



**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA ISRAEL**  
**ESCUELA DE POSGRADOS “ESPOG”**  
**MAESTRÍA EN**  
**ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN**  
*Resolución: RPC-SO-09-No.265-2021*

**PROYECTO DE TITULACIÓN EN OPCIÓN AL GRADO DE MAGISTER**

<b>Título del proyecto:</b>
<i>Sistema inteligente basado en redes neuronales y protocolo MQTT para predicción de desgaste en turbinas Pelton.</i>
<b>Línea de Investigación:</b>
<i>Automatización y control de procesos con aplicaciones en la industria</i>
<b>Campo amplio de conocimiento:</b>
<i>Ingeniería, industria y construcción</i>
<b>Autor/a:</b>
<b>Mónica Isabel Reino Cárdenas</b>
<b>Tutor/a:</b>
<i>Wilmer Fabián Albarracín Guarochico</i>

Quito – Ecuador  
2022

## APROBACIÓN DEL TUTOR



Yo, WILMER FABIÁN ALBARRACÍN GUAROCHICO con C.I: 1713341152 en mi calidad de Tutor del proyecto de investigación titulado: “Sistema inteligente basado en redes neuronales y protocolo MQTT para predicción de desgaste en turbinas Pelton”.

Elaborado por: Mónica Isabel Reino Cárdenas, de C.I: 1805012331, estudiante de la Maestría: de Electrónica y Automatización, de la **UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA ISRAEL (UISRAEL)**, como parte de los requisitos sustanciales con fines de obtener el Título de Magister, me permito declarar que luego de haber orientado, analizado y revisado el trabajo de titulación, lo apruebo en todas sus partes.

Quito D.M., 30 de septiembre de 2022

---

**Firma**

## DECLARACIÓN DE AUTORIZACIÓN POR PARTE DEL ESTUDIANTE



Yo, Mónica Isabel Reino Cárdenas con C.I: 1805012331, autor/a del proyecto de titulación denominado: “Sistema inteligente basado en redes neuronales y protocolo MQTT para predicción de desgaste en turbinas Pelton”. Previo a la obtención del título de Magister en Electrónica, mención Automatización.

1. Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las instituciones de educación superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar el respectivo trabajo de titulación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.
2. Manifiesto mi voluntad de ceder a la Universidad Tecnológica Israel los derechos patrimoniales consagrados en la Ley de Propiedad Intelectual del Ecuador, artículos 4, 5 y 6, en calidad de autor@ del trabajo de titulación, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente. En concordancia suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital como parte del acervo bibliográfico de la Universidad Tecnológica Israel.
3. Autorizo a la SENESCYT a tener una copia del referido trabajo de titulación, con el propósito de generar un repositorio que democratice la información, respetando las políticas de prosperidad intelectual vigentes.

Quito D.M., 19 de septiembre de 2021

**Firma**

## Tabla de contenidos

APROBACIÓN DEL TUTOR	2
DECLARACIÓN DE AUTORIZACIÓN POR PARTE DEL ESTUDIANTE	3
INFORMACIÓN GENERAL	1
Contextualización del tema	1
Problema de investigación	2
Objetivo general	3
Objetivos específicos	3
Vinculación con la sociedad y beneficiarios directos:	4
CAPÍTULO I: DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO	5
1.1. Contextualización general del estado del arte	5
1.2. Proceso investigativo metodológico	7
CAPÍTULO II: PROPUESTA	8
2.1 Fundamentos teóricos aplicados	8
Sistemas inteligentes	8
Inteligencia artificial	8
Redes neuronales	9
Cloud Computing	10
MQTT	10
Brokers.	10
Centrales de Generación Hidroeléctrica	12
Turbinas	12
Turbina tipo Pelton	13
Características del rodete	14
Método de medición de desgaste de cangilon	16
Calidad de agua en un afluente	17
Turbidez	18
Sensores de turbidez	18
2.2 Descripción de la propuesta	19
2.3 Validación de la propuesta	27
2.4 Matriz de articulación de la propuesta	31
2.5 Análisis de resultados. Presentación y discusión.	33
CONCLUSIONES	37
RECOMENDACIONES	39

BIBLIOGRAFÍA	40
Referencias	40
ANEXOS	42

## Índice de tablas

Tabla 1. Valores de turbidez promedio en los meses de invierno.....	19
Tabla 2. Valores de muestreo de turbidez basado en la concentración de sedimentos disueltos en el agua.....	20
Tabla 3 Elementos necesarios para el procesamiento de datos y adquisición de datos:.....	24
Tabla 4 Descripción de perfil de validadores .....	28
Tabla 5 Tabla de ponderaciones del evaluador Ing. Jorge Paredes.....	29
Tabla 6 Tabla de ponderaciones del evaluador Ing. Juan Navas.....	29
Tabla 7 Tabla de ponderaciones del evaluador Ing. Benjamín Araujo.....	30
Tabla 8 Matriz de articulación.....	31
Tabla 9 Valores de muestreo de desgaste de cangilones para entrenar red neuronal. ....	33
Tabla 10 Valores de error luego de entrenamiento de red neuronal.....	34
Tabla 11 Valores de resultantes de la red neuronal. ....	34
Tabla 12 Valores de resultantes de las pruebas de funcionamiento.....	36

## Índice de figuras

Figura 1 Elementos de una red neuronal.....	9
Figura 2 Esquema general del Cloud Computing.....	10
Figura 3 Comparación de brokers y características.....	11
Figura 4 Esquema general de Mqtt utilizado a través de Http.....	11
Figura 5 Descripción gráfica de QoS nivel 2.....	11
Figura 6 Rueda Pelton.....	13
Figura 7 Turbina Francis.....	13
Figura 8 Turbina Kaplan.....	13
Figura 9 Rueda Pelton con cangilones.....	14
Figura 10 Vistas de cangilones, diseño estándar.....	14
Figura 11 Distribución de presiones en el cangilón dependiendo el ángulo de impacto del chorro de agua.....	15
Figura 12 Mecanismo de desgaste de cangilones.....	16
Figura 13 Plantilla para medición de cangilones.....	16
Figura 14 Diseño de plantilla para medición de cangilones.....	16
Figura 15 Personal técnico midiendo cangilones.....	17
Figura 16 Medidor de dureza de materiales Digivess.....	17
Figura 17 Sensor de turbidez de agua y controlador.....	18
Figura 18 Relación turbidez vs concentración.....	20
Figura 19 Agua limpia tomada del río Verde Chico.....	21
Figura 20 Diagrama de flujo del sistema de pronóstico de desgaste de cangilones de turbinas tipo Pelton.....	22
Figura 21 Proceso del sistema de pronóstico de desgaste de cangilones de turbinas tipo Pelton.....	23
Figura 22 Proceso gráfico del sistema de pronóstico de desgaste de cangilones de turbinas tipo Pelton.....	23
Figura 23 Programación de Node Red para presenta datos en Dash board.....	25
Figura 24 Configuración de servidor en Node Red.....	25
Figura 25 Entrenamiento de red neuronal.....	35
Figura 26 Entrenamiento completo de red neuronal con errores mínimos.....	35
Figura 27 Valor de desgaste de turbina 1 en Dashboard de NodeRed.....	36
Figura 28 Valor de desgaste de turbina 2 en Dashboard de NodeRed.....	36
Figura 29 Plantilla de cangilón proporcionada por el fabricante.....	37

Figura 30 Entorno gráfico Raspbian. ....	43
Figura 31 Inicialización de servidor NodeRed. ....	43
Figura 32 Configuración de IP al programa del sistema inteligente. ....	44
Figura 33 Desgaste de cangilón por partículas pequeñas en la zona tricúspide. ....	46



## INFORMACIÓN GENERAL

### Contextualización del tema

Debido al avance socio-económico de los países, los habitantes incrementan el consumo energético, lo que hace necesario la implementación de otras fuentes que suministren energía eléctrica, y también se requiere mantener una buena eficiencia y disponibilidad de las centrales de generación ya implementadas. Para mantener funcionales las centrales energéticas se debe implementar varias alternativas o procesos de reparación para componentes considerados críticos dentro del proceso de generación, estos métodos contribuyen con un incremento en la vida útil de operación y una mejora en la disponibilidad de generación, también es posible evidenciar una disminución en los tiempos muertos por mantenimiento y reparación de los mismos.

La importancia de la generación energética dentro del país se manifiesta en los datos adquiridos del Panorama Eléctrico 2022, dónde están los datos de producción de energía nacional renovable y no renovable en el año 2021, que es de 2690.60 GWh, la producción hidráulica ocupa un 62.24% de participación con un valor de energía de 1941.33 GWh. (Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables, 2022)

Entonces se debe resaltar la importancia de realizar mantenimientos oportunos a las centrales de generación ya instaladas, para conservar la eficiencia de las máquinas y brindar un buen servicio energético al país mediante una potencia firme que garantice a los usuarios energía ininterrumpida durante las 24h.

En el caso de las centrales de generación hidráulica que son las que ocupan mayor participación dentro del panorama energético del país, se requiere mantener en buen estado de funcionamiento a la turbina, debido a que esta máquina es el corazón de una planta de generación, al tener un accionamiento hidráulico, netamente mecánico, existe desgaste en las piezas móviles. Un ejemplo de desgaste en las turbinas es: el desgaste de los álabes en turbinas de tipo Francis y el desgaste de los cangilones en turbinas de tipo Pelton. Este deterioro viene dado por la composición de los materiales con los que está elaborado el rodete frente al choque de agua para producir el movimiento. Mientras el agua incida con mayor fuerza y a más de eso contenga partículas sólidas suspendidas, provocará un mayor daño en estas partes de la turbina, a pesar de que los materiales con los que estén elaboradas estas piezas posean características de dureza adecuadas, el continuo choque de agua provoca a largo plazo erosión irreversible.

Para realizar un plan de mantenimiento integral a turbinas, se hace un énfasis especial al control de desgaste de los rodetes e inyectores, ya que son componentes primordiales de una turbina ya sea Pelton o Francis, para garantizar la generación de la energía hacia el Sistema Nacional Interconectado del país. (Tamariz & Belisario, 1990)

Se debe analizar cualitativamente los costos que genera el proceso de desgaste del equipamiento a una central de generación, ya que se debe recuperar a sus escenarios iniciales para producir energía en forma eficiente, si las reparaciones no son realizadas de manera oportuna, pueden originar mayores daños para la Central y el Sistema Nacional Interconectado. (Torres, 2018)

Se debe organizar adecuadamente el mantenimiento preventivo y mantenimiento correctivo con el fin de mejorar la disponibilidad de todos los equipos generadores. Minimizar los costos de mantenimiento siempre es un reto, debido a que se deben tener controles más precisos y procedimientos más estandarizados de tal manera que concuerde con la exigencia para que la industria esté orientada a perfeccionar todos sus aspectos, tanto de costos, como calidad, cambio oportuno con repuestos adecuados. (Jiménez, 1990)

Específicamente se va a analizar el desgaste que poseen las turbinas de la central Hidroeléctrica Río Verde Chico, este proyecto está situado en la provincia de Tungurahua, cantón Baños de Agua Santa, en un área aportante de 222km<sup>2</sup> de una subcuenca de 30 Km del río Pastaza, el río inicia en las ramificaciones de los Llanganatis y descarga con el nombre de río Muyo, frente a la parroquia Ulba, antes de la captación de la Central Hidroeléctrica Agoyán. La central hidroeléctrica posee un caudal de diseño de 5.2 m<sup>3</sup>/seg. y una potencia instalada de 10 MW.

En la central hidroeléctrica trabajan 12 Operadores técnicos encargados de la operación, monitoreo y mantenimiento general de la planta, personal administrativo, contable y gerencial, a más de eso de una persona encargada de la Coordinación de la Producción y el mantenimiento de la planta. Este proyecto directamente será un aporte hacia el área de mantenimiento, brindando apoyo seguro al personal que se encargad de esas actividades.

### **Problema de investigación**

Para determinar el estado de desgaste de las piezas mecánicas de las turbinas de generación eléctrica de tipo Pelton, la central hidroeléctrica Río Verde Chico destina personal técnico de mantenimiento que ingrese dentro de la turbina que es el lugar donde se encuentra el elemento giratorio mediante chorro de agua denominado rodete, el rodete tiene cucharas metálicas

donde choca el agua para generar el movimiento, denominadas cangilones. La dificultad radica precisamente en la incomodidad con la que se realiza este trabajo de revisión continua de desgaste del elemento. A más de eso la central de generación no dedica mucho tiempo a esta actividad debido a que al apagar el generador conlleva pérdidas económicas.

Es por este motivo que sería de mucha ayuda determinar el estado de desgaste de este componente tan importante, sin necesidad de una intervención física del personal técnico, para que no sea necesario apagar la máquina, pero si se pueda determinar con exactitud el estado de desgaste de la turbina y mediante este dato importante programar ya sean mantenimientos preventivos de reconstrucción de la pieza o mantenimientos correctivos de cambio total del componente.

El desgaste de los cangilones en turbinas Pelton ocasiona la pérdida de eficiencia del generador de energía, y pérdidas económicas. De igual manera el método de medición de desgaste de los cangilones es sumamente laborioso y de difícil acceso, para realizar esta actividad el generador debe estar apagado, lo que produce de igual manera pérdidas económicas. Determinar el desgaste de los cangilones de los rodets de las turbinas Pelton es indispensable para programar una reparación oportuna, o un cambio total, debido a que esta pieza es primordial para el correcto funcionamiento de la turbina.

Es por ese motivo que se plantea determinar el desgaste de los cangilones utilizando inteligencia artificial, y presentar los datos de manera clara haciendo uso del protocolo mqtt para uso de las personas encargadas del análisis de dichos datos. De esta manera facilitar el pronóstico de cambio o reparación de la pieza y disminuir considerable los tiempos de parada de la generación de la planta debido a trabajos relacionados a la medición de desgaste de las turbinas. Se contribuiría también con la seguridad ocupacional del personal encargado de realizar esa laboriosa acción.

### **Objetivo general**

Desarrollar un sistema inteligente basado en redes neuronales y protocolo MQTT para predicción de desgaste en turbinas Pelton.

### **Objetivos específicos**

- Estudiar los métodos actuales mediante los cuales se recopila la información pertinente del desgaste de los cangilones de las turbinas Pelton de la central hidroeléctrica Río Verde Chico.

