



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DEL DISEÑO DE AUTOMATIZACIÓN DEL CONTROL Y  
MONITOREO DE OXÍGENO DISUELTO PARA UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE LODOS  
ACTIVADOS**

**Cristopher Luis Francisco Ochaeta Salguero**

Asesorado por el M. A. Ing. Airons Alejandro Retana Esquivel

Guatemala, mayo de 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DEL DISEÑO DE AUTOMATIZACIÓN DEL CONTROL Y  
MONITOREO DE OXÍGENO DISUELTOS PARA UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE LODOS  
ACTIVADOS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**CRISTOPHER LUIS FRANCISCO OCHAETA SALGUERO**  
ASESORADO POR EL M.A. ING. AIRONS ALEJANDRO RETANA ESQUIVEL

AL CONFERIRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO MECÁNICO Y ELECTRICISTA**

GUATEMALA, MAYO DE 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Armando Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Ing. Jorge Mario Sitaví Cos
EXAMINADOR	Ing. Herbert Samuel Figueroa Avendaño
EXAMINADOR	Ing. Jorge Gilberto González Padilla
SECRETARIO	Inga. Hugo Humberto Rivera Pérez

## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DEL DISEÑO DE AUTOMATIZACIÓN DEL CONTROL Y  
MONITOREO DE OXÍGENO DISUELTO PARA UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE LODOS  
ACTIVADOS**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de Estudios de Postgrado con fecha 24 de agosto de 2021.

**Cristopher Luis Francisco Ochaeta Salguero**

Ref. EEPFI-1192-2021  
Guatemala, 24 de agosto de 2021

Director  
Armando Alonso Rivera Carrillo  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica  
Presente.

Estimado Ing. Rivera:

Reciba un cordial saludo de la Escuela de Estudios de Postgrado. El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado y aprobado el **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN: DISEÑO DE AUTOMATIZACIÓN DEL CONTROL Y MONITOREO DE OXÍGENO DISUELTO PARA UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE LODOS ACTIVADOS**, presentado por el estudiante **Cristopher Luis Francisco Ochaeta Salguero** carné número **201212699**, quien optó por la modalidad del "PROCESO DE GRADUACIÓN DE LOS ESTUDIANTES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA OPCIÓN ESTUDIOS DE POSTGRADO". Previo a culminar sus estudios en la Maestría en Artes en Energía y Ambiente.

Y habiendo cumplido y aprobado con los requisitos establecidos en el normativo de este Proceso de Graduación en el Punto 6.2, aprobado por la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería en el Punto Décimo, Inciso 10.2 del Acta 28-2011 de fecha 19 de septiembre de 2011, firmo y sello la presente para el trámite correspondiente de graduación de Pregrado.



Alejandro Retana  
Ingeniero Electricista  
Colegiado 10992

Mtro. Airons Alejandro Retana Esquivel  
Asesor

*"Id y Enseñad a Todos"*



Mtro. Juan Carlos Fuentes Montepeque  
Coordinador de Área  
Desarrollo Socio-Ambiental y Energético



Mtro. Edgar Darío Álvarez Cotí  
Director

Escuela de Estudios de Postgrado  
Facultad de Ingeniería



EEP-EIME-003-2022

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto bueno del Coordinador y Director de la Escuela de Estudios de Postgrado, del Diseño de Investigación en la modalidad Estudios de Pregrado y Postgrado titulado: **DISEÑO DE AUTOMATIZACIÓN DEL CONTROL Y MONITOREO DE OXÍGENO DISUELTO PARA UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE LODOS ACTIVADOS**, presentado por el estudiante universitario Christopher Luis Francisco Ochaeta Salguero, procedo con el Aval del mismo, ya que cumple con los requisitos normados por la Facultad de Ingeniería en esta modalidad.

ID Y ENSEÑAD A TODOS

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'AR' with a large flourish.

Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo  
Director

Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica



Guatemala, enero de 2022

LNG.DECANATO.OI.348.2022

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DEL DISEÑO DE AUTOMATIZACIÓN DEL CONTROL Y MONITOREO DE OXÍGENO DISUELTO PARA UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE LODOS ACTIVADOS**, presentado por: **Cristopher Luis Francisco Ochaeta Salguero**, después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



ing. Aurelia Anabela Cordova Estrada

Decana

Guatemala, mayo de 2022

AACE/gaoc

## **ACTO QUE DEDICO A:**

### **Dios**

Por darme la vida y permitir alcanzar un objetivo más, y que espero me brinde sabiduría para contribuir con el bien de mi país y generaciones futuras.

### **Mis padres**

Ada Salguero, por darme el apoyo y soporte incondicional en todo momento de la carrera y maestría. Luis Ochaeta, mi padre, por apoyarme y brindarme sus consejos cuando los necesitaba.

### **Mis hermanos**

Adaluisa Ochaeta y Jose Hernandez, por su apoyo y compañía durante mi vida.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por ser la institución académica que me permitió formarme como profesional y ganar tan preciado conocimiento.
<b>Facultad de Ingeniería</b>	Por permitirme ser parte de los profesionales que conforman este país y darme las herramientas y conocimientos necesarios para seguir contribuyendo con mi país.
<b>Mis tías y primos</b>	Por su cariño, apoyo en todo momento, los consejos y experiencias que han compartido conmigo.
<b>Mis amigos</b>	Por hacer más fácil y amenos cada uno de los días que compartimos en nuestra vida universitaria.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	V
LISTA DE SÍMBOLOS .....	VII
GLOSARIO .....	IX
RESUMEN.....	XIII
1. INTRODUCCIÓN .....	1
2. ANTECEDENTES .....	3
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	7
4. JUSTIFICACIÓN .....	11
5. OBJETIVOS .....	13
5.1. General.....	13
5.2. Específicos .....	13
6. NECESIDADES A CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN.....	15
7. MARCO TEÓRICO.....	17
7.1. Planta de tratamiento de agua.....	17
7.1.1. Tratamiento preliminar .....	18
7.1.2. Tratamiento primario.....	18
7.1.3. Tratamiento secundario .....	20
7.1.4. Tratamiento de lodos activados .....	21

7.1.5.	Oxígeno disuelto .....	21
7.1.6.	Tipos de aireación .....	22
7.1.6.1.	Aireadores mecánicos.....	22
7.1.6.2.	Difusores o sopladores de aire.....	24
7.1.7.	Medición de oxígeno disuelto .....	24
7.2.	Sistemas de control.....	25
7.2.1.	Sistemas de control de lazo abierto .....	27
7.2.2.	Sistemas de control de lazo cerrado .....	28
7.2.3.	Controladores.....	29
7.2.3.1.	Controladores lógicos programables ....	30
7.2.3.2.	Controladores de automatización .....	31
7.2.3.3.	Microcontroladores .....	32
7.2.4.	Variadores de velocidad.....	33
7.2.4.1.	Ahorro en un variador de velocidad.....	36
7.2.5.	Sensores y transmisores de oxígeno disuelto .....	37
7.2.5.1.	Sensor amperométrico .....	38
7.2.5.1.	Sensor de oxígeno disuelto óptico .....	39
7.3.	Sistema y equipos de comunicación para monitoreo remoto ...	39
7.3.1.	Sistemas de supervisión, control y adquisición .....	41
7.3.2.	Componentes de un Scada .....	43
7.3.2.1.	Software de programación .....	43
7.3.2.2.	Ordenador central o MTU.....	44
7.3.2.3.	Ordenador remoto o RTU.....	44
7.3.2.4.	Red de comunicación.....	44
7.3.2.5.	Interfaz hombre máquina.....	45
8.	PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS .....	47
9.	METODOLOGÍA .....	51

9.1.	Tipo de estudio .....	51
9.1.1.	Definición de variables.....	51
9.2.	Fases del estudio .....	52
9.2.1.	Fase 1: Exploración bibliográfica .....	53
9.2.2.	Fase 2: Análisis de la línea base antes de la automatización.....	53
9.2.3.	Fase 3: Sistema de control .....	55
9.2.3.1.	Listado de equipos del sistema de control.....	55
9.2.3.2.	Programación del sistema de control...	56
9.2.4.	Fase 4: Sistema de monitoreo .....	57
9.2.4.1.	Listado de equipos del sistema de monitoreo.....	57
9.2.4.2.	Programación del sistema de monitoreo.....	59
9.2.5.	Fase 5: Implementación de sistema de control.....	60
9.2.6.	Fase 6: Recolección y análisis de datos .....	60
9.2.7.	Fase 7: Recolección y análisis de datos .....	62
10.	TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN .....	63
11.	CRONOGRAMA.....	65
12.	FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO .....	67
13.	REFERENCIAS .....	69
14.	APÉNDICES .....	73



# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

## FIGURAS

1.	Niveles de tratamiento de aguas residuales.....	17
2.	Sedimentador primario .....	19
3.	Aireador vertical .....	23
4.	Aireador horizontal .....	23
5.	Sistema de control de lazo abierto .....	27
6.	Sistema de control de lazo cerrado .....	28
7.	Diagrama variador de velocidad.....	33
8.	Etapa de rectificación variador de velocidad .....	34
9.	Etapa de filtrado variador de velocidad .....	35
10.	Etapa de inversión del variador de velocidad.....	35
11.	Diagrama Ley de Afinidad .....	37
12.	Electrodo amperométrico .....	38
13.	Pirámide de automatización .....	40
14.	Ejemplo Scada .....	43
15.	Oxígeno disuelto vs. tiempo, antes de la automatización.....	54
16.	Potencia consumida vs. tiempo, antes de la automatización .....	54
17.	Ejemplo programación en Studio 5000 .....	57
18.	Ejemplo visualización HMI .....	58
19.	Ejemplo visualización <i>Factory Talk View</i> .....	59
20.	Oxígeno disuelto vs tiempo, después de la automatización.....	61
21.	Potencia consumida vs tiempo, después de la automatización .....	61

## TABLAS

I.	Definición de variables.....	51
II.	Cronograma.....	65
III.	Recursos para el desarrollo de la investigación.....	67

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>kWh</b>	Energía
<b>Q</b>	Flujo o Caudal
<b>f</b>	Frecuencia
<b>°C</b>	Grados Celsius
<b>Hz</b>	Hercio
<b>H</b>	Horas
<b>l</b>	Litros
<b>mA</b>	Miliamperios
<b>mg</b>	Miligramos
<b>mg/l</b>	Miligramos/litros
<b>mm</b>	Milímetros
<b>PPM</b>	Partes por millón
<b>%</b>	Porcentaje
<b>kW</b>	Potencia eléctrica
<b>HP</b>	Potencia eléctrica
<b>P</b>	Presión
<b>Q.</b>	Quetzales
<b>s</b>	Segundos
<b>t</b>	Tiempo
<b>N</b>	Velocidad
<b>V</b>	Voltio



## GLOSARIO

<b>CO2</b>	El dióxido de carbono es un gas inodoro, incoloro, ligeramente ácido y no inflamable. Es soluble en agua cuando la presión se mantiene constante, y está formado por una molécula lineal de un átomo de carbono ligado a dos átomos de oxígeno.
<b>Corriente AC</b>	Tipo de corriente eléctrica, en la que la dirección del flujo de electrones va y viene a intervalos regulares o en ciclos.
<b>Corriente DC</b>	Flujo continuo de carga eléctrica a través de un conductor entre dos puntos de distinto potencial y carga eléctrica, que no cambia de sentido con el tiempo.
<b>DBO</b>	Es la Demanda Bioquímica de Oxígeno que tiene un agua, es un parámetro que mide la cantidad de oxígeno consumido al degradar la materia orgánica de una muestra líquida. Es la materia susceptible de ser consumida u oxidada por medios biológicos que contiene una muestra líquida, disuelta o en suspensión.
<b>DQO</b>	La Demanda Química de Oxígeno es un parámetro que mide la cantidad de sustancias susceptibles de

ser oxidadas por medios químicos que hay disueltas o en suspensión en una muestra líquida. Se utiliza para medir el grado de contaminación y se expresa en miligramos de oxígeno diatómico por litro.

**Eficiencia energética** Desarrollo de una actividad que implica prestación de servicios con el máximo de resultados útiles y con el menor gasto de portadores energéticos.

**Licor de mezcla** Homogeneizado del agua residual con los flóculos bacterianos para el tratamiento biológico.

**Oxígeno disuelto** Es la cantidad de oxígeno gaseoso que está disuelto en el agua.

**PTAR** Una planta de tratamiento de aguas residuales - PTAR es el conjunto de obras, instalaciones y procesos para tratar las aguas residuales, con material disuelto y en suspensión usadas por una comunidad o industrial.

**PWM** Son las siglas de *Pulse Width Modulation* (Modulación por ancho de pulso). Para transmitir una señal, ya sea analógica o digital, se debe modular para que sea transmitida sin perder potencia o sufrir distorsión por interferencias.

**Sólidos suspendidos** Los sólidos en suspensión o sólidos suspendidos se refieren a pequeñas partículas sólidas que

permanecen en suspensión en agua como coloide o debido al movimiento del agua. Los sólidos en suspensión se pueden eliminar por sedimentación debido a su tamaño comparativamente grande.

**Voltaje**

Magnitud física en un circuito eléctrico que permite impulsar a los electrones a lo largo de un conductor.



## RESUMEN

El ahorro energético que se puede obtener en una planta de tratamiento de agua de lodos activados en la etapa de aireación puede ser de hasta un 70 %. Un nivel correcto de OD permite asegurar que los microorganismos realizan la oxidación de la materia orgánica utilizando la menor cantidad de energía.

Una de las posibles soluciones es la automatización de la etapa de aireación. Se propone un sistema de control de lazo cerrado con un sensor de oxígeno disuelto como la retroalimentación del sistema, en el cual mediante el uso de distintos equipos de control lograr los niveles de oxígeno adecuados utilizando la mínima cantidad de energía, logrando ahorros del 20 – 40 %.

