

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE GUAYAQUIL**

**CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERO ELECTRÓNICO**

**PROYECTO TÉCNICO:**

**“DISEÑO, IMPLEMENTACIÓN Y CONTROL DIFUSO DE UN PROTOTIPO DE  
PLANTA PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS Terciarias MEDIANTE EL  
EMPLEO DE NANOMEMBRANA”**

**AUTORES**

JESSICA NATALIA CAMPOVERDE GARZÓN

CESAR ANDRÉS MEJÍA PASQUEL

**TUTOR:**

MSC. MÓNICA MIRANDA RAMOS.

**GUAYAQUIL - ECUADOR**

**2019**

## CERTIFICADOS DE RESPONSABILIDAD Y AUTORIA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Jessica Natalia Campoverde Garzón y Cesar Andrés Mejía Pasquel autorizamos a la **Universidad Politécnica Salesiana** la publicación total o parcial de este trabajo de titulación y su reproducción sin fines de lucro.

Además, declaramos que los conceptos, análisis desarrollados y las conclusiones del presente trabajo son de exclusiva responsabilidad de los autores.

Guayaquil, Junio del 2019

---

Jessica Natalia Campoverde Garzón

C.I 0950919423

---

Cesar Andrés Mejía Pasquel

C.I 0925665663

## CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UPS

Nosotros, **JESSICA NATALIA CAMPOVERDE GARZÓN**, con documento de identidad N° **0950919423**, y **CESAR ANDRES MEJIA PASQUEL**, con documento de identidad N° **0925665663**, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la **UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA** la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de grado titulado **“DISEÑO, IMPLEMENTACIÓN Y CONTROL DIFUSO DE UN PROTOTIPO DE PLANTA PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS TERCIARIAS MEDIANTE EL EMPLEO DE NANOMEMBRANA”** mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de **INGENIERO ELECTRÓNICO**, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la universidad facultada para ejercer plenamente los derechos antes cedidos.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscrito este documento en el momento que hacemos entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, Junio del 2019

---

Jessica Natalia Campoverde Garzón  
C.I 0950919423

---

Cesar Andrés Mejía Pasquel  
C.I 0925665663

## **CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN**

Yo declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación “DISEÑO, IMPLEMENTACIÓN Y CONTROL DIFUSO DE UN PROTOTIPO DE PLANTA PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS Terciarias mediante el empleo de nanomembrana” realizado por los estudiantes JESSICA NATALIA CAMPOVERDE GARZON con cédula de identidad N°0950919423 y CESAR ANDRES MEJIA PASQUEL con cédula de identidad N°0925665663 obteniendo un producto que cumple con los objetivos del diseño de aprobación, informe final y demás requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana, para ser considerados como trabajo final de titulación.

Guayaquil, Junio del 2019

---

Tutora del trabajo de titulación  
Msc. Mónica María Miranda Ramos  
c.c 0917271785

## DEDICATORIA

*Dedico el esfuerzo y tiempo invertido en este proyecto principalmente a mi madre ya que con su cariño, sacrificio y motivación me ha impulsado a alcanzar esta meta. También dedico el proyecto a mi familia, con la que he podido contar incondicionalmente y a todas aquellas personas que me han apoyado a lo largo de mi trayectoria universitaria.*

*Jessica Campoverde G.*

*Dedico este proyecto a mis padres, por todo el apoyo que me han dado, por siempre creer en mí y motivarme a superarme cada día. Con su ejemplo y comprensión me han ayudado a ser perseverante, optimista y a que siempre luche por lograr mis objetivos.*

*Cesar Mejía P.*

## AGRADECIMIENTO

*Agradezco a Dios por siempre poner en mi camino a las personas correctas para guiarme, cuidarme y apoyarme.*

*Agradezco a mi familia por su paciencia y fortaleza que han servido para lograr alcanzar mis propósitos; también agradezco a todos quienes creyeron en mí y me han motivado a culminar este proyecto.*

*Jessica Campoverde.*

*Agradezco a mi familia por su sacrificio, por saber entenderme y por el esfuerzo que han hecho para que culmine mi carrera universitaria. Agradezco a Dios por darme la sabiduría a lo largo de mi vida estudiantil y a todos los que me han impulsado a culminar este proyecto.*

*Cesar Mejía P.*

## RESUMEN

AÑO	TÍTULO	ALUMNOS	DIRECTOR	TEMA DE TITULACIÓN
2019	Ingeniero Electrónico	Campoverde Garzón Jessica Natalia  Mejía Pasquel Cesar Andrés	Msc. Mónica Miranda	Diseño, implementación y control difuso de un prototipo de planta para el tratamiento de aguas terciarias mediante el empleo de nanomembrana

El presente proyecto se enfoca en controlar el caudal de permeado de una nanomembrana presente en un sistema de purificación de agua, mediante una programación difusa que permite realizar un control intuitivo en base a los rangos de trabajo de esta para que, mediante la lectura de las variables que afectan directamente la eficiencia del elemento de purificación, se evite un deterioro prematuro o peor aún su ruptura.

El proyecto se inicia asignando un área de la Universidad Politécnica Salesiana sede Guayaquil para ubicar el sistema de filtración con la finalidad de que la misma pueda emplearse para realizar futuros proyectos de titulación y que la institución pueda beneficiarse del agua obtenida de la misma.

Se realiza el montaje del sistema de filtración e instalación de sensores para la adquisición de señales de los parámetros de: presión, caudal, pH y conductividad en la entrada y salida de la planta para el respectivo monitoreo en línea mediante la tarjeta de adquisición de datos NI USB-6210 de National Instruments.

El monitoreo y control se desarrolla con en el software LabVIEW estableciendo rangos de operación tanto para las entradas como para la salida del sistema, manteniendo siempre un rango de operación dentro de los parámetros permisibles para el buen funcionamiento de la nanomembrana. Se controla el caudal deseado mediante la apertura y cierre de una válvula de compuerta, ubicada en el ingreso de flujo de la nanomembrana, empleando un motor de pasos PH266-01GK.

**Palabras Claves:** control difuso, nanomembrana, presión, caudal.

## ABSTRACT

YEAR	DEGREE	STUDENTS	ADVISOR	TITLE TOPIC
2019	Electrónica Engineer	Campoverde Garzón Jessica Natalia  Mejía Pasquel Cesar Andrés	Msc. Mónica Miranda	Design, implementation and fuzzy control of a prototype plant for treatment of tertiary waters using a nanomembrane

This project focuses on controlling the permeate flow rate of a nanomembrane present in a water purification system, through a diffuse programming that allows an intuitive control based on the working ranges of this, so that, by reading the variables that directly affect the efficiency of the purification element, prevent a premature deterioration or even worse its rupture.

The project starts by assigning an area of the Universidad Politécnica Salesiana Guayaquil to locate the filtration system so that it can be used to carry out future titration projects and that the institution can benefit from the water obtained from it.

The installation of the filtration system and installation of sensors for the acquisition of signals of the parameters of: pressure, flow, pH and conductivity in the input and output of the plant for the respective on-line monitoring by the data acquisition card NI USB-6210 from National Instruments.

The monitoring and control are developed with the LabView software establishing operating ranges for both the inputs and the output of the system, always maintaining a range of operation within the parameters allowed for the proper functioning of the nanomembrane. The desired flow rate is controlled by opening and closing a gate valve, located in the flow inlet of the nanomembrane, using a PH266-01GK stepper motor.

**Keywords:** diffuse control, nanomembrane, pressure, flow.

## ÍNDICE GENERAL

CERTIFICADOS DE RESPONSABILIDAD Y AUTORIA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN .....	II
CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UPS .....	III
CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN.....	IV
DEDICATORIA .....	V
AGRADECIMIENTO .....	VI
RESUMEN.....	VII
ABSTRACT .....	VIII
ÍNDICE GENERAL .....	IX
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XI
ÍNDICE DE TABLAS.....	XII
INTRODUCCIÓN.....	1
1. EL PROBLEMA.....	3
1.1 Importancia y Alcance.....	3
1.2 Delimitación .....	3
1.2.1 Delimitación Temporal.....	3
1.2.2 Delimitación Espacial.....	3
1.2.3 Delimitación Académica .....	4
1.3 Objetivos.....	5
1.3.1 Objetivo General.....	5
1.3.2 Objetivos Específicos .....	5
1.4 Beneficiarios .....	5
1.5 Impacto.....	5
2. MARCO TEÓRICO .....	6
2.1 Sistemas de filtración.....	6
2.1.1 Sistemas de ósmosis inversa .....	7
2.1.2 Filtro de Carbón activado.....	7
2.1.3 Filtro de Zeolita.....	8
2.1.4 Filtro de sedimentos .....	8
2.1.5 Lámpara UV .....	9
2.1.6 Nanomembrana.....	9
2.2 Parámetros de calidad de agua .....	10
2.3 Control difuso.....	10
3. MARCO METODOLÓGICO .....	14
3.1 Metodología.....	14
3.2 Descripción de la propuesta.....	14
3.3 Diseño e Implementación de una planta de filtración usando nanomembrana .....	17

3.4 Características y funcionamiento de la planta .....	18
3.5 Instrumentación Instalada .....	18
3.5.1 Sensores de Presión .....	19
3.5.2 Sensores de pH.....	20
3.5.3 Sensores de conductividad.....	21
3.5.4 Sensor de caudal.....	22
3.5.5 Motor de pasos.....	23
3.6 Adquisición de datos.....	24
3.6.1 Programación en software LabView .....	25
3.7 Desarrollo de control difuso .....	28
4. ANALISIS DE RESULTADOS .....	36
CONCLUSIONES .....	36
RECOMENDACIONES .....	36
CRONOGRAMA .....	38
PRESUPUESTO.....	39
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	40
ANEXOS .....	42

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b>	Ubicación geográfica en donde se implementó el proyecto .....	4
<b>Figura 2</b>	Sistema de filtración .....	6
<b>Figura 3</b>	Fases de tratamiento de agua .....	7
<b>Figura 4</b>	Osmosis Inversa .....	7
<b>Figura 5</b>	Filtro de carbón activado .....	8
<b>Figura 6</b>	Filtro de sedimentos .....	8
<b>Figura 7</b>	Componentes de una lampara UV .....	9
<b>Figura 8</b>	Membranas de filtración .....	9
<b>Figura 9</b>	Parámetros de calidad para agua de consumo humano .....	10
<b>Figura 10</b>	Estructura de control difuso .....	11
<b>Figura 11</b>	Función de Saturación .....	11
<b>Figura 12</b>	Función de Hombro .....	12
<b>Figura 13</b>	Función triangular .....	12
<b>Figura 14</b>	Función trapecio .....	12
<b>Figura 15</b>	Función Sigmoidal .....	13
<b>Figura 16</b>	Ejemplo para formación de reglas difusas .....	13
<b>Figura 17</b>	Simbología de diagrama P&ID .....	15
<b>Figura 18</b>	Diagrama P&ID del proceso de filtración .....	16
<b>Figura 19</b>	Vista frontal de planta .....	17
<b>Figura 20</b>	Vista superior de planta .....	17
<b>Figura 21</b>	Diagrama de conexión de transductor de presión .....	19
<b>Figura 22</b>	Adquisición de señales de presión con DAQ Assistan .....	19
<b>Figura 23</b>	Conexión de sensores de pH .....	20
<b>Figura 24</b>	Adquisición de señales pH con DAQ Assistant .....	20
<b>Figura 25</b>	Programación de sensores de conductividad .....	21
<b>Figura 26</b>	Diagrama de conexión para lectura de conductividad .....	22
<b>Figura 27</b>	Conexión de sensor de caudal .....	22
<b>Figura 28</b>	Conexión de Motor de pasos .....	23
<b>Figura 29</b>	Diagrama de conexión de sensores y DAQ .....	23
<b>Figura 30</b>	Lectura de datos de pH y presión .....	24
<b>Figura 31</b>	Tablero de control .....	24
<b>Figura 32</b>	Lecturas de presión y alarma de mantenimiento .....	25
<b>Figura 33</b>	Lectura de sensores de conductividad .....	26
<b>Figura 34</b>	Control difuso .....	26
<b>Figura 35</b>	Control de giro de motor .....	27
<b>Figura 36</b>	Control de paro de motor .....	27
<b>Figura 37</b>	Funciones de membresía en LabVIEW, sistema SISO .....	29
<b>Figura 38</b>	Declaración de reglas de control sistema SISO .....	29
<b>Figura 39</b>	Funciones de membresía, sistema MISO .....	30
<b>Figura 40</b>	Reglas de control para sistema MISO .....	31
<b>Figura 41</b>	Respuesta de control en caudal de 4.5GPM .....	31
<b>Figura 42</b>	Respuesta de control en caudal de 4GPM .....	31
<b>Figura 43</b>	Respuesta de control en caudal de 3GPM .....	32
<b>Figura 44</b>	Respuesta de control en caudal de 1 GPM .....	32
<b>Figura 45</b>	Respuesta de control en diferentes caudales .....	32
<b>Figura 46</b>	HMI de sistema de control .....	33
<b>Figura 47</b>	HMI de sistema de monitoreo .....	34
<b>Figura 48</b>	Gráfico de respuesta de control .....	35

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> Reglas de control sistema SISO .....	28
<b>Tabla 2</b> Reglas de control sistema MISO.....	30
<b>Tabla 3</b> Presupuesto de proyecto.....	39

## INTRODUCCIÓN

El agua es el elemento vital que ocupa las tres cuartas partes de la superficie terrestre, sin embargo, no toda esta cantidad de agua es apta para ser usada por el ser humano ya que el agua que se encuentra en mares y océanos es agua salada y tan solo un mínimo porcentaje es agua dulce que se encuentra en ríos, lagos y glaciares.

Desde siglos atrás el ser humano se ha beneficiado de las fuentes de agua dulce para satisfacer sus necesidades y consumían directamente ésta agua desarrollando diferentes mecanismos para poder obtenerla y transportarla. Después con las mejoras en la calidad de vida y salud se afirma que deben emplearse métodos de purificación para que el agua dulce sea apta para consumo humano, el método más práctico ha sido someter el agua dulce a altas temperaturas hasta su punto de ebullición para poder eliminar microbios que pongan en riesgo la salud sin embargo al tratarse de un método que conlleva tiempo y depende mucho del volumen requerido así como del grado de contaminación del agua, con la ayuda de los avances científicos y tecnológicos, se han establecido diferentes opciones para potabilizar y purificar el agua dulce ya sea mediante el empleo de sustancias químicas o utilizando elementos filtrantes.

En la actualidad las plantas de filtración tienen muchas aplicaciones y sus elementos varían dependiendo la cantidad de producción, tipo de agua de ingreso y finalidad; por ende, también varía su tamaño. Las más conocidas son las plantas de tratamiento de agua potable que se tienen en las ciudades en donde sus elementos filtrantes son de gran tamaño al igual que sus instrumentos y equipos de control, también se tienen plantas de filtración para agua pura ya sea en fábricas de producción que se emplea para obtener agua de ingreso a calderos o sistemas de enfriamiento, así como en plantas alimenticias para preparación de productos en donde los elementos del proceso de filtrado son de un tamaño normal y se tiene los sistemas de filtración domésticos en donde no se requiere de numerosa instrumentación y los filtros son de tamaño pequeño.

