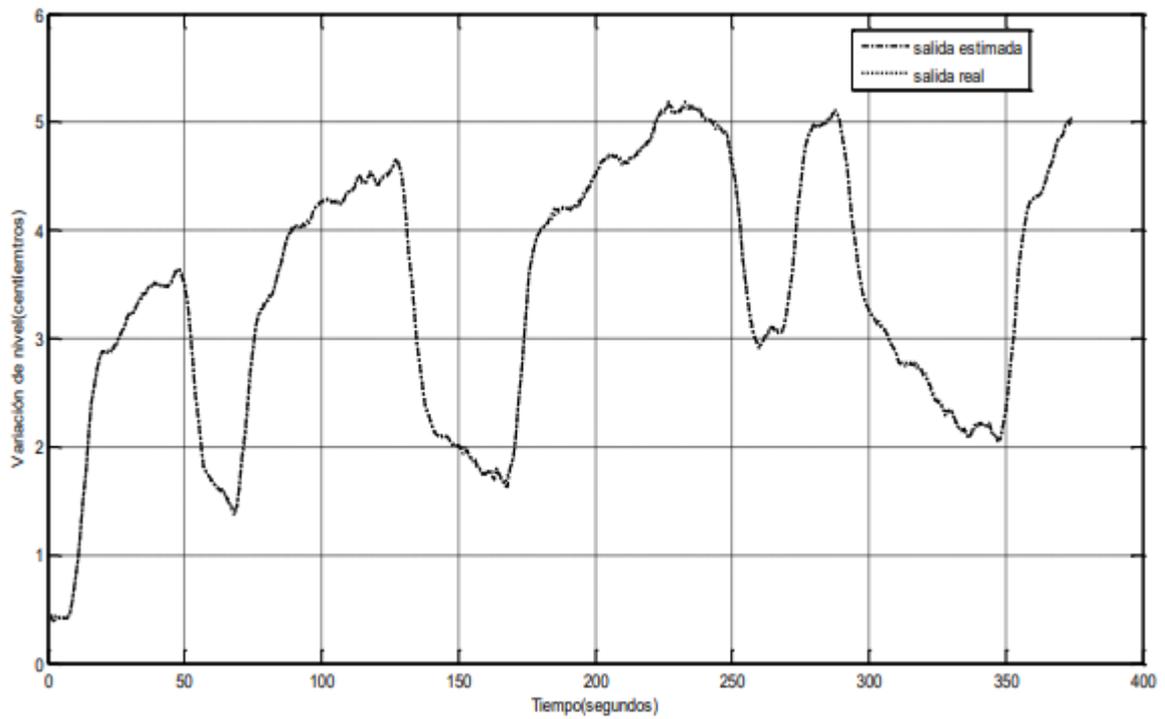


Figura 22 Salida real y del modelo después de la fase del entrenamiento

El resultado obtenido del entrenamiento del modelo neuronal se presenta en la figura 22, donde se evidencia su destacada capacidad de aproximación.

4.1.3. Análisis comparativo del modelo neuro – difuso desarrollado vs el control hidráulico convencional, determinando la robustez del modelo obtenido frente a diferentes tipos de perturbaciones.

Para el análisis comparativo se realizó pruebas de simulación, para lo cual se hizo variar los parámetros internos, esto es un problema que afecta el desempeño de los sistemas de control, para llevar a cabo esta evaluación, se debe considerar la variación de todos los parámetros del sistema, incluyendo la ganancia, las constantes de tiempo y el retardo. En este contexto, es fundamental tener en cuenta los límites de operación que son esenciales para garantizar el funcionamiento adecuado del sistema y su régimen de operación de descarga a través de la compuerta equivalente de control aguas arriba. El límite inferior de operación se establece cuando la demanda de agua por parte de los usuarios disminuye en relación al régimen nominal, lo que conlleva a una reducción en las necesidades de agua para la irrigación. En este escenario, se alcanza un volumen mínimo de flujo de agua a través de las compuertas de control aguas arriba, lo que se traduce en una disminución del coeficiente de aceleración y, como resultado, en cambios sustanciales en los parámetros dinámicos del tramo de canal. El régimen de descarga mínimo se logra al abrir las compuertas de control aguas arriba a un valor por debajo del utilizado para la obtención del modelo nominal, específicamente por debajo de 200 cm. Sin embargo, dado que no se cuentan con datos para identificar un nuevo modelo bajo estas condiciones, se debe asumir una variación porcentual en los parámetros internos del modelo nominal. Según esta consideración, se establecerá un régimen de descarga mínimo con una variación positiva en los parámetros internos del modelo nominal. El régimen de máxima descarga de operación a través de las compuertas de control aguas arriba se caracteriza por tener un valor de Q_{max} mayor que el régimen nominal ($Q_{max} > Q_{nom}$). Este régimen de descarga máximo generalmente se logra al abrir completamente la compuerta equivalente de control, lo que implica una apertura mayor a la utilizada en la identificación del modelo nominal (más de 200 cm). En esta situación, se observa una variación decreciente de los parámetros internos, lo que resulta en una variación negativa con respecto al modelo nominal. Se ha establecido una variación del -20% para los parámetros internos y del -5% para el tiempo de retardo en comparación con el modelo nominal.

Es importante destacar que los parámetros hidráulicos, como el coeficiente de fricción, la geometría del canal, la elevación del agua aguas abajo, la velocidad, entre otros, y el régimen de descarga $Q(t)$ en tramos principales de canales de riego, pueden experimentar cambios

aleatorios dentro de los rangos de operación, lo que genera incertidumbre en los parámetros dinámicos del modelo nominal. Por lo tanto, el comportamiento dinámico preciso de estos tramos de canal suele ser desconocido en muchas ocasiones. En este contexto, los modelos obtenidos, identificados como $G_{min}(s)$ y $G_{max}(s)$, representan los límites de operación del sistema. Estos límites establecen el rango de variabilidad de cada uno de los parámetros dinámicos.