Se propone realizar mediciones de los niveles de oxígeno disuelto y de la energía consumida por los sopladores para la inyección de aire antes de realizar la automatización del sistema. Con esta información se definirá la línea base con la cual se trabaja normalmente en la planta.

Haciendo uso de las distintas herramientas de hardware y software se desarrollará un sistema de control PID con la función de controlar la cantidad de aire inyectada al sistema y la energía consumida. El sistema de control debe ser capaz de automatizar incluyendo las tareas de desplegar alarmas, fallas y mostrar el comportamiento de las variables.

Se realizará una medición final del oxígeno disuelto y la energía consumida por los sopladores después de la implementación del sistema. Se compararán

los datos de antes y después de la automatización del sistema para poder obtener el ahorro energético obtenido.

.

# 1. INTRODUCCIÓN

La calidad y cantidad de agua disponible es un tema fundamental para asegurar el futuro de los seres humanos. Cada vez es más evidente la escasez de agua dulce en el planeta tierra, por lo que es de gran importancia el cuidado y aprovechamiento eficiente de este recurso. A pesar de que los gobiernos han realizado y fortalecido las normativas para asegurar que el agua desechada cumpla con ciertos parámetros. Las industrias y municipalidades ven como un gasto las plantas de tratamiento de agua residual y muchas de ellas son ineficientes.

Basado en distintos estudios el 70 % de la electricidad consumida en una planta de tratamiento residual de lodos activados es debido a la aireación. Por lo que este trabajo presenta un diseño de la automatización del control y monitoreo de una planta de lodos activados, donde como principal objetivo se busca el ahorro energético que se puede obtener con la automatización de la aireación y así reducir costos operativos y de mantenimiento.

Se realizará un estudio técnico y financiero donde mediante la implementación de un sistema de control y monitoreo, conformado por distintos equipos, se pueda asegurar que los niveles de oxígeno disuelto en el tanque de lodos activados sea el correcto en todo momento y que el consumo de energía de los sopladores o compresores que inyectan aire al tanque sea el mínimo necesario para mantener esos niveles. Además, se estará analizando si el ahorro de energía obtenido y el tiempo de recuperación son suficientes para justificar la inversión en los equipos de automatización.

El diseño de control propuesto es un sistema de lazo cerrado conformado por un sensor de oxígeno disuelto como retroalimentación del sistema, contará con un controlador, un variador de velocidad el cual permitirá que se controle la cantidad de aire que es inyectada al tanque. Para el monitoreo se realizará una interfaz gráfica en una pantalla la cual permitirá ver las alarmas y el valor de las variables en tiempo real. Los equipos y softwares utilizados para el experimento serán suministrados por una empresa de automatización, el sistema de control se implementará en una empresa con una planta de lodos activados que cuentan con una aireación directa por un compresor. Para el análisis del ahorro energético se tomarán mediciones de oxígeno disuelto y consumo de energía antes y después de la automatización.

En el capítulo 2, se presentarán los antecedentes más importantes para esta investigación. En la fase 1, se hace una revisión bibliográfica de los fundamentos teóricos de esta aplicación. Posteriormente en la fase 2 se harán las mediciones antes de la automatización, y se establecerá la línea base con la cual trabaja la planta de lodos activados. En la fase 3 se desarrollará el sistema de control y la programación del controlador y variador de velocidad, se integrarán todas las señales de los sensores. En la fase 4 se trabajará en la interfaz gráfica que será desplegada en la pantalla y en la cual se podrá monitorear cómo está trabajando el sistema en tiempo real. En la fase 5 se estará estableciendo la implementación del sistema de control y el monitoreo en la planta de lodos activados donde se realizará la prueba.

En el fase 6 se estarán realizando las mediciones de oxígeno disuelto y consumo de energía después de la automatización. En la fase 7 y 8 se presentarán los resultados más significativos de la investigación y la discusión de estos respectivamente. Finalmente se darán las conclusiones de la investigación y las recomendaciones para la continuidad del proyecto.

## 2. ANTECEDENTES

En Guatemala no se logró encontrar un estudio publicado sobre diseño de un sistema de control y monitoreo de Oxígeno Disuelto (OD) para el aumento de eficiencia en la aireación en la etapa de lodos en una planta de aguas residuales. Por lo que se investigó en otros países de Latinoamérica donde se han hallado los siguientes estudios, publicación y artículos.

En la tesis de maestría en Hidrosistemas titulada *Control de oxígeno disuelto en un tanque de aireación de una planta piloto de lodos activados*, Peña (2012), se propone el control de un tanque de aireación de los lodos activados mediante el concepto de aprendizaje por refuerzo. El sistema hace uso de experiencias y las utiliza para tomar acciones las cuales permitan alcanzar los objetivos definidos. El estudio logró obtener un aumento de eficiencia donde se mantienen concentraciones de OD entre 1 y 2 mg/l y se redujo el caudal de aire entre un 20 y 45 %.

En el artículo técnico titulado *Sistema de control de aireación mediante lógica difusa (Fuzzy) para pequeñas EDAR*, Manzano, Poch, Arespacochaga, Rodríguez, Rouge, Hurtado y Aguilera (2017) se propone un sistema de control en la aireación de una EDAR cuyo objetivo busca reducir los costos de operación y reducir el consumo de energía en la aireación en estaciones depuradoras de agua residual. Mediante la medición de variables de oxígeno disuelto y control de redox en la aireación y con el uso de variadores de velocidad para los sopladores. En el estudio se ha analizado 4 diferentes EDAR en las cuales se logró demostrar que implementando el sistema de control se ha logrado reducir el consumo

energético en la aireación con un promedio del 29 % y donde la mayor reducción de consumo energético alcanza hasta un 34 %.

Se han investigado otros estudios, realizados en otros países del mundo, acerca de la optimización y los ahorros energéticos que se pueden ser obtenidos mediante los sistemas de control en los tanques de aireación de las PTAR y EDAR. Algunos de los estudios que se lograron encontrar son los siguientes:

En la tesis de maestría de ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente titulada *Evaluación del coeficiente de transferencia de oxígeno en procesos de fangos activados para optimizar la aireación*, Ivailova, Solís, Bes-Pia y Aguado, (2020) se establece que en una estación depuradora de aguas residuales (EDAR) uno de los más grandes consumos de energía eléctrica es debido a la aireación en los tratamientos biológicos. Por lo que se realiza un estudio del sistema de oxigenación el cual busca aumentar la eficiencia y la búsqueda de nuevas formas de disminuir los costos de energía. En el estudio se definieron tres puntos claves para el ahorro energía: Sistema de control de la aireación para ajuste de la cantidad de oxígeno, sopladores capaces de trabajar en forma eficiente en necesidades bajas y medias que permite una buena regulación a comparación de los sopladores de altas potencias y por último trabajar a bajas concentraciones de OD puede aumentar la diferencia respecto a la saturación de oxígeno y se puede conseguir mayores transferencias de oxígeno hacía el agua. Luego de la implementación del sistema de control se logró afirmar que el consumo global de la EDAR estuvo por debajo de 0.25 kWh/m<sup>3</sup> comparado a 0.42 kWh/m<sup>3</sup> que se pueden encontrar en EDAR de características similares.

En el artículo *Optimización de EDAR mediante sistemas de control basados en sensores de pH, REDOX y oxígeno*, Ruano, Robles, Jiménez, Casao, Ribes, Serralta, Seco y Ferre (2017), se hace un estudio de la optimización de una EDAR

implementando un control que se basa en las mediciones de PH, Redox y oxígeno. Se propone un sistema básico de control de aireación, donde se hace uso de un controlador programado con una lógica difusa, donde se propone mantener concentraciones de OD en la aireación mientras se mantiene al mínimo la presión del sistema.

También se propone un sistema de control más avanzado para la eliminación continua de nitrógeno, este sistema de control hace uso de los datos obtenidos de mediciones de REDOX y PH y tiene como objetivo optimizar de forma más optimizada el control de OD. El sistema está basado en un sistema *Múltiple Input Single Output* (MISO), lo que significa que se utilizan varias variables de entrada para controlar una variable de salida, en este caso se utilizó un control proporcional e integral (PI) del REDOX y PH para el control de OD. En el estudio se realizó una prueba la cual luego de implementar del sistema de control de los aireadores, se obtuvo un ahorro energético de 20 % de la energía general de la planta, mientras que con el sistema de control de nitrógeno se logró un ahorro adicional del 12 %. El sistema de control fue puesto a prueba en 3 EDAR donde además de obtener una mejora significativa en la calidad de agua, se alcanzaron ahorros de hasta el 46 % en una de las pruebas.

En el artículo publicado *Dissolved oxygen control in activated sludge process using a neural network-based adaptive PID algorithm*, Du, Wang y Jegatheesan, (2018), se propone un sistema de control inteligente el cual es ubicado en la etapa de lodos activados el cual busca mantener los niveles de OD. En el sistema se ha utilizado un algoritmo de Proporcional-Integral-Derivativo (PID) adaptativo basado en redes neuronales. Este estudio fue realizado en una planta de tratamientos residuales en Gansu provincia de China, y tiene como objetivo aumentar la eficiencia del tratamiento de agua y reducir la energía de aireación consumida. Esto surge luego de establecer que un sistema de PID

tradicional tiene ciertas limitaciones cuando existen perturbaciones, provocando que sea difícil ajustar los niveles de concentración de OD de una manera rápida y eficiente.

El estudio propone una red neuronal artificial donde se utiliza inteligencia artificial para imitar el comportamiento de los procesos y organismos biológicos. La red de inteligencia artificial es capaz de analizar y reconocer patrones, cambios o fluctuaciones que le permite hacer predicciones y ajustes necesarios para un control más automatizado. En la prueba la concentración se definió en 2 mg/L y se hizo una simulación que duró 7 días en los cuales se logró comparar el comportamiento de un PID tradicional y uno adaptativo. En la prueba se observó que bajo diferentes condiciones climáticas que afectaron los efluentes, el desempeño en la aireación del PID adaptativo era superior al de PID tradicional consumiendo menos energía por día y generando mayores ahorros energéticos del 5 - 8 %.

### **3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

El agua es uno de los recursos más importante para la vida en el planeta tierra. La superficie del planeta tierra se conforma por más de un 70 % de agua, de la cual solo un 2.5 % es agua dulce. La mayor parte del agua dulce se encuentra congelada en los polos, en acuíferos enterrada bajo la tierra y en lagos y ríos. Debido a esto es sumamente importante que se creen acciones de conservación del agua que permita detener la escasez y contaminación de las fuentes existentes.

Además del consumo humano y de los animales, el agua es vital para distintas aplicaciones en el uso domiciliar y en muchos de los procesos industriales. Cada día toneladas de agua son descargadas por los drenajes conteniendo una gran cantidad de desechos sólidos, el destino final de las aguas residuales son comúnmente ríos y lagos.

Las aguas residuales son una de las principales causas de contaminación en ríos y lagos, pueden hacer que muchos de los ecosistemas acuáticos se vean fuertemente afectados y pueden representar un alto riesgo para la salud de los habitantes que hacen uso de las aguas y los peces que provienen de ellas.

Actualmente muchas de las empresas y municipalidades no cuentan con plantas de tratamiento residual, y si existen, las mismas son deficientes y no cumplen con los parámetros establecidos, liberando grandes cantidades de desechos y contaminación. La principal causa de desinterés en el correcto tratamiento de aguas residuales es debido a las débiles sanciones por parte de

los gobiernos y los altos costos de mantenimiento y operación que una planta puede representar.

Para el tratamiento de las aguas residuales existen distintos procesos los cuales pueden representar altos costos de mantenimiento y operación. Uno de los procesos de mayor costo y consumo de energía es el reactor de lodos activados, el cual, debido a la necesidad de aireación, ya sea con sopladores o aireadores, puede representar entre el 40 - 70 % de la energía de una planta residual.

Al igual que en la naturaleza, el reactor de lodos activados utiliza microorganismos aeróbicos para la oxidación biológica de la materia orgánica. Estos microorganismos consumen grandes cantidades de oxígeno disuelto para poder descomponer la materia orgánica por lo que es necesario asegurar que existan los niveles de oxígeno y condiciones adecuadas que favorezcan su desarrollo, comúnmente este proceso es deficiente ya que no se tiene un control de la cantidad de aireación que se está suministrando, por lo que pueden existir deficiencias de oxígeno disuelto o consumo de energía innecesario.

Es por lo que se plantea la siguiente pregunta: ¿Cuál será el mejor diseño de un sistema de control y monitoreo de oxígeno disuelto automatizado que permita el aumento de eficiencia en la aireación de una planta de tratamiento de lodos activados?

Para responder esta pregunta se debe dar respuestas a las siguientes preguntas auxiliares.

- ¿Cuáles son los componentes necesarios para la automatización del control del oxígeno disuelto que permita la máxima eficiencia en la aeración?
- ¿Cuál es la interfaz y el sistema de monitoreo más adecuado para el control de oxígeno disuelto y eficiencia de reactor de lodos activados?
- ¿En qué porcentaje aumentará la eficiencia de la aireación y cuánto será el ahorro energético luego de la implementación del sistema de control y monitoreo de oxígeno disuelto?



## 4. JUSTIFICACIÓN

La realización de la siguiente investigación se justifica en la línea de investigación de gestión y uso eficiente de la energía del área de gestión energética de la Maestría en Energía y Ambiente.

Se sabe que el agua es un recurso natural vital para la vida en el planeta tierra, el desarrollo de los ecosistemas y el funcionamiento del mundo como lo conocemos. En la actualidad su escasez es uno de los principales problemas del mundo, por lo que es necesario encontrar formas de cuidarla y hacer un uso responsable.