Asimismo con los avances tecnológicos surge el desarrollo de sistemas de control automático para que cada vez se reduzca la intervención del hombre en los diferentes procesos industriales. Es así que existen varias metodologías y tipos de control que ayudan a automatizar los procesos y sistemas, teniendo como generalidad los tipos de control PI, PD y PID ya que son los que más se implementan en procesos industriales. Sin embargo se tienen otros tipos de control que a pesar de no ser tan reconocidos demuestran ser de gran utilidad para implementarse en otras aplicaciones, es así como se tiene el control difuso que actualmente es reconocido por implementarse en electrodomésticos y sobre todo para sistemas no lineales.

Un control difuso se caracteriza por emplear variables lingüísticas asociadas a un rango de aceptación, por ejemplo definir que la presión normal de descarga en una línea de Gas Licuado de Petróleo (GLP) sea entre 275 y 300 PSI; es así que se obtiene la variable de entrada con un convertidor analógico/digital el cual genera una señal interpretable al software que permite la integración de las variables lingüísticas y numéricas para realizar el control, así mismo la salida lingüística del

control difuso pasa por un convertidor digital/analógico que acopla las señales de salida en las adecuadas para controlar el sistema físico.

El control difuso se basa en asignación de rangos de operación en cada variable a emplear y asignarles un grado de pertenencia, como alto-regular-bajo; con lo cual se van definiendo los parámetros de control. En este tipo de control juega un papel importante la experiencia y conocimiento que se tenga del funcionamiento de la planta ya que esto ayudará a que el control se asemeje más a tener un comportamiento lógico, por ello es que este control forma parte de los sistemas de inteligencia artificial.

El proyecto presenta una opción de control automático en sistemas de filtración al implementar un control difuso en una planta de purificación de agua en la que se incorporarán equipos tecnológicos y se aplicarán los conocimientos obtenidos a lo largo de la formación académica para obtener el monitoreo en línea de la planta y control de su producción.

El enfoque de implementar un sistema de monitoreo es para que ayude a detectar y actuar sobre cualquier tipo de alteraciones que ocurran en la planta lo cual comprometa la eficiencia de la nanomembrana y proteger su vida útil, para ello se contará con sensores de salida analógica instalados en diferentes etapas del proceso de filtración hasta su salida de purificación que ayudarán a verificar el estado de la planta en línea garantizando un correcto funcionamiento de la misma.

Adicionalmente se implementa un control difuso aplicado a la válvula de compuerta ubicada en la entrada de la nanomembrana para regular el caudal de producción con ayuda de un motor a pasos y obteniendo la respectiva señal de caudal.

## **1. EL PROBLEMA**

Al implementar un sistema de filtración es importante que trabaje de manera continua y eficiente ya que en caso de que la planta no trabaje adecuadamente, y dependiendo la finalidad, desencadena en efectos negativos como deterioro de equipos, inversión en mantenimientos, reemplazo de componentes, entre otros.

En todo sistema de filtración se realiza mantenimientos preventivos en base a las recomendaciones del fabricante o diseñador, sin embargo suele presentarse casos de un deterioro prematuro en alguno o varios de los elementos que componen el sistema por motivo de que no se pudieron detectar irregularidades presentes en los parámetros del fluido en el ingreso de la planta o en alguna de las etapas del sistema; como puede ser por causa de variación de presión, flujo, impurezas no contempladas o contaminación en el fluido de ingreso. Al no poder detectar y corregir los eventos en tiempo real conlleva a que el elemento de purificación pueda obstruirse, deteriorarse o romperse lo cual implica costos adicionales para mantenimientos correctivos o dependiendo la magnitud del daño se realice el reemplazo de componentes en la planta.

### **1.1 Importancia y Alcance**

La importancia del proyecto se encuentra en que se emplea un sistema de purificación libre del uso de químicos implementando osmosis inversa con una nanomembrana y lámparas UV. Su alcance es demostrar lo beneficioso de contar con un sistema de control y mediciones en línea para este tipo de plantas e impulsar a que se realicen futuros proyectos de titulación enfocado en sistema de mejoras de procesos.

### **1.2 Delimitación**

A continuación, se detalla las bases del desarrollo del proyecto para poder dar una solución al problema planteado.

#### **1.2.1 Delimitación Temporal**

La ejecución del proyecto se inicia en Septiembre del 2017 y culmina en Mayo del 2019.

#### **1.2.2 Delimitación Espacial**

El proyecto se instaló y desarrolló en el aula C100 de la Universidad Politécnica Salesiana sede Guayaquil, la misma ha sido designada por las autoridades de la institución educativa. Ubicada en Guayaquil, barrio centenario calles Gral. Francisco Robles y 37 SE



## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo General**

Diseñar e implementar un prototipo de planta para el tratamiento de aguas terciarias mediante el empleo de nanomembrana de filtración que será controlada por un sistema difuso empleando una tarjeta de adquisición de datos DAQ y LabVIEW.

### **1.3.2 Objetivos Específicos**

- Realizar el sistema eléctrico y mecánico para la conexión de las tuberías y los componentes que conforman la planta.
- Implementar un sistema de control electrónico mediante una tarjeta DAQ de NI como tarjeta para adquisición de datos de caudal, presión, pH.
- Establecer el rango de presión a la que trabaja la nanomembrana mediante la medición de presión en la entrada y salida de esta.
- Diseñar un control lógico difuso destinado a controlar el flujo de ingreso en la nanomembrana.
- Determinar la eficiencia de la nanomembrana comparando los valores de pH y conductividad al ingreso y salida del filtro.
- Elaborar la conexión de la tarjeta DAQ con LabVIEW para la lectura de datos de caudal, presión, pH adquiridos en la planta y visualizarlos en un computador.
- Establecer el tiempo de uso óptimo de la nanomembrana mediante la medición del flujo y desinfección del agua.

## **1.4 Beneficiarios**

La comunidad universitaria es quien se beneficiará de la implementación realizada ya que pueden desarrollar nuevos proyectos de mejora usando los equipos instalados, así como se beneficiarán del agua obtenida de la planta.

## **1.5 Impacto**

Al usar sensores y un sistema de adquisición de datos se garantiza que el usuario pueda verificar el funcionamiento de la planta en tiempo real y con el sistema de control facilita la operación de la planta ya que por medio de la interfaz de computadora puede manipular el caudal de producción en un entorno amigable y de fácil operación.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 Sistemas de filtración

Un sistema de filtración se emplea para retener particularidades físicas o químicas de los fluidos. Los filtros como tal se diseñan con características y materiales a fin de retener un compuesto específico del fluido a emplear. Un sistema de filtración está compuesto por varios filtros independientes de diferentes propiedades para poder obtener un fluido con mejores características o más limpio del que se tiene inicialmente.

Los filtros se pueden implementar para tratamiento de fluidos distintos al agua como tal, por ejemplo, para combustibles; sin embargo se ha desarrollado más alternativas de filtros enfocados en tratamiento de aguas.

Un sistema de filtración se implementa en función al resultado final que se desea obtener en comparación al fluido de ingreso, es así que puede definirse en base a: impurezas a eliminar, parámetros de calidad y grado de contaminación del fluido de ingreso. [2]

Para definir un grado de tratamiento de agua se debe especificar su finalidad, es decir para qué se desea emplear el agua obtenida del sistema de filtración y qué tipo de agua se desea filtrar (agua cruda, agua potable, etc.). Es así que se establecen las etapas del sistema de filtración y el tipo de filtros a usar.

Los sistemas de purificación de agua puede constar de múltiples etapas las mismas que se definen según el tipo de retención que se necesita de cada una de ellas, es decir si se tiene agua cruda y se desea obtener agua potable se analiza el tipo de componentes que presenta el agua de ingreso para escoger los filtros adecuados que retengan sedimentos, sólidos suspendidos, olor, color u otras particularidades que se tenga en la misma, de esta manera se tienen etapas de filtración cada una de ellas destinada a separar o retener una característica física o química específica del fluido hasta que finalmente pase por un sistema de desinfección para garantizar que el agua sea apta para consumo humano.



**Figura 2** Sistema de filtración [3]

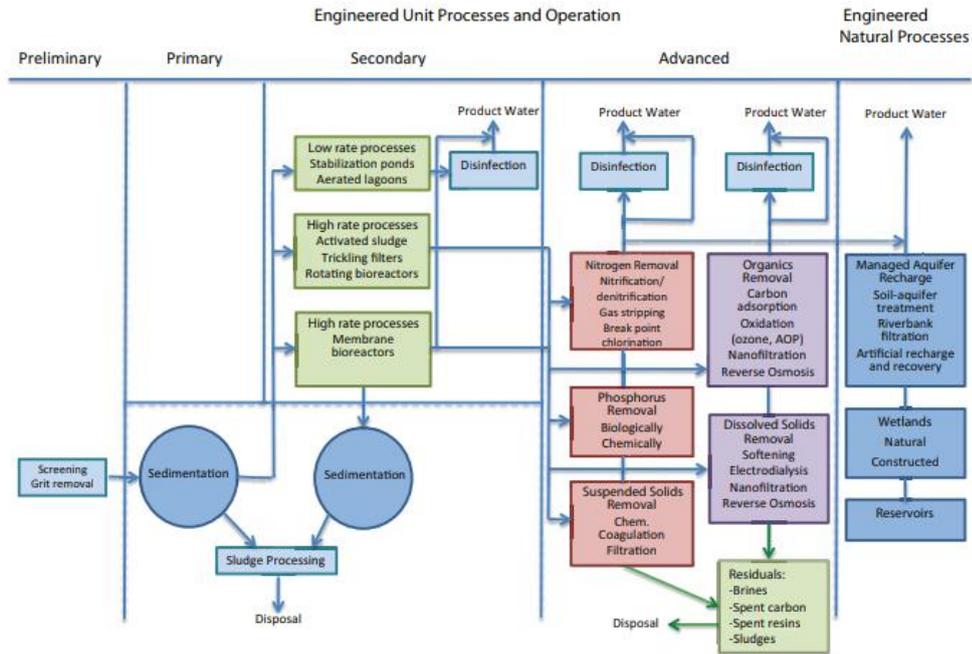


Figura 3 Fases de tratamiento de agua [4]

### 2.1.1 Sistemas de ósmosis inversa

Un sistema de osmosis inversa consiste en un sistema de filtración caracterizado por emplear membranas semipermeables que tienen poros de dimensiones micrométricas por donde circula un fluido a altas presiones para que logre atravesar los poros al mismo tiempo que retiene macromoléculas e incluso componentes iónicos, los cuales son de tamaño mayor a la dimensión del poro diseñado produciendo un efecto tamiz. [5]

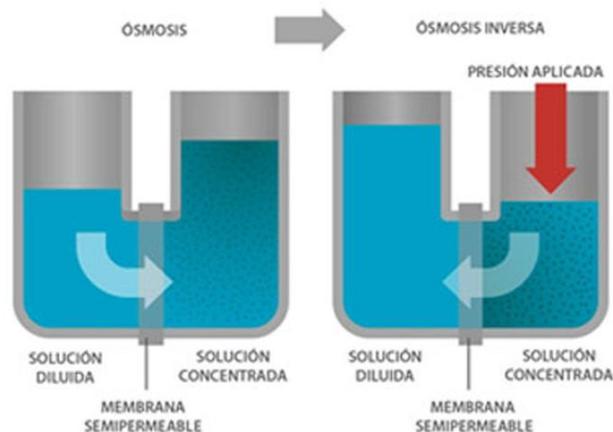


Figura 4 Osmosis Inversa [6]

### 2.1.2 Filtro de Carbón activado

Un filtro de carbón activado se obtiene a partir de residuos biomásicos, el carbón activado como tal tiene una gran capacidad de adsorción por lo que se emplea en

diferentes aplicaciones, entre ellas para potabilización de agua. Actualmente se han desarrollado estudios para obtención de carbón activado a partir de materiales orgánicos y que pueda ayudar a la utilización de recursos renovables. [7]

Comúnmente en los sistemas de filtración de agua se utilizan filtros de carbón activado para eliminar cloro, color y sabor lo cual ayuda a tener un filtrado más fino del agua. [2]



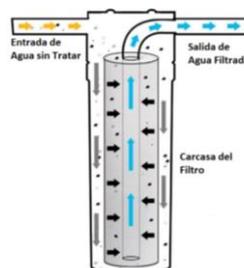
**Figura 5** Filtro de carbón activado [8]

### 2.1.3 Filtro de Zeolita

La Zeolita es un material de compuesto químico con eficientes propiedades de adsorción y de gran durabilidad, que retiene partículas micrométricas. Los filtros de zeolita ayudan a disminuir la cantidad de sólidos, dureza, hierro, manganeso, arsénico, sulfato de detergente anicónico y de sólidos solubles de manera efectiva en agua potable; además ayuda a tener menos pérdida de presión en el flujo del sistema [9]

### 2.1.4 Filtro de sedimentos

Los filtros de sedimento ayudan a retener partículas orgánicas e inorgánicas que se encuentran en un fluido; es muy común que se usen para agua cruda o potable ya que es importante disminuir al mínimo la cantidad de sedimentos del fluido para evitar que las características físico-químicas se alteren de tal manera que pueda afectar a la función final del fluido a filtrar. Los sedimentos pueden ayudar a la proliferación de algas, acumulación de metales pesados y bioacumulación de compuestos tóxicos para los seres vivos, dependiendo su concentración. [10]



**Figura 6** Filtro de sedimentos [11]

### 2.1.5 Lámpara UV

Las lámparas UV usan el tipo de radiación ultravioleta para desinfección de agua en tratamientos de purificación, es un proceso no invasivo que ayuda a la esterilización de microorganismos patógenos siempre que se mantenga un rango muy bajo de turbidez. [2]

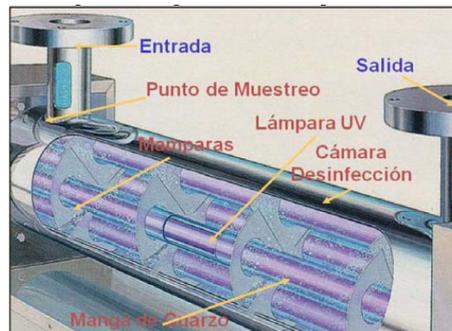


Figura 7 Componentes de una lámpara UV [2]

### 2.1.6 Nanomembrana

Una nanomembrana es un filtro que está diseñado con poros de tamaño nanométrico, esta característica las hace ideales para ser usadas en sistemas de purificación además de que su vida útil es mayor que el empleo de membranas convencionales, siempre que trabaje cumpliendo las especificaciones técnicas y rangos de operación.