- Determinar los requerimientos técnicos necesarios para el sistema inteligente de predicción del desgaste de cangilones de turbinas Pelton mediante el protocolo Mqtt y redes neuronales para la central hidroeléctrica Río Verde Chico.
- Entrenar a la red neuronal capaz de determinar el desgaste de los cangilones de las turbinas Pelton en la central hidroeléctrica Río Verde Chico.
- Diseñar el prototipo para el sistema inteligente de predicción del desgaste de cangilones de turbinas Pelton mediante el protocolo Mqtt y redes neuronales para la central hidroeléctrica Río Verde Chico.

#### **Vinculación con la sociedad y beneficiarios directos:**

Este proyecto tiene un aporte tecnológico directo con la central hidroeléctrica Río Verde Chico, debido a que está configurado en base a las características propias del afluente que la alimenta, con el parámetro más importante de turbidez del agua, y determina el desgaste de las turbinas que posee la central a una constante exposición e impacto de partículas suspendidas en el agua de dicho río. Este proyecto puede replicarse para otras centrales de generación hidroeléctrica simplemente cambiando el valor de turbidez de agua determinado en campo del río que alimenta a dichas centrales, de esta manera se podrá determinar sin ningún problema el desgaste existente, cabe recalcar que solo se podrá determinar el desgaste de cangilones de turbinas de tipo Pelton.

Para realizar la medición del desgaste de los cangilones de las turbinas Pelton, el personal técnico debe ingresar dentro de las mismas, utilizando un equipo especial medidor de espesores, y calibrador, de esta manera se toman las medidas en cada uno de los cangilones, y este proceso tiene una duración de 8 horas por turbina. Este proceso involucra parar la planta hidroeléctrica de 10MW/h durante 16 horas, este proceso se lo realiza cada 3 meses y reduce la disponibilidad de la planta en un 2.22%, lo que significa pérdidas económicas de aproximadamente 12mil dólares americanos, en el caso de que no se determine adecuadamente el desgaste de las turbinas, el cambio de las piezas representa un gasto de alrededor de los 400 mil dólares americanos.

El beneficio del proyecto radica en que para determinar el desgaste de las turbinas no se requerirá parar la planta, que se traduce a una reducción de pérdidas económicas, de igual manera, el personal técnico no se expondrá a condiciones inseguras de trabajo para medir el desgaste de las turbinas, y se determinará de manera oportuna las condiciones de la pieza mecánica para programar mantenimientos correctivos o cambios definitivos del elemento.

## CAPÍTULO I: DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

### 1.1. Contextualización general del estado del arte

Las turbinas; durante su funcionamiento, pierden eficiencia y disminuye su rendimiento por el desgaste de los canchales debido al exceso de sedimento que contiene el agua con las que trabajan. Es posible mapear las variables de entrada y salida del sistema utilizando Redes Neuronales Artificiales (RNA), en particular, para estimar el desgaste y producir resultados que se acercan mucho al comportamiento real del sistema.

El beneficio de emplear técnicas de RNA se basa en que no se necesita conocer el proceso del sistema a detalle, es suficiente con elaborar un mapeo de las variables involucradas en la entrada y salida del sistema. Este proceso representa la etapa de aprendizaje en la que el esquema implementado es capaz de “aprender” cada posible variación del sistema para poder tomar las decisiones correctivas en base a las especificaciones técnicas del fabricante del elemento.

Para el desarrollo del trabajo de titulación, se ha considerado realizar una investigación de trabajos similares en cuanto a objetivos y tecnologías, para de esa manera estimar la factibilidad de aplicabilidad dentro de las empresas de generación hidroeléctrica, en base a artículos científicos o trabajos de grado de diferentes universidades se determinará la mejor metodología que se ajuste a las necesidades de este proyecto.

Entre los proyectos que han servido de soporte para sustentar este trabajo de investigación se puede citar los siguientes:

Para optimizar la eficiencia y la fiabilidad del motor a diésel Marino, y poder detectar y diagnosticar fallos se ha utilizado una herramienta de diagnóstico basada en datos históricos mediante métodos estadísticos de Inteligencia Artificial. El proyecto “SISTEMA DE DIAGNÓSTICO DE MOTOR DIESEL MARINO BASADO EN MODELO TERMODINÁMICO Y DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL”, permite tomar decisiones apropiadas para la operación y para el mantenimiento adecuado que permita mejorar el tiempo de vida de este equipo. (Pagán Rubio, 2017)

Mejorar todas las experiencias de Mantenimiento y Operación mediante la mejora de modelos modernos de confiabilidad para la detección de fallos en base a datos que abarquen las condiciones del entorno y operacionales en los parques eólicos centralizados en un sistema de Inteligencia Artificial es el objetivo del trabajo titulado “Modelos de confiabilidad y algoritmos de detección de fallas para aerogeneradores”, los datos son procedentes tanto de sistemas

SCADA como CMS para la aplicación de nuevos métodos basados en algoritmos de localización de fallos de los aerogeneradores. (Reder, 2018)

Determinar métodos de inteligencia artificial (IA) como medida profiláctica para tratar el problema de los fallos prematuros en sistemas de turbinas eólicas de gran importancia y es el objetivo del proyecto titulado “Monitoreo de condición en las turbinas de viento del parque eólico Gibara II aplicando métodos de la industria 4.0”. Para ello se ha realizado monitoreo constante de las condiciones de funcionamiento de los elementos involucrados en el sistema aplicando métodos de la Industria 4.0. Uno de los mayores inconvenientes en la realización de este proyecto fue el tratamiento del volumen de datos que se obtuvo del monitoreo, pero gracias a los métodos de IA como redes neuronales (RNA), los autores lograron declarar modelos matemáticos que permitieron perfeccionar, pronosticar, transformar y validar, patrones de procedimientos técnicos. (Trinchet, Arbella, & Mora, 2021)

Presentar una aplicación basada en machine learning para el mantenimiento predictivo en una bomba centrífuga simulada, fue el resultado del proyecto titulado “Implementación de mantenimiento predictivo para una bomba centrífuga utilizando machine learning”, también se plantea una estrategia de la manera de utilizar la inteligencia artificial como herramienta o técnica para el mantenimiento. Se recopilan los datos de variables dinámicas en base a simulaciones discretas de la bomba centrífuga para un sistema de abastecimiento de agua común, como: torque, presión y caudal, y se los procesan para obtener los datos referentes a los mantenimientos preventivos. (Soto Zabala, 2021)

Presentar una estrategia de diagnóstico para precisar el estado técnico de turbinas de una planta de congelación, de igual manera estimar el rendimiento de una turbina utilizando como indicador el consumo de vapor utilizando técnicas de Inteligencia Artificial es el principal objetivo del proyecto titulado “Diagnóstico del mantenimiento centrado en la eficiencia de turbinas de contrapresión aplicando redes neuronales artificiales”, para cumplir con este objetivo, en el trabajo plantean técnicos de mapeo de variables de entrada y salida del sistema en cuestión y de esa manera obtener resultados similares al comportamiento real del sistema. (Gómez, Armas, Monteagudo, & Ramos, 2009)

## **1.2. Proceso investigativo metodológico**

Se utilizó la investigación aplicada para el desarrollo de éste proyecto, debido a que se analizaron los métodos mediante los cuales se recopila la información pertinente del desgaste de los canjilones de las turbinas de la Central Hidroeléctrica Río Verde Chico y a la vez se comprobó los requerimientos técnicos para optimizar el proceso de medición de desgaste de las turbinas que permiten optimar el rendimiento de la planta.

A la vez se utilizó una investigación de carácter bibliográfico que fue una herramienta crucial para la recopilación de información oportuna para la elaboración del sistema inteligente de predicción del desgaste de cangilones de turbinas Pelton mediante el protocolo Mqtt y redes neuronales en la Central Hidroeléctrica Río Verde Chico, para esto se examinaron archivos de diferentes tipos como: artículos de revistas, divulgaciones científicas documentadas y proyectos de investigación de repositorios de diferentes Universidades, principalmente de la Universidad Tecnológica Israel.

También, se utilizó una investigación de campo, para determinar las condiciones actuales de funcionamiento y recopilación de datos de desgaste de los canjilones de las turbinas de la Central Hidroeléctrica Río Verde Chico.

El enfoque de investigación que se utilizó es el enfoque cuantitativo, debido a que se utilizaron datos medidos de pruebas ya experimentadas, y en base a esos datos recopilados por sensores y personal capacitado, se implementó un sistema capaz de procesarlos y procesar nuevos datos recopilados en tiempo real para de esa manera proporcionarlos como salida, fueron ser capaces de reflejar el mismo comportamiento que los ya obtenidos de pruebas anteriores.

## CAPÍTULO II: PROPUESTA

### 2.1 Fundamentos teóricos aplicados

#### **Sistemas inteligentes**

La Industria 4.0 pretende convertir a las empresas en entidades inteligentes que maximicen de forma eficiente y eficaz los resultados comerciales. La automatización de los procesos empresariales o transformación digital, uno de los pilares u objetivos de la industria inteligente, se basa en la combinación de las nuevas tecnologías en las cadenas de valor de las organizaciones a través de sistemas inteligentes, mejorando así el rendimiento. (La Universidad en Internet UNIR, 2022)

El mundo físico y el lógico o virtual pueden fusionarse gracias a la aplicación de tecnologías como Big Data, IoT, 5G, inteligencia artificial, robots, visión sintética, realidad mejorada, etc. por parte de los sistemas inteligentes. Los numerosos equipos de producción y la maquinaria se interconectan con la cadena de suministro, permitiendo que el aprendizaje autónomo y la inteligencia artificial configuren y optimicen automáticamente los procesos de producción para alcanzar el mayor nivel de automatización de la cuarta revolución industrial. (La Universidad en Internet UNIR, 2022)

#### **Inteligencia artificial**

De acuerdo con Rouhiainen. La inteligencia artificial (IA) es la capacidad de las máquinas de emplear algoritmos, aprender de los datos y aplicar lo aprendido para tomar decisiones comparables a las de un ser humano. Sin embargo, las máquinas dotadas de inteligencia artificial pueden procesar enormes cantidades de datos a la vez sin necesidad de hacer una pausa. Los errores cometidos por los ordenadores que ejecutan las mismas actividades que los humanos son también notablemente menos frecuentes, ya que sólo utilizan funciones lógicas para la toma de decisiones y excluyen el componente emocional que hace únicos a los humanos. (Rouhiainen, 2018)

La IA se puede aplicar en casi todas las situaciones.

- El reconocimiento, la clasificación y el etiquetado de imágenes estáticas son herramientas útiles en muchos sectores de las industrias.
- El rendimiento de las estrategias en cuanto a mejoras comercial: se ha utilizado en el sector financiero.
- El procesamiento eficaz y escalable de los datos de pacientes mejorará de manera



más efectiva la atención médica.

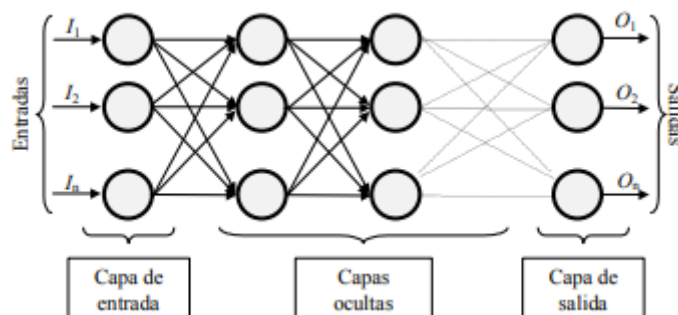
- Otra tecnología que tiene una amplia aplicación en varios sectores industriales es el mantenimiento predictivo.
- Aunque la detección y clasificación de objetos tiene aplicaciones en el campo de los vehículos autónomos, también tiene potencial en una amplia gama de otras industrias.
- Distribución de contenido en las redes sociales: se trata principalmente de una táctica de marketing, pero también puede utilizarse para sensibilizar a las organizaciones sin ánimo de lucro o para difundir información rápidamente como servicio público.
- Es utilizada también como una herramienta para la protección contra amenazas de seguridad cibernética para los bancos y los sistemas que envían y reciben pagos en línea (Rouhiainen, 2018)

### Redes neuronales

Se define como un sistema computacional compuesto de elementos de origen simple que se inspira en modelos biológicos, los que son capaces de procesar información como respuesta a datos de entrada externos. (Matich, 2001)

El aprendizaje flexible, la auto organización, la tolerancia a los fallos, el funcionamiento en tiempo real y la sencillez de interacción con la tecnología existente son algunas de sus ventajas. (Matich, 2001)

Los elementos básicos que componen una red neuronal son los siguientes:



**Figura 1** Elementos de una red neuronal

Existen dos métodos de aprendizaje de las redes neuronales:

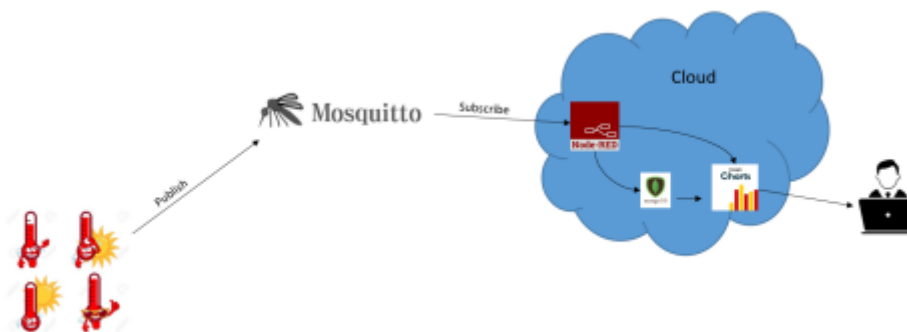
- Supervisado: Destaca porque se realiza en un entorno de entrenamiento bajo el control de un agente supervisor externo que evalúa y selecciona la respuesta que

debe dar la red ante los datos de entrada.