Si aplicamos la estrategia de control desarrollada hasta la fecha para regular la salida del sistema, teniendo en cuenta que el comportamiento real del sistema se describe mediante los modelos que varían en el rango de los modelos de descarga mínima y máxima, se obtendrá la respuesta del sistema, es importante mencionar que estas respuestas se ven ligeramente degradadas en el caso de los diferentes modelos de régimen de descarga mínimo y máximo. En el caso de $G_{min}(s)$, la respuesta exhibe una tendencia subamortiguada, caracterizada por una mayor velocidad de respuesta, pero con un sobreimpulso más elevado (inferior al 5%). Por otro lado, para $G_{max}(s)$, la respuesta se torna más lenta y muestra un comportamiento sobreamortiguado, careciendo de sobreimpulso, tal como se representa en la figura a continuación.

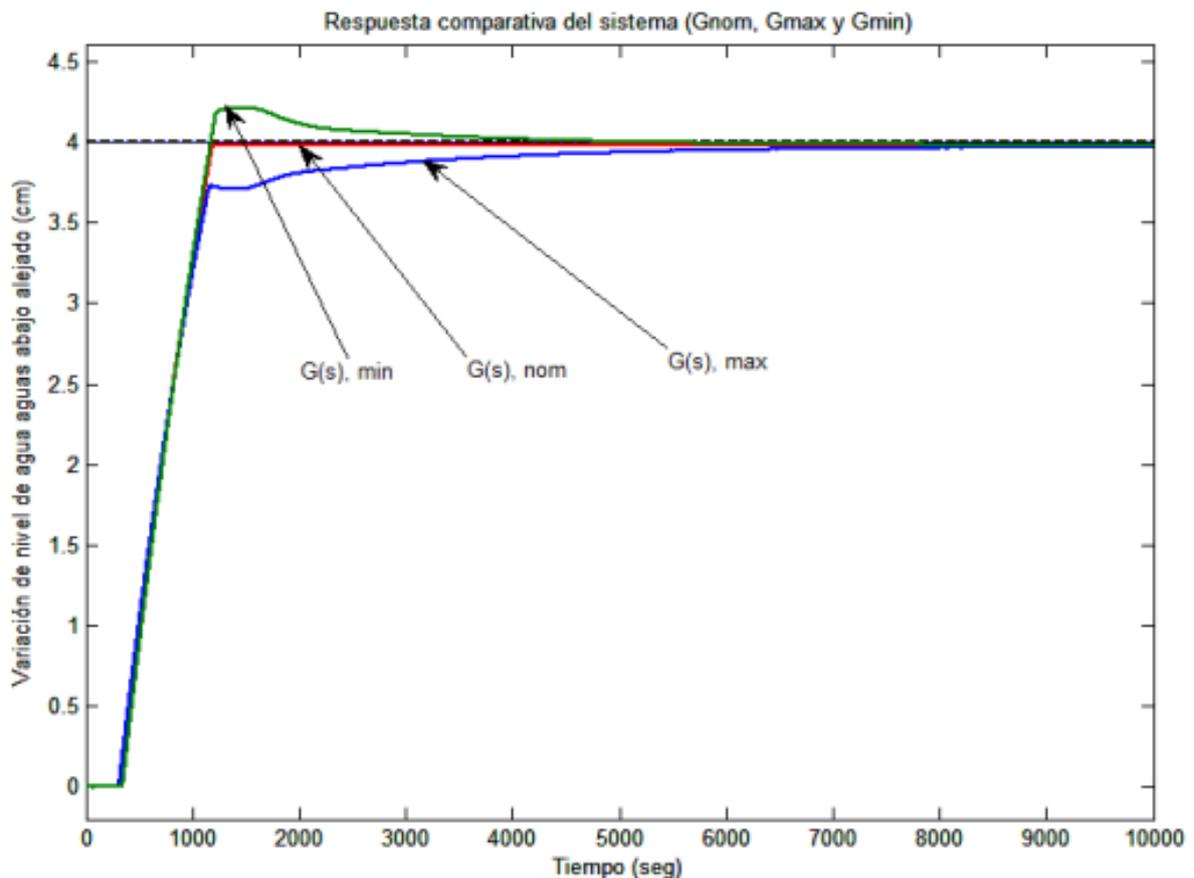


Figura 23: Respuesta comparativa del sistema de control con variación de parámetros internos.

4.1.4. Propuesta de implementación práctica del modelo neuro – difuso desarrollado en el tramo km 8+000 – 20+000 del canal de riego IRCHIM, 2020.

Para llevar a cabo la propuesta de implementación, se fundamenta en el estándar OPC (OLE for process control), que constituye un estándar de comunicación en el ámbito de control y supervisión de procesos industriales, basado en tecnología de Microsoft. Este estándar proporciona una interfaz común que permite la interacción y el intercambio de datos entre componentes de software individuales. La comunicación a través de OPC sigue una arquitectura cliente-servidor, donde el servidor OPC actúa como la fuente de datos, como si fuera un dispositivo de hardware a nivel de planta. Cualquier aplicación basada en OPC puede acceder a este servidor para leer o escribir cualquier variable que el servidor ofrezca. Esto resuelve el problema de los controladores propietarios y, además, implica costos menores. Entre las ventajas del estándar OPC se incluyen la interoperabilidad entre aplicaciones de automatización y control, la interoperabilidad entre aplicaciones de gestión y oficina, la eliminación de problemas de compatibilidad, el acceso eficiente a los datos del proceso, la facilidad de operación y otros beneficios. Las mediciones de niveles de variación de agua y la posición de las compuertas en el canal de riego, recopiladas por el controlador local (SIMATIC S7-300), deben ser transmitidas a la PC (cliente) donde estará en funcionamiento la aplicación en Simulink con la implementación del controlador neurofuzzy con predictor de Smith. Es importante destacar que a partir de las señales de entrada se calculará la salida de control, la cual será enviada de vuelta al controlador para su ejecución. El diagrama de comunicación OPC entre el servidor y el cliente se muestra en la figura.