Se han probado nanomembranas para retención de moléculas orgánicas e inorgánicas con excelentes resultados, así como también se puede implementar para remover hidrocarburos, antibióticos, toxinas, bacterias e incluso virus de polio. [12]

Es importante tomar en cuenta que para usar una nanomembrana se debe tener como ingreso un fluido de tratamientos previos de tal manera que el fluido esté libre de sedimentos, materia orgánica, etc. [4]

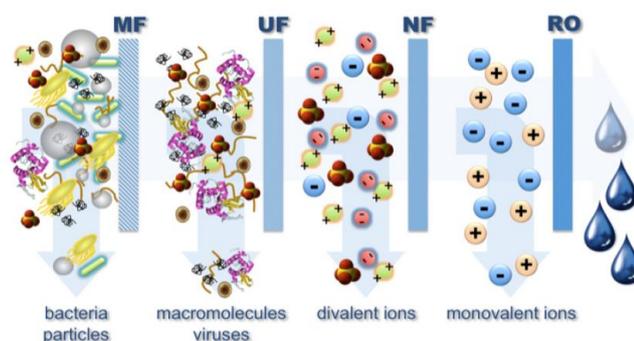


Figura 8 Membranas de filtración [4]

## 2.2 Parámetros de calidad de agua

La calidad de agua siempre debe ser evaluada bajo los rangos establecidos por normativas nacionales o internacionales. La calidad de agua se establece no solo para agua bebible sino para diferentes aplicaciones como puede ser el agua potable, agua de riego, aguas que se vierten en ríos, agua para fármacos, etc.

Para saber los parámetros y rangos aceptables de calidad primero se debe definir qué tipo de agua se está analizando, es decir un agua para riego tiene rangos de aceptación más amplia que un agua para fármacos. En el proyecto implementado se conoce que el tipo de agua que se obtendrá de la osmosis inversa será un tipo de agua para consumo humano por ello se determinan los rangos de control de calidad en base a la normativa nacional INEN que especifica los parámetros físicos y químicos para agua de consumo humano con su respectivo rango de aceptación.

La normativa detalla que el agua purificada envasada debe cumplir con los requisitos especificados en normativa NTE INEN 2200, la misma debe ser elaborada con agua que cumpla la normativa NTE INEN 1108. [13]

Requisito	Unidad	Min	Máx	Método de ensayo
Color	Pt-Co <sup>b</sup>	-	5	NTE INEN-ISO 7887
Turbidez	NTU <sup>a</sup>	-	1	NTE INEN-ISO 7027
Sólidos Totales Disueltos Aguas purificadas envasadas	mg/L	-	500	2 540 Solids Standard Methods
Sólidos Totales Aguas purificadas mineralizadas envasadas	mg/L	500	1 000	2 540 Solids Standard Methods
pH a 20 °C agua purificada envasada		4,5	9,5	NTE INEN-ISO 10523
pH a 20 °C agua purificada mineralizada envasada		3,8	9,0	NTE INEN-ISO 10523
Cloro libre residual	mg/L	AUSENCIA		NTE INEN 977
Dureza total	mg/L	-	300	NTE INEN 974

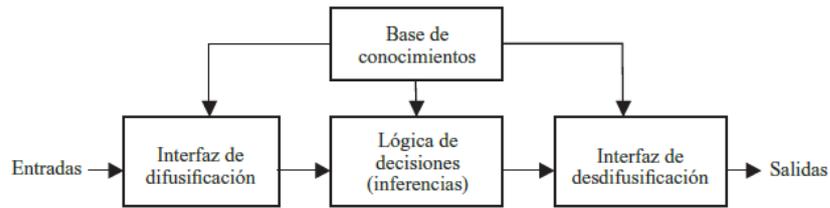
<sup>a</sup> 1 unidad en la escala PT-CO = 1 mg/L de platino en forma de cloro platino

<sup>b</sup> 1 unidad nefelométrica de turbidez (NTU) = 1 mg/L de formazina estándar.

**Figura 9** Parámetros de calidad para agua de consumo humano [13]

## 2.3 Control difuso

El control difuso es un control adaptativo que se caracteriza por emplear variables lingüísticas para definir los rangos de trabajo y parametrización del control. El control difuso se basa en la experiencia de un usuario respecto al sistema que se desea controlar, es muy efectivo para aplicarse en sistemas no lineales ya que por su sencillez en la configuración se puede ir perfilando y ajustando los rangos de operación tanto en sus entradas como en su salida. [14]



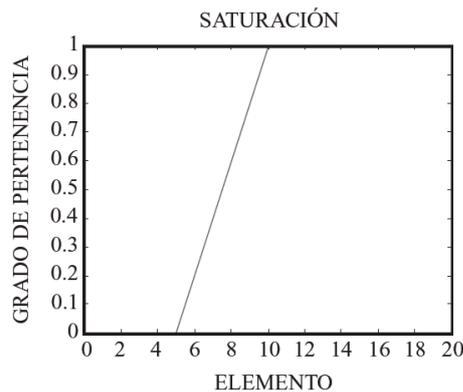
**Figura 10** Estructura de control difuso [14]

El control difuso se basa en los conjuntos difusos en donde se trata de extender el rango de pertenencia en un conjunto mas no solo definir que pertenece o no (lógica booleana), esto se logra creando ambigüedades, en donde se establecen reglas de “si-entonces” con lo cual se logra plasmar la experiencia del ser humano para realizar un sistema de control. [15]

Para realizar un control difuso se emplean funciones de membrecía que conforman los conjuntos difusos, dichas funciones se emplean según el grado de pertenencia que se desea asignar a una variable, a continuación, se describen las funciones de membrecía que se puede emplear en un control difuso:

Función de Saturación:

La función de saturación toma valores ascendentes partiendo de 0 a 1 según el rango de asignación de una variable, por ejemplo al tener la variable “caliente” con respecto a la temperatura se puede definir que al tener 35°C tiene una pertenencia de 1 y al tener 5°C la pertenencia sería 0 con lo cual se tiene el rango de “frio” que va de 5°C (como un valor mínimo) a 35°C (como un valor máximo).

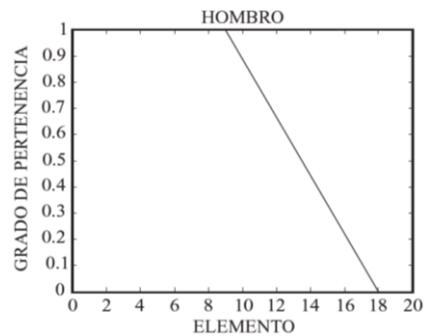


**Figura 11** Función de Saturación [14]

Función hombro

La función de hombro tiene un significado opuesto a la función saturación. Esta función toma valores descendentes partiendo de 1 a 0 según el rango de asignación de una variable, por ejemplo, al tener la variable “frio” con respecto a la temperatura se puede definir que al tener 35°C tiene una pertenencia de 0 y al

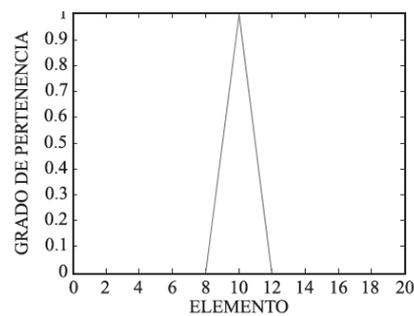
tener 5°C la pertenencia sería 1 con lo cual se tiene el rango de “frio” que va de 35°C (como un valor mínimo) a 5°C (como un valor máximo).



**Figura 12** Función de Hombro [14]

### Función Triangular

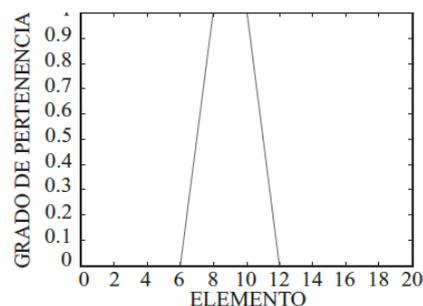
La función triangular hace referencia a que en una escala de valores se tiene que el valor medio cumple con la afirmación mientras que la pertenencia va decayendo mientras toma valores lejanos a este. [14]



**Figura 13** Función triangular [14]

### Función Trapecio

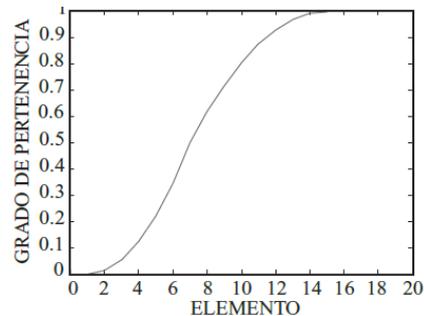
La función trapecio se emplea cuando un rango de valores puede cumplir una afirmación, por ejemplo cuando se tiene un objeto a cierta distancia se puede establecer un rango de puntos desde donde se lo aprecia nítidamente. [14]



**Figura 14** Función trapecio [14]

## Función Sigmoidal

La función Sigmoidal toma valores ascendentes en un rango de asignación de una variable, se caracteriza porque este valor no incrementa linealmente sino en forma de saturación, es decir existe un punto en que la función toma una curva ya que el incremento de pertenencia no es brusco por lo cual es que es más semejante a un comportamiento real. [14]



**Figura 15** Función Sigmoidal [14]

## Reglas

Las reglas lingüísticas de un control difuso forman parte del segundo paso del proceso de control, en donde se asigna una declaración de “si-entonces” que incluye las composiciones realizadas es decir las variables de entrada y salida.

Existen diferentes maneras de declarar las reglas difusas de control como puede ser: en base a la experiencia, conocimiento de ingeniería de control, acciones de control de un operador. [14]

- Si  $x$  pertenece al dominio  $A_0$ , entonces  $y$  pertenece al dominio  $B_0$
- Si  $x$  pertenece al dominio  $A_1$ , entonces  $y$  pertenece al dominio  $B_1$
- Si  $x$  pertenece al dominio  $A_2$ , entonces  $y$  pertenece al dominio  $B_2$
- Si  $x$  pertenece al dominio  $A_3$ , entonces  $y$  pertenece al dominio  $B_3$

**Figura 16** Ejemplo para formación de reglas difusas [14]

### 3. MARCO METODOLÓGICO

#### 3.1 Metodología

En el desarrollo del proyecto se aplicaron diferentes métodos que se describen a continuación:

Método Deductivo: Se aplica el método deductivo al momento del diseño de la planta de filtración ya que se toma como referencia las plantas de tratamiento de agua para determinar qué tipo de elementos se necesitan, así como para la selección de la instrumentación y mediante los conocimientos adquiridos a lo largo de la formación académica lo cual ayudará a conocer los parámetros, formulas e incógnitas necesarias para el desarrollo de este proyecto.

Método Analítico: Se analizan los puntos clave en donde deben ser ubicados los sensores para el monitoreo del proceso de filtración y detectar puntos de mejora para obtener un eficiente funcionamiento de la planta.

Método de Síntesis: Se aplica síntesis al momento de la interpretación de los datos monitoreados y de control para determinar la eficiencia de producción de la planta.

Método Experimental: Se ejecuta diversas pruebas para el control de filtración de la nanomembrana en la planta y así poder obtener resultados efectivos. Se aplica también en el desarrollo de la programación y software ya que según el comportamiento de la planta y tiempo de estabilización se va ajustando los parámetros del control.

#### 3.2 Descripción de la propuesta

Se realiza un control difuso en un prototipo de planta de filtración usando una tarjeta de adquisición de datos NI USB-6210 de National Instruments y programación en software LabVIEW.

El monitoreo de la planta se realiza obteniendo la lectura de los diferentes sensores instalados, a continuación, se describe la ubicación de estos con su respectiva finalidad:

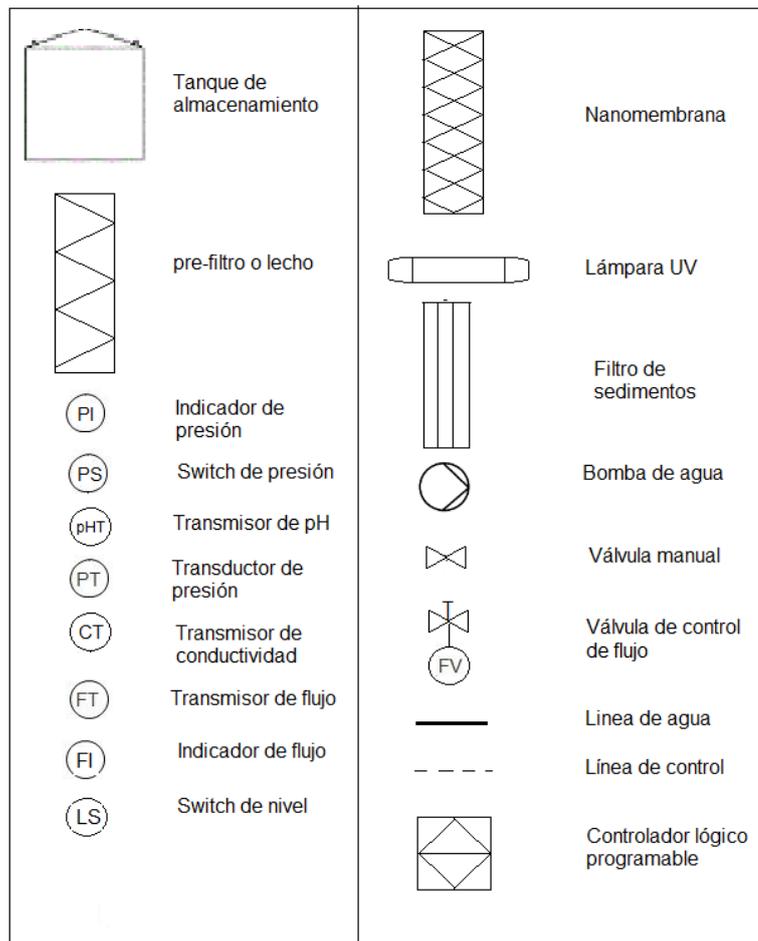
Sensor de pH: se coloca un sensor de pH en la entrada y uno en la salida de la planta para verificar la demanda de potencial de hidrogeno en el flujo de agua y compararlas para mantener una estabilidad de tal manera que indique en caso de tener una variación significativa después de la filtración.

Sensor de Conductividad: se instala uno a la entrada y uno a la salida de la planta para medir los valores de conductividad y TDS que logra filtrar la nanomembrana, este parámetro ayuda a verificar que el filtro está trabajando adecuadamente o si requiere de mantenimiento o revisión.

Transductor de Presión: Se coloca un sensor entre los lechos filtrantes el cual indica si el lecho está obstruido, se coloca uno en la entrada de la nanomembrana debido a que una sobrepresión puede provocar la ruptura de esta, y uno en cada salida de la nanomembrana que son permeado y concentrado los cuales me indican si la nanomembrana se encuentra obstruida.

Sensor de Caudal: Se realiza la medición de caudal a la salida de permeado y concentrado de la nanomembrana lo cual indica directamente la producción de la planta.

El control de caudal de producción de la planta se realiza definiendo rangos de trabajo alto, medio y bajo que serán definidos por un usuario, se programa el control teniendo en cuenta que dichos rangos estén dentro de los parámetros de operación adecuados para la nanomembrana. El control se realiza en el software LabView y con la tarjeta NI USB-6210 la cual envía una señal analógica para controlar el giro del motor de pasos PH266-01GK.

