



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

**IMPLEMENTACIÓN ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA PARA UNA
PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA, DE UNA EMPRESA
GALVANIZADORA DE LÁMINA.**

Juan Carlos Barrientos García

Asesorado por el Ing. Byron Odilio Arrivillaga Méndez.

Guatemala, agosto de 2009

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**IMPLEMENTACIÓN ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA PARA UNA
PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA, DE UNA EMPRESA
GALVANIZADORA DE LÁMINA.**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

JUAN CARLOS BARRIENTOS GARCÍA

ASESORADO POR INGENIERO BYRON ODILIO ARRIVILLAGA MÉNDEZ.

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO ELECTRÓNICO

GUATEMALA, AGOSTO DE 2009

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA**



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Inga. Glenda Patricia García Soria
VOCAL II	Inga. Alba Maritza Guerrero de López
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. José Milton De León Bran
VOCAL V	Br. Isaac Sultan Mejía
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Romeo Neftalí López Orozco
EXAMINADOR	Ing. José Anibal Silva de los Angeles
EXAMINADOR	Ing. Byron Odilio Arrivillaga Méndez
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

IMPLEMENTACIÓN ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA PARA UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA, DE UNA EMPRESA GALVANIZADORA DE LÁMINA,

tema que me fuera asignando por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha 09 de noviembre de 2007.



Juan Carlos Barrientos García.

Guatemala, 27 de Mayo de 2009.

Ingeniero
Julio César Solares Peñate
Coordinador Área de Electrónica
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

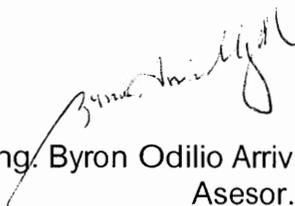
Ingeniero Solares:

Por este medio me dirijo a usted, para informarle, que he asesorado el trabajo de graduación titulado: **Implementación Eléctrica y Electrónica para una planta de tratamiento de agua de una empresa galvanizadora de lámina**, realizada por el estudiante universitario Juan Carlos Barrientos Garcia, con carné 1997-20419, como requisito para optar al título de Ingeniero Electrónico.

Luego de revisar el contenido, encuentro el trabajo satisfactorio y en mi opinión llena los requisitos para su aceptación, por lo que, el autor de este trabajo de graduación y yo como asesor nos hacemos responsables del contenido y conclusiones del mismo.

Agradecería que revise, el trabajo a fin de dar el visto bueno para que el estudiante Barrientos Garcia, pueda someterse al examen respectivo.

Muy atentamente,



Ing. Byron Odilio Arrivillaga Méndez.
Asesor.



FACULTAD DE INGENIERIA

Escuelas de Ingeniería Civil, Ingeniería
Mecánica Industrial, Ingeniería Química,
Ingeniería Mecánica Eléctrica, Técnica
y Regional de Post-grado de Ingeniería
Sanitaria.

Ciudad Universitaria, zona 12
Guatemala, Centroamérica

Guatemala, 7 de julio de 2009

Señor Director
Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

Por este medio me permito dar aprobación al Trabajo de Graduación titulado: **“IMPLEMENTACIÓN ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA PARA UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA DE UNA EMPRESA GALVANIZADORA DE LÁMINA”**, desarrollado por el estudiante **Juan Carlos Barrientos García**, ya que considero que cumple con los requisitos establecidos.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarlo.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS

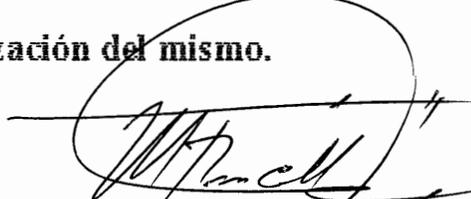

Ing. Julio César Solares Peñate
Coordinador de Electrónica





REF. EIME 41. 2009.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante; Juan Carlos Barrientos García titulado: "IMPLEMENTACIÓN ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA PARA UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA DE UNA EMPRESA GALVANIZADORA DE LÁMINA", procede a la autorización del mismo.