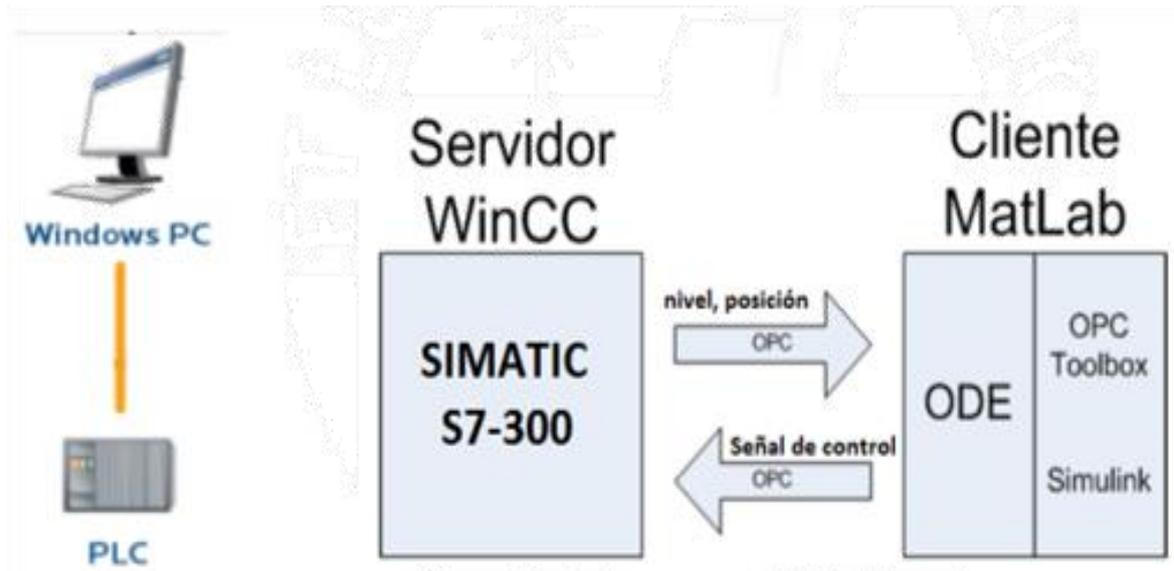


Figura 24: Esquema de comunicación OPC entre el servidor y el cliente.

En el sistema, una estación de automatización puede comprender componentes como la fuente de corriente (Power Supply: PS), la unidad central de procesamiento (Central Processing Unit: CPU), el procesador de comunicación (Communication Processor: CP), así como los módulos de entrada y salida (I/O Modules). Dentro del sistema de control local, es esencial que los instrumentos se conecten mediante protocolos de comunicación que permitan la transferencia continua de datos. Para lograr esto, se emplea un controlador piloto que proporciona su señal de control (como referencia interna) a otro controlador interno conocido como el regulador de órgano. Este último se encarga de determinar el posicionamiento real (apertura efectiva) del conjunto de compuertas ubicadas aguas arriba en la casa de compuertas. De esta manera, se evita que las compuertas estén en movimiento constante, lo que reduce el desgaste mecánico asociado a un movimiento continuo. El diagrama de bloques funcional del sistema de control local para la distribución de agua en la bocatoma muestra la interacción entre el regulador piloto y el regulador de órgano, así como otros elementos necesarios para su operación.