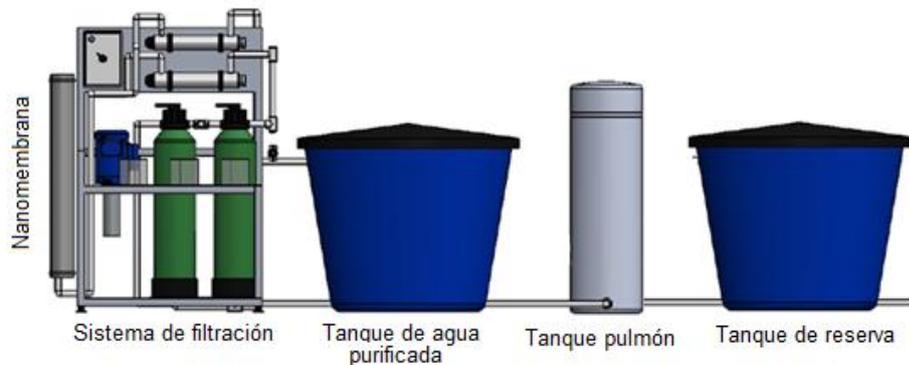


**Figura 17** Simbología de diagrama P&ID

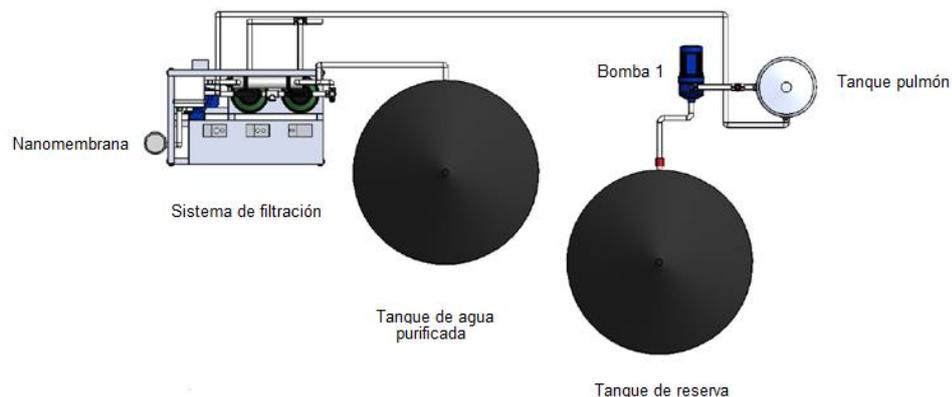


### 3.3 Diseño e Implementación de una planta de filtración usando nanomembrana

#### Diseño de planta de filtración



**Figura 19** Vista frontal de planta



**Figura 20** Vista superior de planta

Inicialmente el enfoque fue tener un prototipo de un sistema de flujo de agua para ingreso a una nanomembrana teniendo como ingreso un flujo de agua altamente contaminada y poder realizar el control respectivo, sin embargo, al momento de realizar las respectivas investigaciones para el uso de la nanomembrana se percata de que se necesita un sistema de pre filtrado para poder aprovechar su funcionalidad y sobre todo para que su vida útil sea más extensa. Se busca asesoramiento de una compañía proveedora de sistemas de filtrado con la cual se definen el tipo de prefiltros para que el fluido de ingreso a la nanomembrana tenga las propiedades adecuadas para su filtración final y se plantea el diseño de la planta en base al volumen de producción de agua que se desea manejar a la salida del filtrado y se definen los puntos de ubicación de los diferentes instrumentos de medición para el respectivo monitoreo del sistema.

Debido a que los sistemas de filtración puede ser de diferentes tamaños y tener cierta cantidad de elementos en base al tipo de fluido que se requiere tener a la salida de esta así como del volumen de producción lo que infiere directamente en el

costo total del sistema de filtración así como del espacio que llegase a ocupar; se decide implementar una planta con una producción de 16 GPM y se diseña con los elementos necesarios para que opere correctamente y que pueda adaptarse con la instrumentación necesaria para llevar a cabo un sistema de control como, como resultado se instala la planta de filtración con la infraestructura tal como se muestra en las figuras 19 y 20.

### **3.4 Características y funcionamiento de la planta**

La planta cuenta de un tanque de reserva de agua potable, la misma que será usada como fluido de ingreso, este tanque ayuda a que mientras esté operando la planta no intervenga con el volumen y presión de flujo que utilizan las demás áreas de la institución educativa ya que la planta opera con una presión específica y por medio de una bomba se mantiene un caudal de ingreso constante. Es decir, si no se tuviera el tanque de reserva la planta operaría directamente desde la red de suministro de agua potable y al momento de que esta se encuentre produciendo se vería afectada la presión en la red de ingreso de agua potable de la institución impidiendo que, por la caída de presión, el agua llegue con un buen flujo a los pisos altos. Adicionalmente se cuenta con una bomba de ingreso de flujo y su respectivo tanque pulmón que ayuda a elevar la presión del fluido según la necesidad de producción de la planta.

El sistema de filtración inicia con dos lechos, uno de carbón activado que ayuda a retener características químicas y microorganismos presentes en el agua de ingreso y continúa por el segundo elemento de filtración compuesto de un filtro de Micro Z que ayuda a la retención de sólidos de hasta 5 micras [9]. El fluido circula por una lámpara UV que ayuda a neutralizar los microorganismos que pudieran pasar de los dos primeros filtros.

Siendo un sistema de desinfección libre de químicos; una vez que se elimina la carga química y sedimentos del agua pasa a un proceso de osmosis inversa en donde se emplea ultra filtración mediante el uso de una nanomembrana que, al tratarse de un filtro nanoporoso es evidente que el flujo y presión de agua en su salida será muy bajo en relación a su entrada, es decir se tendrá una caída de presión y una caída de caudal de producción por lo cual se incorpora una segunda bomba que ayuda a elevar la presión y flujo la entrada de la nanomembrana para que ayude a que el fluido penetre los microporos y se obtenga un flujo de producción continuo.

La nanomembrana ayuda a retener partículas microscópicas y organismos bacterianos, a esto se añade una neutralización final con una lámpara ultravioleta con lo cual se obtiene un agua pura apta para consumo humano.

### **3.5 Instrumentación Instalada**

Para realizar el monitoreo de los parámetros de funcionamiento de la planta y calidad de agua se dispone de diferentes sensores para obtener una lectura en

línea, para el control se dispone de un motor de pasos acoplada a una válvula de compuerta que se encuentra en el ingreso de la nanomembrana.

Para la instalación de la instrumentación en la planta se definen los puntos en base a los rangos máximos y mínimos de operación, considerando también que se ubiquen en áreas donde sea crítica la medición.

Se define la medición de presión entre los lechos y entre la nanomembrana para que, según su variación entrada-salida se pueda determinar que se encuentran saturados o no, de igual manera se mide el caudal de permeado y concentrado de la nanomembrana para saber cuánto se está produciendo y cuanto se rechaza. La medición analítica es muy importante porque indica la calidad de agua y en base a ello se realizan mantenimientos, ajustes o cambio de la nanomembrana así como de los componentes de la planta.

### 3.5.1 Sensores de Presión

Se instalan cuatro sensores de presión con cuyos valores se puede determinar si alguno de los elementos filtrantes está operando ineficientemente y con ello realizar un mantenimiento del sistema.

Se usan transductores de presión marca SIEMENS. Para la conexión de los sensores de presión se usa cable de baja impedancia con la finalidad de que al transmitir la señal se tenga una buena exactitud comparando con los manómetros instalados. Se alimentan los sensores con 12VDC y se usa una resistencia de 250  $\Omega$  en la señal negativa. La señal obtenida de los transductores es de 4-20 mA la misma que es leída por la DAQ y se realiza el ajuste según los rangos de presión de los equipos, como resultado se tiene una medición en unidades PSI.

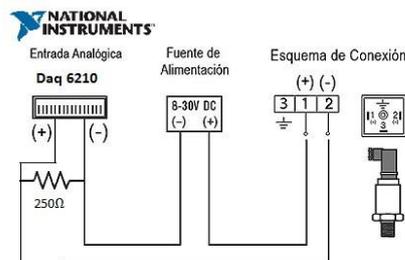


Figura 21 Diagrama de conexión de transductor de presión [16]

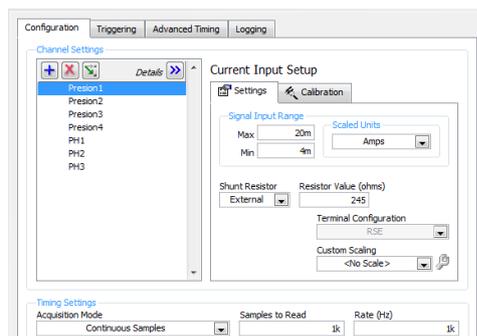


Figura 22 Adquisición de señales de presión con DAQ Assistant

Para la calibración de los sensores se usa la ecuación de la recta usando como variables el rango de 4-20mA Vs el rango máximo de medición, obteniendo como resultado las siguientes ecuaciones:

$$p1 = (9375 \times a1) - 37,5$$

$$p2 = (18750 \times a2) - 75$$

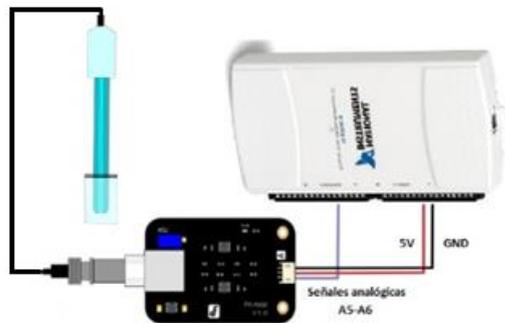
$$p3 = (18750 \times a3) - 75$$

$$p4 = (18750 \times a4) - 75$$

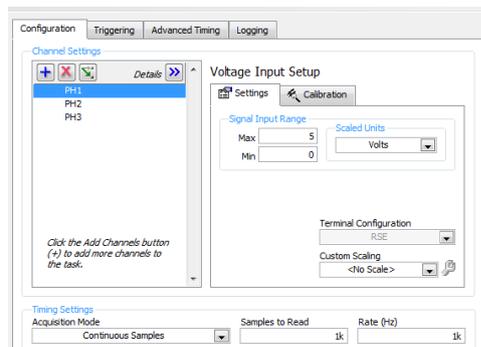
En donde a1, a2, a3 y a4 representa el valor de mA y corresponde al nombre de la entrada de señal de la DAQ. La ecuación de p1 es diferente debido a que el rango de medición máximo es de 150PSI, en comparación al resto de sensores que manejan un rango de hasta 300 PSI.

### 3.5.2 Sensores de pH

Se instalan los sensores de pH tanto en la entrada como en la salida de la planta, para el montaje de los sensores se dispone de celdas de flujo diseñadas para que se coloquen las mediciones analíticas y que mediante un muestreo continuo se obtenga la medición. Estos sensores necesitan de un flujo continuo y calmado, pero no soportan las elevadas presiones de la planta por lo cual no se instaló directamente en las tuberías ya que podría ocasionar una ruptura del cristal del que están formado lo cual dañaría los sensores de pH. Además de que la velocidad del fluido afecta directamente al tiempo de respuesta de los sensores y se tendrían valores incoherentes o inestables.



**Figura 23** Conexión de sensores de pH



**Figura 24** Adquisición de señales pH con DAQ Assistant

Para la medición de pH se tiene una señal análoga la misma que ingresa a una tarjeta electrónica proporcionada con el mismo sensor de donde se obtiene una señal de voltaje 0-5 VDC esta señal es leída con la DAQ y mediante la ecuación de la recta se puede obtener el valor de pH como salida.

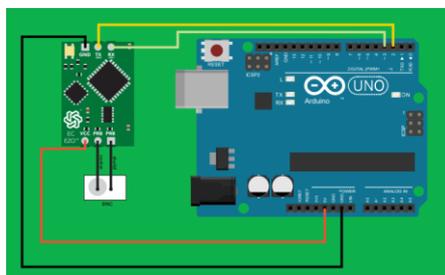
$$\text{ph1} = (a5 \times -6.024) + 22,61;$$
$$\text{ph2} = (a6 \times -6.023) + 22.7315;$$

En donde a5 y a6 son los valores de voltaje obtenidos en la medición y corresponde a los nombres de pines de entrada en la DAQ.

Para el ajuste de los sensores se deben usar patrones de pH, dependiendo la aplicación y la precisión requerida se plantean los puntos de calibración y que valores de patrón se emplea, como en este caso se necesita tener buena exactitud ya que se trata de agua para consumo humano se cuenta con 3 patrones en polvo de 4,00; 6,89 y 9,84 de pH los mismos que se disuelven en 100ML de agua destilada. De esta cantidad de vierte una pequeña parte en un envase distinto para que tenga contacto con la sonda para evitar contaminar toda la solución patrón, una vez que se coloca la sonda en el nuevo recipiente patrón se usa un multímetro para leer el valor de voltaje que se obtiene de la tarjeta electrónica y con ello realizo el cálculo de ecuación de la recta. Se repite el procedimiento para los otros patrones tomando en cuenta que se debe lavar la sonda de pH con agua destilada antes de cambiar de patrón para evitar que se contaminen.

En caso de que los valores de pH obtenidos con coincidan con los patrones una vez realizado el ajuste, entonces se giran los potenciómetros hasta obtener un voltaje mínimo usando el patrón de 7 de pH, con ese ajuste se toman nuevamente las mediciones de voltaje con pH 4 y 10. Una vez más se realiza la ecuación de la recta y se compara las mediciones.

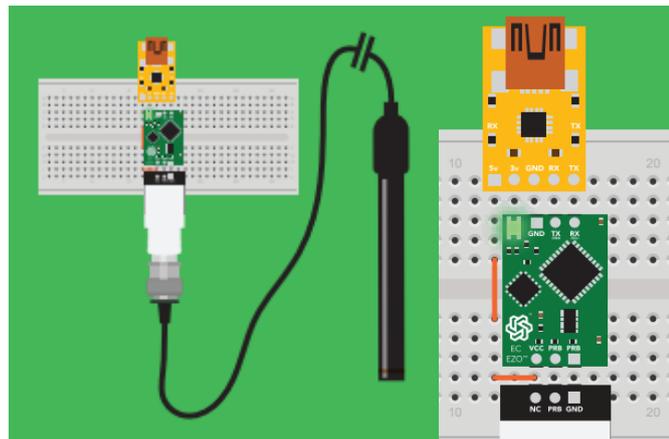
### 3.5.3 Sensores de conductividad



**Figura 25** Programación de sensores de conductividad [17]

Se instalan sensores de conductividad marca Atlas Scientific. Para leer el sensor de conductividad se lee por un puerto serial, los sensores de conductividad vienen con una tarjeta de comunicación en donde se programa el rango de medición así como las lecturas que se desea obtener, las mismas que pueden ser conductividad, TDS y salinidad. Se conecta los sensores en base al diagrama especificado en figura 25.

Para realizar la calibración de los sensores se usan soluciones patrones de conductividad, en la compra de los sensores se incluyen soluciones patrón para la calibración dependiendo el rango de medición del sensor. Físicamente se introduce el sensor en una muestra del patrón seleccionado y mediante programación se ajusta la medición deseada tal como se indica en hojas técnicas del sensor, una vez configuradas las tarjetas de los sensores basta con usar una tarjeta PL2303 para obtener los datos de medición en línea y conectar a la tarjeta de adquisición de datos.