- No supervisado: Para ajustar los pesos de las conexiones neuronales, esta red debe reconocer los rasgos y correlaciones que se pueden encontrar entre los datos de entrada. (Matich, 2001)

### Cloud Computing

En IoT se desea un sistema de procesamiento en la nube. Podemos transferir datos y controles menores utilizando MQTT, pero se necesitan servidores y bases de datos para conseguir un sistema IoT completo. Algunos casos típicos de uso de MQTT implican la combinación de las herramientas Node-RED y MongoDB. La comunicación de datos se gestionaría mediante MQTT y, como se ha dicho anteriormente, después de que los datos llegaran al servidor, Node-RED los recogería y los almacenaría en MongoDB. Se pueden utilizar herramientas como Google Chart para evaluar los datos y mantener un control en tiempo real sobre ellos. (Martínez, 2017)



**Figura 2** Esquema general del Cloud Computing

### MQTT

Message Queue Telemetry Transport es un protocolo de código abierto diseñado y mejorado para redes y dispositivos con poco ancho de banda o inestables. Este protocolo de tránsito de mensajes de publicación/suscripción es sencillo de utilizar y excelente para conectar dispositivos a redes con un ancho de banda limitado. Con el uso de servicios de alta calidad, MQTT intenta reducir los requisitos de recursos de los dispositivos, al tiempo que pretende garantizar la seguridad y fiabilidad de la transmisión de información. MQTT utiliza TCP para comunicarse. (Martínez, 2017)

### Brokers.

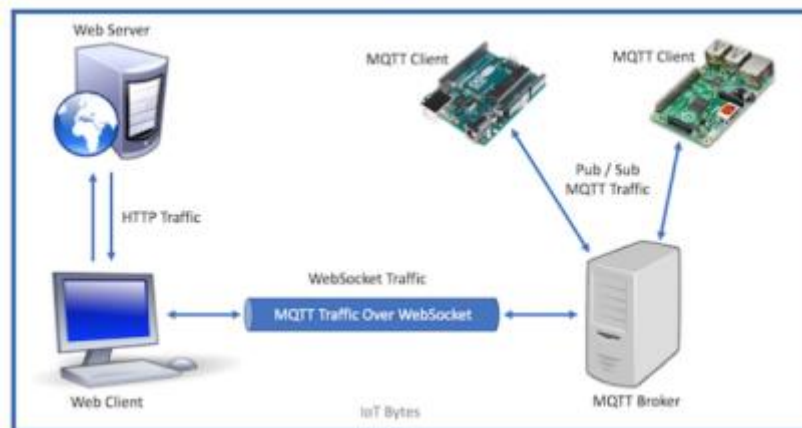
Recibir los mensajes de los clientes, procesarlos y reenviarlos a los suscriptores del tema son todas las responsabilidades del broker. La gestión de la red es otra de las tareas que realiza el broker. Los clientes envían periódicamente un paquete (PINGREQ) y esperan la respuesta del

broker para mantener el canal operativo (PINGRESP). En la siguiente tabla se enumeran los brokers que existen actualmente en el mercado junto con las ventajas que aportan al protocolo MQTT. (Martínez, 2017)

Broker	QoS0	QoS1	QoS2	Autenticación	Bridge	SSL	Clustering	WebSocket
Mosquitto	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X	✓
Mosca	✓	✓	X	✓	X	✓	X	✓
HiveMQ	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
ActiveMQ	✓	✓	✓	✓	X	✓	✓	✓
VerneMQ	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
JoramMQ	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

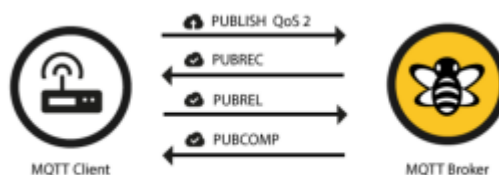
**Figura 3** Comparación de brokers y características.

MQTT Websocket fue desarrollado para que MQTT pueda ser utilizado a través de HTTP y con un cliente MQTT basado en el navegador. Esto es útil si necesita enviar datos a servidores u otros dispositivos no conectados a la red. (Martínez, 2017)



**Figura 4** Esquema general de Mqtt utilizado a través de Http.

Debido a la arquitectura "brokerizada" de los sistemas, los métodos sobre MQTT tienen un punto de débil: el broker. La disponibilidad del sistema es la disponibilidad del bróker, la cual es baja. (Martínez, 2017)



**Figura 5** Descripción gráfica de QoS nivel 2

## Centrales de Generación Hidroeléctrica

Un conjunto de equipos conocido como central hidroeléctrica permite convertir en energía eléctrica al agua en movimiento proveniente de los ríos. (Fundación ENDESA, 2021)

Las centrales se clasifican de acuerdo a los siguientes parámetros:

- Según altura de salto hidráulico:

**Centrales de alta presión.** - alturas de salto hidráulico  $\geq 200$  metros. Se utilizan turbinas tipo Pelton y Francis lentas para alturas menores. (Ramiro, 2011)

**Centrales de media presión.** – Su altura comprende valores entre 20 y 200 m. Se emplean turbinas de tipo Francis medias y tipo Francis rápidas para los saltos de menor altura, dentro de los límites. (Ramiro, 2011)

**Centrales de baja presión.** - Son aquellas con alturas inferiores a 20 m. Se usan turbinas tipo Francis extra-rápidas y turbinas Kaplan. (Ramiro, 2011)

- Según su régimen de flujo:

**De agua fluyente.-** son las que utilizan el caudal de una corriente instantánea para alimentar simultáneamente una turbina y un generador eléctrico. No tienen una instalación de almacenamiento ni un embalse. No son habituales porque la capacidad del caudal para mantener una presión constante y la capacidad de captación del agua son también necesarias para la producción de electricidad. (Fundación ENDESA, 2021)

**De embalse.-** utilizan infraestructura de diques que pueden ser artificiales o naturales para almacenar el fluido e ir regulándolo hacia las turbinas y si se dispone de reservas suficientes para generar energía durante todo el año. (Fundación ENDESA, 2021)

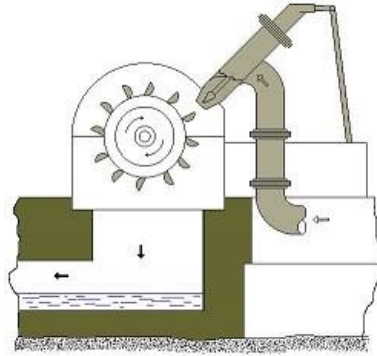
- Potencia generada: centrales de potencia si son mayores a 10MW, o pueden ser mini centrales cuando la potencia está entre 1 a 10 MW y micro centrales son aquellas con potencia generada menores a 1MW. (Ramiro, 2011)

## Turbinas

Las turbinas son máquinas eléctricas que tienen la capacidad de transformar la energía hidráulica en energía mecánica y mediante un acoplamiento en el eje de salida a un generador produce energía eléctrica.

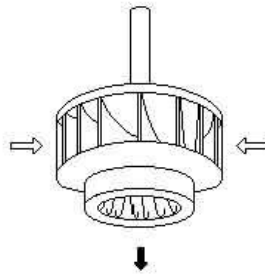
Existen tres variedades de turbinas:

- Rueda Pelton: se emplea para presiones elevadas lo que implica alturas de salto hidráulico considerables. (Fundación ENDESA, 2021)



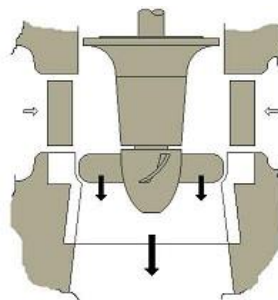
**Figura 6** Rueda Pelton

- Turbina Francis: son ideales para el uso con saltos hidráulicos de mediana altura su estructura mecánica permite que el agua entre en una dirección y salga en otra a 90º sin pérdidas de carácter hidrodinámico. (Fundación ENDESA, 2021)



**Figura 7** Turbina Francis

- Turbina Kaplan o de hélice: es ideal para el uso en lugares con saltos hidráulicos de pequeña altura. Este tipo de turbinas certifican buen rendimiento a bajas velocidades de rotación. (Fundación ENDESA, 2021)



**Figura 8** Turbina Kaplan

### **Turbina tipo Pelton**

La tubería forzada, el distribuidor y el rodete son los tres componentes que forman las turbinas Pelton, a menudo conocidas como turbinas de acción o de impulso.

Una válvula de aguja en el inyector controla el caudal y permite ajustarlo a la demanda eléctrica. La válvula de aguja está hecha para mantener virtualmente una velocidad constante en la máquina sincrónica,  $c_1$ , incluso cuando el caudal cambia.

### Características del rodete

La turbina Pelton es una rueda en forma de cucharas denominados cangilones, con un diseño característico, el chorro de agua que sale del inyector incide directamente sobre las cucharas, de tal forma que el choque del chorro se da en dirección tangencial al rodete, para incrementar la potencia de propulsión.

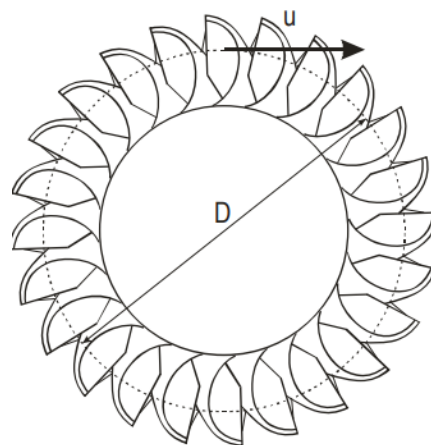


Figura 9 Rueda Pelton con cangilones

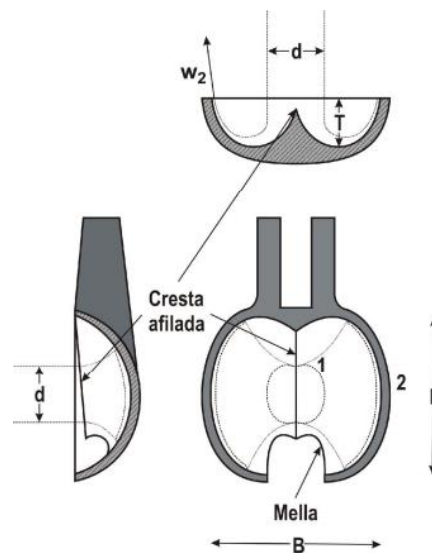
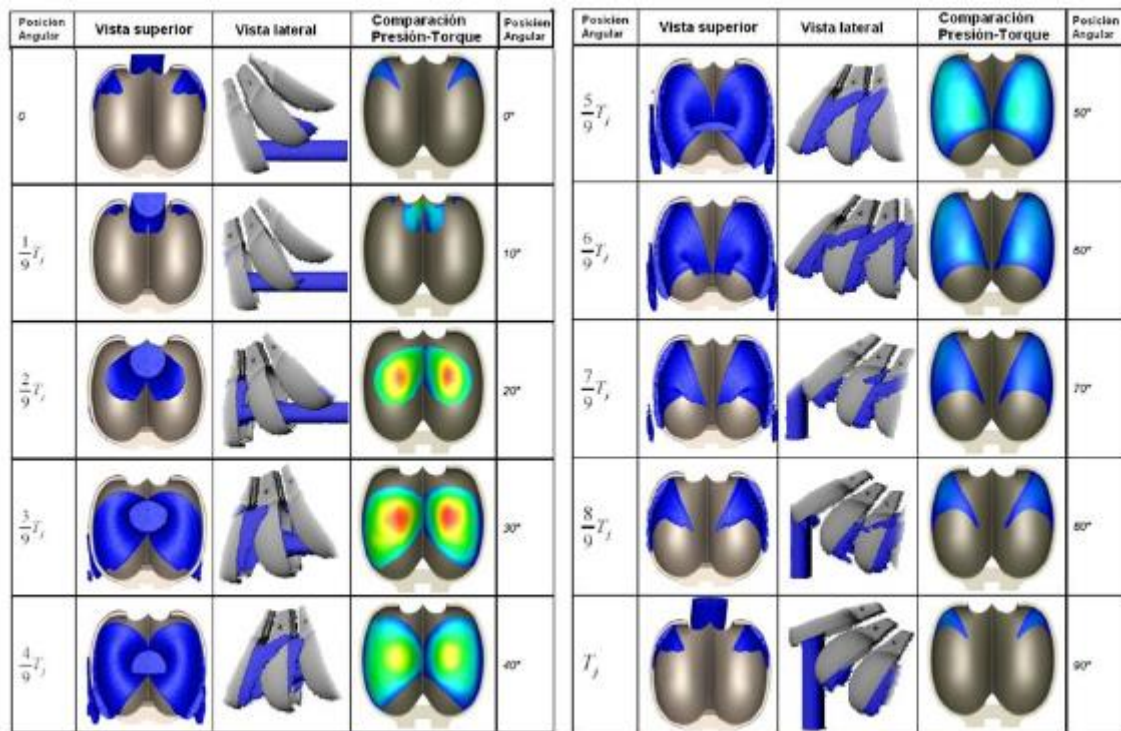


Figura 10 Vistas de cangilones, diseño estándar

Cuando el chorro incide perpendicularmente sobre la cuchara se obtiene el máximo aprovechamiento energético del fluido.

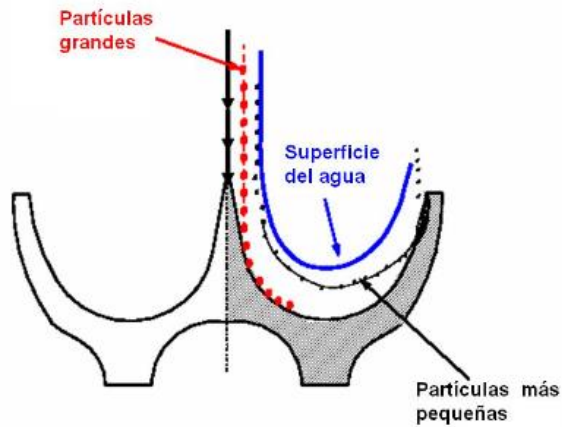
Se observa la distribución de presiones para diferentes puntos del cangilón en la siguiente figura, siendo más intensas en la zona interna, dado que en ese punto se presenta la mayor cantidad de energía cedida por el agua. (Baena, 2008)



**Figura 11** Distribución de presiones en el cangilón dependiendo el ángulo de impacto del chorro de agua.

También se puede apreciar con mayor detalle la zona en la que impacta el agua cuando el chorro tiene un ángulo de 90° respecto al rodete, este ángulo de incidencia es el ideal en cuanto a minimizar pérdidas y daños de la pieza mecánica.