Para disminuir la contaminación y mejorar la calidad de agua, el agua residual utilizada en la industria y domicilios es tratada en las PTAR. Debido a sus altos costos de operación las PTAR en muchas ocasiones no existen o son deficientes. En una PTAR el reactor de lodos activados es el proceso donde se realiza la oxidación biológica de la materia orgánica y debido a la aireación que necesita se puede consumir entre el 40 - 70 % de la energía eléctrica de toda la PTAR.

El estudio busca diseñar un sistema de control y monitoreo en línea del oxígeno disuelto que permita aumentar la eficiencia de la aireación en un tanque de lodos activados en una planta de aguas residuales. El aumento de la eficiencia se obtendrá al conseguir controlar la aireación y cantidad de oxígeno necesario para el proceso de oxidación haciendo uso de la mínima cantidad de energía.

Una mejor calidad de agua descargada en los afluentes naturales nos beneficia a todos. Reduce la contaminación de ríos y lagos, previene de enfermedades a los habitantes cercanos los cuales hacen uso de ella o se alimentan de los peces que viven allí. Además de hacer el trabajo más fácil y eficiente a los gerentes de mantenimiento o encargados de las PTAR.

Este diseño permitirá que se puedan replicar acciones similares en las diferentes PTAR de las distintas industrias y municipalidades. El estudio es pertinente ya que demostrará los ahorros energéticos que se obtienen al implementar el sistema y los potenciales ahorros en costos de operación y mantenimiento que pueden llegar a obtener, al mismo tiempo que se contribuye en una mejor calidad de agua.

## **5. OBJETIVOS**

### **5.1. General**

Proponer el diseño de la automatización del control y monitoreo de oxígeno disuelto de una planta de tratamiento de lodos activados.

### **5.2. Específicos**

- Determinar los componentes necesarios para la automatización del control de oxígeno disuelto para aumento de eficiencia.
- Definir la comunicación e interfaz de visualización para el monitoreo del sistema de control.
- Calcular el aumento de eficiencia y ahorro energético obtenido luego de la implementación del sistema de control.



## **6. NECESIDADES A CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN**

Esta investigación tiene como alcance la propuesta de un diseño de automatización del control y monitoreo del oxígeno disuelto en una planta de aguas residuales de lodos activados.

En las PTAR el reactor de lodos es uno de los procesos que más energía consume, esto es debido a que es necesario hacer uso de aireadores o sopladores los cuales están inyectando oxígeno al agua. Los correctos niveles de oxígeno son necesarios para asegurar que los microorganismos aeróbicos puedan hacer su tarea de descomponer la materia orgánica. Si los niveles de oxígeno disuelto son bajos los microorganismos no podrán oxidar la materia y si son demasiado altos, se estará realizando una aireación y consumo energético mayor al necesario.

Es por eso por lo que se plantea un sistema de control el cual mediante el uso de un sensor de OD pueda medir los niveles de oxígeno en tiempo real. La medición de OD se utilizará como retroalimentación del sistema el cual le permitirá tomar decisiones como por ejemplo si es necesario aumentar o disminuir el flujo de aire en los sopladores en determinado momento. También será capaz de monitorear otras variables como pH, Redox, temperatura, presión, entre otros.

Se hará uso de un controlador para las decisiones del sistema y un variador de velocidad para controlar el soplador. De igual forma para aprovechar al máximo el sistema es necesario un sistema de monitoreo, el cual le permita a los ingenieros de mantenimiento la visualización en tiempo real de las distintas

variables del proceso, así como los indicadores de eficiencia del sistema, fallas, alarmas y datos que le permitan poder programar mantenimientos preventivos, predictivos o correctivos según sea el caso.

Este sistema permitirá que a la vez que se mejora la calidad de agua, se tengan ahorros en costos energéticos y mediante el sistema de monitoreo poder generar ahorros en los costos de mantenimiento y operación.

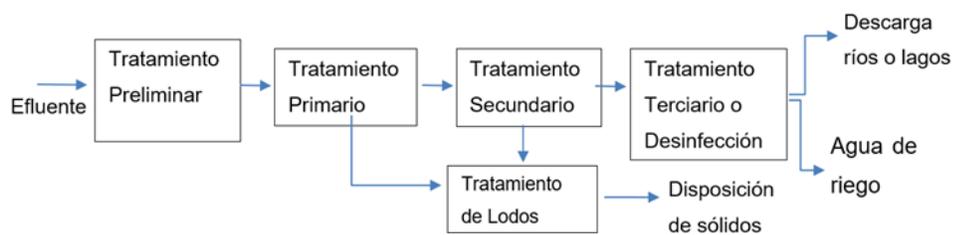
## 7. MARCO TEÓRICO

### 7.1. Planta de tratamiento de agua

Una planta de tratamiento de aguas residuales puede ser definida como la combinación de distintos procesos los cuales pueden ser físicos, químicos o biológicos. Las PTAR son utilizadas para mejorar la calidad del agua que es utilizada día a día en los hogares o en los distintos procesos industriales.

Es importante hacer una caracterización de las aguas ya que según el proceso donde fueron utilizadas pueden variar, y con la caracterización se puede definir el tratamiento que el agua pueda necesitar. Existen distintos niveles de tratamiento de agua el cual se puede representar en la figura 1.

Figura 1. Niveles de tratamiento de aguas residuales



Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de Ayala (2008). *Apoyo didáctico en la enseñanza - Aprendizaje de la asignatura de plantas de tratamientos de aguas residuales.*

### **7.1.1. Tratamiento preliminar**

El proceso preliminar de aguas es el lugar donde se realiza la eliminación de sólidos de gran tamaño y que puede ocasionar problemas en el funcionamiento de diferentes equipos como bombas y tuberías. En el tratamiento preliminar existen 2 sistemas en el cual podemos mencionar las rejillas y el desarenador (Farias, 2016).

- Rejillas: son barrotes con cierto espaciamiento y son utilizadas para remover los residuos sólidos de gran tamaño que puede traer las aguas de los drenajes.
- Desarenador: son canales o tanques utilizados para remover sedimentos sólidos de menor tamaño como arenas las cuales por medio de un proceso de decantación se separan los sólidos hacia el fondo del desarenador.

### **7.1.2. Tratamiento primario**

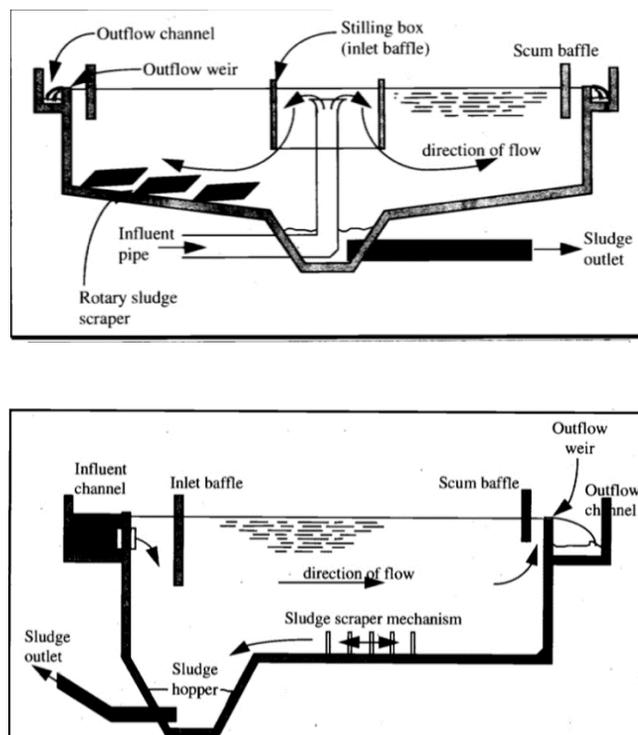
Proceso de la PTAR que tiene como objetivo remover los sólidos suspendidos, grasas y aceites. Este proceso puede ser clasificado de sedimentación o flotación.

La sedimentación consiste en separar los sólidos de las aguas residuales por gravedad, los tanques pueden ser de diferentes geometrías y tamaños. El tiempo de retención puede ser de 60 a 120 minutos los cuales son suficientes para remover entre el 45 – 65 % de los sólidos suspendidos y disminución de la demanda biológica de oxígeno (DBO) del 30 – 40 %. En este proceso se pueden añadir químicos llamados coagulantes que producen compuestos llamados flóculos. Los flóculos pasan a tanques donde con una lenta agitación se busca

que se acumulen y aumenten su peso haciendo que por gravedad desciendan al fondo del tanque (Farias, 2016).

Los procesos de flotación se utilizan en aguas que contienen cierta cantidad de grasas, aceite y espumas que flotan en la superficie. En algunos casos se inyectan burbujas de aire las cuales al ascender hacen flotar los sólidos y se logra separar los líquidos. También se pueden usar sedimentadores circulares con barredoras las cuales empujan los sólidos hacia cajas recolectoras (Farias, 2016).

Figura 2. Sedimentador Primario



Fuente: EPA (1997). *Sedimentador primario circular y rectangular.*

### **7.1.3. Tratamiento secundario**

Para Ayala y Gonzales (2008), este proceso se usa para tratamientos del tipo biológico donde se utilizan microorganismos existentes en las aguas residuales. En el tratamiento de agua secundario se pueden encontrar tanto procesos aeróbicos como anaerobios, incluso combinación de ambos procesos en algunas plantas.

Según Sawyer, McCarty y Parkin (2000), los microorganismos aeróbicos utilizan oxígeno para descomponer la materia, dando como resultados productos inocuos. Mientras que los microorganismos anaeróbicos descomponen la materia sin necesidad de oxígeno ya que utilizan otras sustancias como sulfatos, nitratos, dióxido de carbono entre otras las cuales forman productos finales como biogás (metano + CO<sub>2</sub>) y pueden existir malos olores por la producción de sulfuros.

Dentro de las principales diferencias entre los tratamientos anaerobios y aeróbicos se puede mencionar que el tratamiento aeróbico puede alcanzar mejores grados de tratamiento, no generan malos olores y eliminación de nutrientes. Entre algunas de las ventajas de los sistemas anaeróbicos se pueden mencionar: espacios más pequeños, menor cantidad de lodos residuales, costos de operación más pequeños y no requieren energía para aireación (Arvizu, 1996).

Las plantas anaeróbicas son utilizadas cuando existe grandes cantidades de materia orgánica como la que podemos encontrar en una industria de alimentos y bebidas. La combinación de los 2 sistemas puede dar como resultado la obtención de un mejor tratamiento en las aguas residuales (Arvizu, 1996).

#### **7.1.4. Tratamiento de lodos activados**

Para Ayala y Gonzales (2008), las plantas de lodos activados es uno de los procesos más utilizados en PTAR de países de mejor economía. Son bastante eficientes ya que pueden lograr una reducción del DBO que ronda entre 85 – 93 %. Fue desarrollado en 1914 por Arden y Lockett, y fue llamado así ya que involucra la producción de microorganismos aeróbicos capaces de descomponer la materia orgánica proveniente de las aguas residuales.

El sistema está conformado de un tanque de aireación también llamado reactor, en el tanque existen lodos conformados por microorganismos como por ejemplo bacterias, hongos, algas y otros organismos. Este lodo puede ser reciclado de otros procesos de la PTAR como el de clarificación secundaria Para (Ayala y Gonzales, 2008).

Los sólidos presentes en el tanque de aireación de un proceso de lodos activados son llamados sólidos suspendidos de licor de mezcla (SSLM) y es usado para poder monitorear los niveles de biomasa presentes en el tanque de aireación.

#### **7.1.5. Oxígeno disuelto**

En el licor de mezcla el OD es vital y necesario para el crecimiento y desarrollo de los microorganismos en los tanques de aireación. Tomando en cuenta que un proceso de lodos activados depende del proceso aeróbico es necesario poder tener un control de la aireación del tanque (Environmental Protection Agency, 1997).

Un bajo nivel de oxígeno disuelto provocará que los microorganismos no puedan realizar su trabajo de descomponer la materia orgánica apropiadamente. De igual manera niveles de OD por encima de los necesarios significara gastos de energía innecesarios y altos costos de operación (Environmental Protection Agency, 1997).

Los expertos concuerdan que para poder satisfacer los niveles de la demanda biológica de oxígeno (DBO), cantidad de oxígeno consumido para degradar la materia orgánica, es necesario una concentración de OD entre 1 - 2 mg/l en el licor de mezcla.

#### **7.1.6. Tipos de aireación**

Para poder mantener los niveles de OD en el reactor de lodos activados se puede hacer uso de diferentes equipos mecánicos cuyo objetivo es transferir oxígeno al agua residual. Dentro de estos equipos se pueden clasificar en 3 métodos:

- Aireación mecánica
- Difusores
- Combinación de los agitadores mecánicos y los difusores

##### **7.1.6.1. Aireadores mecánicos**

Los aireadores mecánicos hacen uso de la energía mecánica para la transferencia de oxígeno y se pueden dividir en verticales y horizontales. Adicional se pueden clasificar por su montaje el cual puede ser fijo o flotante, por su velocidad de rotación, por su ubicación superficial o sumergido (Monroy, 2010).

En los aireadores verticales la transferencia de oxígeno es lograda debido a la agitación del agua por medio de la rotación de turbinas, los mismos se pueden dividir en flujo inducido, baja y alta velocidad, logrando una mezcla del agua y que las gotas salpicadas sean expuestas al aire creando una transferencia de oxígeno (Monroy, 2010).

Figura 3. **Aireador vertical**



Fuente: Grupo Falmat (s.f.). *Equipos y sistemas de aireación.*

Los aireadores horizontales están compuestos por alavés que giran y elevan gotas de agua hacia el aire creando una transferencia de oxígeno.