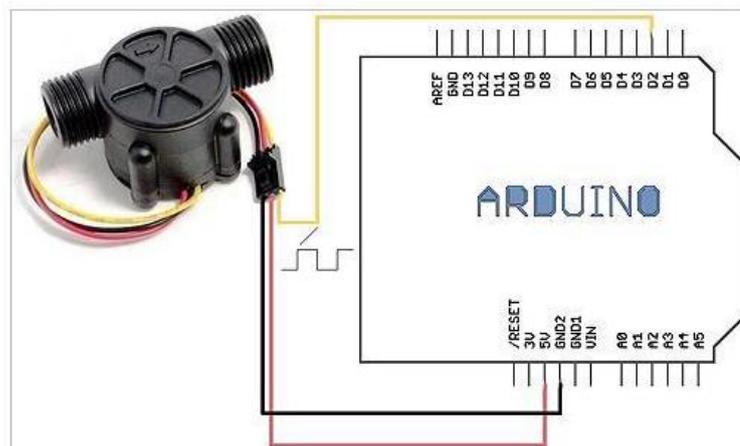


**Figura 26** Diagrama de conexión para lectura de conductividad [17]

### 3.5.4 Sensor de caudal

Se instalan dos sensores de caudal tipo paleta modelo YF-S201, uno en la salida de permeado y otro en la salida de concentrado ubicados después de la nanomembrana.

La señal obtenida de los sensores de caudal es de pulsos la misma que se calibra mediante codificación y tomando de referencia los rotámetros instalados con lo cual se puede obtener el dato de caudal en GPM.



**Figura 27** Conexión de sensor de caudal [18]

### 3.5.5 Motor de pasos

Se usa un motor de pasos modelo PH266-01K el cual tiene un torque suficiente para abrir y cerrar la válvula de compuerta mientras el sistema está trabajando. Para el control del motor se usa una tarjeta "driver" modelo A4988 la cual permite enviar una señal de pulsos para que efectúe el giro ya sea en sentido horario o anti-horario.

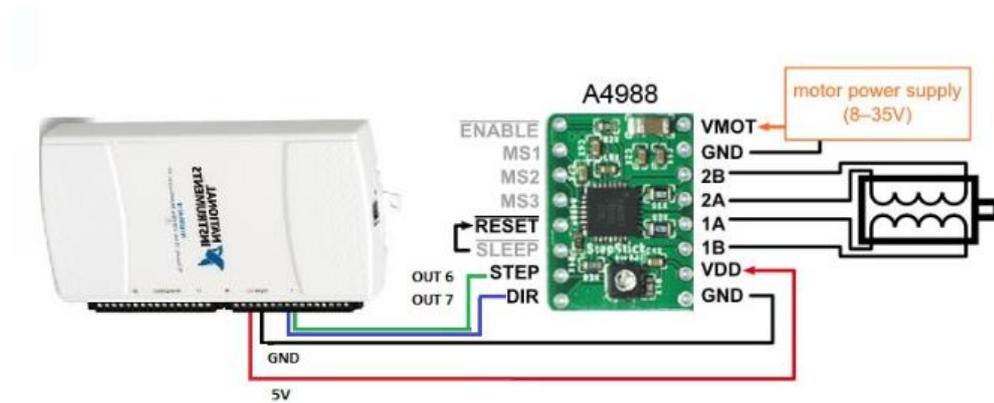


Figura 28 Conexión de Motor de pasos

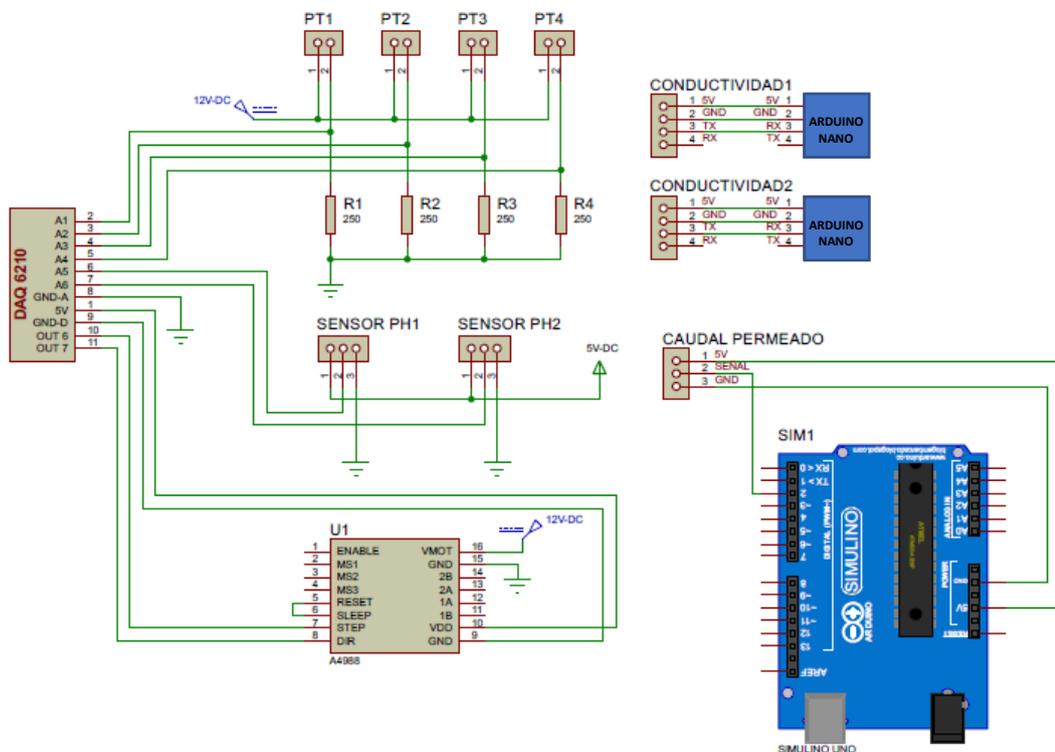


Figura 29 Diagrama de conexión de sensores y DAQ

### 3.6 Adquisición de datos

Antes de realizar el control se realiza un análisis del comportamiento de la planta en base a la manipulación manual de parámetros de presión y caudal mediante la regulación de la válvula de compuerta y de aguja.

Se realizan diferentes pruebas para con ello definir los rangos de trabajo del control, teniendo presente los rangos de operación máxima de los elementos instalados, así como las recomendaciones dadas por los co-diseñadores de la planta.

Se emplea una tarjeta de adquisición de datos NI USB-6210 de National Instruments la misma que tiene la cantidad de entradas y salidas necesarias para el desarrollo del proyecto, en base al diagrama de conexiones especificado en figura 30.

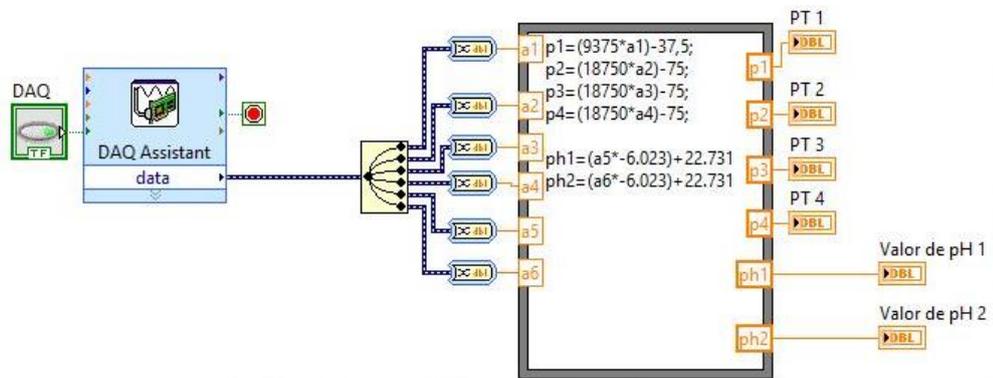


Figura 30 Lectura de datos de pH y presión



Figura 31 Tablero de control

### 3.6.1 Programación en software LabView

Se realiza la programación del sistema de control y monitoreo, se adquieren las señales de los sensores con la herramienta DAQ ASSISTANT y con la ayuda de una ventana de comando se ingresan las fórmulas para la conversión de las señales de pH y presión. Para visualizar la tendencia se enlazan los valores que se obtienen de las mediciones con un indicador propio del programa de tal manera que se visualice como va incrementando el valor en una imagen animada.

Se establece una alarma para cuando la diferencia de presión en la nanomembrana exceda los 13PSI y si la presión de entrada de la nanomembrana excede los 130PSI, estos valores se toman de las especificaciones de funcionamiento indicado en las hojas técnicas de la nanomembrana.

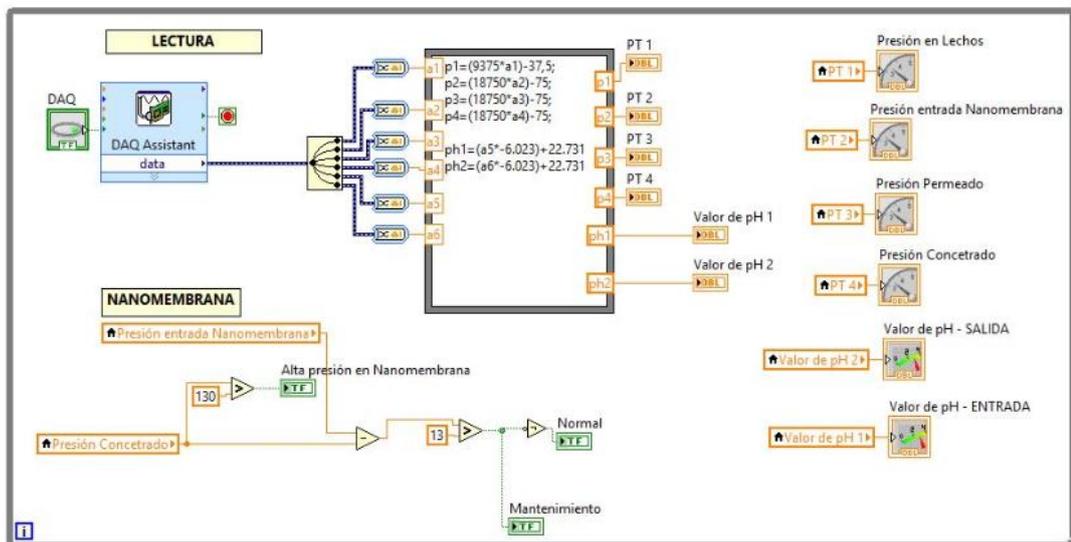
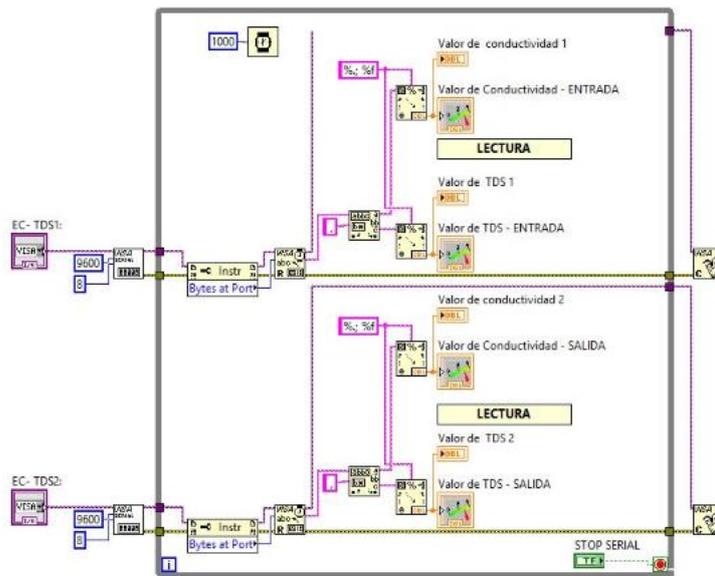


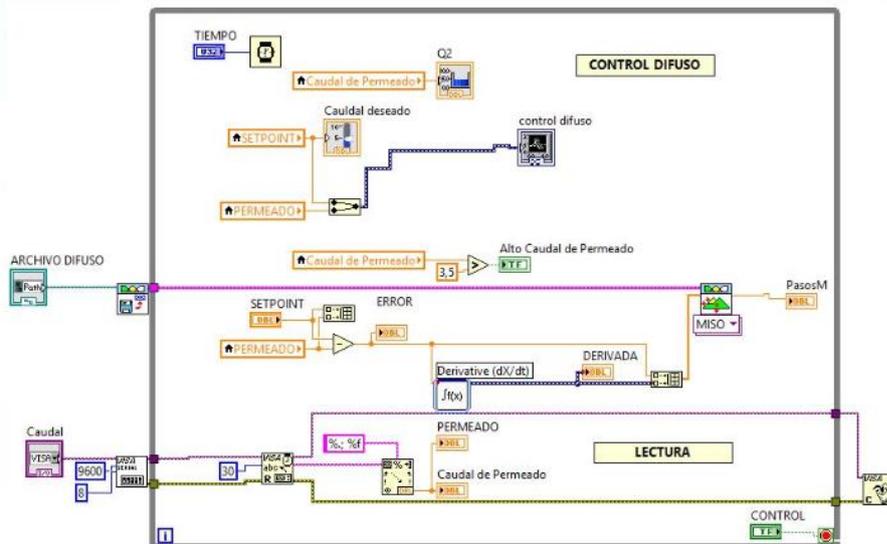
Figura 32 Lecturas de presión y alarma de mantenimiento

La lectura de los sensores de conductividad se realiza mediante el puerto serial, con la herramienta VISA propia de LabVIEW, el dato se recibe como un carácter "string" y se convierte en un valor numérico que se conecta a un indicador, como se observa en la figura 33, de tal manera que se pueda observar como incrementa el valor de la medición en una imagen animada.

La programación del control difuso se realiza dentro de un lazo "while" para que tome los valores de entrada continuamente y se vaya actualizando el control. Se tiene como entrada un "set point" que será controlado por un usuario y se puede seleccionar desde un "slide control" de la pantalla HMI, como se puede observar en figura 34. Se presenta el set point Vs el valor actual de permeado en una gráfica "waveform chart" en donde se puede apreciar la tendencia en el tiempo de cómo actúa el control y en qué tiempo llega a su valor deseado.