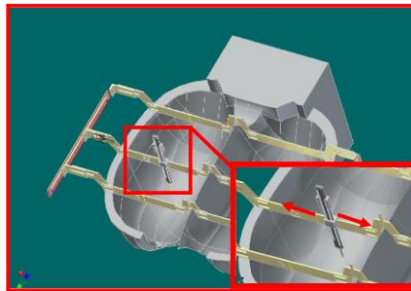
El efecto que las partículas disueltas en el fluido tienen sobre la superficie de los cangilones es lo que provoca los importantes daños que estos componentes mecánicos experimentan con el impacto de dichas partículas. Para entender cómo interactúan las partículas con el cangilón se proponen unas condiciones ideales de incidencia del chorro. En estas circunstancias, las partículas del fluido atraviesan la superficie con un ángulo descendente antes de cambiar bruscamente de dirección, en este cambio de dirección se determina el lugar que sufre mayor daño por abrasión. (Baena, 2008)



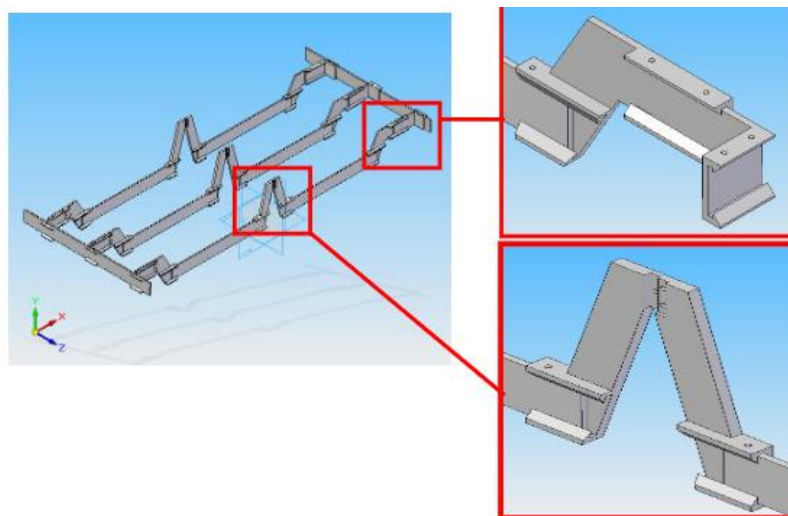
**Figura 12** Mecanismo de desgaste de cangilones

**Método de medición de desgaste de cangilon**

Existen plantillas que fueron creadas con la inventiva del personal técnico para calcular la cantidad de erosión sobre los cangilones. Se colocó una herramienta para medir las distancias de la estructura a la superficie del cangilón en puntos específicos de la pieza mecánica. (Baena, 2008)

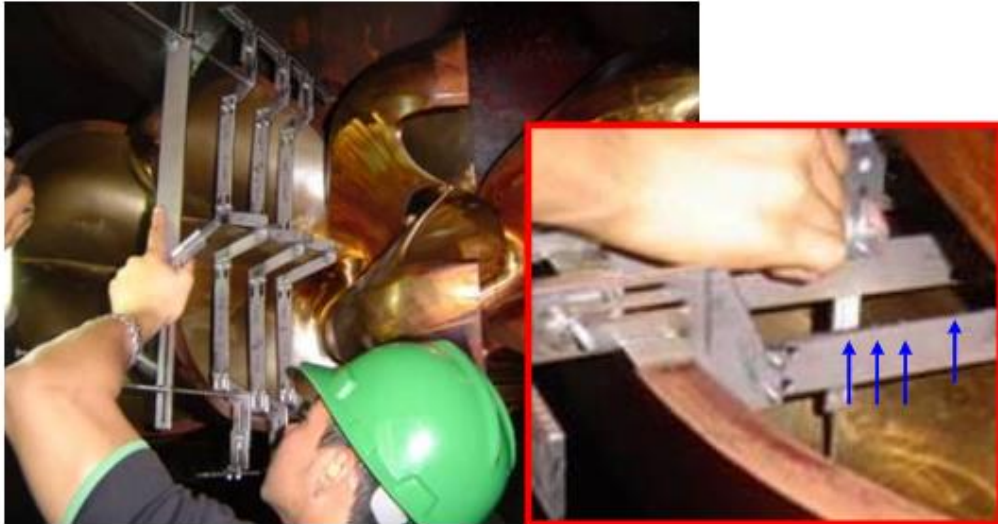


**Figura 13** Plantilla para medición de cangilones



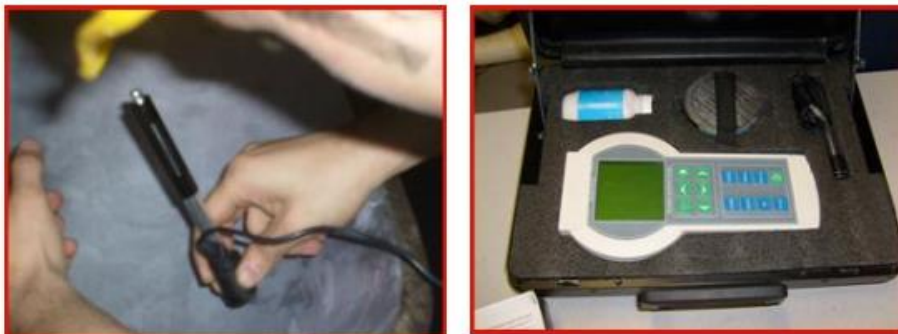
**Figura 14** Diseño de plantilla para medición de cangilones





**Figura 15** Personal técnico midiendo cangilones

Otro método de medición consiste en mediante un equipo electrónico, en este caso, durómetro portátil marca DIGIVESS, referencia DP 300, medir la dureza del material.



**Figura 16** Medidor de dureza de materiales Digivess

### **Calidad de agua en un afluente**

El contenido y el origen de los compuestos que pueden estar presentes en un río en un momento dado determinan su calidad. Algunos de estos elementos son de origen natural, pero otros son aportados a los ríos por las personas que utilizan como el mejor lugar para eliminar los residuos. (Carretero & Pozo, 2007)

El contenido de oxígeno disuelto, turbiedad, sólidos totales, coliformes fecales, variación de temperatura, pH, nitratos, fosfatos, y DBO5, y define los rangos de calidad del agua. (Carretero & Pozo, 2007) Dependiendo el uso que se le dé al líquido vital, se consideran medir y corregir los índices de calidad antes mencionados. Por ejemplo si es agua es para consumo humano, debe ser removida de todos los agentes contaminantes ya sean de origen natural o introducidos por el ser humano. En el caso de que el agua sea utilizada para la generación hidroeléctrica, los

parámetros más importantes a destacar son la turbiedad y los sólidos totales que posee el afluente, debido a que si el agua cuenta con partículas suspendidas, provocará desgaste por abrasión en la turbina de la máquina, esto se debe al impacto de las partículas por el movimiento del agua hacia el rodete de la turbina.

### **Turbidez**

La cantidad de partículas en suspensión que reducen la transparencia del agua se mide como turbidez. El agua parece más turbia y tiene una mayor turbidez porque hay más sólidos en suspensión en ella. Se cree que la turbidez es un signo fiable de la calidad del agua. (Induanalisis, Laboratorio Ambiental, 2019)

El calor del sol es absorbido por las partículas en suspensión, lo que hace que las aguas turbias se calienten y disminuyan el contenido de oxígeno del agua (el oxígeno se disipa más eficazmente en aguas más frías). Además, algunas especies no pueden desarrollarse en aguas demasiado calientes. Las partículas en suspensión dispersan la luz, reduciendo la actividad fotoquímica de plantas y algas y disminuyendo aún más la concentración de oxígeno. Los restos de partículas que se depositan en el fondo de los lagos poco profundos se asientan rápidamente, cubriendo y asfixiando los huevos de los peces y las larvas de los insectos, y rompiendo o dañando las agallas. (Induanalisis, Laboratorio Ambiental, 2019)

### **Sensores de turbidez**

La cantidad de sólidos suspendidos totales (SST) en el agua afecta a la forma en que el dispositivo mide la transmisión y la frecuencia de la luz, que puede utilizarse para detectar las partículas suspendidas en el líquido. El SST aumenta al mismo tiempo que la turbidez del líquido. El método de medición es mediante un haz de luz infrarroja que circula en los extremos del dispositivo, cuando la turbidez interrumpe este haz de luz o a medida que lo vaya atenuando, el sensor detecta el valor de partículas suspendidas en el agua, se denomina medición por transmitancia de luz. (I+D Electrónica, 2016)



**Figura 17** Sensor de turbidez de agua y controlador.

## 2.2 Descripción de la propuesta

Condiciones de funcionamiento: mediante el censado de la calidad del agua por medio de un sensor de turbidez, se determinará la cantidad de partículas suspendidas en el líquido, mediante este parámetro el sistema inteligente será capaz de determinar el desgaste del cangilón.

La velocidad de impacto del chorro de agua es constante y viene dada por la siguiente fórmula:  $Q = vA$ , donde  $Q$  es el caudal proveniente del inyector,  $v$  será la velocidad de impacto de agua contra el cangilón y  $A$  es el área transversal del inyector.

$$Q = vA$$

En épocas de alta concentración de sedimento en el agua, el caudal excede el caudal de diseño de la planta de generación hidroeléctrica, por lo que los inyectores permanecen abiertos a un 100%, brindando un área transversal total de apertura. Entonces la velocidad de impacto del chorro de agua al ser un valor constante, no forma parte de las variables del proceso, debido a que no influye en mayor medida en el cálculo de desgaste para este caso en particular.

En época de estiaje, no se registran partículas suspendidas en el líquido, por lo que el sistema sirve únicamente para estimar el desgaste de los cangilones durante época de invierno que crece el caudal del río que alimenta a la central. Entonces:

Variables del proceso:

- Variables de entrada: turbidez de agua
- Variables de salida: desgaste de cangilones.

Se tienen datos históricos de sensores de turbidez ubicados en el tanque de carga de la central hidroeléctrica en épocas de invierno, debido a que el sistema de desarenación ubicado en la captación de agua, está diseñado para decantar partículas suspendidas de diámetros de mayores a 0.25mm, la turbidez también presenta un valor cuasi constante. Los datos presentados en la siguiente tabla corresponden a datos recopilados por el personal técnico de la central hidroeléctrica. Resultados en la siguiente tabla.

**Tabla 1.** Valores de turbidez promedio en los meses de invierno.

		Turbidez medida (NTU)			
Meses	de	2019	2020	2021	2022
invierno					

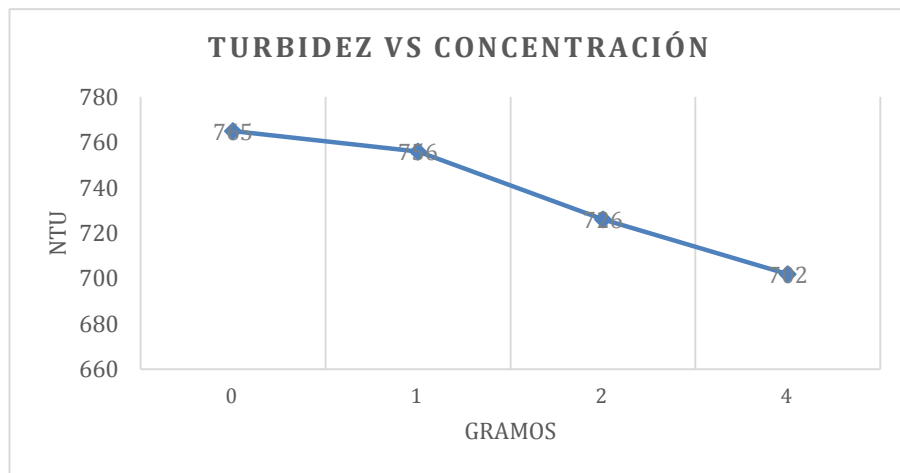
<b>Junio</b>	702	699	701	704
<b>Julio</b>	708	705	698	701
<b>Agosto</b>	715	708	705	----

La relación entre la concentración de sedimentos y la turbidez medida en NTU en el agua se describe en la siguiente ecuación:

Se estableció la concentración de sedimentos por unidad NTU de acuerdo a la siguiente ecuación de la recta determinada mediante el método de mínimos cuadrados con datos medidos en diferentes días del año.

$$y = -16,54x + 766,5$$

$$NTU = -16,54Gramos + 766,5$$



**Figura 18** Relación turbidez vs concentración

De igual manera la central hidroeléctrica tiene establecidos parámetros de operación de la planta de generación en base a la turbidez del agua, hay valores de turbidez que ameritan apagar la planta para no comprometer la vida útil de los rodetes, esta información viene dada por la siguiente tabla.

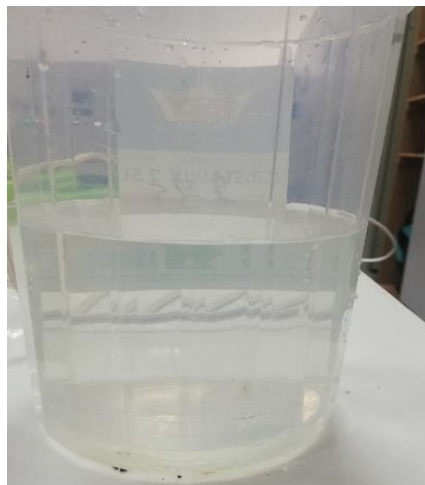
**Tabla 2.** Valores de muestreo de turbidez basado en la concentración de sedimentos disueltos en el agua.

	<b>Valor (gr/lt)</b>	<b>Turbidez (NTU)</b>	<b>Recomendación</b>
Río en invierno, aluviones	---	< 564	Apagar la planta de generación

Valor crítico	4	702	Limpiezas continuas de desarenadores
Valor superior	2	726	Limpiezas continuas de desarenadores
Valor ideal	1.1	756	Operar normal
Río en verano	0	765	Operar normal

*Muestra de 1 litro de agua tomada directamente del río Verde Chico*

En época de verano, se ha medido la turbidez en un litro de agua tomada del río verde chico, dando un valor de 765 NTU, o lo que es lo mismo que 0gr/lit de concentración de sedimentos.