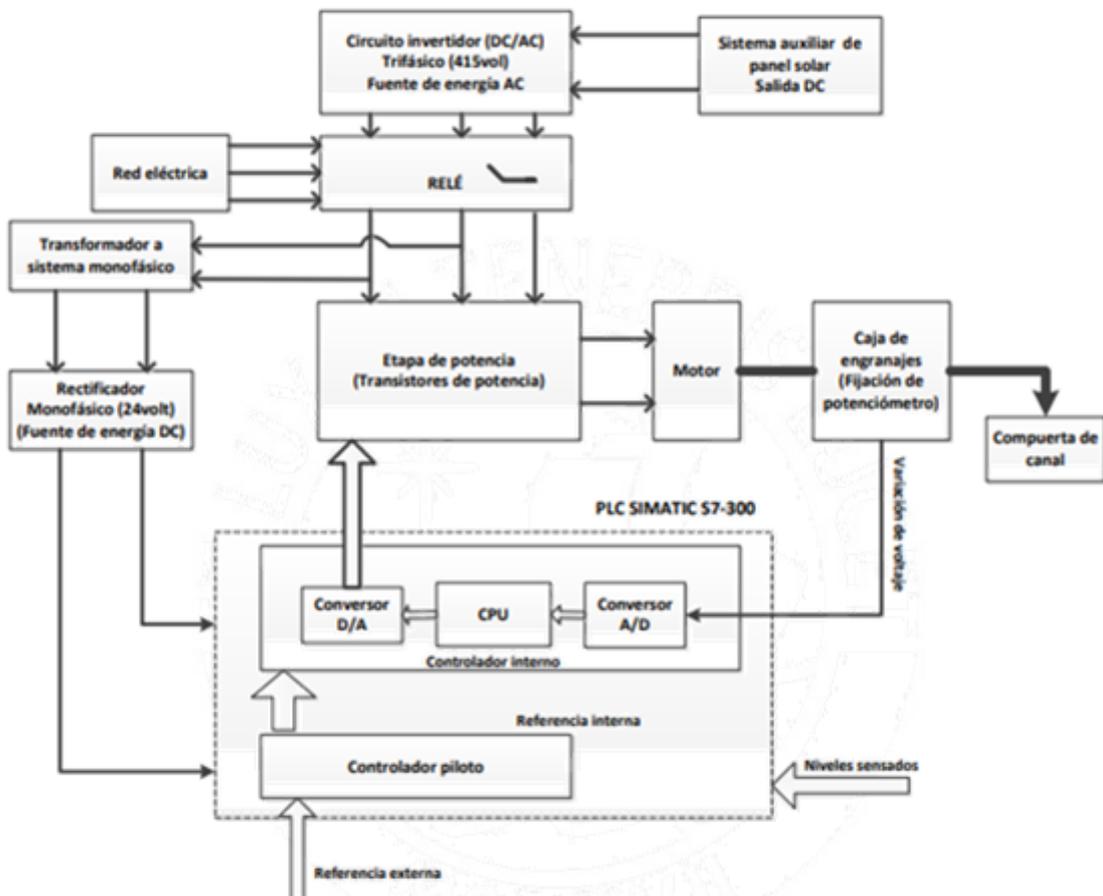


Figura 25: Esquema funcional para la puesta en marcha del sistema de control local.

Un componente de gran importancia en el sistema es la electrónica de potencia, que se encarga de transformar la energía proveniente de la fuente auxiliar (solar de corriente continua) en una forma trifásica a través de un circuito convertidor. Esto permite la activación del motor en caso de que falle el suministro eléctrico convencional. La señal analógica, que representa el voltaje en la salida del potenciómetro y, por ende, la posición de la compuerta, se mide indirectamente. Posteriormente, esta señal se procesa mediante el convertidor analógico a digital (A/D) del controlador programable (PLC) y se convierte nuevamente a una señal analógica (D/A) que se utiliza para controlar el motor. El control de este lazo secundario, que opera dentro del lazo principal de control, se conoce como un control en cascada. El controlador piloto tiene en cuenta las mediciones de los niveles de agua aguas arriba y aguas abajo a distancia. En cuanto al protocolo de comunicación para la transferencia de datos, se utiliza el bus de sistema de desarrollo PCS 7 Industrial Ethernet, que se basa en el estándar IEEE 802.3 y tiene una velocidad de transmisión de 10 o 100 Mbit/s.

Dado que el PLC SIMATIC S7-300 se encuentra en la ubicación aguas arriba, en las proximidades de la casa de compuertas y el panel solar, se requerirá la utilización de un adaptador de conexión junto con un enlace de fibra óptica para transmitir las señales procedentes del sensor de variación de nivel aguas abajo alejado. Esto es necesario debido a la gran distancia de separación, que alcanza los 12 km, correspondiente a la longitud del tramo de canal. Por otro lado, para el sensor de variación de nivel aguas arriba, se empleará un cable ITP. El PLC se encargará de recopilar las señales provenientes de los sensores de variación de nivel, así como la señal del sensor de posición del controlador interno. La comunicación entre el PLC y la estación remota se llevará a cabo de manera inalámbrica, permitiendo así la transferencia bidireccional de datos a través del estándar OPC.

También se contemplará un sistema de alerta diseñado para prever posibles fallos. Este sistema aprovecha las capacidades de transmisión celular GSM de los sensores de nivel ultrasónicos. En conjunto con la estación SIMATIC S7-300, el sistema opera de forma autónoma y, utilizando el sistema de mensajes cortos (SMS), envía información crítica sobre el estado de la planta, alertas o notificaciones a un ingeniero de mantenimiento o a un centro de control. De manera recíproca, la estación S7 debe contar con la capacidad de recibir y descifrar estos mensajes. La transmisión de datos mediante SMS a través de la red celular GSM se presenta como una alternativa sencilla, fiable y asequible. Para conectar un SIMATIC S7-300 a una red GSM, es necesario establecer una conexión entre la interfaz

serie de comunicaciones y el MODEM GPRS/GSM MD720-3. En la figura que sigue se ilustra el esquema de conexión del sistema de control propuesto en el presente trabajo.

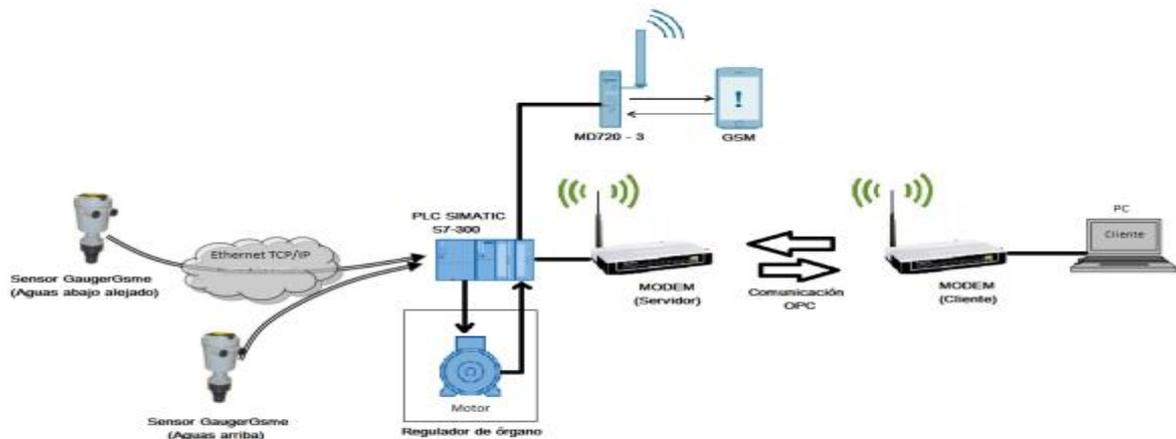


Figura 26: Integración del sistema de control en sitio y la estación de control y supervisión.