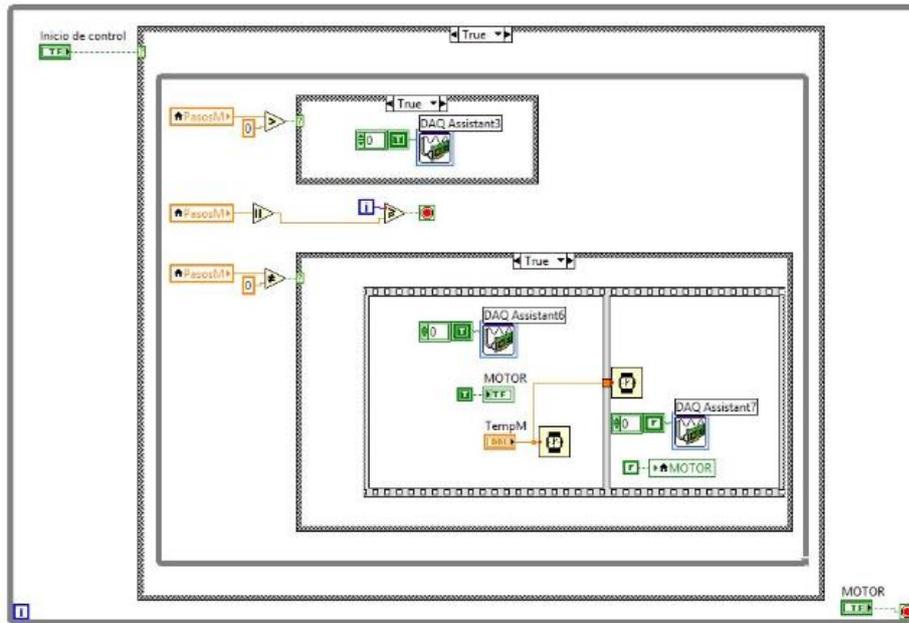


**Figura 33** Lectura de sensores de conductividad

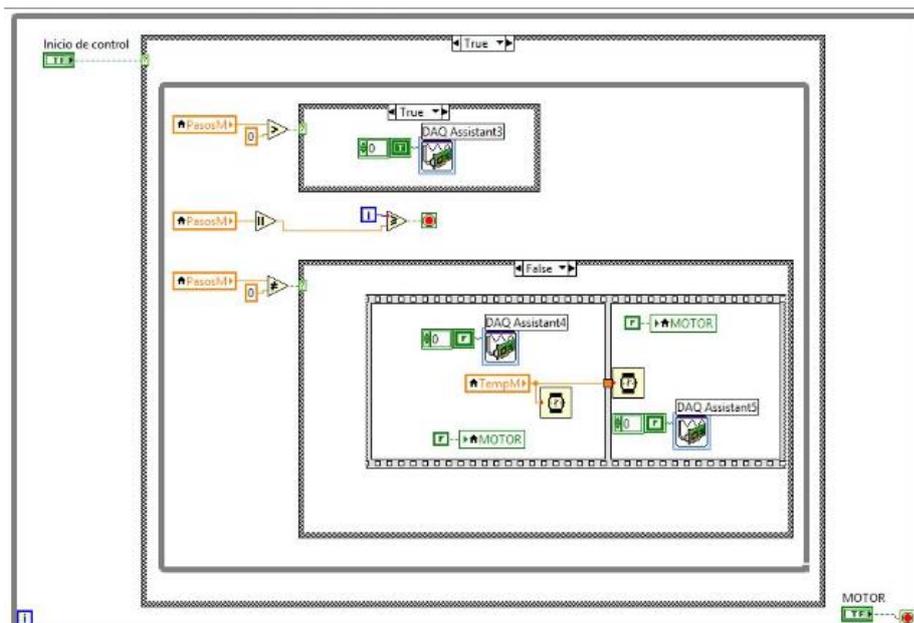


**Figura 34** Control difuso

Para la configuración de la señal de control para el motor se establece con un lazo de “true-false” en donde al activar el control actúa el motor. En primer lugar, entra en un lazo continuo en donde si el valor de la señal de control es mayor a cero se envía un pulso al pin al cual está conectado el giro del motor, esto ayuda a que gire de manera horaria o anti horaria. En segundo plano se realiza la activación de las bobinas siempre y cuando el control esté actuando, es decir cuando el control envía un valor de 0 indica que debe parar el motor y entonces el programa deja de enviar pulsos a las bobinas para que se detenga el motor, esta señal se envía desde la DAQ al driver PH266-01K del motor.



**Figura 35** Control de giro de motor



**Figura 36** Control de paro de motor

Se configuran dos pantallas HMI para que el operador pueda ver el comportamiento de la planta, una muestra el monitoreo es decir presenta los valores actuales de todos los sensores con salida analógica instalados, se usan gráficos acordes a las variables de medición. La otra pantalla muestra el esquema de conexión de los sensores y en orden al recorrido del fluido por la planta de filtración. Se detallan los componentes de la planta y para los sensores instalados se usan indicadores numéricos y gráficos; para el control se tienen visualizadores numéricos y una gráfica en tiempo real de la tendencia del flujo de permeado en el tiempo.

### 3.7 Desarrollo de control difuso

Para el desarrollo del control difuso se usa como entrada el error, obtenido de la señal deseada de caudal menos la señal que se obtiene del sensor de caudal de permeado, y como salida se tiene el número de pasos para que el motor abra o cierre la válvula de compuerta.

Para realizar la programación requerida se emplea el toolkit de Fuzzy Logic lo cual facilita la programación del control, adicionalmente para la lectura de datos se necesita tener el toolkit NI-DAQ lo cual permite leer las diferentes señales desde la tarjeta de adquisición de datos.

Se define el rango del error en (-5 GPM a 5 GPM) en base a que serán los valores máximos de error respecto al caudal deseado. Se establecen 5 funciones de membresía con las siguientes asignaciones:

- 1) Función trapezoidal, negativo grande "NG" [-7,5 ; -5 ; -2,5 ; -0,8]
- 2) Función triangular, negativo pequeño "NP" [-1 ; -0,475 ; -0,05]
- 3) Función triangular, Cero "Z" [-0,06 ; 0 ; 0,06]
- 4) Función triangular, Positivo Pequeño "PP" [0,05 ; 0,475 ; 1]
- 5) Función trapezoidal, positivo grande "PG" [0,8 ; 2,55 ; 7,5]

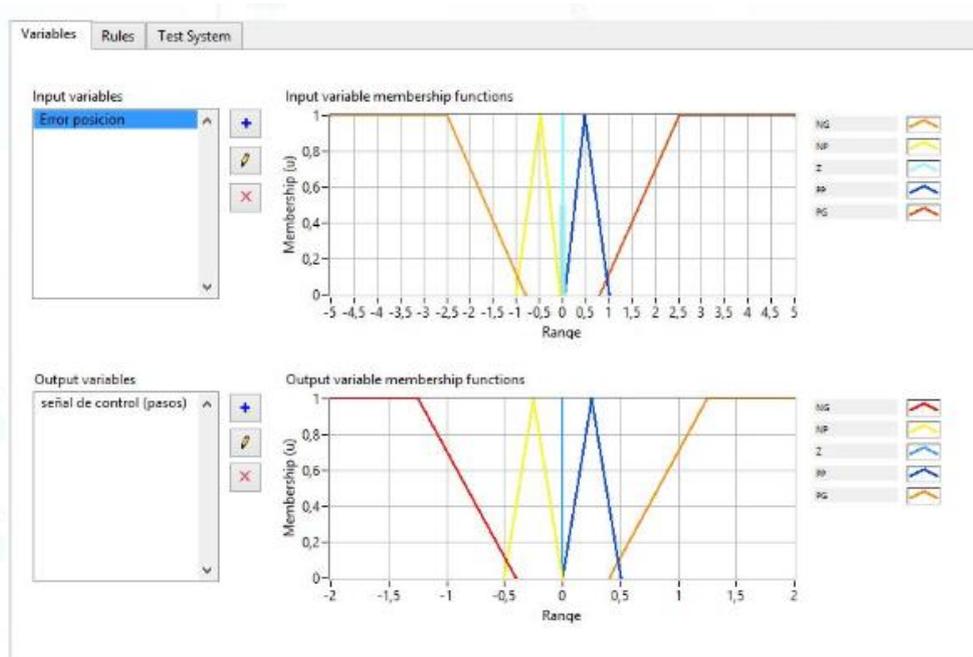
Se define el rango de salida de pulsos en (-2 pulsos a 2 pulsos) en base a que mientras menos pulsos de salida tenga se tiene menor margen de error en estado estacionario. Se establecen 5 funciones de membresía con las siguientes asignaciones:

- 1) Función trapezoidal, negativo grande "NG" [-3,75 ; -2,5 ; -1,25 ; -0,4]
- 2) Función triangular, negativo pequeño "NP" [-0,5 ; -0,25 ; 0]
- 3) Función singleton, Cero "Z" [ 0 ]
- 4) Función triangular, Positivo Pequeño "PP" [0 ; 0,25 ; 0,5]
- 5) Función trapezoidal, positivo grande "PG" [0,4 ; 1,25 ; 2,5 ; 3,75]

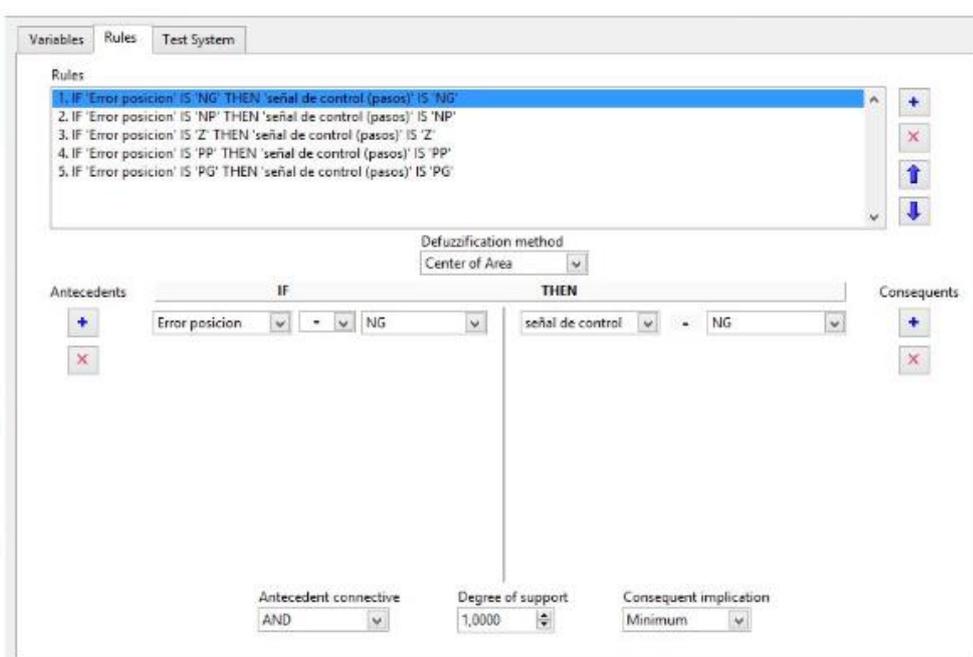
Se asignan las reglas con las que trabajará el control según lo especificado en la tabla número 1.

e (in)	pulsos (out)
NG	NG
NP	NP
Z	Z
PP	PP
PG	PG

**Tabla 1** Reglas de control sistema SISO



**Figura 37** Funciones de membresía en LabVIEW, sistema SISO



**Figura 38** Declaración de reglas de control sistema SISO

Al aplicar en control de caudal con estas características se tiene que el tiempo en alcanzar el caudal deseado es de 193 segundos aproximadamente con un error en estado estacionario mayor al 50% sobre todo en caudales bajo 2,5 GPM por lo que se realiza una nueva prueba en el sistema agregando una entrada de control.

Se desarrolla un ajuste en el control difuso agregando una entrada al sistema, correspondiente a la derivada del error manteniendo un rango de (-5 a 5) en base a

que se debe cumplir la condición para todo el rango del error. Se establecen 5 funciones de membresía con las siguientes asignaciones:

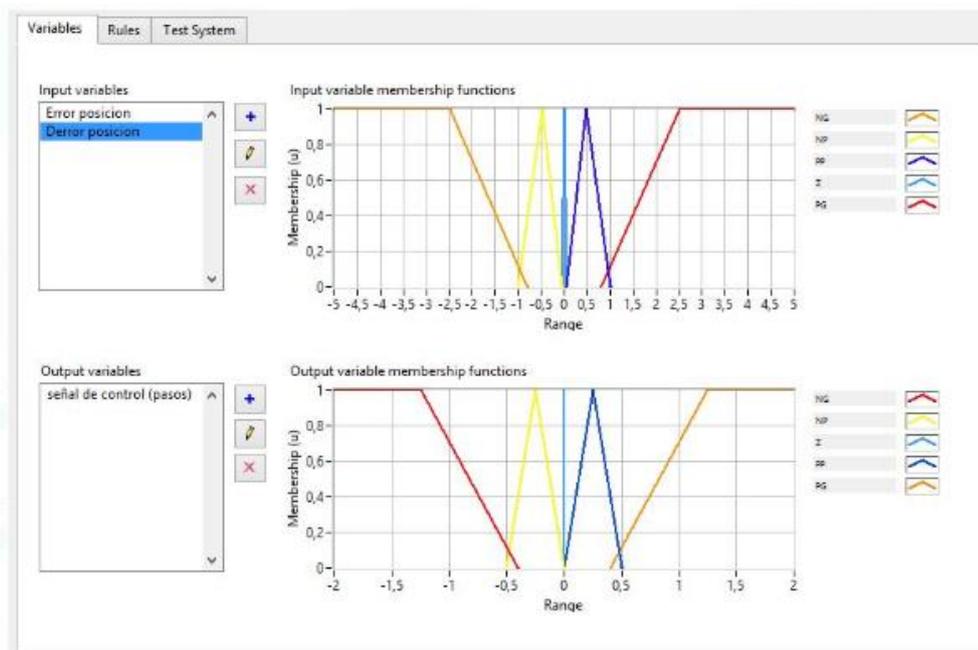
- 1) Función trapezoidal, negativo grande "NG" [-7,5 ; -5 ; -2,5 ; -0,8]
- 2) Función triangular, negativo pequeño "NP" [-1 ; -0,475 ; -0,05]
- 3) Función triangular, Cero "Z" [-0,06 ; 0 ; 0,06]
- 4) Función triangular, Positivo Pequeño "PP" [0,05 ; 0,475 ; 1]
- 5) Función trapezoidal, positivo grande "PG" [0,8 ; 2,55 ; 7,5]

Se mantiene los rangos de operación para la señal de control y para el error.