**Figura 19** Agua limpia tomada del río Verde Chico

#### **a. Estructura general**

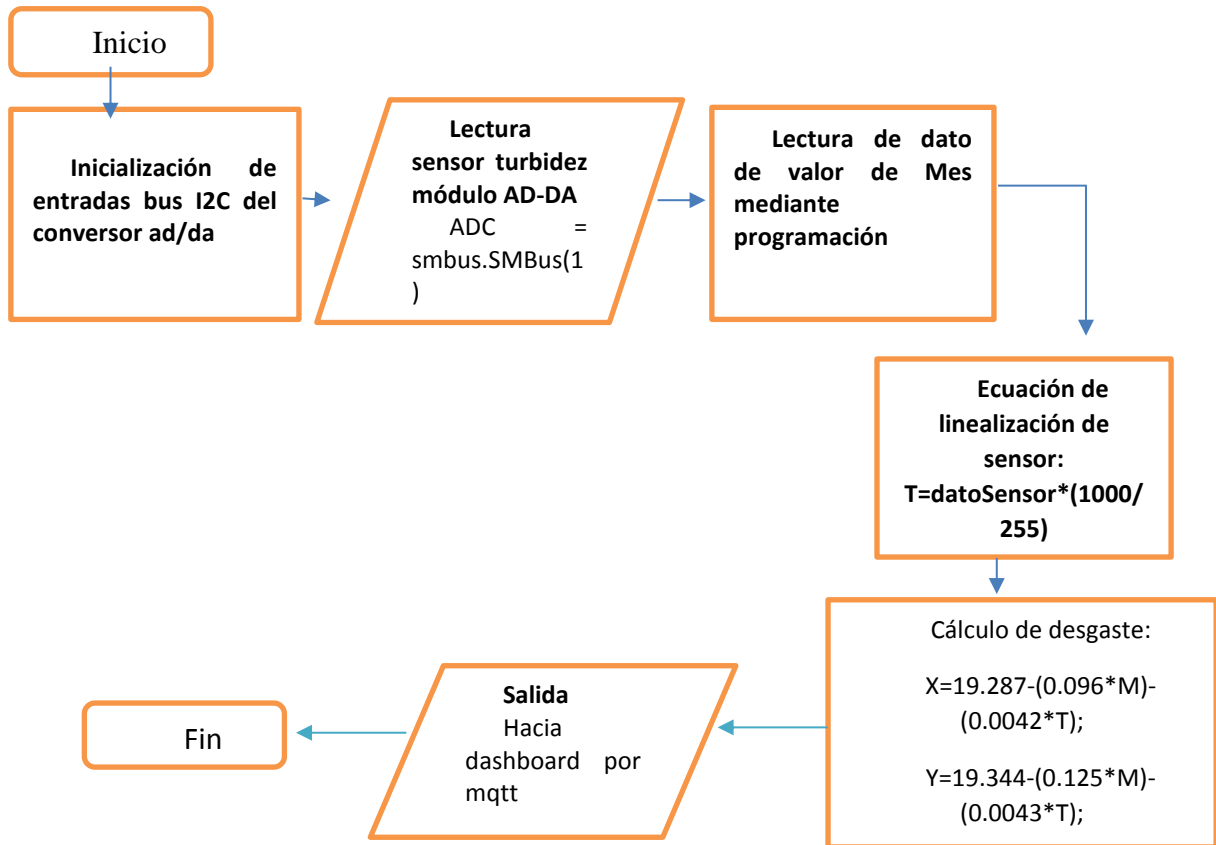
El proyecto funciona de la siguiente manera:

- Para que funcione correctamente el prototipo, como primer paso se debe incluir todas las librerías requeridas.
- Luego se realiza una declaración de variables, y pines físicos que se van a utilizar para captar datos de entrada o salida en el funcionamiento del prototipo.
- Después de deben inicializar la librería ADC = smbus.SMBus(1) perteneciente al conversor análogo digital que recepta y convierte la señal del sensor de turbidez.
- Se realiza la lectura de la señal del bus de datos del conversor, y se le asigna una dirección única.
- Se declara la dirección IP del dispositivo.
- Se linealizan los sensores mediante ecuaciones el sensor de turbidez, para obtener

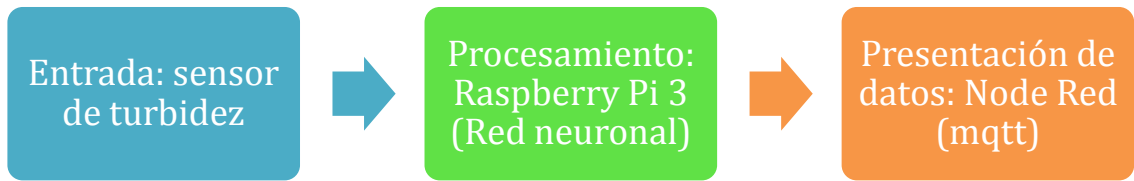
el dato deseado.

- Se escriben las ecuaciones encargadas de la predicción del desgaste de los cangilones con los coeficientes obtenidos de la red neuronal.
- Finalmente se envían todos los datos obtenidos al servidor web mediante el protocolo mqtt y el broquer mosquito para visualizarlos en un dashboard en tiempo real.

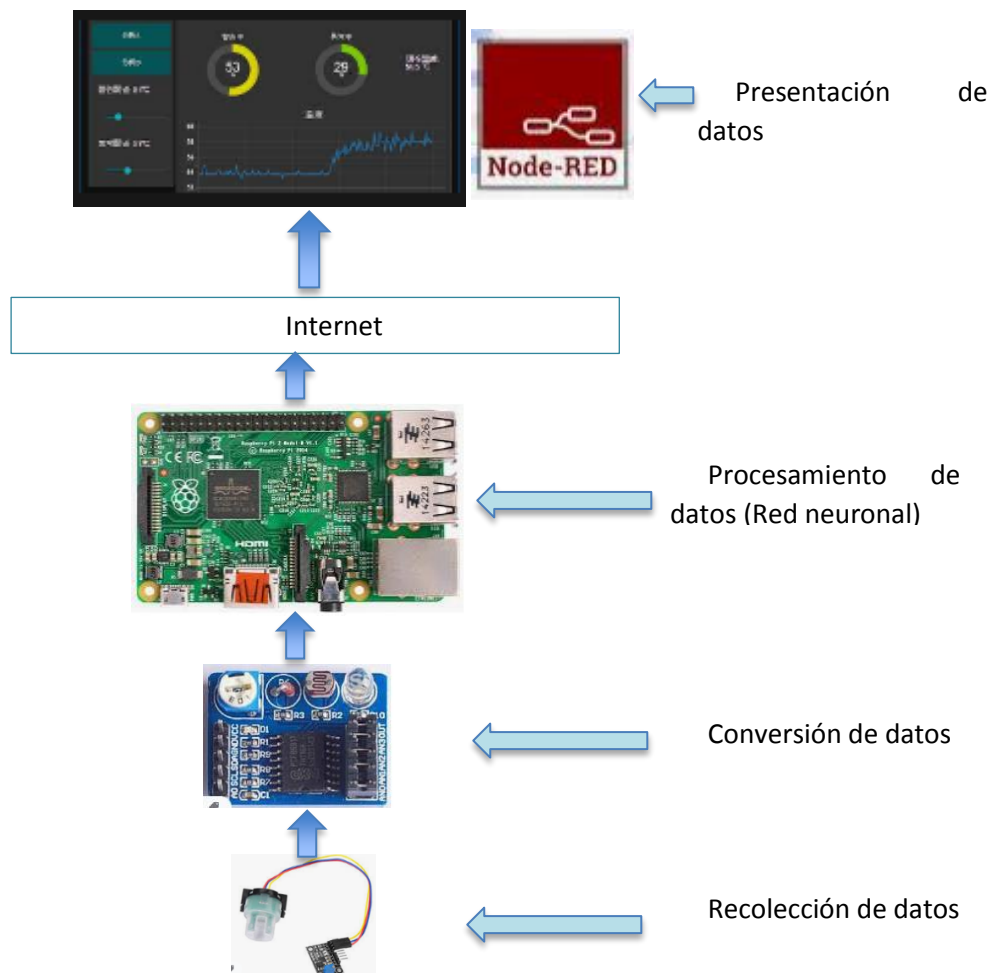
El proceso se puede visualizar en el siguiente gráfico.



**Figura 20** Diagrama de flujo del sistema de pronóstico de desgaste de cangilones de turbinas tipo Pelton.






**Figura 21** Proceso del sistema de pronóstico de desgaste de cangilones de turbinas tipo Pelton.



**Figura 22** Proceso gráfico del sistema de pronóstico de desgaste de cangilones de turbinas tipo Pelton.

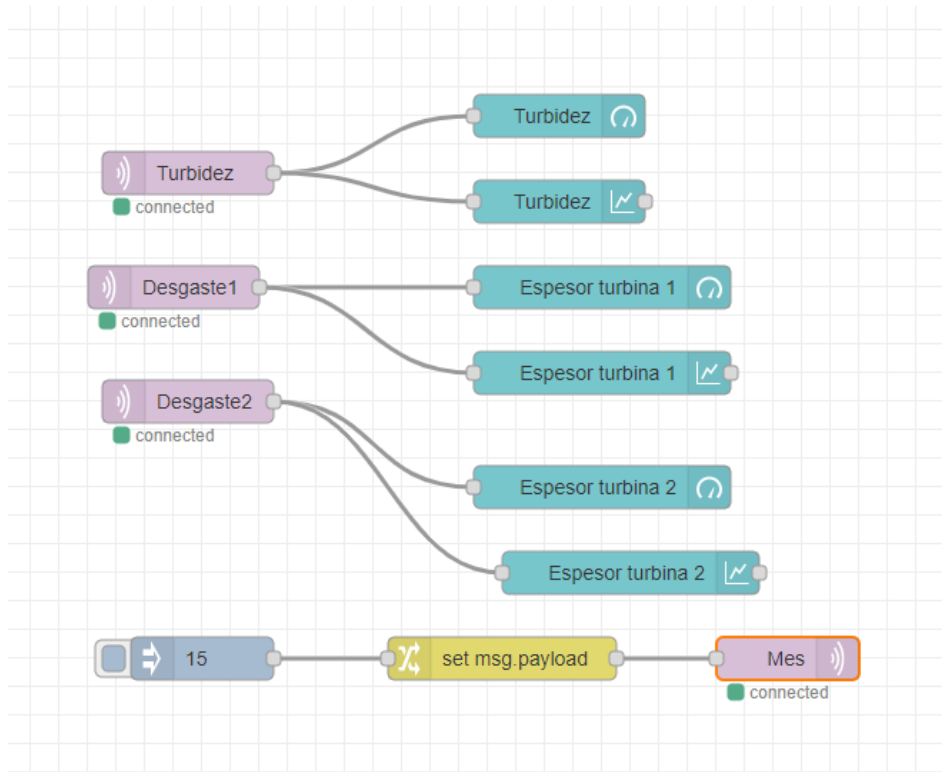
Materiales necesarios para el prototipo:

**Tabla 3** Elementos necesarios para el procesamiento de datos y adquisición de datos:

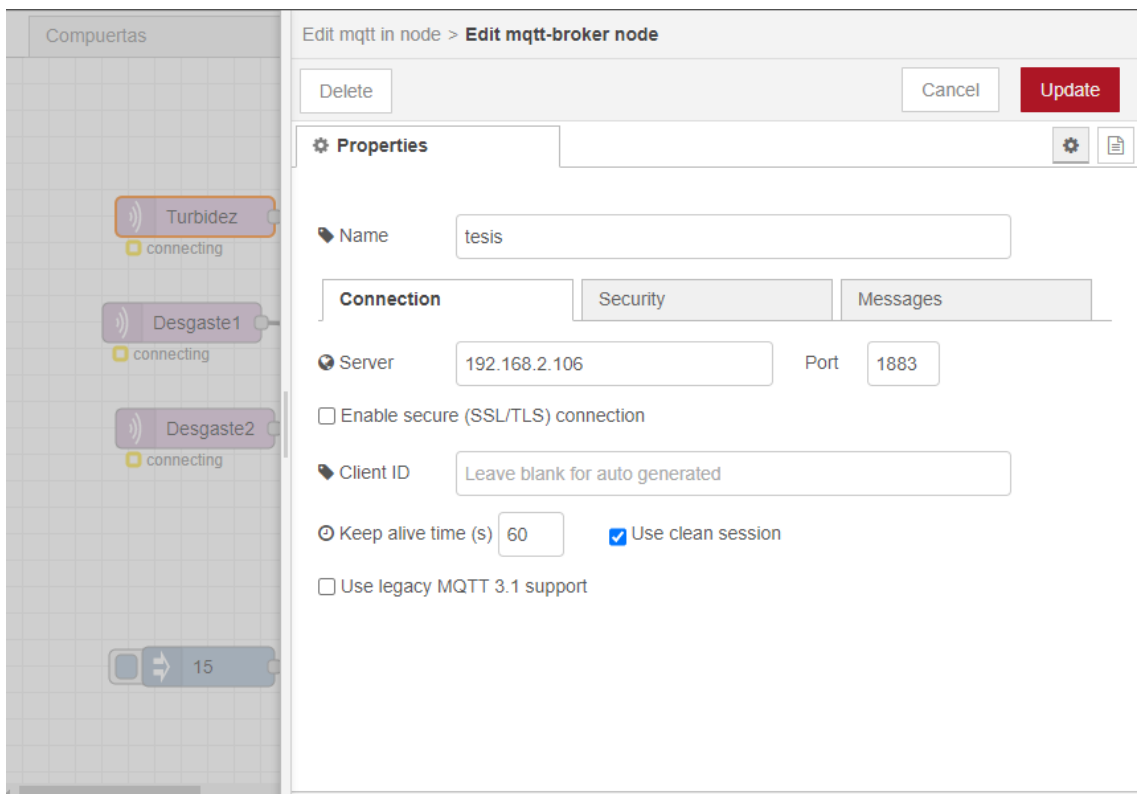
Nombre	Descripción	Figura
Raspberri Pi 3 modelo B	Procesamiento de señales	
PCF-8591	Conversor AD/DA	
Sensor turbidez 20190408	Sensor que entrega un valor análogo.	

Configuración de Node-Red y utilización de protocolo Mqtt mediante bróker público instalado en el servidor de la raspberry pi para envío de datos. La IP del servidor se coloca en la configuración del bloque Mqtt de recepción de dato.