Finalmente, la estación remota (cliente) estará equipada con una interfaz HMI (Interfaz de Interacción Humano-Máquina), diseñada para supervisar y controlar la apertura de la compuerta, y también para mantener un registro de datos históricos que documenta la evolución de la variación del nivel de agua aguas abajo alejado. En el diseño propuesto, se busca establecer una comunicación efectiva entre el sistema de control en Simulink y una aplicación HMI. Por lo tanto, se ha optado por utilizar una aplicación HMI en el entorno Windows debido a su alta accesibilidad, abundancia de información y facilidad de uso, lo que la hace adecuada para aplicaciones de baja complejidad. La simplicidad en la programación es un factor importante, ya que influye significativamente en el tiempo requerido para lograr la comunicación entre el sistema de control y la HMI. Si bien el nivel de información disponible y la redundancia de la plataforma de la aplicación son aspectos relevantes, no son considerados críticos en este contexto.

Una manera sencilla y práctica de crear una Interfaz de Interacción Humano-Máquina (HMI) es a través de LabVIEW, que, mediante el Simulink Interface Toolkit, ofrece métodos para establecer una conexión con el sistema de control desarrollado en Simulink y convertirlo en una biblioteca dinámica (DLL). Mediante la combinación de las capacidades de Simulink y Real-Time Workshop con LabVIEW, el Simulink Interface Toolkit facilita la importación de modelos de simulación en LabVIEW. Esto da como resultado una herramienta amigable, versátil y aplicable en diversos contextos, incluyendo sistemas de control para canales de riego principales, entre otros elementos.

4.2. DISCUSIÓN

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

fuelle 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%.

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. 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.

5.2. RECOMENDACIONES

1. Implementar un controlador NDPS en los canales principales de riego en Perú como un proceso que tenga un enfoque detallado y metódico para lograr el éxito en la gestión del agua en la agricultura. De manera holística y que involucre la selección cuidadosa de un sitio piloto que represente fielmente las condiciones reales de riego en el país.
2. Extender el alcance de la red neuro-difusa para explorar el comportamiento dinámico de la planta en mayor profundidad, para lograr la implementación de una red ANFIS, conocida como un sistema de inferencia neuro-difuso adaptativo. Este nuevo enfoque es esencial para adentrarnos en el mundo de la no linealidad, un aspecto crítico en la gestión de canales de riego.
3. Implementar algoritmos de ajuste de parámetros en tiempo real, implicando que el modelo sea capaz de aprender y modificar sus parámetros de manera autónoma a medida que se enfrenta a nuevos desafíos, que garantice que el sistema pueda mantener un alto rendimiento y precisión, incluso en condiciones operativas variables.
4. Invocar a las autoridades nacionales, regionales y locales que se involucren con las soluciones metódicas y basadas en la ciencia para la solución de un problema global como es la distribución del recurso hídrico, teniendo en cuenta la sostenibilidad en todos sus aspectos.

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS Y VIRTUALES

- 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>
- Alnajjar, H. Y. H., & Üçüncü, O. (2022). Enhance modelling predicting for pollution removal in wastewater treatment plants by using an adaptive neuro-fuzzy inference system. *Environmental Research and Technology*, 5(3), 213–226. <https://doi.org/10.35208/ert.1106463>
- Astuti, I. S., Wiwoho, B. S., Purwanto, P., Wagistina, S., Deffinika, I., Sucahyo, H. R., Herlambang, G. A., & Alfarizi, I. A. G. (2022). An Application of Improved MODIS-Based Potential Evapotranspiration Estimates in a Humid Tropic Brantas Watershed—Implications for Agricultural Water Management. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 11(3). <https://doi.org/10.3390/ijgi11030182>
- 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>
- Calvete, H. I., Galé, C., Iranzo, J. A., & Mateo, P. M. (2023). A decision tool based on bilevel optimization for the allocation of water resources in a hierarchical system. *International Transactions in Operational Research*, 30(4), 1673–1702. <https://doi.org/10.1111/itor.12943>
- Grigg, N. S. (2023). Systems engineering and water resources management: A closer relationship is needed. *Systems Engineering*. <https://doi.org/10.1002/sys.21725>
- Hassanvand, M. R., Salimi, A. H., Kisi, O., Omidvar Mohammadi, H., & Abouzari, N. (2021). Investigating Application of Adaptive Neuro Fuzzy Inference Systems Method and Epanet Software for Modeling Green Space Water Distribution Network. *Iranian*