Figura 4. **Aireador horizontal**



Fuente: Landy Brush Aereators (s.f.). *Wastewater - Aeration Systems.*

### **7.1.6.2. Difusores o sopladores de aire**

Los difusores de aire son colocados en la parte inferior del sistema de aireación, inyectan aire comprimido a través de placas con agujeros de diferente tamaño. Basándose en el tamaño de los orificios los difusores se pueden clasificar en:

- Burbuja gruesa superior a 6 mm
- Burbuja media de 3 a 6 mm
- Burbuja fina menor a 3 mm

La ventaja de los difusores de aire de burbuja fina es que requiere menos energía para su funcionamiento, tienen alta eficiencia de transferencia de oxígeno, la desventaja es que requieren mucho mayor mantenimiento ya que se deben limpiar los agujeros que pueden ser obstruido debido a las sales y contaminantes del agua.

En los difusores de aire de burbuja gruesa son utilizados mayormente para mezclar que, al oxigenar, están menos propensos a el taponamiento, aunque consumen más energía y tienen una transferencia menos eficiente.

### **7.1.7. Medición de oxígeno disuelto**

Para la medición de oxígeno disuelto existen 2 métodos estándares, el primero es un método aún muy utilizado que hace uso de procedimientos yodométrico y se lleva a cabo mediante la titulación de oxidación-reducción. El segundo es una medición la cual puede realizarse en sitio y utiliza un electrodo cubierto por una membrana (Sawyer, McCarty y Parkin, 2000).

En el método de Winkler o yodométrico todas las reacciones para la determinación del OD son de oxidación-reducción. Es necesario tomar una muestra con un dispositivo especial, botella de Winkler, que asegure que no existirá exposición al aire o haya combinaciones de agua a diferente presión y temperatura. Es necesario la aplicación a la muestra de reactivos como sulfato de manganeso, álcali-yoduro-azida los cuales tornaran la muestra color marrón y confirmaron la presencia de oxígeno.

Se utiliza el almidón como indicador tornando la muestra en un color azul brillante y el tiosulfato de sodio como agente reductor. El tiosulfato de sodio se irá añadiendo controladamente hasta que la muestra cambie de color azul brillante y retorne a la forma incolora, esto significa que todo el yodo ha sido reducido a ion yoduro. Utilizando los datos de volumen y concentración del agente reductor y volumen de la muestra es posible calcular la cantidad de OD (Sawyer, McCarty y Parkin, 2000).

Actualmente se utiliza la medición en sitio y en tiempo real por medio de electrodos especiales. Estos pueden ser amperométricos o sensores de oxígeno óptico. Son adecuados para la medición de OD en estanques, corrientes, tanques de tratamiento biológico o cualquier cuerpo de agua. Se pueden transportar fácilmente y algunos poseen compensación por temperatura. La medición de OD se transmite con señales eléctricas a un transmisor que interpreta los datos.

## **7.2. Sistemas de control**

Un sistema de control es definido como la combinación de distintos objetos físicos que se encuentran conectados con el objetivo de poder controlar, dirigir o manipular una determinada salida u otros sistemas (Perez, Perez y Perez, 2007).

Los sistemas de control pueden estar compuestas por distintas variables y señales como lo son:

- Variables de entrada
- Variables de salida
- Retroalimentación
- Perturbaciones

Las variables de entrada son las señales que ingresan al sistema y no dependen de ninguna otra variable. La salida del sistema de control está compuesta por una variable que está siendo controlada con el objetivo de que se alcance los objetivos establecidos.

Para Perez, Perez y Perez (2007), la retroalimentación es una propiedad de los sistemas de control que permiten poder hacer una comparación entre las variables de entrada y salida, con lo cual se pueden definir las acciones necesarias para alcanzar los objetivos planteados.

Finalmente, las perturbaciones son señales internas o externas del sistema de control que pueden afectar el funcionamiento y desempeño de este. Estas perturbaciones son aleatorias y deben tomarse en cuenta acciones que logren disminuirlas lo más posible (Perez, Perez y Perez, 2007).

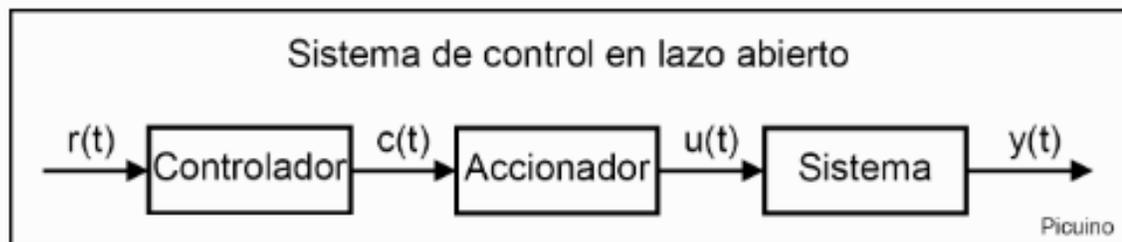
Los sistemas de control se pueden clasificar en 2 tipos, con o sin retroalimentación. Los sistemas con retroalimentación son llamados sistemas de control de lazo cerrado y sin retroalimentación, sistemas de control de lazo abierto.

### 7.2.1. Sistemas de control de lazo abierto

Según Perez, Perez y Perez (2007), los sistemas de control de lazo abierto son sistemas los cuales no tienen una señal de retroalimentación y son utilizados en sistemas simples. Un control de lazo abierto modifica una señal de entrada haciendo uso de un controlador y obteniendo como resultado la manipulación de la señal de salida según se haya configurado.

Los sistemas de control son procesos los cuales actúan sobre una base de control de tiempo. En la figura 5 se puede definir  $r(t)$  como la señal de referencia,  $c(t)$  Señal de controlador,  $u(t)$  es la acción que se realizará y la  $y(t)$  es definida como la variable de salida que alcanzara el sistema.

Figura 5. Sistema de control de lazo abierto



Fuente: Picuino (2020). *Control automático, recursos para tecnología.*

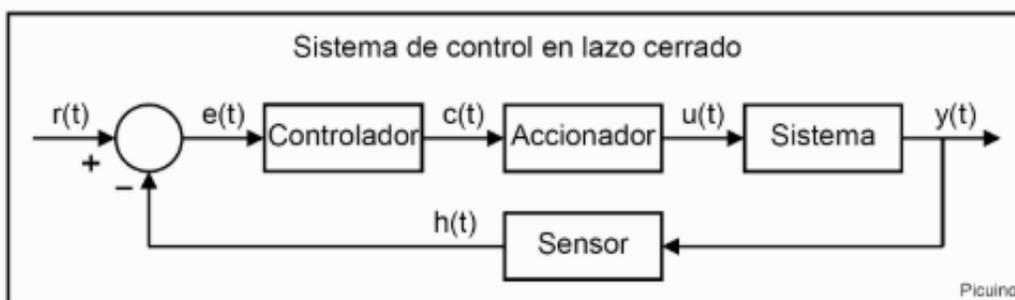
Los sistemas de control de lazo abierto son sistemas económicos y poco exactos por lo que se utilizan en aplicaciones las cuales no son críticas, como ejemplo de un lazo de control abierto podemos mencionar la variación del volumen de una bocina, donde el controlador es el potenciómetro y el accionador el amplificador de audio. Conforme se vaya modificando la posición del potenciómetro se podrá regular la salida de audio.

### 7.2.2. Sistemas de control de lazo cerrado

Los sistemas de control de lazo cerrado tienen como característica principal la comparación de la señal de salida con respecto a la señal de entrada o referencia del sistema. Para poder realizar esta comparación es necesario contar con una señal de retroalimentación la cual puede provenir de sensores o componentes que le indiquen al sistema en qué estado se encuentre la variable de salida.

La diferencia entre la variable de salida y la variable de referencia es conocida como error del sistema, el sistema de retroalimentación busca brindar la información del estado actual de la señal de salida para que el controlador pueda realizar las acciones necesarias las cuales permitan ir reduciendo el error lo más posible. En la figura 6 se puede observar el esquema de un sistema de control de lazo cerrado (Perez, Perez y Perez, 2007).

Figura 6. Sistema de control de lazo cerrado



Fuente: Picuino (2020). *Control automático, recursos para tecnología.*

A diferencia del sistema de lazo abierto descrito en el inciso anterior, el esquema del control de lazo cerrado se le añade la variable  $h(t)$  la cual es la señal

emitida por el sensor y utilizada como retroalimentación del sistema (Picuino, 2020).

Un ejemplo sencillo de un control en lazo cerrado es la temperatura en un cuarto, donde una persona define una temperatura. La variable de retroalimentación, en este caso un termómetro, le indicará al sistema la temperatura actual en el cuarto, si existe una diferencia entre la temperatura definida y la medida por el termómetro, el controlador dará la orden al accionador pudiendo ser un ventilador o un calentador para que aumente o disminuya la temperatura, el ciclo se irá repitiendo hasta que el error entre la temperatura establecida y la medida en el cuarto sea cero.

### **7.2.3. Controladores**

En la automatización industrial los controladores forman parte del día a día de las operaciones. Son utilizados para el control automatizado de infinidad de aplicaciones y procesos como control de motores, bandas transportadoras, calderas, dosificación de productos, control de temperatura en hornos y muchos procesos más.

Los controladores están diseñados con una memoria programable y un procesador con los cuales se pueden guardar diferentes instrucciones para el desarrollo de distintas funciones. Estas funciones y acciones son logradas gracias a distintas operaciones lógicas, cálculos, contadores, temporizadores y control de entradas y salidas de señales digitales y análogas del sistema (Rehg y Sartori, 2014).

Para la programación de las instrucciones y funciones de un controlador es necesario el uso de un programa con un determinado lenguaje de programación,

los diferentes desarrolladores de controladores tienen sus Software propietarios para poder programar sus controladores. Los lenguajes de programación más utilizados en la industria son los siguientes:

- Programación en escalera
- Texto estructurado
- Cartas secuenciales
- Diagrama de bloques

En la industria se pueden encontrar diferentes tipos de controladores los cuales dependerán de distintas características y funcionalidades que se estén buscando poder alcanzar del proceso.

#### **7.2.3.1. Controladores lógicos programables**

Los controladores lógicos programables están compuestos de distintas partes las cuales pueden estar en una construcción compacta o de una forma modular.

Unidad central de procesamiento CPU, es la parte principal del PLC y el cerebro de la operación. El CPU es la pieza encargada de utilizar las operaciones lógicas y matemáticas y que permite realizar las distintas funciones del sistema (Rehg y Sartori, 2014).

La fuente de poder es el componente necesario para el suministro de potencia del equipo, este puede ser 24 VDC o 120 VAC. En algunos sistemas de control se pueden encontrar 2 fuentes de voltaje, 1 para la alimentación del CPU y otro para la alimentación de las salidas de campo (Rehg y Sartori, 2014).

El lugar donde se guardan los datos y las instrucciones es la memoria que se divide en memoria permanente y memoria operacional, conocida como memoria de acceso aleatorio o RAM. La memoria permanente es donde se ejecuta el sistema de operación del PLC y puede ser reemplazada. Mientras que la RAM, es donde se guarda y ejecuta el programa (Rehg y Sartori, 2014).

Un PLC también cuenta con distintos módulos de entradas y salida (E/S) las cuales pueden ser digitales o análogas. Una E/S digital son aquellas que solo pueden brindar 2 estados, si o no, encendido o apagado como por ejemplo el estado de una luz, esta solo puede estar encendida o apagada. Mientras que las E/S digitales utilizan señales de corriente 4 - 20 mA o de voltaje 0 - 10 V que dependerán del valor de una determinada variable. Como por ejemplo en la medición de temperatura de 0 - 100 °C se puede definir 0 como la señal de 0 V y 100 °C como 10 V, por lo que si en el ambiente se mide una temperatura de 50 °C esta corresponderá a un valor de 5 V (Rehg y Sartori, 2014).

Finalmente, los controladores también constan de un módulo de comunicación el cual permite al PLC poder conectarse con los otros componentes que componen el sistema de control. Este medio de comunicación también permite el intercambio de información con una computadora o con otro equipo.

#### **7.2.3.2. Controladores de automatización**

Un controlador de automatización programable (PAC) es en esencia muy parecido a un PLC, ambos pueden realizar las mismas funciones y son utilizado para controlar máquinas y sistemas de control.

La principal diferencia entre los PLC y los PAC puede observarse en la forma de programación que cada uno utiliza, mediante los PLC comúnmente utilizan lenguajes de escalera, los PAC pueden usar otros lenguajes más gráficos y orientados a objetos como es el uso de diagramas de bloques o texto estructurado.

Los PLC son utilizados para el desarrollo de procesos más simples y proyectos de automatización de máquinas sencillas. Mientras los PAC tienen la capacidad de poder controlar la operación de incluso plantas completas. Los PAC pueden estar compuestos de dos o más procesadores por lo que tienen una mayor facilidad de ejecutar distintas tareas al mismo tiempo (Zach, 2017).

Los PAC comúnmente están compuestos de una manera modular lo que le permite el crecimiento paulatino según las necesidades del sistema lo vayan requiriendo. La comunicación en un PAC también es más rápida, mientras en un PLC debe existir una instrucción para el envío o recepción de datos un PAC lo hace en tiempo real y con una comunicación bilateral continua (Zach, 2017).

### **7.2.3.3. Microcontroladores**

Los microcontroladores son componentes que funcionan de manera similar a un PLC, también se componen de fuente de poder, CPU, memoria, módulos de entradas y salidas, y módulo de comunicación. Al igual que el PLC son programados mediante lenguajes de programación los cuales pueden ser bastante similares a los de un PLC normal (Allen Bradley, 1995).

La principal diferencia con un PLC es que los microcontroladores son utilizados en aplicaciones bastante sencillas y con un nivel de criticidad bajo, como controles de bombas, máquinas pequeñas aisladas y controles de

iluminación. Los microcontroladores se vuelven una buena opción debido a sus bajos costos comparados contra los PLC y los PAC (Allen, 1995).