**Figura 23** Programación de Node Red para presenta datos en Dash board



**Figura 24** Configuración de servidor en Node Red.

## **b. Explicación del aporte**

El sistema inteligente, opera con una variable de entrada que corresponde a la turbidez de agua medida en el tanque de carga del sistema de captación de agua de la central hidroeléctrica Río Verde Chico, en base a este valor determinado en MPU, deberá estimar de manera aproximada el desgaste de los cangilones de los rodets de las 2 turbinas ubicadas en casa de máquinas. Las salidas son 2, que corresponde a una salida por turbina. No se han determinado más salidas debido a que el impacto de agua es en una sola zona del cangilón, esto se debe a que el chorro de agua incide directamente a 90° con la pieza mecánica, este ángulo de incidencia viene dado por el fabricante y evita la corrosión por cavitación en el rodete, que es un tipo de erosión más agresiva y exponencial. A más de eso se ha tomado un valor promedio de desgaste de todos los cangilones, debido a que los datos no presentaron desviaciones considerables. La pantalla con los datos de salida son presentados mediante el protocolo de internet HTTP hacia los operadores de la central hidroeléctrica, con el objetivo de que determinen tiempos de mantenimiento, reparación o cambio.

El prototipo está elaborado con un sensor de turbidez de agua modelo 20190408 que trabaja a 5V de alimentación, este sensor es compatible con Arduino, Raspberry Pi, Pic, etc. Tiene una salida analógica la cual es el parámetro de entrada para el proceso de determinación de desgaste de cangilones. El procesamiento de la información está dado por una Raspberry Pi 3 que posee entradas GPIO configurables se acuerdo a la necesidad. La presentación de los datos está configurado mediante transmisión mqtt hacia el internet en una página HTTP.

Los resultados que brinda el sistema es el pronóstico de desgaste de los cangilones de las turbinas que posee la central hidroeléctrica, las salidas son 1 por cada turbina, el método de validación de resultados está considerado en base a los parámetros promediados medidos en años anteriores en los rodets de la central, estos datos sirvieron de fundamento para el adiestramiento de la red neuronal. En el caso de realizar una parada de producción, se medirá el desgaste actual de los rodets y se comparará con los valores resultantes del sistema inteligente.

El proyecto se desarrolla en base a un prototipo que de ser validado por el personal involucrado en el departamento de investigación de la central hidroeléctrica, se implementará de forma adecuada que contribuya una herramienta de ayuda para el personal técnico.

## **Estrategias y/o técnicas**

El sistema inteligente de pronóstico de desgaste de cangilones de turbinas de tipo Pelton, opera con una variable de entrada correspondiente a la turbidez de agua dato que es tomado del tanque de carga del sistema de captación de agua de la central hidroeléctrica Río Verde Chico, este parámetro de entrada de un sensor modelo 20190408, debe determinar el desgaste de los cangilones de los rodetes de las 2 turbinas de 5MW cada una ubicadas en casa de máquinas. Las salidas son 2, que corresponde a una salida por turbina. Los datos son presentados en una pantalla dashboard en internet, esta aplicación sirve para la visualización en tiempo real de los datos que son transmitidos desde un microcontrolador, en este caso una Raspberry Pi3, mediante el protocolo Mqtt utilizando el bróker Mosquito. Los datos que sirvieron de entrenamiento para la red neuronal son las medidas de desgaste de los cangilones tomadas en los años anteriores, presentadas en el Anexo1.

El prototipo está elaborado con un sensor de turbidez de agua modelo 20190408 que trabaja a 5V de alimentación, este sensor es compatible con Arduino, Raspberry Pi, Pic, etc., se ha escogido este sensor para el prototipo por la facilidad de uso, el costo y la compatibilidad con varias tarjetas microcontroladoras. Este sensor tiene una salida analógica de 0 a 5 V, la cual es el parámetro de entrada para el proceso de determinación de desgaste de cangilones. El procesamiento de la información está dado por una Raspberry Pi 3 que posee entradas GPIO configurables se acuerdo a la necesidad. Esta tarjeta microcontroladora ha sido escogida debido a que posee tarjeta de red que permite la conexión con internet para la transmisión de los datos, no se requiere de ningún otro módulo aparte a los que ya vienen incluidos en la tarjeta, el sistema operativo es una variación de Linux (Raspbian), el cual permite la programación en lenguaje Python, que es un lenguaje ideal para configurar redes neuronales. La presentación de los datos está configurado mediante transmisión Mqtt hacia el internet en una página HTTP. Se ha escogido este protocolo porque está dentro de los más utilizados para sistemas IoT debido a que es ligero y trabaja en equipos con bajo ancho de banda, posee QoS de nivel 2, lo que garantiza que el dato sea presentado al usuario. Debido a que la raspberry Pi 3, no posee entradas analógicas y dichos sensores de turbidez de agua son de este tipo, se ha optado por la utilización del módulo conversor AD/DA PCF-8591.

### **2.3 Validación de la propuesta**

En la siguiente tabla se encuentran quienes validaron el proyecto, lo revisaron y comprobaron el funcionamiento.

**Tabla 4** Descripción de perfil de validadores

Nombres y Apellidos	Años de experiencia	Titulación Académica	Cargo
Jorge Luis Paredes	12	Ing. Electrónico en instrumentación Mg. Energías renovables	Coordinador de la producción y el mantenimiento
Juan Andrés Navas	8	Ing. Electromecánico Mg. Energías renovables	Jefe de mantenimiento
Damián Benjamín Araujo	8	Ing. Electrónica y Comunicaciones Mg. En Automatización y Sistemas de Control	Jefe de operaciones

Los objetivos perseguidos mediante la validación son los siguientes:

- Validar la metodología de trabajo aplicada en el desarrollo de la investigación.
- Aprobar los resultados, conclusiones y recomendaciones obtenidas.
- Redefinir (si es necesario) el enfoque de los elementos desarrollados en la propuesta, considerando la experiencia de los especialistas.
- Constatar las posibilidades potenciales de aplicación del modelo de gestión propuesto.

Ejemplo:

*Datos del validador.*

Nombres y Apellidos	Años de	Titulación Académica	Cargo
Wilmer Fabian Albarraín Guarocho	13	Magister en Administración y Dirección de Empresas	Profesor Titular

*Criterios de valuación*

Crerios	Descripción
Impacto	Representa el alcance que tendrá el modelo de gestión y su representatividad en la generación de valor público.
Aplicabilidad	La capacidad de implementación del modelo considerando que los contenidos de la propuesta sean aplicables
Conceptualización	Los componentes de la propuesta tienen como base conceptos y teorías propias de la gestión por resultados de manera sistémica y
Actualidad	Los contenidos de la propuesta consideran los procedimientos actuales y los cambios científicos y tecnológicos que se producen en la nueva gestión pública.
Calidad Técnica	Miden los atributos cualitativos del contenido de la propuesta.
Factibilidad	Nivel de utilización del modelo propuesto por parte de la Entidad.
Pertinencia	Los contenidos de la propuesta son conducentes, concernientes y convenientes para solucionar el problema planteado.

*Escala de evaluación. Elaborada por: Ing. Wilmer Fabian Albarracín Guarochico MBA*

**Tabla 5** Tabla de ponderaciones del evaluador Ing. Jorge Paredes.

CRITERIOS	EVALUACION			SEGUN	IMPORTANCIA
	En Total Desacuerdo	En Desacuerdo	Ni de Acuerdo Ni en Desacuerdo	De Acuerdo	Totalmente Acuerdo
Impacto					X
Aplicabilidad					X
Conceptualiz					X
Actualidad					X
Calidad					X
Factibilidad					X
Pertinencia					X

**Tabla 6** Tabla de ponderaciones del evaluador Ing. Juan Navas.

CRITERIOS	EVALUACION			SEGUN	IMPORTANCIA
	En Total Desacuerdo	En Desacuerdo	Ni de Acuerdo Ni en Desacuerdo	De Acuerdo	Totalmente Acuerdo
Impacto					X
Aplicabilidad					X
Conceptualiz					X
Actualidad					X
Calidad					X
Factibilidad					X
Pertinencia					X

**Tabla 7** Tabla de ponderaciones del evaluador Ing. Benjamín Araujo.

CRITERIOS	EVALUACION			SEGUN	IMPORTANCIA
	En Total Desacuerdo	En Desacuerdo	Ni de Acuerdo Ni en Desacuerdo	De Acuerdo	Totalmente Acuerdo
Impacto					X
Aplicabilidad					X
Conceptualiz					X
Actualidad					X
Calidad					X
Factibilidad					X
Pertinencia					X

## 2.4 Matriz de articulación de la propuesta

En la presente matriz se sintetiza la articulación del producto realizado con los sustentos teóricos, metodológicos, estratégicos-técnicos y tecnológicos empleados.

**Tabla 8** Matriz de articulación

Ejes o partes principales del proyecto		Breve descripción de los resultados de cada parte	Sustento teórico que se aplicó en la construcción del proyecto	Metodologías, herramientas técnicas y tecnológicas que se emplearon
<b>1</b>	Estudiar los métodos actuales mediante los cuales se recopila la información pertinente del desgaste de los canchales de las turbinas Pelton de la central hidroeléctrica Río Verde Chico.	En base a experiencias observadas y documentación de informes de mantenimiento revisados para la elaboración de este proyecto, se concluyó que los métodos de recolección de datos de desgaste de turbinas son manuales, e implican parar la producción.	Mantenimientos preventivos Mantenimientos correctivos Tipos de turbinas y características Fenómenos hidrodinámicos.	1.1. Documentación de informes de hidroeléctricas 1.2. Búsqueda de datos en libros referentes al tema 1.3. Entrevistas de experiencias similares respecto al tema.
<b>2</b>	Determinar los requerimientos técnicos necesarios para el sistema inteligente de predicción del desgaste de canchales de turbinas Pelton mediante el protocolo Mqtt y redes neuronales para la central hidroeléctrica Río Verde Chico.	Luego de realizar una investigación bibliográfica, se determinaron que los requerimientos técnicos necesarios correspondían a un sistema descentralizado al sistema propio Scada de la planta. Para ello se ha elegido un controlador utilizado en aplicaciones IoT: raspberri pi.	Programación en Python Redes neuronales Inteligencia artificial Sistemas operativos raspbian Protocolo de comunicación Mqtt	2.1. Investigación bibliográfica en tesis relacionadas. 2.2. Documentación de redes neuronales. 2.3. Tipos de sensores e instrumentos. 2.4. Protocolos de comunicación IoT 2.5 Comunicación por Mqtt

3	Entrenar a la red neuronal capaz de determinar el desgaste de los canchilones de las turbinas Pelton en la central hidroeléctrica Río Verde Chico.	Se ha utilizado una red neuronal propia de Python la misma que da como resultado coeficientes de predicción de ecuaciones lineales, esto se debe a la naturaleza de los datos. El entrenamiento fue instantáneo, con una duración de 1 min.	Programación en Python Redes neuronales Inteligencia artificial Sistemas operativos raspbian Protocolo de comunicación Mqtt	3.1. Investigación bibliográfica en tesis relacionadas. 3.2. Documentación de redes neuronales. 3.3. Tipos de sensores e instrumentos. 3.4. Protocolos de comunicación IoT 3.5 Comunicación por Mqtt
4	Diseñar el prototipo para el sistema inteligente de predicción del desgaste de cangilones de turbinas Pelton mediante el protocolo Mqtt y redes neuronales para la central hidroeléctrica Río Verde Chico.	Con los coeficientes obtenidos del entrenamiento de la red neuronal, se han elaborado las ecuaciones capaces de predecir el desgaste de las turbinas con un error mínimo. Estas ecuaciones han servido para que el sistema inteligente sea capaz de presentar los datos en tiempo real mediante el protocolo HTTP en un Dashboard configurado en NodeRed.	Programación en Python Redes neuronales Inteligencia artificial Sistemas operativos raspbian Protocolo de comunicación Mqtt Programación en node red Configuración de servicios en raspbian.	4.1. Investigación bibliográfica en tesis relacionadas. 4.2. Documentación de redes neuronales. 4.3. Tipos de sensores e instrumentos. 4.4. Protocolos de comunicación IoT 4.5 Comunicación por Mqtt



## 2.5 Análisis de resultados. Presentación y discusión.

La red neuronal se implementó con la librería SKLEARN, propia de Python, de esta librería se ha utilizado el método de regresión lineal (LinearRegression), por la naturaleza de los datos, y por el número de entradas y salidas. Anexo 2.

Para el entrenamiento de la red neuronal se tomaron datos correspondientes a mediciones de desgaste de cangilones en diferentes meses del año, se ha determinado el promedio de desgaste de los cangilones de cada unidad, para obtener 2 valores de salida, y de esta manera optimizar los recursos de memoria y procesamiento del microcontrolador utilizado. La siguiente tabla muestra los datos de entrenamiento.

**Tabla 9** Valores de muestreo de desgaste de cangilones para entrenar red neuronal.

Meses	Turbidez(NTU)	Desgaste1(mm)	Desgaste2(mm)
0,00	0,00	19,32	19,32
7,00	544,00	16,25	16,42
12,00	659,00	15,26	15,02
15,00	687,00	14,99	14,87
18,00	699,00	14,573	14,12
20,00	705,00	14,559	13,559
22,00	708,00	14,397	13,397
25,00	699,00	13,529	12,529
28,00	765,00	13,449	12,449
31,00	765,00	13,449	12,449
35,00	700,00	12,982	12,132
36,00	705,00	12,671	12,001

La columna Meses corresponde al número de meses que ha transcurrido desde que las turbinas están funcionando, hasta la medición de desgaste. La Turbidez es el valor promedio medido de calidad de agua en el tanque de carga del sistema de captación de agua. Desgaste 1 y Desgaste 2, son los valores promedio de espesor útil de la pieza mecánica de todos los cangilones de cada turbina.