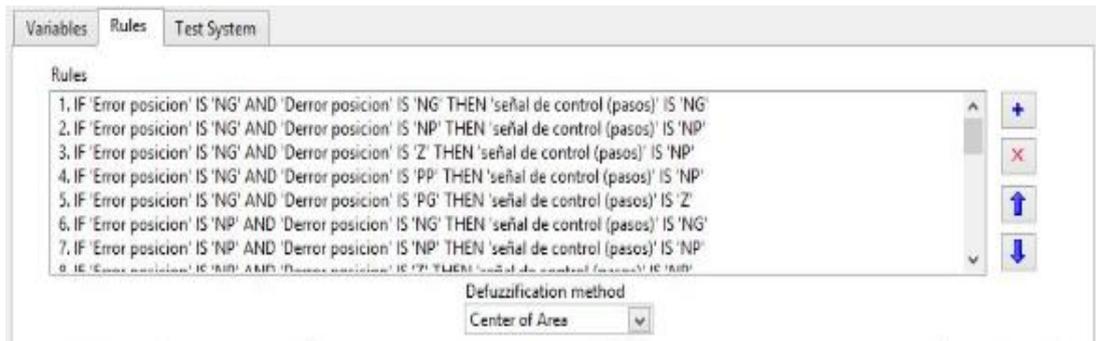
Se asignan las reglas con las que trabajará el control bajo la siguiente directriz:

e/de	NG	NP	Z	PP	PG
NG	NG	NP	NP	NP	Z
NP	NG	NP	NP	Z	PP
Z	NP	NP	Z	PP	PP
PP	NP	Z	PP	PP	PG
PG	Z	PP	PG	PP	PG

**Tabla 2** Reglas de control sistema MISO

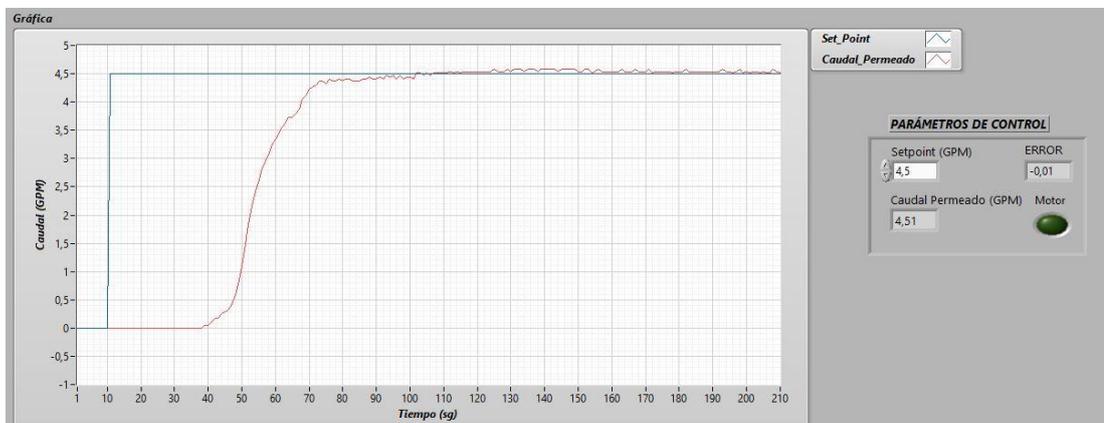


**Figura 39** Funciones de membresía, sistema MISO

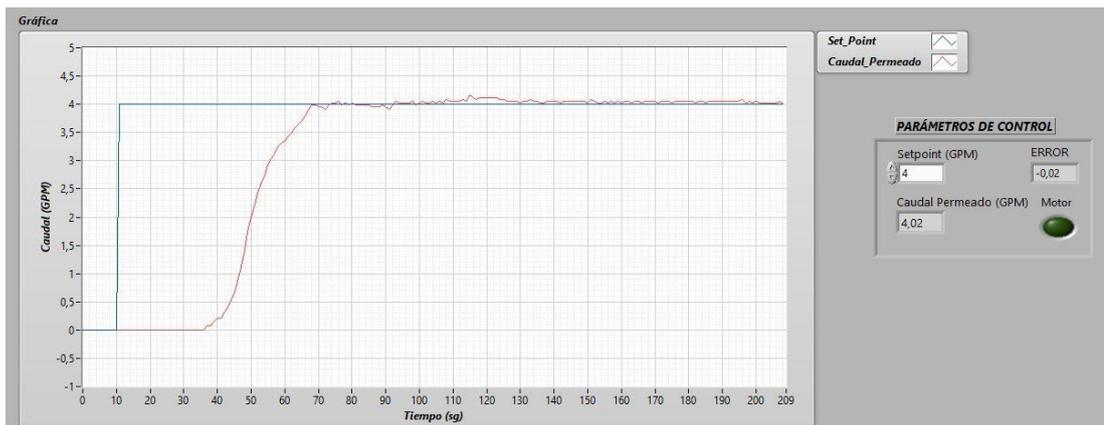


**Figura 40** Reglas de control para sistema MISO

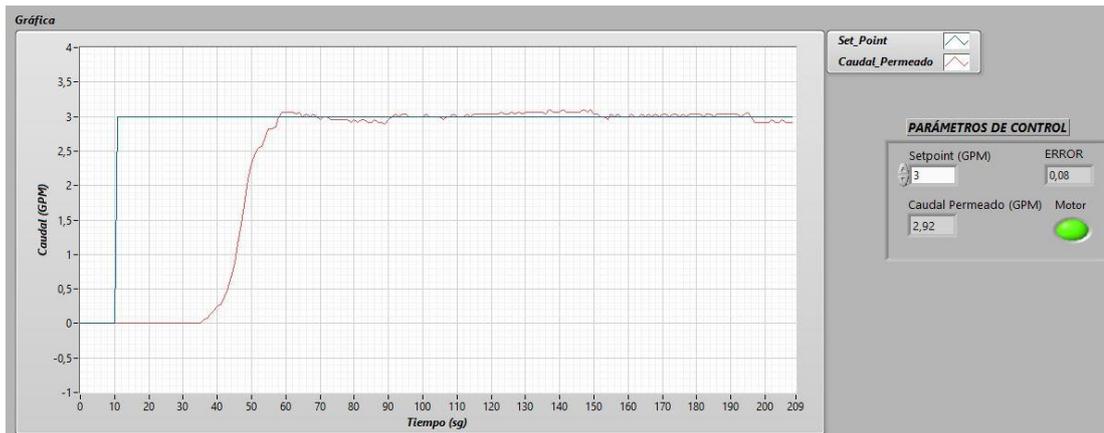
Al aplicar en control de caudal con estas características se tiene que el tiempo en alcanzar el caudal deseado es de 125 segundos aproximadamente con un error en estado estacionario del 5% para caudales mayores a 2GPM y se mantiene un error del 20% para caudales bajos.



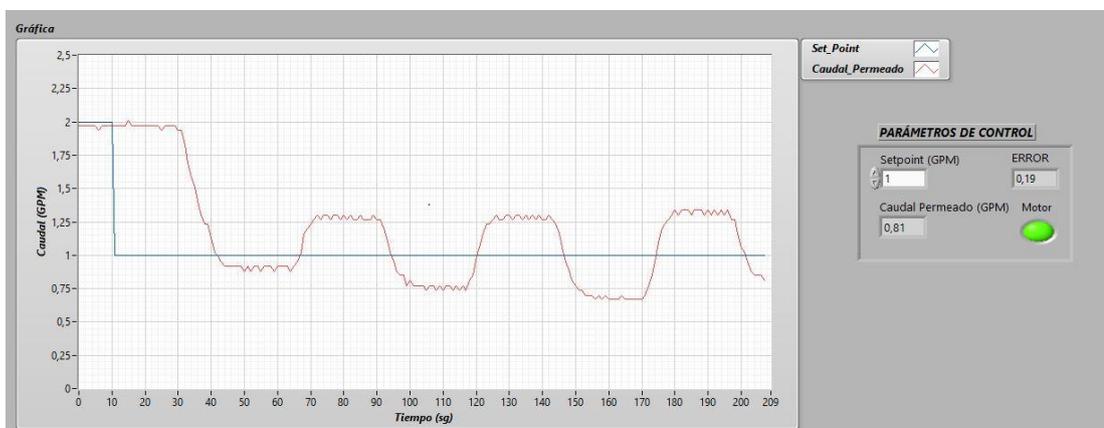
**Figura 41** Respuesta de control en caudal de 4.5GPM



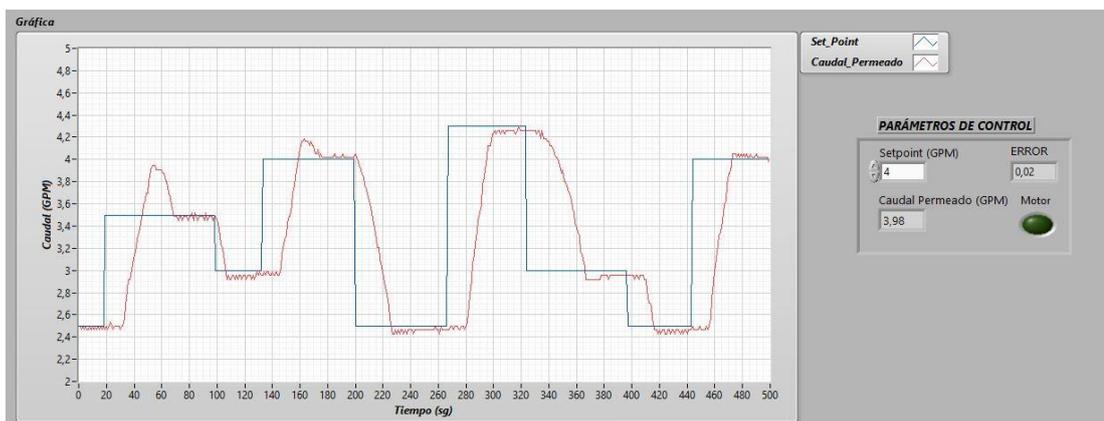
**Figura 42** Respuesta de control en caudal de 4GPM