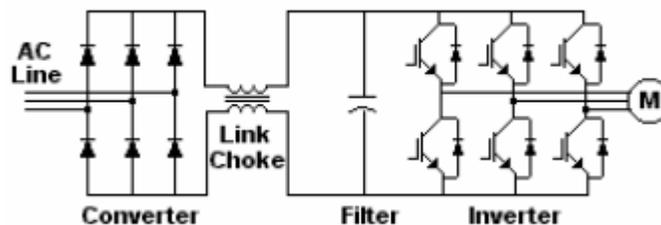
#### 7.2.4. Variadores de velocidad

Los variadores de velocidad son equipos eléctricos los cuales permiten el control de motores de inducción regulando la velocidad y torque exacto que exige el proceso en determinada aplicación. Este control permite generar grandes ahorros de energía ya que el motor solo estará consumiendo la potencia necesaria para mover la carga a la cual está conectado.

Los variadores de velocidad son cada vez más utilizados en la industria y cada vez es más difícil encontrar arranque de motores los cuales no se hacen con variadores de velocidad.

El funcionamiento de un variador de velocidad consta de 3 etapas, la etapa rectificadora, un circuito intermedio que es la etapa de filtro y una etapa inversora. En la figura 6 se puede observar de mejor manera el esquema simplificado de un variador de velocidad (Allen, 2004).

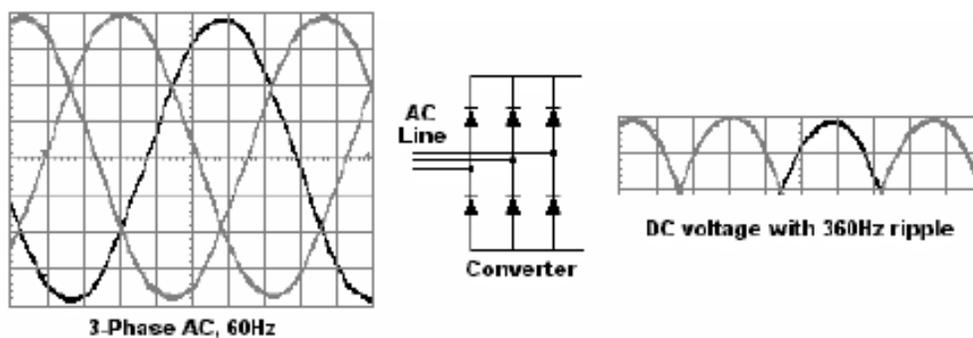
Figura 7. Diagrama variador de velocidad



Fuente: Allen (2004). *Drives Engineering Handbook*.

En la etapa de rectificación los variadores de velocidad son alimentados por una corriente alterna la cual puede ser trifásica o monofásica. Mediante el uso de un puente de diodos de alta potencia la onda senoidal es convertida a una onda corriente DC positiva.

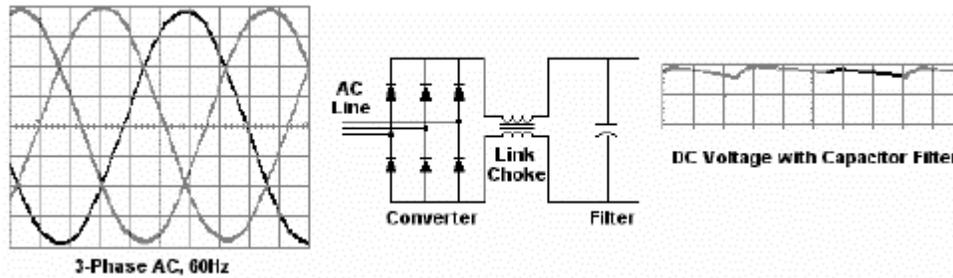
Figura 8. **Etapa de rectificación variador de velocidad**



Fuente: Allen (2004). *Drives Engineering Handbook*.

En la etapa 2, luego de conseguir una corriente y voltaje DC es necesario que ésta atraviese una etapa de filtrado. La etapa está conformada por una inductancia o una bobina de choque (*line Choke*). El *line Choke* cumple la función de amortiguar la línea de AC del banco de capacitores y sirve para mejorar el factor de potencia y reducir los armónicos. Mientras que el banco de capacitores siempre está presente, la inductancia puede ser opcional. En ambos casos, el voltaje de DC pulsante de 360 Hz es filtrado suavemente por el banco de capacitores. La onda DC pasa por un arreglo la cual elimina el rizado de la señal y busca conseguir una corriente continua lo más plana posible (Allen, 2004).

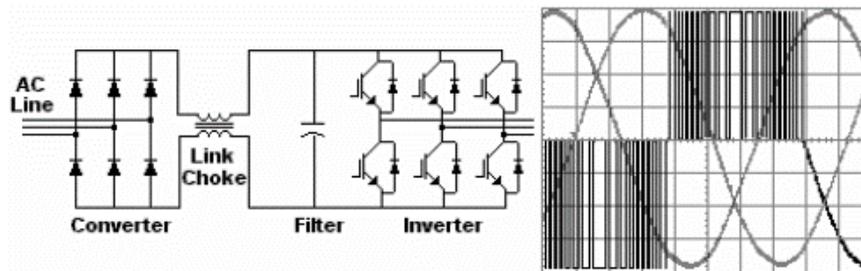
Figura 9. **Etapa de filtrado variador de velocidad**



Fuente: Allen (2004). *Drives Engineering Handbook*.

La tercera etapa es la sección del inversor. Esta sección utiliza transistores de alta velocidad como interruptores para aplicar una forma de onda de modulación de ancho de pulso al motor. La de modulación de ancho de pulso es una onda cuadrada y es más conocida en inglés el cual se encuentra como *Pulse Width Modulated* (PWM). Tomando en cuenta que los motores son básicamente grandes inductores y que el cambio de corriente en un inductor no es tan rápido. La tensión del bus de DC se puede aplicar en pulsos de ancho variable para lograr una corriente en el motor que se aproxime a una onda sinusoidal (Allen, 2004).

Figura 10. **Etapa de inversión del variador de velocidad**



Fuente: Allen (2004). *Drives Engineering Handbook*.

#### 7.2.4.1. Ahorro en un variador de velocidad

La variación de la frecuencia será definida en función del par y velocidad que necesite el proceso en determinado momento. Si se actúa sobre la frecuencia, está lográndose modificar la velocidad de giro de los motores, y por lo consiguiente se modificarán las variables en las cuales el motor está influyendo como lo puede ser el caudal, la presión, y potencia eléctrica.

En los sistemas de bombas y ventiladores existe una relación matemática entre el caudal, presión y consumo de energía. Con estas ecuaciones se puede calcular el ahorro energético que se tendría al reducir el flujo o presión de una bomba o ventilador. Las ecuaciones de afinidad son las siguientes:

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{N_2}{N_1} \quad | \quad \frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2 \quad | \quad \frac{HP_2}{HP_1} = \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^3 \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:

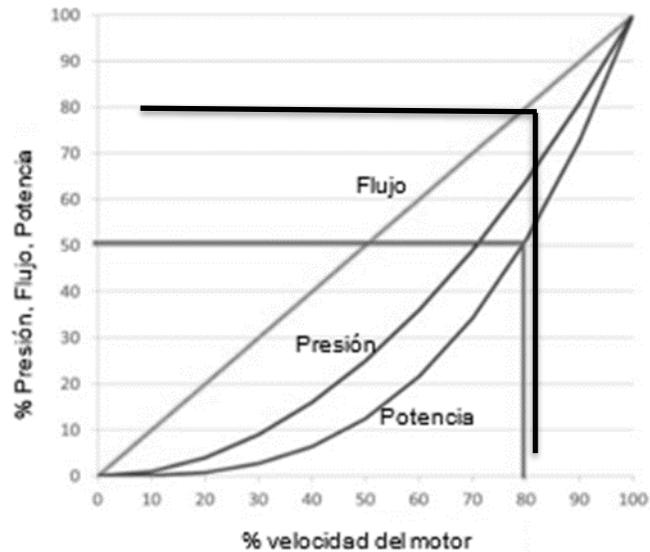
N = Velocidad

Q = Flujo o caudal

P = Presión

HP = Potencia

Figura 11. Diagrama Ley de afinidad



Fuente: elaboración propia, con información de Allen (2004). *Drives Engineering Handbook*.

Con la ley de afinidad se puede demostrar como una reducción del 20 % en el flujo se puede llegar a reducir el consumo energético hasta en un 50 %.

Para un uso eficiente de un variador es necesario realizar un buen dimensionamiento del variador de frecuencia según las características del motor asociado y una parametrización de cómo se desea que se comporte el sistema.

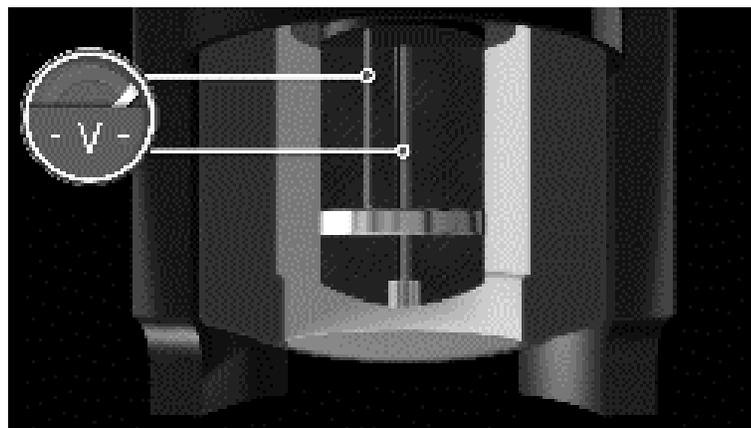
### 7.2.5. Sensores y transmisores de oxígeno disuelto

Los sensores son equipos electrónicos los cuales se dedican al monitoreo de una variable, por distintos procesos que pueden ser mecánicos, químicos o físicos los cuales los sensores pueden convertir la medición a una señal eléctrica.

### 7.2.5.1. Sensor amperométrico

Los sensores amperométricos siguen el funcionamiento del electrodo de Clark, el electrodo está compuesto de un cátodo y un ánodo, un voltaje DC es aplicado a ambos electrodos. El cátodo y ánodo están localizados en una cámara de reacción la cual está rellena de un electrolito y es separada del medio por una membrana. Cuando el sensor es sumergido a un medio con oxígeno la diferencia de presiones parciales afuera y dentro de la membrana hace que el oxígeno sea difundido a través de la membrana hacia la cámara de reacción (Endress y Hauser, 2019).

Figura 12. Electrodo amperométrico



Fuente: Endress y Hauser (2019), *Digital sensor for measuring dissolved oxygen*.

Las moléculas de oxígeno difundidas se reducen a iones de hidróxido ( $\text{OH}^-$ ) en el cátodo. La plata se oxida a iones de plata ( $\text{Ag}^+$ ) en el ánodo (esto forma una capa de halogenuro de plata). Lo que provoca que una corriente fluya debido a la donación de electrones en el cátodo y la aceptación de electrones en el ánodo. En condiciones constantes, este flujo es proporcional al contenido de oxígeno del medio (Endress y Hauser, 2019).

Esta corriente se convierte en el transmisor y se indica en la pantalla como concentración de oxígeno en mg / l, µg / l, ppm, ppb o Vol %, como índice de saturación en % SAT o como presión parcial de oxígeno en hPa (Endress y Hauser, 2019).

#### **7.2.5.2. Sensor de oxígeno disuelto óptico**

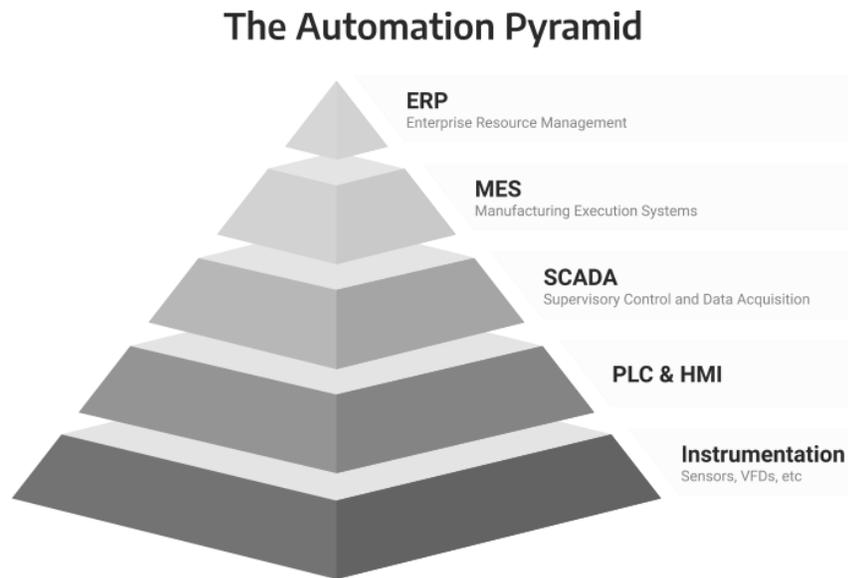
Un sensor de oxígeno disuelto óptico usa el principio de extinción de la fluorescencia, está compuesto por un LED un fotodiodo y una sección separada que está cubierta por una capa permeable de oxígeno. En esta capa hay tantas moléculas de oxígeno como en el medio. Esto significa que la presión parcial en la capa es igual a la presión en el medio. La capa contiene moléculas sensibles al oxígeno llamado marcadores, estas pueden ser excitadas por una luz anaranjada y responden con una luz fluorescente color rojo oscuro, el oxígeno disuelto se adhieren a los marcadores y atenúan la luz fluorescente (Endress y Hauser, 2019).

La señal luminosa es detectada por el fotodiodo, procesada en el transmisor y enviado donde se necesite la información. Si el medio está libre de oxígeno, las señales de respuesta son largas y muy intensas. Si existe la presencia de oxígeno las señales de respuesta son más breves y menos intensas. La cantidad de OD detectado será proporcional a la señal luminosa detectada por el fotodiodo (Endress y Hauser, 2019).