Luego del entrenamiento de la red neuronal, se obtienen el dato de error que nos indica la eficiencia de la predicción del desgaste, y el error al cuadrado, que va de 0 a 1, siendo 0 una predicción desfavorable, y 1 una predicción perfecta. En el caso de este modelo tenemos los siguientes datos:

**Tabla 10** Valores de error luego de entrenamiento de red neuronal.

<b>EL ERROR ES:</b>	<b>EL VALOR DEL R^2 ES:</b>
<b>0.22488655313159078</b>	<b>0.9875844044052797</b>

Los coeficientes de la regresión lineal calculados por la red neuronal para este caso son los siguientes:

LOS COEFICIENTES SON:

$$[[-0.09621761 -0.00415042]]$$

$$[-0.12593699 -0.00430068]]$$

Las ecuaciones que describen a la red neuronal para predecir el espesor de los cangilones de la turbina Pelton luego de estar expuestos a partículas suspendidas en el agua que impacta contra la superficie y genera desgaste son:

$$X = 19.287 - (0.096 \times M) - (0.0042 \times T)$$

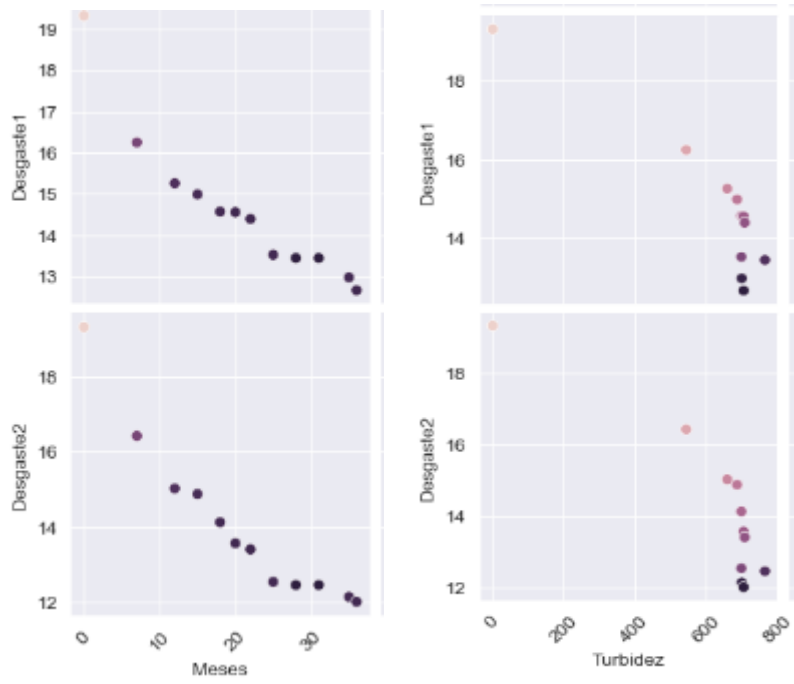
$$Y = 19.344 - (0.125 \times M) - (0.0043 \times T)$$

Como parte de las pruebas realizadas tenemos los siguientes ensayos, dónde se puede apreciar la similitud de cálculo en base a los valores de entrada, se han realizado 2 ensayos con datos correspondientes a la tabla de entrenamiento, dándonos como resultado salidas con un error mínimo de 0.2:

**Tabla 11** Valores de resultantes de la red neuronal.

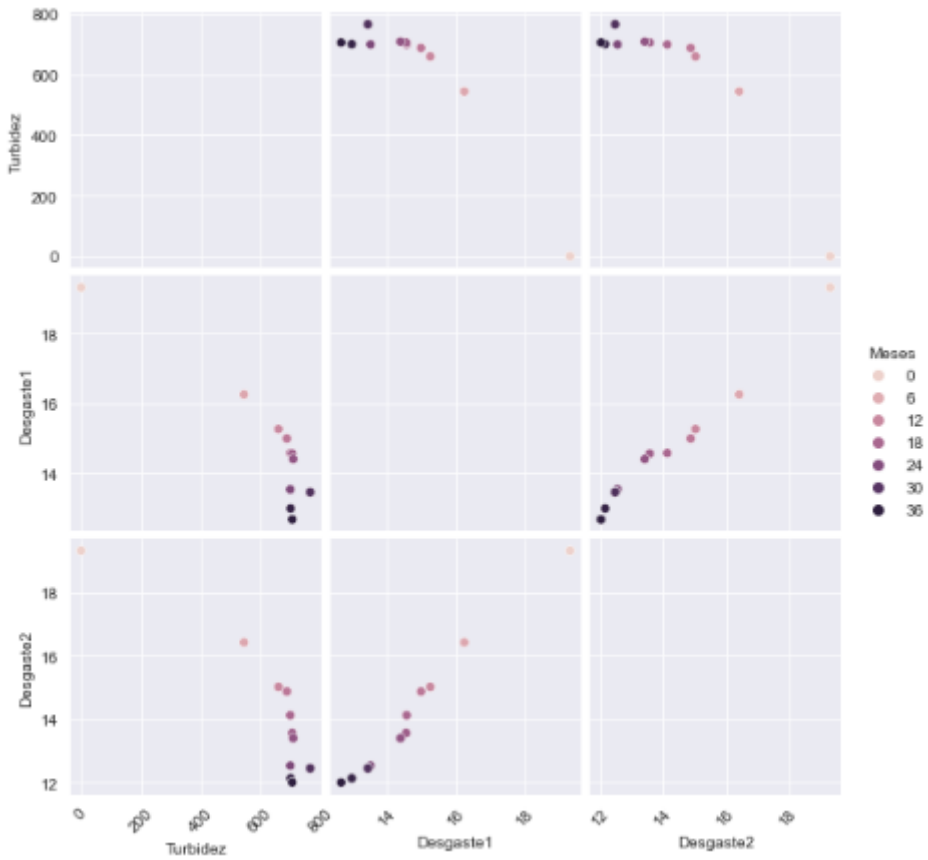
<b>Meses</b>	<b>Turbidez</b>	<b>Salida1</b>	<b>Salida2</b>
<b>45</b>	800	11.52	10.55
<b>0</b>	0	19.25	19.37
<b>10</b>	705	15.37	15.08
<b>31</b>	765	13.1	12.18

El comportamiento del sistema, se muestra en la siguiente gráfica, tenemos que a mayor contaminación del agua, se presentan valores de salida de desgaste mayores mientras más meses esté expuesta la pieza mecánica a esa contaminación.



**Figura 25** Entrenamiento de red neuronal.

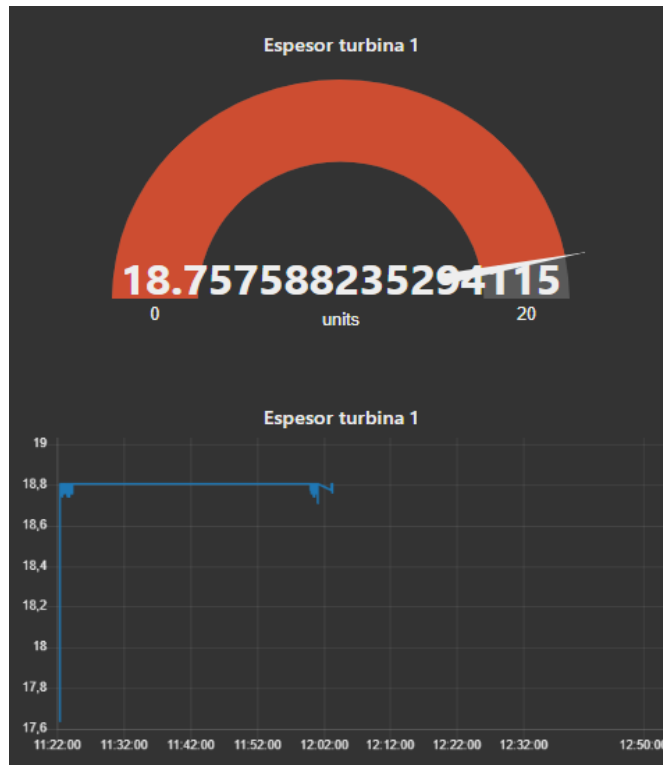
El entrenamiento de la red neuronal se puede apreciar en el siguiente gráfico:



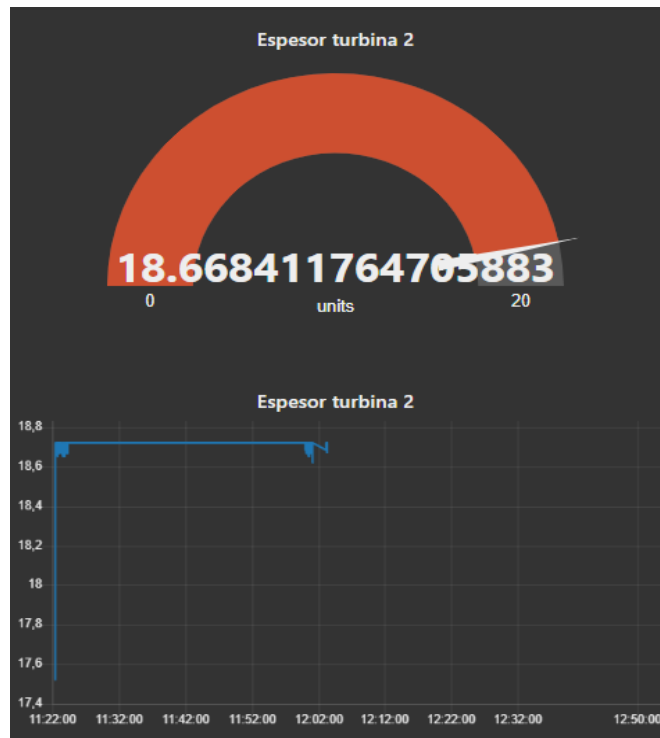
**Figura 26** Entrenamiento completo de red neuronal con errores mínimos.

Condiciones de prueba de funcionamiento:

**Tabla 12** Valores de resultantes de las pruebas de funcionamiento.



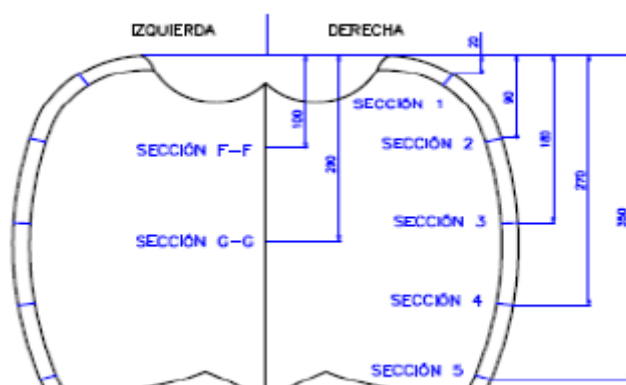
**Figura 27** Valor de desgaste de turbina 1 en Dashboard de NodeRed.



**Figura 28** Valor de desgaste de turbina 2 en Dashboard de NodeRed.

## CONCLUSIONES

Luego de realizar la respectiva investigación de los métodos mediante los cuales se recopila la información referente al desgaste de los cangilones de las turbinas Pelton, se determinaron 2 métodos eficientes; uno de los métodos es la medición mediante una herramienta que sirve de plantilla fija que es colocada en la cuchara, se adapta a esta pieza un calibrador pie de rey y se toman las muestras de espesor. Otro método es mediante un dispositivo electrónico medidor de espesores, el cual cuenta con una sonda que al estar en contacto con la superficie metálica es capaz de medir el espesor de dicha superficie. El método mediante el que recopilan esta información el personal técnico de la central hidroeléctrica Río Verde Chico es mediante una gráfica proporcionada por el fabricante donde indica el espesor de diferentes puntos de la cuchara, haciendo uso de un calibrador pie de rey realizan la medición en los puntos mencionados y posteriormente comparan los valores para identificar si el espesor ha disminuido.



**Figura 29** Plantilla de cangilón proporcionada por el fabricante.

Los requerimientos técnicos necesarios para la implementación de este sistema inteligente son equipos que deberán ser independientes al sistema de control propio de la central. Corresponde a una tarjeta de adquisición y procesamiento de datos, en este caso una Raspberry Pi, la cual cuenta con un sistema operativo robusto y de software libre en el que se puede programar la red neuronal en lenguaje PYTHON, y programar el funcionamiento del sistema inteligente de igual manera en lenguaje PYTHON, también se puede configurar un servidor capaz de enviar los datos hacia Node Red mediante el protocolo MQTT haciendo uso de su bróker MOSQUITO. Para el censado del dato de turbidez de agua del tanque de carga, variable mediante la cual funciona el sistema inteligente, se recomienda utilizar un sensor robusto de turbidez de la marca HACH LXV423.99.00100 modelo: Solitax ts-line sc, debido a que tiene gran exactitud con un error de medición menor al 1%, es sumergible y posee rejilla de auto limpiado en el caso

de que el sensor se contamine con sedimento del agua, lo que permite minimizar las mediciones falsas. Debido a que la Raspberry no posee entrada de señales análogas, se requiere de un conversor ad/da, se sugiere el modelo PCF-8591. La presentación de los datos se realizará en un servidor web, por lo que es indispensable el acceso a internet.

Luego de haber realizado la programación de la red neuronal con las muestras de espesor de los cangilones de las turbinas Pelton tomadas en diferentes meses luego de la exposición del elemento al impacto de partículas de sedimento suspendidas en el agua, se obtuvieron los siguientes coeficientes:  $[-0.09621761 \ -0.00415042]$  que corresponden a la ecuación de predicción del desgaste de la turbina 1, la ecuación que describe esta predicción es:  $X = 19.287 - (0.096 \times M) - (0.0042 \times T)$ . Los coeficientes que corresponden al espesor pronosticado de la turbina 2 son los siguientes:  $[-0.12593699 \ -0.00430068]$ , de igual manera la ecuación que permite obtener la predicción es la siguiente:  $Y = 19.344 - (0.125 \times M) - (0.0043 \times T)$ . La red neuronal utilizada fue elaborada con el método LinearRegression de la librería SKLEARN en Python.

Luego de haber diseñado el prototipo y presentar los datos en un Dashboard en tiempo real, se comprobaron los valores obtenidos con los valores ingresados para entrenar a la red neuronal, y se consiguieron valores con un error mínimo de 0.22, por lo que la red neuronal es eficiente para determinar el valor de espesor de los cangilones de las turbinas Pelton. No se requiere utilizar gran cantidad de instrumentos para la implementación del sistema, la tarjeta de procesamiento de datos y la red neuronal realizan los cálculos correspondientes al espesor de dichos cangilones. El envío de datos mediante el protocolo MQTT hacia Node-Red, es estable e ininterrumpido.

## RECOMENDACIONES

Para corroborar los datos que se han obtenido de la red neuronal referentes al espesor de los cangilones de las turbinas, se recomienda elaborar una pieza mecánica que se ubique como plantilla para las cucharas de las turbinas y de esa manera tomar un dato más exacto en los puntos sugeridos por el fabricante, el modelo se lo aprecia en la figura 14.