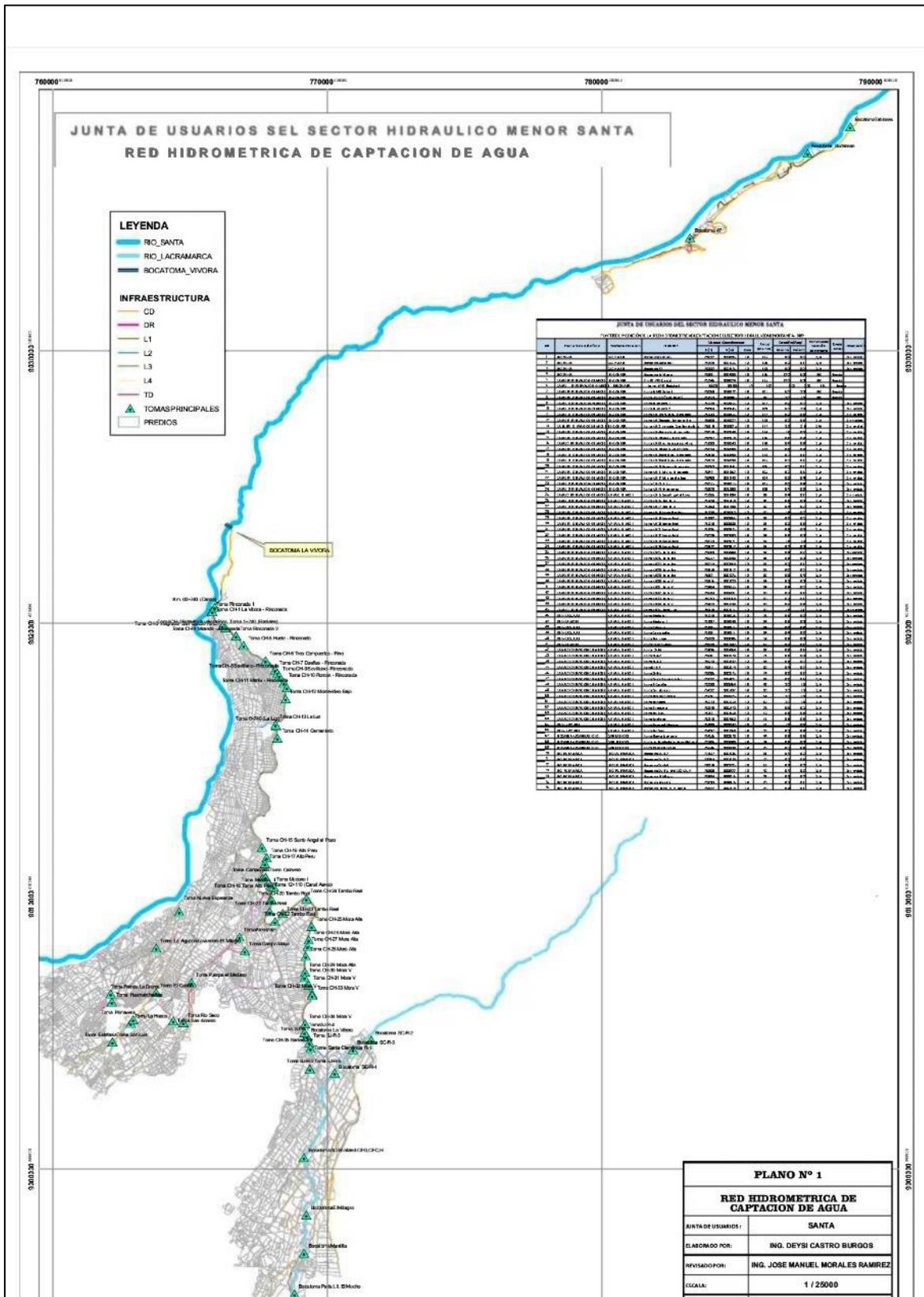
Journal of Science and Technology - Transactions of Civil Engineering, 45(4), 2765–2777. <https://doi.org/10.1007/s40996-021-00625-8>

- Kusumastuti, D. I., Gustira, A., & Wahono, E. P. (2021). Analysis of water distribution system at Alang-Alang Lebar. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 930(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/930/1/012019>
- 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>
- Schlattmann, A., Neuendorf, F., Burkhard, K., Probst, E., Pujades, E., Mauser, W., Attinger, S., & von Haaren, C. (2022). Ecological Sustainability Assessment of Water Distribution for the Maintenance of Ecosystems, their Services and Biodiversity. *Environmental Management*, 70(2), 329–349. <https://doi.org/10.1007/s00267-022-01662-3>
- 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>
- Tavakoli, R., Sharifara, A., & Najafi, M. (2020). Artificial Neural Networks and Adaptive Neuro-Fuzzy Models to Predict Remaining Useful Life of Water Pipelines. *World Environmental and Water Resources Congress 2020: Water, Wastewater, and Stormwater and Water Desalination and Reuse - Selected Papers from the Proceedings of the World Environmental and Water Resources Congress 2020*, 191–204. <https://doi.org/10.1061/9780784482988.019>

VII. ANEXOS

ANEXO 1: Plano de Red hidrométrica de captación de agua



ANEXO 2: Panel fotográfico



Figura 27: Realizando el aforado del canal principal Cascajal – Nepeña – Casma – Sechin



Figura 28 Instalación de la base para colocar el correntómetro Valeport



Figura 29 Vista panorámica donde se va colocando el molinete con lastre al canal para aforar



Figura 30 tomando datos (aforar) con el correntómetro del canal



Figura 31 Vista panorámica del molinete con lastre



Figura 32 Vista panorámica del contador de señales para las mediciones del correntómetro



Figura 33 Vista panorámica con los técnicos y equipos para aforar (correntómetro)



Figura 34: Toma lateral de la compuerta 23; km 26+754



Figura 35: Salida de la toma del canal compuerta 23, flujo de régimen turbulento



Figura 36: Tramo inicial con fuerte pendiente del canal compuerta 23



Figura 37: Canal Carlos Leight de primer orden que abastece al canal de segundo orden

ANEXO 3 Hoja de cálculo canal IRCHIM tomados a través del correntómetro.