### **7.3. Sistema y equipos de comunicación para monitoreo remoto**

Para que pueda existir la capacidad de gestionar las operaciones de toda la planta existen ciertos componentes de software y hardware que componen los distintos niveles de automatización.

Figura 13. Pirámide de automatización



Fuente: Rockwell (2012). *Sistemas de automatización*.

Los sistemas de supervisión, control y adquisición de datos se encuentran en el nivel 2 de la pirámide, mientras que en el nivel 0 encontramos todos los instrumentos de campo como lo son sensores, actuadores, variadores de velocidad entre otros.

El nivel 1 está compuesto por los diferentes PLC y HMI que estarán leyendo los valores de las variables del proceso en tiempo real y brindando instrucciones a los equipos del nivel 0.

### **7.3.1. Sistemas de supervisión, control y adquisición de datos (SCADA)**

Los sistemas de supervisión, control y adquisición de datos son más conocidos en la industria como (SCADA) proviene del que proviene de las siglas en inglés de *Supervisory Control and Data Acquisition*.

Un SCADA es un programa o conjunto de programas diseñados mediante software de programación para poder tener un monitoreo y un control de los procesos automatizados en la planta. El SCADA permite lograr una comunicación con los instrumentos, actuadores, y dispositivos de campo distribuidos en los distintos procesos donde son utilizados (Esteban, 2014).

La interacción de un SCADA con el proceso es por medio de una interfaz gráfica la cual puede ser visualizada en computadoras o en equipos creados especialmente para la visualización de los procesos en planta llamados interfaces hombre máquina (HMI). Las HMI pueden ser operadas por medio de pantallas táctiles, botones, teclados u otros equipos (Esteban, 2014).

Una de las ventajas de los SCADA es que los operadores pueden monitorear las variables del proceso en el momento que están sucediendo, además de monitorear las variables un SCADA le permite actuar y modificar las variables en tiempo real según sea necesario (Esteban, 2014).

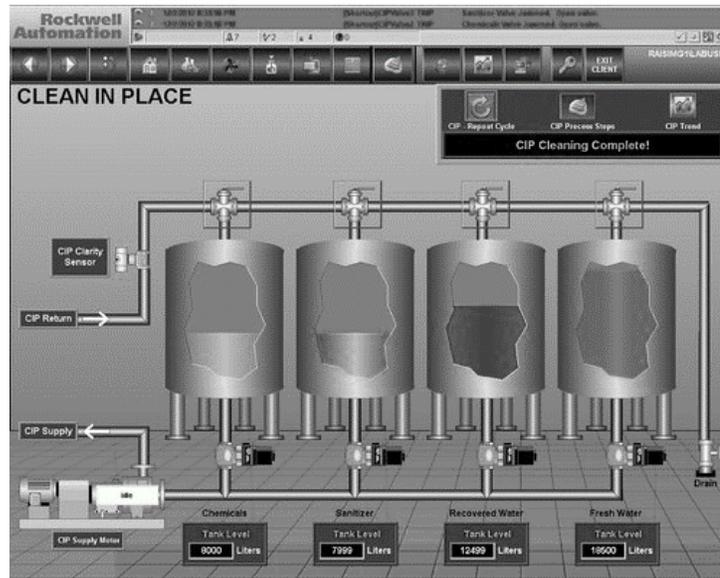
Es importante diferenciar un SCADA de un Sistema de Control Distribuido (DCS). Una de las principales diferencias es que los DCS se utilizan para controlar procesos muchos más complejos y distribuidos, mientras los SCADA buscan el control de la planta centralizado en un solo punto (Corrales, 2007).

Para Gómez y Río (2008), las principales características de un SCADA son los siguientes:

- Debe ser capaz de adquirir y almacenar los datos, para poder recolectar, procesar y guardar la información constante y de una manera confiable.
- Tener una interfaz gráfica y animada de las variables de proceso y poder ser monitoreado por medio de alarmas y condiciones.
- Una arquitectura abierta y flexible con capacidad de crecimiento y adaptación.
- Tener una conectividad a través de redes de comunicación con aplicaciones y bases de datos, locales o distribuidas.
- Supervisión, poder observar desde una pantalla de control como las variables pueden cambiar según el proceso.

Un ejemplo de un SCADA de un determinado proceso es como se puede observar en la figura 14.

Figura 14. Ejemplo SCADA



Fuente: Allen (2004). *Drives Engineering Handbook*.

### 7.3.2. Componentes de un SCADA

Dentro de los distintos componentes que se encuentran en un SCADA podemos mencionar los siguientes.

#### 7.3.2.1. Software de programación

El software de programación es el lenguaje de programación e interfaz gráfica que permite realizar el diseño y desarrollo de la aplicación la cual se quiere monitorear y controlar. Actualmente esta programación está orientada a objetos, en el software de programación es necesario la importación de etiquetas con las cuales son nombradas las distintas variables que están siendo controladas por el PLC o PAC (Allen, 1995).

### **7.3.2.2. Ordenador central o MTU**

El MTU es el encargado de supervisar y recolectar la información de las distintas estaciones que componen el sistema. El MTU tiene como funciones el interrogar constantemente los ordenadores remotos y el envío de instrucciones, desplegar la interfaz del operador y de presentar la información de variables, alarmas e históricos en tiempo real (Esteban, 2014).

### **7.3.2.3. Ordenador Remoto o RTU**

El RTU son procesadores que son colocados en puntos estratégicos del SCADA y controlan procesos remotos. Recolectan las señales de los instrumentos de campo y controlan los elementos de salida, como válvulas, motores, variadores, entre otros. Los RTU se encuentran a un nivel intermedio de la automatización, los cuales pueden ser PC, armarios de control, controladores o HMI (Esteban, 2014).

### **7.3.2.4. Red de comunicación**

La red de comunicación es el medio que administra la información que es enviada por los instrumentos de campos, controladores, HMI o distintos equipos de automatización. Cada instrumento y controlador pueden tener un diferente protocolo de comunicación el cual puede variar por marca. Actualmente los diferentes fabricantes están buscando poder estandarizar esa comunicación que le permita a los usuarios una mejor conexión de su proceso (Gómez y Río, 2008).

### **7.3.2.5. Interfaz hombre máquina**

Una interfaz hombre máquina (HMI, *Human Machine Interface*) es un equipo eléctrico el cual nos permite establecer una interfaz entre las personas operadoras y la máquina. Inicialmente estos sistemas estaban formados por paneles con luces pilotos, indicadores digitales y análogos para monitoreo de los estados de un determinado equipo y con pulsadores, selectores y otros actuadores que permitían controlar los procesos.



## 8. PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

LISTA DE SÍMBOLOS

GLOSARIO

RESUMEN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

OBJETIVOS

HIPÓTESIS

RESUMEN DE MARCO METODOLÓGICO

INTRODUCCIÓN

### 1. MARCO TEÓRICO

- 1.1. Planta de tratamiento de agua
  - 1.1.1. Tratamiento preliminar
  - 1.1.2. Tratamiento primario
  - 1.1.3. Tratamiento secundario
  - 1.1.4. Tratamiento de lodos activados
  - 1.1.5. Oxígeno disuelto
  - 1.1.6. Tipos de aireación
    - 1.1.6.1. Aireadores mecánicos
    - 1.1.6.2. Difusores de aire
  - 1.1.7. Medición de oxígeno disuelto
- 1.2. Sistema de control
  - 1.2.1. Sistema de control de lazo abierto
  - 1.2.2. Sistema de control de lazo cerrado

- 1.2.3. Controladores
    - 1.2.3.1. Controladores lógicos programables
    - 1.2.3.2. Controladores de automatización programables
    - 1.2.3.3. Microcontroladores
  - 1.2.4. Variadores de velocidad.
    - 1.2.4.1. Ahorro en un variador de velocidad
  - 1.2.5. Sensores y transmisores de oxígeno disuelto
    - 1.2.5.1. Sensor amperométrico
    - 1.2.5.2. Sensor de oxígeno disuelto óptico
  - 1.3. Sistema y equipos de comunicación para monitoreo remoto
    - 1.3.1. Sistemas de supervisión, control y adquisición de datos (SCADA)
    - 1.3.2. Componentes de un SCADA
      - 1.3.2.1. Software de programación.
      - 1.3.2.2. Ordenador central o MTU (*Master Terminal Unit*)
      - 1.3.2.3. Ordenador Remoto o RTU (*Remote Terminal Unit*)
      - 1.3.2.4. Red de comunicación
      - 1.3.2.5. Interfaz hombre Máquina
2. ANÁLISIS DE LA LÍNEA BASE ANTES DE LA AUTOMATIZACIÓN
3. SISTEMA DE CONTROL
- 3.1. Listado de equipos del sistema de control
  - 3.2. Programación de sistema de control
4. SISTEMA DE MONITOREO

- 4.1. Listado de equipos del sistema de monitoreo
- 4.2. Programación del sistema de monitoreo
  
- 5. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL
  
- 6. RECOLECCIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS
  
- 7. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS
  
- 8. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS

APÉNDICES

ANEXOS



## 9. METODOLOGÍA

### 9.1. Tipo de estudio

El presente estudio es de tipo cuantitativo descriptivo. En este se hará una propuesta para el diseño de un sistema de control y monitoreo de oxígeno disuelto para el aumento de eficiencia en la aireación de una planta de tratamiento de lodos activados.

#### 9.1.1. Definición de variables

A continuación, en la tabla I, se presentan las definiciones de las variables de este estudio.

Tabla I. Definición de variables

Variable	Definición Conceptual	Definición operacional
Oxígeno Disuelto	Es la cantidad de oxígeno gaseoso que está disuelto en el agua.	Se utilizará un sensor amperométrico para realizar la medición de oxígeno disuelto en el tanque de aireación. El sensor generará una señal 4 - 20 mA que será proporcional a la medición de OD en (mg/L).
Potencia eléctrica	Es un parámetro que indica la cantidad de energía eléctrica transferida de una fuente generadora a un elemento consumidor por unidad de tiempo	Por medio del variador de velocidad se podrá utilizar los datos de funcionamiento y obtener la potencia que se está consumiendo en determinado momento. (kW)

Continuación tabla V.

Energía consumida	Corresponde a la energía que se consume durante un determinado tiempo. Se calcula multiplicando los kW que consume cada equipo eléctrico por el tiempo que están en funcionamiento.	Utilizando los datos de potencia consumida por el variador se logrará determinar la cantidad de energía consumida por los días que se realice la prueba. (kWh)
Costos fijos	El costo o coste es el gasto económico que representa la fabricación de un producto o la prestación de un servicio.	Se determinará el costo de los equipos que serán utilizados para el control y el monitoreo. (Quetzales)
Costo variables	Los costos variables son aquellos gastos que varían en proporción a la actividad de la empresa.	Se determinarán los costos variables y de mantenimiento que tengan el sistema de control y monitoreo. (Quetzales)
Retorno de inversión (ROI)	El retorno sobre la inversión es una razón financiera que compara el beneficio o la utilidad obtenida en relación con la inversión realizada	Mediante el cálculo de la energía ahorrada con el sistema de control se presentará un reporte de retorno de inversión el cual indique si el proyecto es viable. (Quetzales)

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

## 9.2. Fases de estudio

Para la metodología de la investigación se tienen distintas fases de estudio que permitirán desarrollar la investigación de una manera ordenada, clara, práctica y sobre todo entendible.

### **9.2.1. Fase 1: Exploración bibliográfica**

Se describirá de acuerdo con la teoría, la etapa de aireación en una planta de tratamiento de agua residual de lodos activados, sus procesos de beneficio y los residuos provenientes del mismo. Además, se determinará los rangos de oxígeno disuelto necesarios para que los microorganismos trabajen de una manera eficiente y que otras variables son necesarias para mejorar la eficiencia en la aireación.

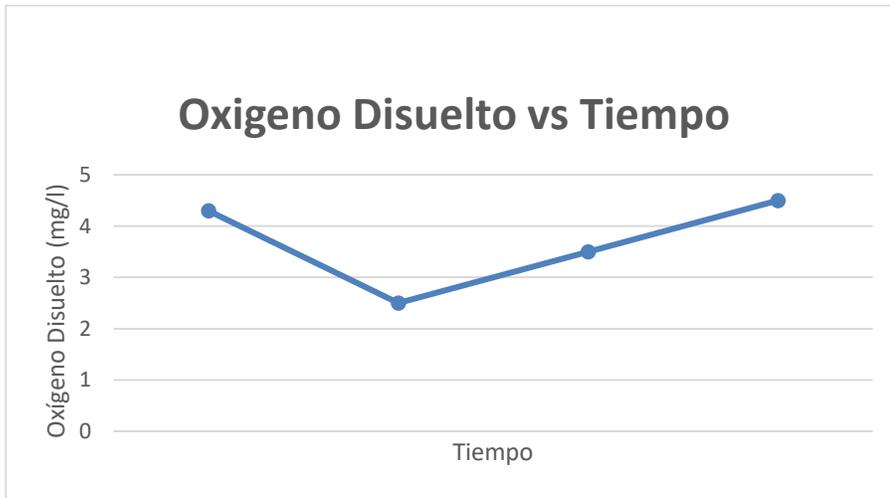
### **9.2.2. Fase 2: Análisis de la línea base antes de la automatización**

Para tener un punto de referencia y comparación se debe establecer el funcionamiento del tanque de lodos activados antes de la automatización y de la implementación del sistema de control.

En esta fase se realizará la medición en línea de los niveles de oxígeno disuelto que se encuentran en el tanque de aireación y la energía consumida por los sopladores. Utilizando un registrador de datos se guardarán las variables de oxígeno disuelto y potencia consumida por el compresor en una memoria cada 15 minutos por un lapso de 3 días.