**Figura 43** Respuesta de control en caudal de 3GPM



**Figura 44** Respuesta de control en caudal de 1 GPM



**Figura 45** Respuesta de control en diferentes caudales

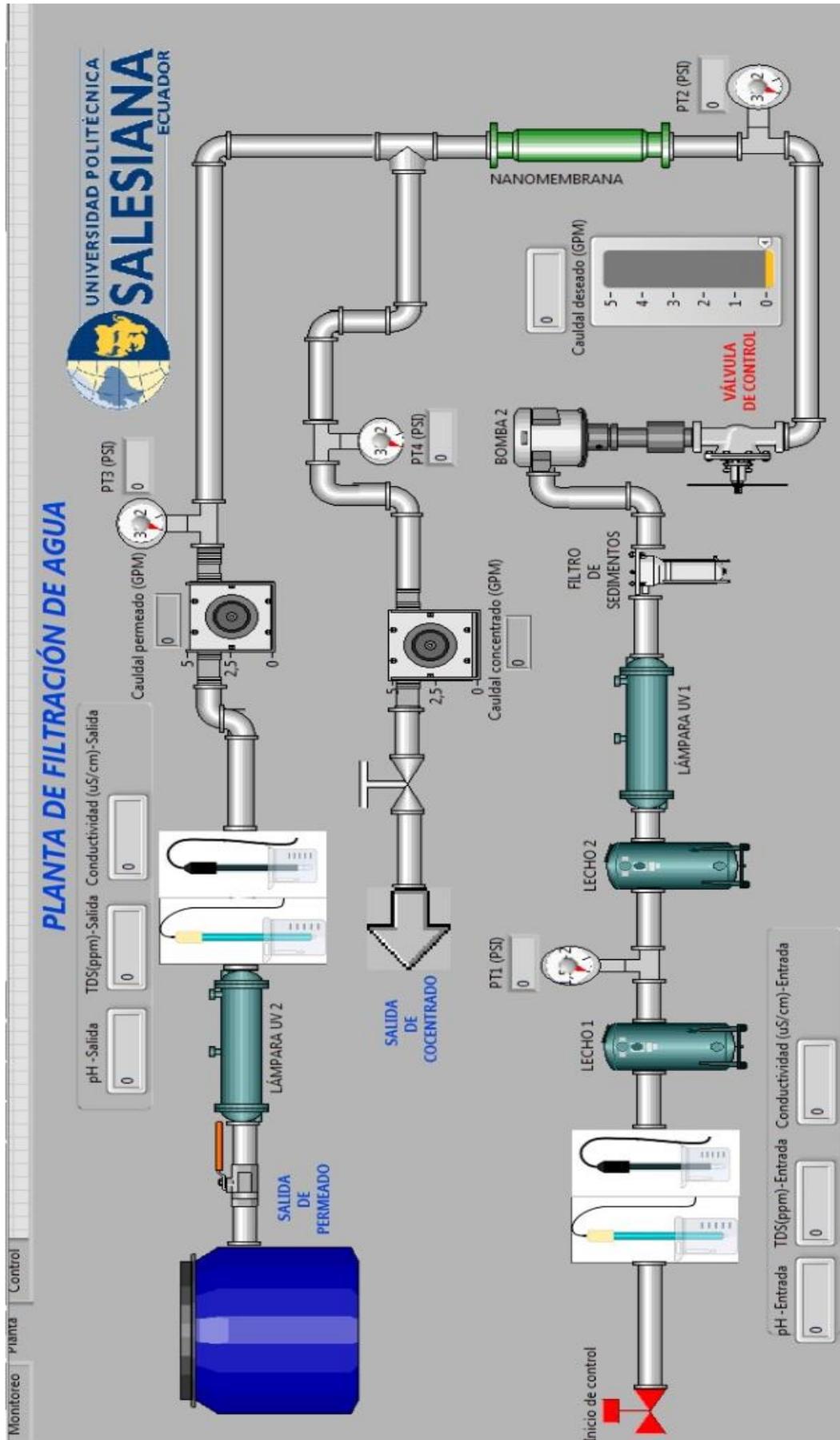


Figura 46 HMI de planta

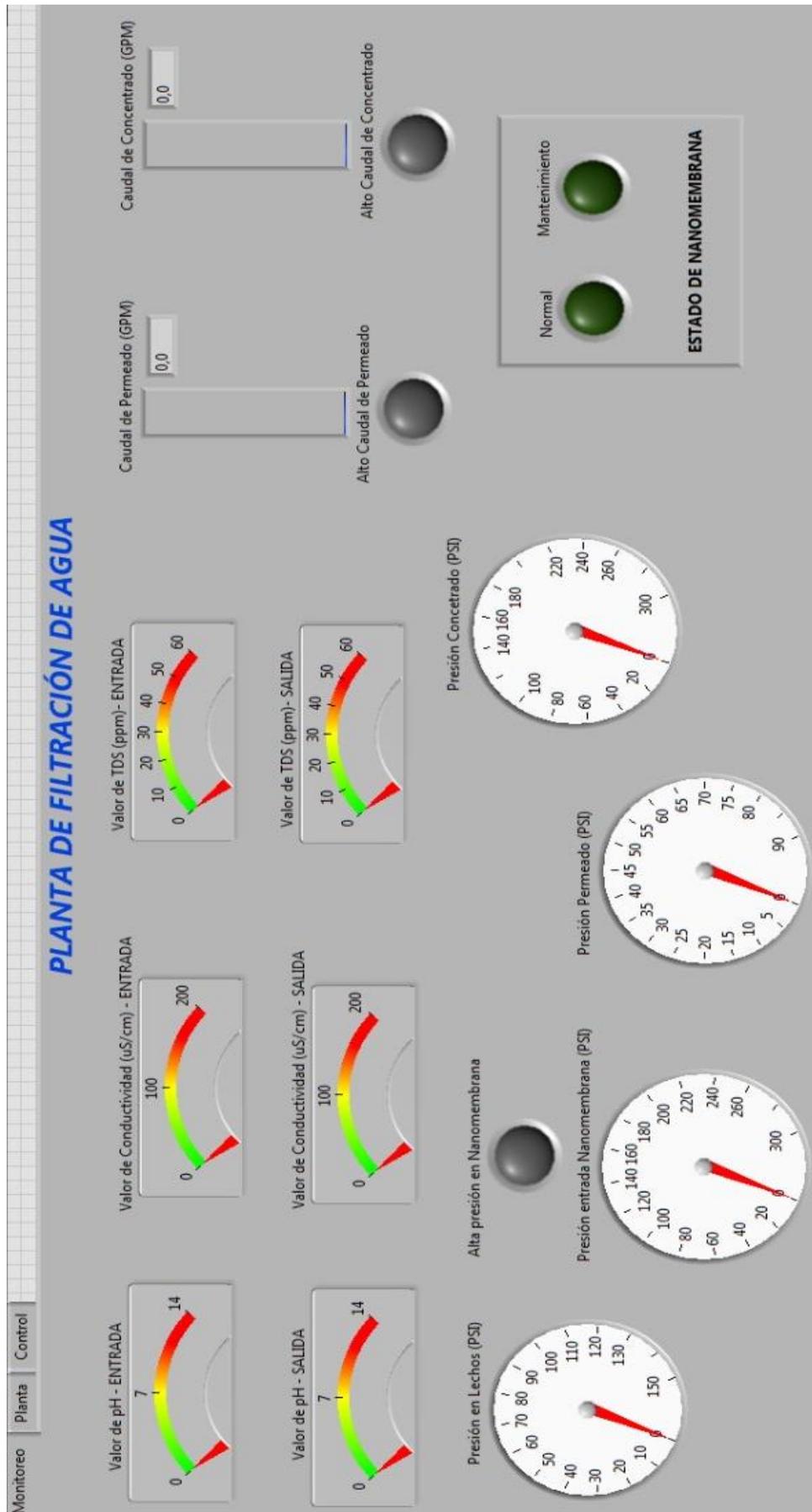


Figura 47 HMI de sistema de monitoreo

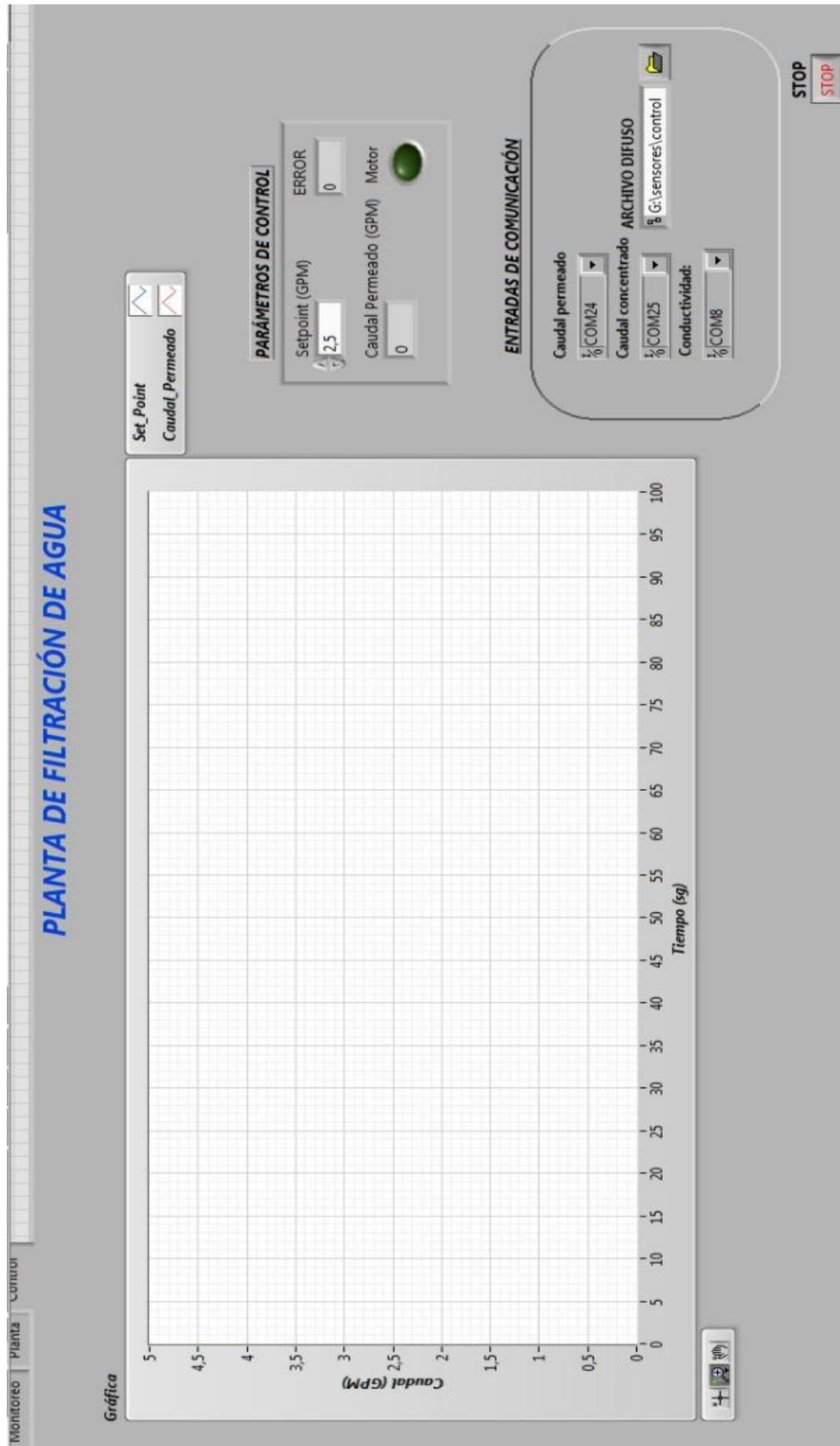


Figura 48 Gráfico de respuesta de control

## 4. ANALISIS DE RESULTADOS

### CONCLUSIONES

Con la implementación del proyecto se verifica que los sistemas de control difuso pueden aplicarse para mejoras en plantas de filtración de agua.

Al obtener un monitoreo en línea se puede determinar las condiciones de funcionamiento de la planta o su estado de operación

El control difuso empleado logra mantener un error del 5% para caudales de producción mayores a 2GPM, para caudales bajos se mantiene con un margen de error mayor al 5%

Al realizar un sistema de control PD se logra una mejor respuesta reduciendo el error en estado estacionario sin embargo se extiende el tiempo de estabilización

El sistema de filtración implementado logra obtener una calidad de agua apta para consumo humano según análisis realizado, cumpliendo la normativa INEN 2200

El sistema de filtración tiene un comportamiento no lineal ya que al abrir la válvula con pulsos constantes el caudal no incrementa proporcionalmente, sobre todo al inicio de la apertura en donde se presenta un pico de caudal.

Al mantener la válvula de aguja a 180 grados de apertura permite tener un mejor control de caudal ya que la apertura de la válvula de compuerta no produce cambios bruscos en el aumento o disminución de caudal, es decir con poca apertura de giro ya se llega al valor límite de operación.

### RECOMENDACIONES

Para implementar un sistema de filtración se debe tomar en cuenta el tipo de agua que se desea obtener en la salida y el volumen de producción.

Se recomienda definir el tipo de agua de ingreso y calidad de agua a la salida ya que de ello dependen los componentes a usar para el sistema y su costo.

Se recomienda realizar una prueba de los sensores que se adquieren para verificar que estén en óptimas condiciones para la instalación en una planta.

Se recomienda realizar varias pruebas en la planta para conocer su respuesta ante diferentes parámetros de operación

Se recomienda realizar un lavado de los lechos por aproximadamente 10 minutos antes de usar la planta si esta ha permanecido fuera de uso por más de 48 horas.

Se recomienda verificar que todas las válvulas se encuentren en la posición correcta tanto al iniciar como al terminar el proceso de filtrado.

Consultar con personal que trabaje con este tipo de aplicaciones para poder conjuntamente diseñar un sistema que incluyan componentes electrónicos y de control realizando un análisis detallado de las variables críticas para el buen funcionamiento de la planta.

Se recomienda calibrar los sensores analíticos al menos cada tres meses para mantener una precisión en el monitoreo de calidad de agua.

Se recomienda realizar una limpieza de las celdas de flujo de los sensores analíticos para evitar acumulación de sedimentos que pueden afectar a las mediciones.

Se recomienda que el agua de rechazo sea usado en limpieza de pisos o para descarga de baños para que pueda ser aprovechada en beneficio de la institución, si se desea emplear para otros usos realizar el respectivo análisis de agua y evaluar las normativas de calidad según el tipo de uso deseado.

Se recomienda usar fuentes independientes para los sensores y elementos de control ya que por balance de cargas la lectura de los sensores digitales puede verse afectados.



## PRESUPUESTO

<b>PRESUPUESTO DE PROYECTO:</b> Diseño, implementación y control DIFUSO de un prototipo de planta para el tratamiento de aguas terciarias mediante el empleo de nanomembrana			
<b>Presupuesto financiado por Universidad Politécnica Salesiana</b>			
Descripción	Unidades	Costo unitario (USD)	Costo Total (USD)
Tanque pulmón	1	\$ 294,39	\$ 294,39
Bomba de agua	2	\$ 423,00	\$ 846,00
Sistema de filtración (lechos, nanomembrana, lámparas UV)	1	\$ 6 620,33	\$ 6 620,33
Tubería	20 m	\$ 1,15	\$ 23,00
Tablero plástico	1	\$ 40,00	\$ 40,00
Kit de bombeo	1	\$ 50,00	\$ 50,00
Switch de nivel	2	\$ 15,00	30,00
<b>SUBTOTAL (USD)</b>			<b>\$ 7 903,72</b>
<b>IVA (USD)</b>			<b>\$ 948,45</b>
<b>TOTAL (USD)</b>			<b>\$ 8 852,17</b>
<b>Presupuesto financiado por autores del proyecto</b>			
Descripción	Unidades	Costo unitario (USD)	Costo Total (USD)
Tanques de reserva de agua	2	\$ 133,69	\$ 267,37
Sensores de presión	4	\$ 388,00	\$ 1 552,00
Sensores de caudal	2	\$ 20,00	\$ 40,00
Sensores de pH	3	\$ 52,00	\$ 156,00
Sensores de conductividad	3	\$ 218,00	\$ 654,00
Motor de pasos	1	\$ 80,00	\$ 80,00
Tarjeta DAQ	1	\$ 520,00	\$ 520,00
Adaptación del motor con la válvula de ingreso a la membrana	1	\$ 15,00	\$ 15,00
Celdas de flujo para sensores analíticos	3	\$ 35,00	\$ 105,00
Cables y conectores para sensores y DAQ	200 m	\$ 0,50	\$ 100,00
Accesorios varios de tablero de control	1	\$ 24,00	\$ 24,00
Transporte (dentro de la ciudad)	1	\$ 820,00	\$ 820,00
Impresión de libro de tesis	3	\$ 10,00	\$ 10,00
Tablero de sistema de control	1	\$ 146,00	\$ 146,00
<b>SUBTOTAL (USD)</b>			<b>\$ 4 509,38</b>
<b>IVA (USD)</b>			<b>\$ 541,13</b>
<b>TOTAL (USD)</b>			<b>\$ 5 050,51</b>

**Tabla 3** Presupuesto de proyecto

Nota: El costo total del proyecto fue co-financiado por la Universidad Politécnica Salesiana y los autores.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] Google, «Google Maps,» [En línea]. Available: [https://www.google.com/maps/@-2.2202748,-79.8872407,3a,60y,90t/data=!3m6!1e1!3m4!1s1-FSr6z-ou\\_S5EaR6Hu8fw!2e0!7i13312!8i6656](https://www.google.com/maps/@-2.2202748,-79.8872407,3a,60y,90t/data=!3m6!1e1!3m4!1s1-FSr6z-ou_S5EaR6Hu8fw!2e0!7i13312!8i6656). [Último acceso: 10 Marzo 2019].
- [2] M. Romero, «TRATAMIENTOS UTILIZADOS EN POTABILIZACIÓN DE AGUA,» Facultad de Ingeniería - Universidad Rafael Landívar.
- [3] «Fluence Corporation,» 2017. [En línea]. Available: <https://www.fluencecorp.com/es/que-es-un-proceso-de-membranas/>. [Último acceso: 10 Marzo 2019].
- [4] National Research Council , Water Reuse Potential for Expanding the Nation's Water Supply Through Reuse of Municipal Wastewater, Washington, DC: The National Academies Press, 2012.
- [5] A. HERNANDEZ, MICROFILTRACIÓN, ULTRAFILTRACIÓN Y OSMOSIS INVERSA, EDITUM, 1990.
- [6] «Osmoinfo,» 2015. [En línea]. Available: <http://www.osmosisdomestica.es/que-es-la-osmosis-inversa/#prettyPhoto>. [Último acceso: 03 Marzo 2019].
- [7] A. J. Filippín, et al, «OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE CARBÓN ACTIVADO A PARTIR DE RESIDUOS OLIVÍCOLAS Y OLEÍCOLAS POR ACTIVACION FÍSICA,» Avances en Ciencias e Ingeniería, vol. 8, nº 3, pp. 59-71, 2017.
- [8] «Equipos de osmosis inversa,» 2019. [En línea]. Available: <https://equipososmosisinversa.com/filtros-de-carbon-activado/>. [Último acceso: 20 Febrero 2019].
- [9] C. J. LARREA VARGAS, APLICACIÓN DE UN FILTRO DE ZEOLITA PARA POTABILIZACIÓN DEL AGUA NIVEL DOMICILIARIO SITIO PALESTINA CABTÓN EL GUABO PROVINCIA DEL ORO, MACHALA, 2015.
- [10] L. A. Quintero Rendón, E. A. Agudelo y e. al., «Determinación de indicadores para la calidad de agua sedimentos y suelos, marinos y costeros en puertos colombianos,» Gestión y Ambiente , vol. 13, nº 3, pp. 51-64, 2010.
- [11] «Equipos de Osmosis Inversa,» 2019. [En línea]. Available: <https://equipososmosisinversa.com/filtros-de-sedimentos/>. [Último acceso: 20 Febrero 2019].
- [12] N. Quirós Bustos y e. al, «Aplicaciones ambientales de la nanotecnología: Desarrollo de un sensor para la detección de contaminantes químicos en aguas superficiales de acueductos rurales y de una metodología para el tratamiento de agua, utilizando nanotubos de carbono.,» Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2012.
- [13] INEN SERVICIO ECUATORIANO DE NORMAIZACIÓN, AGUA PURIFICADA ENVASADA.REQUISITOS, QUITO, 2017.
- [14] P. Ponce Cruz, INTELIGENCIA ARTIFICIAL CON APLICACIONES A LA INGENIERÍA, Mexico: Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V., 2010.
- [15] C. González Morcillo, 2011. [En línea]. Available: [https://www.esi.uclm.es/www/cglez/downloads/docencia/2011\\_Softcomputing/LogicaDifusa.pdf](https://www.esi.uclm.es/www/cglez/downloads/docencia/2011_Softcomputing/LogicaDifusa.pdf). [Último acceso: 10 Febrero 2019].
- [16] «Varitel Ingeniería Electrónica,» [En línea]. Available: [http://www.varitel.com/html/sensores\\_de\\_presion.html](http://www.varitel.com/html/sensores_de_presion.html). [Último acceso: 20 Marzo 2019].

- [17] Atlas Scientific, «AtlasScientific,» [En línea]. Available: [https://www.atlas-scientific.com/\\_files/\\_datasheets/\\_circuit/EC\\_EZO\\_Datasheet.pdf](https://www.atlas-scientific.com/_files/_datasheets/_circuit/EC_EZO_Datasheet.pdf). [Último acceso: 22 Octubre 2018].
- [18] A. Rincon Cardona y J. A. Rendon Osorio, DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMA SCADA PARA EL MONITOREO DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES, UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA, 2016.

## ANEXOS