CORRENTÓMETRO : VALEPORT
 FECHA : ABRIL DEL 2023

Tirante(m)			Z	B (m)	bi (m)	Espejo Bi=B+2bi (m)	Bi/4 (m)	Areas (m ²)				Vprom.(m/s): Calculado por el correntómetro				Caudales Parciales (m ³ /seg.)				Qsección (m ³ /seg.)
Y1	Y2	Yi						A1	A2	A3	A4	Vp1	Vp2	Vp3	Vp4	Qprom.1	Qprom.2	Qprom.3	Qprom.4	
0.35	0.45	0.80	1.5	2.56	0.68	3.91	0.98	0.311	0.715	0.715	0.311	0.587	0.566	0.561	0.520	0.18	0.41	0.40	0.16	1.15
0.35	0.55	0.90	1.5	2.56	0.83	4.21	1.05	0.365	0.864	0.864	0.365	0.734	0.728	0.687	0.687	0.27	0.63	0.59	0.25	1.74
0.35	0.61	0.96	1.5	2.56	0.92	4.39	1.10	0.399	0.959	0.959	0.399	0.740	0.746	0.755	0.740	0.30	0.72	0.72	0.30	2.03
0.35	0.68	1.03	1.5	2.56	1.02	4.60	1.15	0.440	1.076	1.076	0.440	0.853	0.826	0.787	0.764	0.37	0.89	0.85	0.34	2.45
0.35	0.75	1.10	1.5	2.56	1.13	4.81	1.20	0.482	1.199	1.199	0.482	0.850	0.817	0.896	0.953	0.41	0.98	1.07	0.46	2.92
0.35	0.81	1.16	1.5	2.56	1.22	4.99	1.25	0.519	1.309	1.309	0.519	1.004	0.897	0.888	0.879	0.52	1.17	1.16	0.46	3.31
0.35	0.86	1.21	1.5	2.56	1.29	5.14	1.29	0.550	1.404	1.404	0.550	0.923	0.888	0.968	1.024	0.51	1.25	1.36	0.56	3.68
0.35	0.93	1.28	1.5	2.56	1.40	5.35	1.34	0.596	1.542	1.542	0.596	1.025	1.014	0.916	1.004	0.61	1.56	1.41	0.60	4.18
0.35	0.95	1.30	1.5	2.56	1.43	5.41	1.35	0.609	1.582	1.582	0.609	0.940	0.953	0.977	1.045	0.57	1.51	1.55	0.64	4.26
0.35	1.00	1.35	1.5	2.56	1.50	5.56	1.39	0.643	1.685	1.685	0.643	0.983	1.012	1.124	1.137	0.63	1.71	1.89	0.73	4.96
0.35	1.03	1.38	1.5	2.56	1.55	5.65	1.41	0.664	1.749	1.749	0.664	1.122	1.095	1.057	1.181	0.75	1.92	1.85	0.78	5.29
0.35	1.07	1.42	1.5	2.56	1.61	5.77	1.44	0.692	1.835	1.835	0.692	1.164	1.118	1.100	1.181	0.81	2.05	2.02	0.82	5.69
0.35	1.09	1.44	1.5	2.56	1.64	5.83	1.46	0.707	1.878	1.878	0.707	1.045	1.060	1.156	1.187	0.74	1.99	2.17	0.84	5.74
0.35	1.11	1.46	1.5	2.56	1.67	5.89	1.47	0.721	1.923	1.923	0.721	1.125	1.122	1.080	1.125	0.81	2.16	2.08	0.81	5.86
0.35	1.13	1.48	1.5	2.56	1.70	5.95	1.49	0.736	1.967	1.967	0.736	1.116	1.058	1.152	1.075	0.82	2.08	2.27	0.79	5.96
0.35	1.16	1.51	1.5	2.56	1.74	6.04	1.51	0.758	2.035	2.035	0.758	1.131	1.144	1.171	1.232	0.86	2.33	2.38	0.93	6.50
0.35	1.25	1.60	1.5	2.56	1.88	6.31	1.58	0.826	2.244	2.244	0.826	1.072	1.110	1.049	1.069	0.89	2.49	2.36	0.88	6.62
0.35	1.29	1.64	1.5	2.56	1.94	6.43	1.61	0.857	2.341	2.341	0.857	1.137	1.160	1.145	1.164	0.97	2.71	2.68	1.00	7.37
0.35	1.41	1.76	1.5	2.56	2.12	6.79	1.70	0.955	2.639	2.639	0.955	1.149	1.099	1.206	1.359	1.10	2.90	3.18	1.30	8.48
0.35	1.46	1.81	1.5	2.56	2.19	6.94	1.74	0.998	2.768	2.768	0.998	1.380	1.286	1.309	1.451	1.38	3.56	3.62	1.45	10.01

ANEXO 4 Relación mira caudal del canal IRCHIM

Q = 0.0956 M³.368

Q = Caudal (m³/s)

M = Lectura de Mira (m)