Con la información recolectada se podrá construir una gráfica similar a la de la figura 15 y de la figura 16, la cual representará la línea base del reactor de lodos activados. Además, se podrá interpretar el comportamiento de los niveles de oxígeno disuelto y la potencia consumida antes de la implementación del sistema de control.

Figura 15. **Oxígeno disuelto vs. tiempo antes de la automatización**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 16. **Potencia consumida vs. tiempo antes de la automatización**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

### **9.2.3. Fase 3: Sistema de control**

Se dimensionan los equipos y arquitectura que conformara parte del sistema de control. Se debe considerar los sensores, controladores, actuadores y protecciones adecuadas.

#### **9.2.3.1. Listado de equipos del sistema de control**

Se establecerá el listado de equipos necesario para realizar el sistema de control. Dentro de los equipos más importantes se puede mencionar los siguiente:

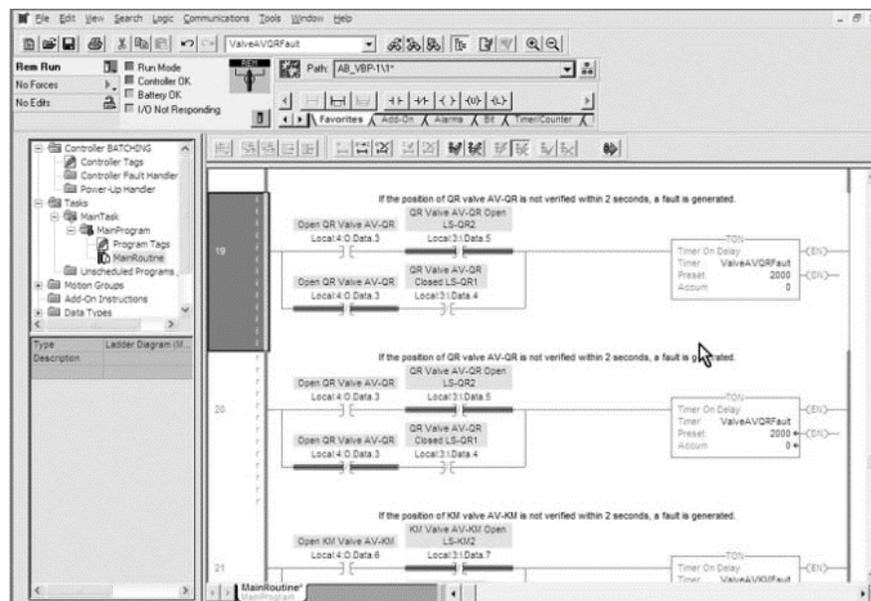
- Variador de velocidad: se debe establecer la potencia y equipos de protección del variador de velocidad. El variador controlará el compresor o soplador que se esté utilizando y con eso la cantidad de oxígeno que se estará inyectando al tanque de aireación.
- Controlador: se debe seleccionar el controlador lógico programable que más se adecue a esta aplicación. Dentro de la selección se debe tomar en cuenta la memoria y la cantidad de entradas y salidas análogas y digitales que serán necesarias para controlar la aireación de una manera eficiente.
- Sensor y transmisor: se seleccionará el sensor de oxígeno con el rango correcto el cual garantice que se podrá realizar una correcta medición del OD tomando en cuenta que el OD se debe mantener entre 2 – 3 mg/L. De igual forma se debe seleccionar un transmisor el cual convierta la señal del sensor a una señal eléctrica 4 - 20 mA que pueda ser procesada e interpretada por el PLC.

- Actuadores: dispositivos de control los cuales permitan maniobrar el sistema de forma manual por cualquier emergencia o problema con el modo automático del sistema de control.
- Software de programación: el software será el medio utilizado para la programación del sistema de control.

### **9.2.3.2. Programación del sistema de control**

Luego de la selección de los equipos que conformaran el sistema de control, se procederá a la programación del PLC, donde se propone un control proporcional integral y derivativo (PID) para el control de la aireación. Haciendo uso de la retroalimentación obtenida por la medición de oxígeno disuelto, el sistema debe ser capaz de hacer las correcciones en la frecuencia del variador y regular el caudal de oxígeno inyectado y así mantener el nivel de OD establecido y requerido para el proceso de oxidación de la materia orgánica. Para este proyecto se utilizará el *Software Studio 5000* de Allen Bradley el cual permitirá poder hacer la programación por distintos lenguajes los cuales pueden ser bloques, texto estructurado o escalera.

Figura 17. Programación en Studio 5000



Fuente: Allen (2004). *Drives Engineering Handbook*.

#### 9.2.4. Fase 4: Sistema de monitoreo

Para el sistema de monitoreo es necesario seleccionar los equipos con capacidades que permitan realizar un monitoreo remoto y que permita la configuración de alarmas para un mantenimiento preventivo y correctivo.

##### 9.2.4.1. Listado de equipos del sistema de monitoreo

Para el sistema de monitoreo se realizará un pequeño SCADA el cual permita poder visualizar en una pantalla táctil el comportamiento y funcionamiento de la aireación del tanque de lodos activados. Para el sistema de monitoreo se debe definir el listado de equipos que se utilizaran los cuales se deben tomar en cuenta los siguientes puntos.

- Una interfaz hombre máquina (HMI) con las dimensiones adecuadas en las cuales se puedan monitorear las variables y el control de la aireación de la planta de lodos activados.
- Un protocolo de comunicación el cual comunique los equipos de control y visualización, y sea el encargado de transmitir los datos para el monitoreo.
- Establecer las variables que se estarán monitoreando y visualizando en el sistema de control.
- Definir las alarmas que alertan por algún fallo o por el funcionamiento incorrecto de alguno de los equipos.

Figura 18. **Visualización HMI**



Fuente: Allen (2004). *Drives Engineering Handbook*.

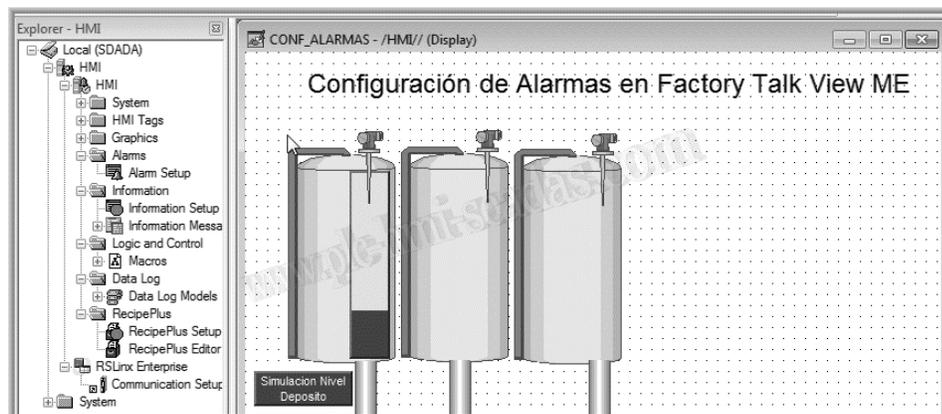
#### 9.2.4.2. Programación del sistema de monitoreo

Se utilizará el software *Factory Talkview* de Allen Bradley para la programación y desarrollo de la aplicación e interfaz de la pantalla que se utilizará para el control y monitoreo del proceso de aireación. En esta pantalla se podrán observar las distintas variables y alarmas del proceso.

Adicional la pantalla HMI seleccionada tiene una licencia que permite por medio de un software llamado *VantagePoint* tener acceso vía un servidor web para la visualización de la aplicación desde cualquier punto de red de la planta desde una computadora o dispositivo inteligente.

A continuación, en la figura 19 se puede observar cómo se construye un programa para visualización de un proceso en *Factory Talk View*.

Figura 19. Visualización *Factory Talk View*



Fuente: Allen (2004). *Drives Engineering Handbook*.

### **9.2.5. Fase 5: Implementación sistema de control**

Para la implementación del sistema de control y monitoreo se realizará el experimento en una planta que cuenta con una planta de aguas residuales de lodos activados. Se hará uso de un Demo el cual está conformado por un controlador, variador de velocidad, pantalla HMI y un sensor con su transmisor de OD.

Haciendo uso de la programación de los equipos ya mencionados y el software de programación en Studio 5000 se diseñará un sistema de control de lazo cerrado. El sensor de OD y transmisor estará sumergido en la pileta de aireación y emitirá una señal eléctrica de 4 - 20mA que es proporcional a la cantidad de oxígeno disuelto en el tanque.

En el sistema se establecerá un nivel de OD con lo cual se asegure que los microorganismos estarán haciendo el trabajo de oxidación eficientemente. El sensor de OD se utilizará como la retroalimentación del sistema y mediante un algoritmo PID se pretende que el compresor mantenga la inyección de aire adecuada.

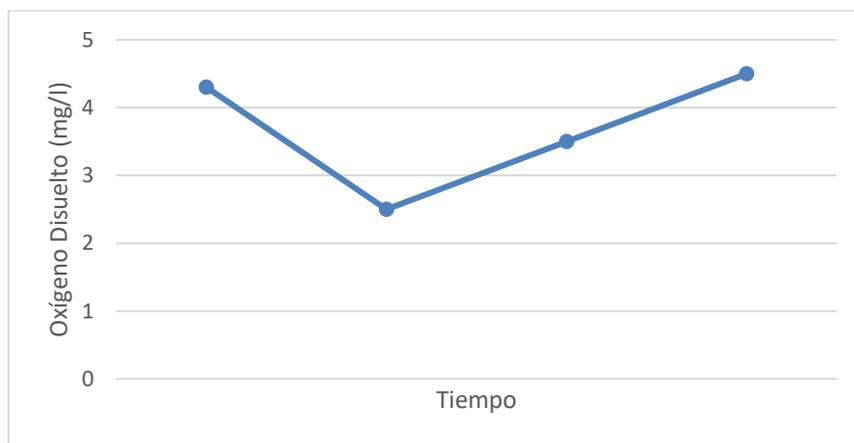
En este demo se realizará la programación del sistema de control y la visualización para el sistema remoto. Se deberán realizar varias pruebas para afinar el control PID y conseguir la mayor eficiencia en la aireación del sistema.

### **9.2.6. Fase 6: Recolección y análisis de datos**

La implementación del sistema de control y monitoreo estará trabajando por unos días. En los días de prueba se estará haciendo mediciones nuevamente de los niveles de OD y la potencia consumida por la aireación.

Con la información recolectada se podrá construir nuevamente una gráfica similar a la de la figura 18 y de la figura 19 en la cual se determine el comportamiento del oxígeno Disuelto y la potencia después de la implementación del sistema de control.

Figura 20. **Oxígeno disuelto vs. tiempo después de la automatización**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 21. **Potencia consumida vs. tiempo después de la automatización**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Con las gráficas antes y después de la automatización se hará una comparación. Esta comparación permitirá obtener los ahorros energéticos obtenidos y con esto poder calcular un retorno de inversión del proyecto.

$$\text{Ahorro de energía} = \text{Promedio sin SC} - \text{Promedio con SC} \quad (\text{Ec. 2})$$

Finalmente se harán recomendaciones de los potenciales ahorros de costos en mantenimiento y operaciones adicionales que se pueden obtener con la implementación del sistema de control y monitoreo remoto.

#### **9.2.7. Fase 7: Presentación y discusión de resultados**

Con la información obtenida en todo el proceso metodológico se presentarán los ahorros energéticos, así como una discusión de los resultados obtenidos y los aspectos técnicos y financieros que influyen en la automatización de una planta de lodos activados.

## 10. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

En el trabajo de investigación se estará proponiendo un diseño de la automatización del control y monitoreo de oxígeno disuelto para una planta de tratamiento de lodos activados. Se diseñará un sistema de control de lazo cerrado con un sensor de oxígeno disuelto como retroalimentación, en donde se busca la máxima eficiencia en la aireación de una planta de lodos activados.

Se debe asegurar que los niveles de oxígeno disuelto sean los ideales para que los microorganismos puedan realizar su trabajo de oxidación de la carga orgánica y que se esté utilizando la menor cantidad de energía.

De igual forma se estará realizando un estudio financiero donde se analizará el retorno de inversión del proyecto donde se incluya el retorno de los gastos fijos y variables del proyecto, para finalmente concluir si es viable la implementación del proyecto.

- Herramientas de recolección de datos
  - Gráfica de los niveles de oxígeno disuelto antes de la automatización.
  - Gráfica de la potencia consumida antes de la automatización.
  - Energía consumida antes de la automatización.

- Gráfica de los niveles de oxígeno disuelto después de la automatización.
- Gráfica de la potencia consumida después de la automatización.
- Energía consumida después de la automatización.
- Tabla de los costos de equipos para el sistema de control y monitoreo.
- Tabla de los costos variables y de mantenimiento del sistema de control y monitoreo.
- Herramientas estadísticas
  - Comparación de los niveles de oxígeno disueltos antes y después de la implementación de la automatización.
  - Comparación de la potencia consumida antes y después de la implementación de la automatización.
  - Análisis del porcentaje de energía ahorrada por la automatización del control y monitoreo de oxígeno disuelto.
  - Análisis y reporte del retorno de inversión del proyecto.

## 11. CRONOGRAMA

A continuación, en la tabla se muestra el cronograma propuesto para el diseño de automatización del control y monitoreo propuesto.

Tabla II. **Cronograma**

Actividad	2021																									
	Enero			Febrero				Marzo					Abril				Mayo			Junio						
Fase 1: Exploración bibliográfica	■	■	■	■																						
Fase 2: Análisis de la línea base antes de la Automatización.				■	■	■	■																			
Fase 3: Sistema de control							■	■	■	■	■	■	■	■	■	■										
Fase 4: Sistema de monitoreo										■	■	■	■	■	■	■	■	■								
Fase 5: Implementación sistema de control																		■	■	■	■					
Fase 6: Recolección y análisis de Datos																						■	■	■		
Fase 7: Presentación de resultados																								■	■	

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.