Para la elaboración del prototipo se ha utilizado un sensor de turbidez compatible con arduino y Raspberry, pero para la implementación del sistema inteligente en la central hidroeléctrica se recomienda utilizar un sensor de turbidez robusto y capaz de brindar datos exactos, se recomienda el sensor HACH LXV423.99.00100 modelo: Solitax ts-line sc.

Por la naturaleza de los datos se ha implementado una red neuronal de tipo regresión lineal, en el caso de requerir datos con un error menor al obtenido por la red neuronal, se recomienda realizar más muestreos de espesor de los cangilones en diferentes condiciones de operación, estos datos adicionales servirán para entrenar nuevamente a la red neuronal disminuyendo el error.

Se recomienda que el sistema inteligente sea independiente al sistema de control propio de la central, para que en el caso de requerir mantenimiento preventivo o correctivo, no interfiera con la operación normal de la planta. Es necesario tener una señal estable de internet para que los datos puedan ser enviados de manera ininterrumpida a la página de Node-Red y sean presentados de manera adecuada.

## BIBLIOGRAFÍA

### Referencias

- Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables. (2022). *Panorama Eléctrico*. Quito: Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables.
- Baena, J. (2008). *INTERDEPENDENCIA ENTRE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN Y EL DESGASTE EN ROJETES TIPO PELTON FABRICADOS EN ACERO ASTM A743 GRADO CA6NM*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Carretero, M., & Pozo, M. (2007). *Mineralogía aplicada. Salud y medio ambiente*. Madrid: Ediciones Paraninfo S.A.
- Fundación ENDESA. (2021). *Centrales Hidroeléctricas*. Obtenido de Fundación Endesa: <https://www.fundacionendesa.org/es/educacion/endesa-educa/recursos/centrales-renovables/central-hidroelectrica>
- Gómez, J., Armas, M., Monteagudo, J., & Ramos, F. (2009). *Diagnóstico del mantenimiento centrado en la eficiencia de turbinas de contrapresión aplicando redes neuronales artificiales*. Quito: Universidad Politécnica Nacional.
- I+D Electrónica. (03 de 2016). *didacticaselectronicas.com*. Obtenido de Sensor de turbidez (calidad de agua): <https://www.didacticaselectronicas.com/index.php/sensores/ambientales/sensor-de-turbidez-calidad-de-agua-sensores-de-turbidez-agua-turbiedad-calidad-de-agua-dfrobot-detail>
- Induanalisis, Laboratorio Ambiental. (15 de 05 de 2019). *Induanalisis.com*. Obtenido de Turbidez: [https://www.induanalisis.com/publicacion/detalle/turbidez\\_28](https://www.induanalisis.com/publicacion/detalle/turbidez_28)
- Jiménez, L. (1990). *OPTIMIZACIÓN DEL MANTENIMIENTO PREVENTIVO DE LAS TURBINAS PELTON DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA "JUAN CAROSIO"-MOYOPAMPA*. Lima: UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA.
- La Universidad en Internet UNIR. (17 de 03 de 2022). *UNIR.net*. Obtenido de Qué son los sistemas inteligentes? Importancia y aplicaciones: <https://www.unir.net/ingenieria/revista/sistemas-inteligentes/>
- Martínez, M. (2017). *Desarrollo de proyectos IoT utilizando Raspberry Pi como plataforma*. Cartagena: Universidad Politécnica de Cartagena.
- Matich, D. (2001). *Redes Neuronales: Conceptos Básicos y aplicaciones*. Rosario: Universidad Tecnológica Nacional.
- Pagán Rubio, J. (2017). *SISTEMA DE DIAGNÓSTICO DE MOTOR DIESEL MARINO BASADO EN MODELO TERMODINÁMICO Y DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL*. Cartagena: Universidad Politécnica de Cartagena.
- Ramiro, O. (2011). *Pequeñas centrales hidroeléctricas*. Bogotá: Ediciones de la U.
- Reder, M. (2018). *Modelos de confiabilidad y algoritmos de detección de fallas para aerogeneradores*. Zaragoza: Universidad de Zaragoza.



- Rouhiainen, L. (2018). *Inteligencia Artificial*. Barcelona: Planeta S.A.
- Soto Zabala, D. (2021). *Implementación de mantenimiento predictivo para una bomba centrífuga utilizando machine learning*. Bogotá: Universidad Antonio Nariño.
- Tamariz, M., & Belisario, Á. (1990). *Recuperación integral de rodetes Pelton del complejo hidroeléctrico del Mantaro*. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería.
- Torres, W. (2018). *Estudio de costos variables por sólidos en suspensión en una central hidroeléctrica con turbina Pelton*. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería.
- Trinchet, C., Arbella, F., & Mora, C. (2021). Monitoreo de condición en las turbinas de viento del parque eólico Gibara II aplicando métodos de la industria 4.0. *RILCO: Revista de Investigación Latinoamericana en Competitividad Organizacional*, 5.

## ANEXOS

### ANEXO 2: PROGRAMACIÓN DE LA RED NEURONAL EN PYTHON.

```
import numpy as np
import pandas as pd
#import seaborn as sns
#import matplotlib.pyplot as plt

from sklearn.linear_model import LinearRegression
from sklearn.metrics import mean_squared_error

cuchara=pd.read_excel(r"C:\Users\Moni\Desktop\maestria U ISRAEL\tesis\entradas.xlsx")
#cuchara=cuchara.replace(np.nan,"0")
Meses=cuchara['Meses'].values
Turbidez=cuchara['Turbidez'].values
Desgaste1=cuchara['Desgaste1'].values
Desgaste2=cuchara['Desgaste2'].values

X=np.array([Meses, Turbidez]).T
Y=np.array([Desgaste1, Desgaste2]).T

reg=LinearRegression()
reg=reg.fit(X,Y)
Y_pred=reg.predict(X)
error=np.sqrt(mean_squared_error(Y,Y_pred))
r2=reg.score(X,Y)
print("EL ERROR ES:", error)
print("EL VALOR DEL R^2 ES:",r2)
print("LOS COEFICIENTES SON: \n",reg.coef_)
Meses=31
Turbidez=765
print("LA PREDICCIÓN DE DESGASTE ES:",reg.predict([[Meses,Turbidez]]))
```

### ANEXO 3: ENTORNO RASPBERRY PY 3 EN VNC.

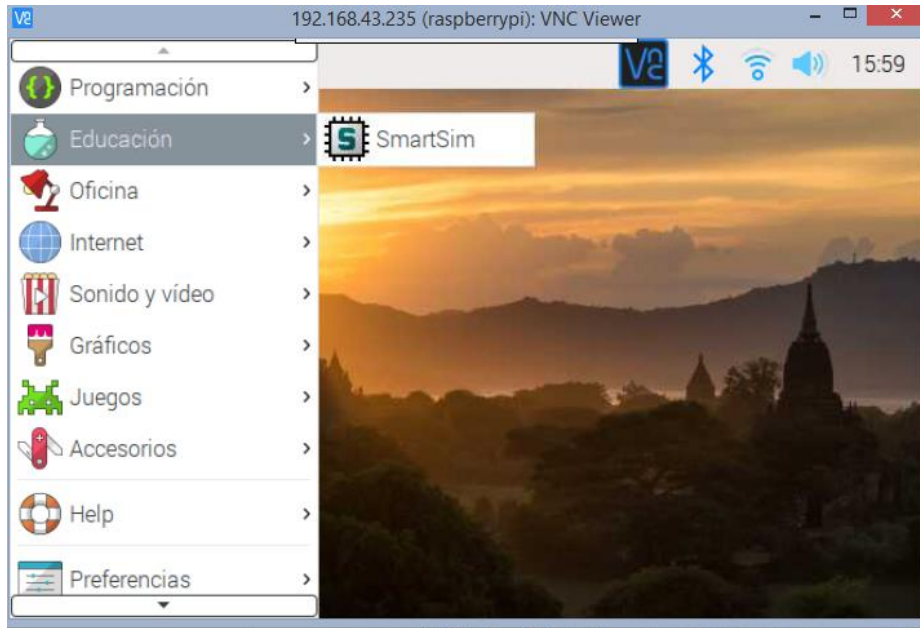


Figura 30 Entorno gráfico Raspbian.

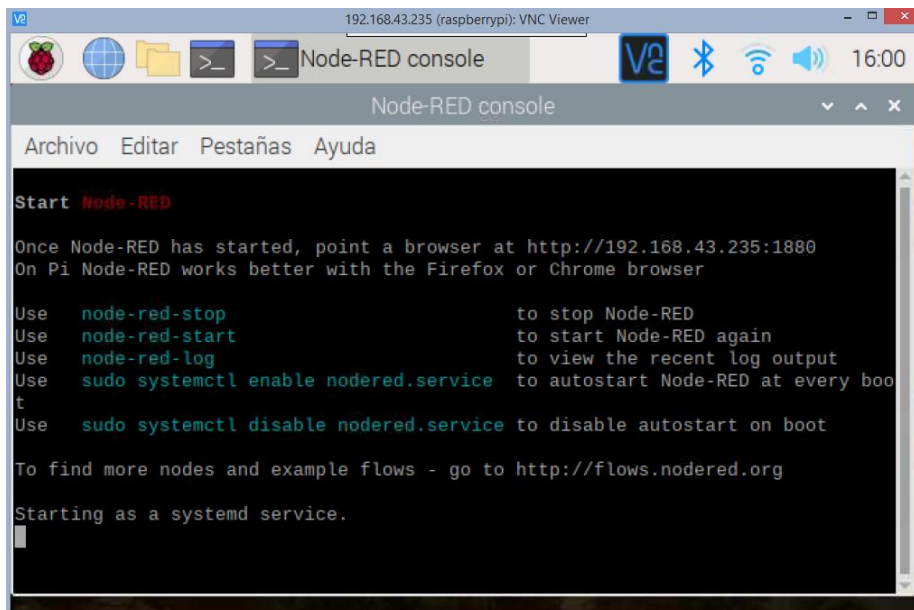
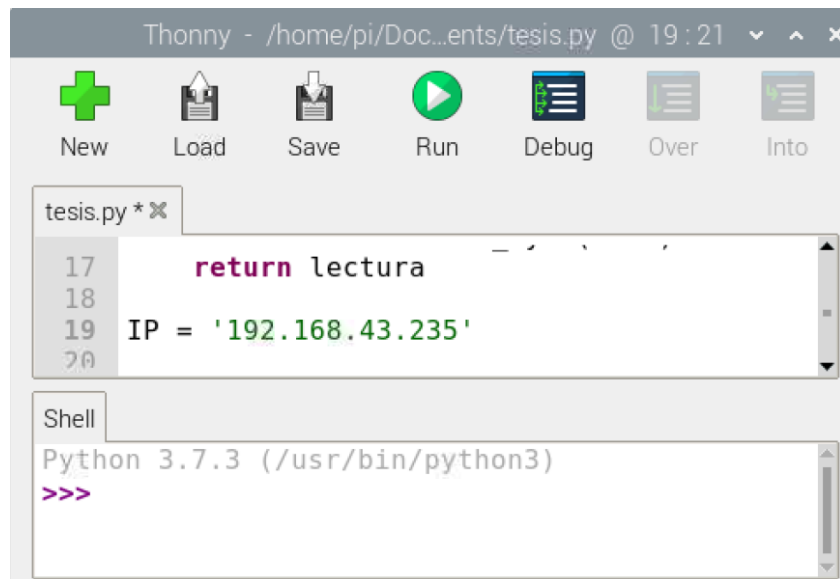


Figura 31 Inicialización de servidor NodeRed.



**Figura 32** Configuración de IP al programa del sistema inteligente.

#### ANEXO 4: PROGRAMA DEL SISTEMA INTELIGENTE EN PYTHON.

```
import paho.mqtt.publish as publish

import smbus

import RPi.GPIO as GPIO

import time

GPIO.setmode(GPIO.BOARD)

A4 = 0X40

D1=0

D2=0

#SENSOR DE TURBIDEZ

ADC = smbus.SMBus(1)

def leeINPUT(x):

    ADC.write_byte_data(0x48, (0x40 +x), x)

    Time.sleep(0.2)

    Lectura = ADC.read_byte(0x48)

    Return lectura

IP='192.168.43.235'

While True:

T1=(leeINPUT(1))*(1000/255)

M=5

D1=19.287-(0.096*M)-(0.0042*T1)

D2=19.344-(0.125*M)-(0.0043*T1)

Print("T1={0} D1={1} D2={2}. Format (T1,D1,D2)")

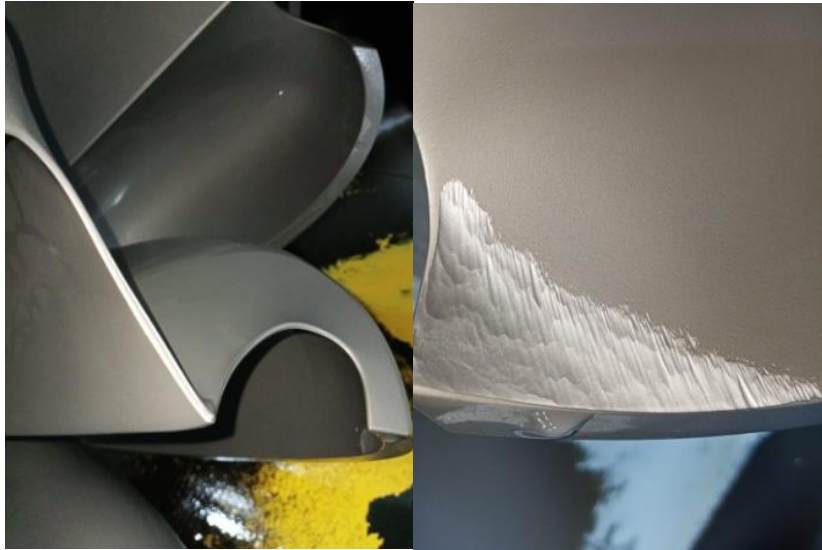
Publish.single ('Turbidez', T1, hostmane=IP)

Publish.single ('Desgaste1, T1, hostmane=IP)

Publish.single ('Desgaste2, T1, hostmane=IP)

Time.sleep(0.1)
```

**ANEXO 5: PROGRAMA DEL SISTEMA INTELIGENTE EN PYTHON.**



**Figura 33** Desgaste de cangilón por partículas pequeñas en la zona tricúspide.