LECTURA DE MIRA (m)	CAUDAL ESTACION DE CONTROL KM 0 + 200 (m ³ /s)	LECTURA DE MIRA (m)	CAUDAL ESTACION DE CONTROL KM 0 + 200 (m ³ /s)	LECTURA DE MIRA (m)	CAUDAL ESTACION DE CONTROL KM 0 + 200 (m ³ /s)	LECTURA DE MIRA (m)	CAUDAL ESTACION DE CONTROL KM 0 + 200 (m ³ /s)	LECTURA DE MIRA (m)	CAUDAL ESTACION DE CONTROL KM 0 + 200 (m ³ /s)	LECTURA DE MIRA (m)	CAUDAL ESTACION DE CONTROL KM 0 + 200 (m ³ /s)	LECTURA DE MIRA (m)	CAUDAL ESTACION DE CONTROL KM 0 + 200 (m ³ /s)
1.00	0.094	1.51	0.383	1.98	0.954	2.45	1.955	2.92	3.531	3.39	5.837	3.86	9.038
1.01	0.098	1.52	0.392	1.99	0.970	2.46	1.982	2.93	3.572	3.40	5.895	3.87	9.117
1.02	0.103	1.53	0.400	2.00	0.987	2.47	2.009	2.94	3.613	3.41	5.954	3.88	9.197
1.03	0.107	1.54	0.409	2.01	1.004	2.48	2.037	2.95	3.654	3.42	6.013	3.89	9.277
1.05	0.111	1.55	0.418	2.02	1.021	2.49	2.065	2.96	3.696	3.43	6.072	3.90	9.358
1.06	0.116	1.56	0.427	2.03	1.038	2.50	2.093	2.97	3.739	3.44	6.132	3.91	9.439
1.07	0.121	1.57	0.437	2.04	1.055	2.51	2.121	2.98	3.781	3.45	6.192	3.92	9.520
1.08	0.125	1.58	0.446	2.05	1.073	2.52	2.150	2.99	3.824	3.46	6.253	3.93	9.602
1.10	0.130	1.59	0.456	2.06	1.090	2.53	2.179	3.00	3.867	3.47	6.314	3.94	9.685
1.11	0.135	1.60	0.466	2.07	1.108	2.54	2.208	3.01	3.911	3.48	6.375	3.95	9.768
1.12	0.140	1.61	0.475	2.08	1.126	2.55	2.237	3.02	3.955	3.49	6.437	3.96	9.851
1.13	0.145	1.62	0.485	2.09	1.145	2.56	2.267	3.03	3.999	3.50	6.499	3.97	9.935
1.14	0.150	1.63	0.496	2.10	1.163	2.57	2.297	3.04	4.044	3.51	6.562	3.98	10.020
1.16	0.156	1.64	0.506	2.11	1.182	2.58	2.327	3.05	4.089	3.52	6.625	3.99	10.105
1.17	0.161	1.65	0.516	2.12	1.201	2.59	2.357	3.06	4.134	3.53	6.689	4.00	10.191
1.18	0.166	1.66	0.527	2.13	1.220	2.60	2.388	3.07	4.180	3.54	6.753	4.01	10.277
1.19	0.172	1.67	0.538	2.14	1.240	2.61	2.419	3.08	4.226	3.55	6.818	4.02	10.363
1.20	0.178	1.68	0.549	2.15	1.259	2.62	2.451	3.09	4.272	3.56	6.882	4.03	10.450
1.21	0.183	1.69	0.560	2.16	1.279	2.63	2.482	3.10	4.319	3.57	6.948	4.04	10.538
1.22	0.189	1.70	0.571	2.17	1.299	2.64	2.514	3.11	4.366	3.58	7.014	4.05	10.626
1.24	0.195	1.71	0.582	2.18	1.319	2.65	2.547	3.12	4.413	3.59	7.080	4.06	10.715
1.25	0.201	1.72	0.594	2.19	1.340	2.66	2.579	3.13	4.461	3.60	7.146	4.07	10.804
1.26	0.207	1.73	0.606	2.20	1.361	2.67	2.612	3.14	4.509	3.61	7.213	4.08	10.893
1.27	0.213	1.74	0.617	2.21	1.382	2.68	2.645	3.15	4.558	3.62	7.281	4.09	10.984
1.28	0.219	1.75	0.630	2.22	1.403	2.69	2.678	3.16	4.607	3.63	7.349	4.10	11.074
1.29	0.226	1.76	0.642	2.23	1.424	2.70	2.712	3.17	4.656	3.64	7.417	4.11	11.165
1.30	0.232	1.77	0.654	2.24	1.446	2.71	2.746	3.18	4.706	3.65	7.486	4.12	11.257
1.31	0.239	1.78	0.667	2.25	1.468	2.72	2.780	3.19	4.756	3.66	7.555	4.13	11.350
1.32	0.245	1.79	0.679	2.26	1.490	2.73	2.815	3.20	4.806	3.67	7.625	4.14	11.442
1.33	0.252	1.80	0.692	2.27	1.512	2.74	2.850	3.21	4.857	3.68	7.695	4.15	11.536
1.34	0.259	1.81	0.705	2.28	1.535	2.75	2.885	3.22	4.908	3.69	7.766	4.16	11.630
1.35	0.265	1.82	0.718	2.29	1.557	2.76	2.920	3.23	4.960	3.70	7.837	4.17	11.724
1.36	0.269	1.83	0.732	2.30	1.580	2.77	2.956	3.24	5.012	3.71	7.909	4.18	11.819
1.37	0.276	1.84	0.745	2.31	1.604	2.78	2.992	3.25	5.064	3.72	7.981	4.19	11.914
1.38	0.283	1.85	0.759	2.32	1.627	2.79	3.029	3.26	5.117	3.73	8.053	4.20	12.011
1.39	0.290	1.86	0.773	2.33	1.651	2.80	3.065	3.27	5.170	3.74	8.126	4.21	12.107
1.40	0.297	1.87	0.787	2.34	1.675	2.81	3.102	3.28	5.223	3.75	8.200	4.22	12.204
1.41	0.304	1.88	0.801	2.35	1.699	2.82	3.140	3.29	5.277	3.76	8.274	4.23	12.302
1.42	0.311	1.89	0.816	2.36	1.724	2.83	3.177	3.30	5.331	3.77	8.348	4.24	12.400
1.43	0.319	1.90	0.830	2.37	1.748	2.84	3.215	3.31	5.386	3.78	8.423	4.25	12.499
1.44	0.326	1.91	0.845	2.38	1.773	2.85	3.254	3.32	5.441	3.79	8.498	4.26	12.598
1.45	0.334	1.92	0.860	2.39	1.798	2.86	3.292	3.33	5.496	3.80	8.574	4.27	12.698
1.46	0.342	1.93	0.875	2.40	1.824	2.87	3.331	3.34	5.552	3.81	8.650	4.28	12.799
1.47	0.350	1.94	0.891	2.41	1.850	2.88	3.370	3.35	5.608	3.82	8.727	4.29	12.900
1.48	0.358	1.95	0.906	2.42	1.876	2.89	3.410	3.36	5.665	3.83	8.804	4.30	13.001
1.49	0.366	1.96	0.922	2.43	1.902	2.90	3.450	3.37	5.722	3.84	8.881	4.31	13.103
1.50	0.375	1.97	0.938	2.44	1.928	2.91	3.490	3.38	5.779	3.85	8.960	4.32	13.206