## 12. FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO

La presente investigación se realizará con recursos de una empresa de automatización donde se cuentan con los equipos de control y monitoreo y con los recursos del estudiante de energía y ambiente.

También se contará con una empresa la cual cuenta con una planta de tratamiento de lodos activados donde se utilizará el compresor para automatizar el proceso de aireación.

Tabla III. Recursos para el desarrollo de la investigación

<b>Recurso</b>	<b>Costo</b>
Controlador Micro 850 <i>Logix</i> Allen Bradley	Q. 0.00
Pantalla <i>Component</i> 800 Allen Bradley	Q. 0.00
Variador de velocidad Allen Bradley	Q. 0.00
Sensor de oxígeno disuelto	Q. 0.00
Transmisor 4-20 mA	Q. 0.00
Software de programación CCW	Q. 0.00
Computadora, consumibles.	Q. 3,000.00
Asesor	Q. 2,500.00
<b>TOTAL</b>	<b>Q. 5,500.00</b>

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tomando en cuenta los equipos y recursos para desarrollar el proyecto se considera factible la realización del proyecto.



### 13. REFERENCIAS

1. Allen, B. (1995). *Descripción y aplicación de los microcontroladores programables*. Estados Unidos: MicroMentor.
2. Allen, B. (2004). *Drives Engineering Handbook*. Estados Unidos: MicroMentor.
3. Arvizu, J. (1996). *Tratamiento anaerobio-aerobio de las aguas residuales de las instalaciones del IIE*. México: IIE.
4. Ayala, R. y Gonzales, G. (2008). *Apoyo didáctico en la enseñanza - Aprendizaje de la asignatura de plantas de tratamientos de aguas residuales* (Tesis de licenciatura). Universidad Mayor de San Simón, Bolivia.
5. Corrales, L. (diciembre, 2007). Interfaces de Comunicación Industrial. *Dpto. de Automatización y Control Industrial, 1*, 38-88.
6. Du, Z., Wang, J., y Jegatheesan, V. (febrero, 2018). Dissolved Oxygen Control in Activated Sludge Process Using a Neural Network-Based Adaptive PID Algorithm. *Appl. Sci*, 8(261), 1-21.
7. Endress, A. y Hauser. B. (2019). *Digital optical sensor based on the principle of fluorescence quenching*. Suiza: Autor.

8. Endress, A. y Hauser. B. (2019). *Digital sensor for measuring dissolved oxygen*. Suiza: Autor.
9. Endress, A. y Hauser. B. (s.f.). Sensor digital para la medición de oxígeno. [Mensaje de blog]. Recuperado de <https://www.lasc.endress.com/es/instrumentacion-campo/analisis-agua-liquidos-industria/sensor-oxigeno-tratamiento-aguas>.
10. Environmental Protection Agency. (1997). *Wastewater Treatment Manuals*. Irlanda: Autor.
11. Esteban, P. (diciembre, 2014). Los sistemas SCADA en la automatización industrial. *Tecnología en Marcha*, 28(4), 3-14.
12. Farias, B. (19 de septiembre, 2016). Conocimientos básicos sobre Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (Módulo II). [Mensaje de blog]. Recuperado de <https://www.iagua.es/blogs/bettys-farias-marquez/conocimientos-basicos-plantas-tratamiento-aguas-residuales-modulo-ii>.
13. Gómez, R. y Río, G. (2008). *Temas especiales de instrumentación y control*. Cuba: Felix Varela.
14. Grupo Falmet (s.f.). *Equipos y sistemas de aireación*. Estados Unidos: Autor.
15. Ivailova, I., Solís, J., Bes-Pia, A. y Aguado, D. (julio, 2020). Evaluación del coeficiente de transferencia de oxígeno en procesos de fangos

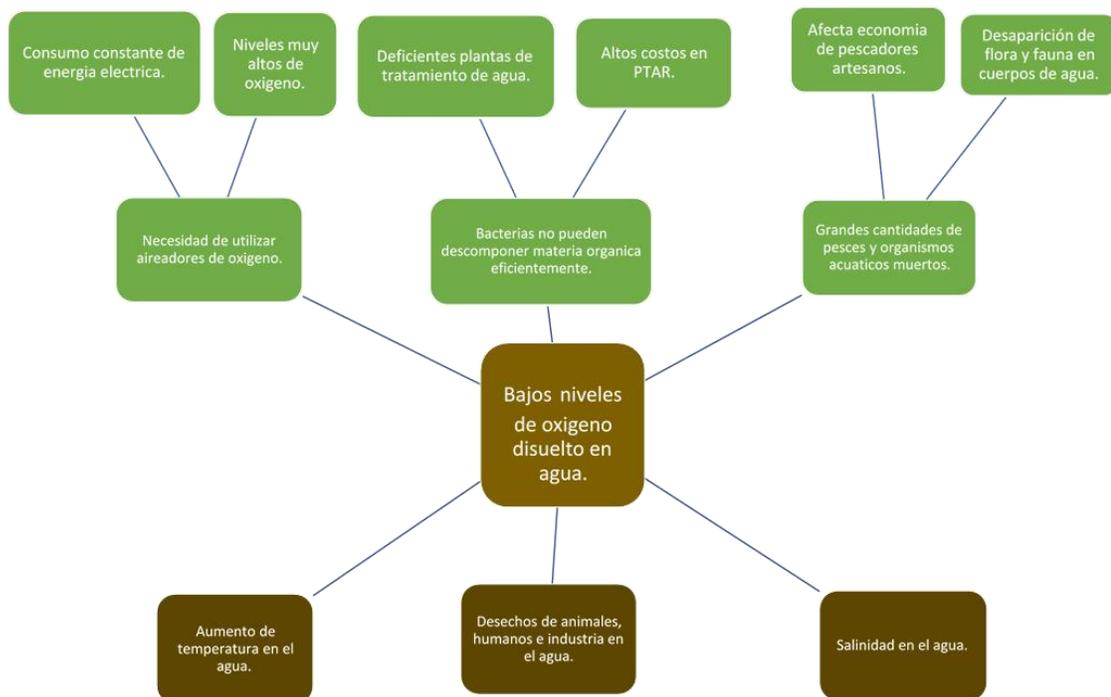
activados para optimizar la aireación. *Editorial Universitat Politècnica de València, 24(3), 183-202.*

16. M Landy Brush Aereators (s.f.). *Wastewater - Aeration Systems*. Estados Unidos: Autor.
17. Manzano, J., Poch, M., Arespachaga, N., Rodríguez, P., Rouge, P., Hurtado, I. y Aguilera, Y. (marzo, 2017). Sistema de control de aireación mediante lógica difusa (Fuzzy) para pequeñas EDAR. *XXXIV Jornadas Técnicas de AEAS, 25, 54-59.*
18. Monroy, K. (2010). *Evaluación de la eficiencia de las técnicas aeróbicas (burbuja fina, burbuja gruesa y aireador venturi jet) a utilizar en el tratamiento de agua residual domiciliar para el sistema de lodos activados en modalidad de aireación extendida (Tesis de licenciatura)*. Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
19. Ogata, K. (s.f.). *Ingeniería de Control Moderna. Tercera edición.* . Minnesota, Estados Unidos: Editorial Prentice Hall.
20. Peña, C. (2012). *Control de oxígeno disuelto en un tanque de aireación de una planta piloto de lodos activados (Tesis de maestría)*. Pontificia Universidad Javeriana, Colombia.
21. Perez, M., Perez, A. y Perez, E. (2007). *Introducción a los sistemas de control y modelo matemático para sistemas lineales invariantes en el tiempo*. Argentina: Universidad Nacional de San Juan.

22. Picuino, A. (17 de enero, 2020). Recursos para Tecnología. [Mensaje de blog]. Recuperado de <https://www.picuino.com/es/arduprog/control-auto.html>.
23. Rehg, J., y Sartori, G. (2014). *Programmable Logic Controllers*. Pennsylvania, Estados Unidos: Pearson.
24. Ruano, M., Robles, A., Jiménez, E., Casao, M., Ribes, J., Serralta, J., Seco, A. y Ferre, J. (junio, 2017) Optimización de EDAR mediante sistemas de control basados en sensores de pH, REDOX y oxígeno. *Revista Técnica de Medio Ambiente*, 200, 8-14.
25. Sawyer, C., McCarty, P. y Parkin, G. (2000). *Química para ingeniería ambiental*. Bogotá, Colombia: McGraw-Hill.
26. Zach, A. (26 de julio, 2017). What's the Difference Between a PLC and PAC? [Mensaje de blog]. Recuperado de <https://www.machinedesign.com/mechanical-motion-systems/article/21835777/whats-the-difference-between-a-plc-and-pac>.

## 14. APÉNDICES

### Apéndice 1. Árbol del problema



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

## Apéndice 2. Matriz de coherencia

PROBLEMA	OBJETIVOS	VARIABLES	METODOLOGÍA	PLAN DE ACCIÓN
<p><b>Pregunta principal:</b></p> <p>¿Cuál será el mejor diseño de un sistema de control y monitoreo de oxígeno disuelto que permita el aumento de eficiencia en la aireación de un reactor de lodos activados?</p>	<p><b>Objetivo general:</b></p> <p>Diseñar un sistema de control y monitoreo de oxígeno disuelto para el aumento de eficiencia en la aireación de un reactor de lodos activados.</p>	<p>Diseño de sistema de control y monitoreo.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Se debe realizar el diseño de sistema de control y monitoreo de oxígeno disuelto, establecer el listado de componentes y softwares de programación. Implementar el sistema y realizar mediciones del ahorro energético obtenido luego de la implementación.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>(15 días) Se realizará una prueba donde se compara por una semana el consumo de energía que tiene el tanque de lodos activados antes de la implementación del sistema de control y el consumo luego de la implementación del sistema.</li> </ul>
<p><b>Preguntas auxiliares:</b></p> <p>1. ¿Cómo funciona un reactor de lodos activados?</p>	<p><b>Objetivos específicos:</b></p> <p>1. Investigar y comprender el funcionamiento de un reactor de lodos activados en una planta de aguas residuales.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Tipos de tanques de aireación de lodos activados.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Exploración bibliográfica.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>(2 días) Realizar investigación de cómo funcionan los reactores de lodos activados y las variables que están involucradas en su proceso.</li> </ul>
<p>2. ¿Cuáles son los componentes necesarios para un sistema de control de oxígeno disuelto que permita la máxima eficiencia en la aireación?</p>	<p>2. Determinar listado de los componentes necesarios para un sistema de control de oxígeno disuelto para aumento de eficiencia.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Listado de componentes y equipos del sistema de control.</li> <li>Software de programación de controlador.</li> <li>Potencia de soplador (kW).</li> <li>Oxígeno Disuelto mg/l (ppm)</li> <li>Presión (psi).</li> <li>Corriente (A).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Establecer potencia del variador de velocidad que será utilizado.</li> <li>Determinar el Controlador Lógico Programable (PLC) o Controlador de Automatización Programable (PAC) más adecuado para la aplicación.</li> <li>Dimensionar el sensor de oxígeno disuelto y transmisor correcto.</li> <li>Definir el mecanismo de control y las variables que lo controlarán.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>(1 día) Establecer las variables que deberán ser controladas en el sistema de control.</li> <li>(2 días) Definir el listado de componentes que serán utilizados para el sistema de control.</li> <li>(1 día) Definir el listado de accesorios y protecciones para eléctricas para proteger los equipos.</li> </ul>
<p>3. ¿Cuál es la interfaz hombre maquina y el sistema de comunicación más adecuado para el monitoreo de oxígeno disuelto y eficiencia de reactor de lodos activados?</p>	<p>3. Definir la comunicación e interfaz de visualización para el monitoreo del sistema de control.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Protocolo de comunicación.</li> <li>Medio de comunicación.</li> <li>Componente de visualización.</li> <li>Software de visualización.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Determinar el protocolo de comunicación que será utilizado para transmitir los datos.</li> <li>Definir el listado de equipos y software necesarios para la visualización de datos.</li> <li>Establecer cuáles son los datos y alarmas necesarias que se deben monitorear.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>(1 día) se debe seleccionar le protocolo de comunicación y el medio por el cual se van a transmitir los datos.</li> <li>(1 día) establecer los equipos donde se visualizarán los datos.</li> <li>(2 días) se realizará un listado de las variables y alarmas que se deben monitorear para aprovechar la máxima eficiencia el sistema.</li> </ul>

## Continuación apéndice 2.

---

4. ¿En qué porcentaje aumentará la eficiencia de la aireación y cuánto será el ahorro energético luego de la implementación del sistema de control y monitoreo de oxígeno disuelto?	4. Calcular el aumento de eficiencia y ahorro energético obtenido luego de la implementación del sistema de control.	<ul style="list-style-type: none"><li>• Alarmas de encendido y apagado.</li><li>• Horas de uso del equipo.</li><li>• Eficiencia (%).</li><li>• Energía consumida. kW/h</li><li>• Oxígeno disuelto mg/l (ppm).</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Calcular cual fue el ahorro energético luego de la implementación del sistema de control.</li><li>• Comparar la eficiencia del sistema antes y después del sistema de control.</li><li>• Analizar si existen ahorros de costos de mantenimiento y operación relacionados.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• (3 días) Se tomarán mediciones de la energía consumida y eficiencia base del sistema.</li><li>• (5 días) Se hará la implementación del sistema de control y monitoreo en el tanque de lodos activados.</li><li>• (3 días) se tomarán mediciones y datos nuevamente con el sistema de control funcionado.</li><li>• (2 días) se analizará y comparará los datos de las mediciones antes y después del sistema de control para poder calcular ahorros obtenidos.</li></ul>
---	--	---	---	--

---

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