Ing. Mario Renato Escobedo Martínez

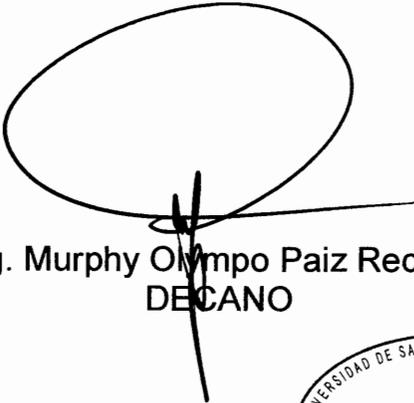
GUATEMALA, 22 DE JULIO 2,009.





El Decano 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: **IMPLEMENTACIÓN ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA PARA UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA, DE UNA EMPRESA GALVANIZADORA DE LÁMINA**, presentado por el estudiante universitario **Juan Carlos Barrientos García**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.


Ing. Murphy Olimpo Paiz Recinos
DECANO

Guatemala, agosto de 2009



/gdech

AGRADECIMIENTO A:

Jehová	Creador de las leyes que estudiamos y de la sabiduría que nos permite comprenderlas y utilizarlas. Por la vida.
Mis padres	Angel Barrientos y Eva de Barrientos. Por su amor, cuidados, desvelos, lágrimas, ejemplo y educación.
Mis hermanos	Eduardo, Verónica, David, Miguel y Fredy. Por su cariño y apoyo.
Mis sobrinos	Luis y Daniel. Por que este éxito los inspire.
la USAC	La tricentenaria, especialmente a la Facultad de Ingeniería. Por permitirme ser parte de su historia.
Mis catedráticos	Por su tiempo, enseñanzas y consejos.
Mi asesor	Ing. Byron Arrivillaga, por su interés y su guía para la elaboración del presente Trabajo de Graduación.
Mis compañeros	Por su amistad. Por sus explicaciones antes del examen y su apoyo después del examen.
Mi novia	Heidi Lorenzana. Por su amor y comprensión en todo momento.
Mis amigos	Por que nunca dejaron de alentarme y aconsejarme.
Guatemala	Porque con su fuerza productiva hace posible nuestra superación.
Mis hijos	Para que cuando lleguen, lo hagan mas alto que yo.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN	XV
OBJETIVOS	XVII
INTRODUCCIÓN	XIX
1. PROCESO DE GALVANIZADO	1
1.1. Métodos de aplicación	1
1.1.1. Rociado del metal	2
1.1.2. Enchapado	2
1.1.3. Difusión	3
1.1.4. Pintura rica en zinc	3
1.1.5. Galvanización por inmersión en caliente	4
1.2. Proceso de Galvanización por inmersión en caliente	4
1.2.1. Limpieza alcalina de la superficie	5
1.2.2. Decapado de la superficie	5
1.2.3. Inmersión en baño zinc	5
1.2.4. Enfriamiento de la superficie	6
2. TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES	7
2.1. Tratamientos físicos	7
2.2. Tratamientos químicos	8
2.3. Tratamientos biológicos	8
2.4. Tratamientos a utilizar en planta de tratamiento de agua	9
2.4.1. Decantación	9
2.4.2. Coagulación	10
2.4.3. Floculación	12
2.4.4. Neutralización	13

3.	LEGISLACIÓN GUATEMALTECA PARA TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES	15
3.1.	Antecedentes	15
3.2.	Legislación vigente	19
4.	PROPUESTA PARA TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES	25
4.1.	Diagrama general	25
4.2.	Diagrama de flujo	26
5.	IMPLEMENTACIÓN ELÉCTRICA	27
5.1.	Bombas de agua	27
5.1.1.	Bomba centrífuga	28
5.1.2.	Bomba de diafragma	32
5.2.	Válvulas solenoides hidráulicas	36
5.3.	Mezcladores	41
5.3.1.	Hélices de entrada superior	46
5.3.2.	Turbinas	47
5.3.3.	Hélices de entrada lateral	47
5.3.4.	Mezcladores a propulsión	48
5.4.	Selección equipo eléctrico	48
5.4.1.	Selección de las bombas de agua	48
5.4.2.	Selección de las válvulas solenoides hidráulicas	49
5.4.3.	Selección de los mezcladores	50
6.	IMPLEMENTACIÓN ELECTRÓNICA	51
6.1.	Sensores de nivel	51
6.1.1.	Indicador de cristal	51
6.1.2.	Flotador de bola	52
6.1.3.	Sensor de conductividad	53
6.1.4.	Diferencial de presión o sensor hidrostático	54
6.1.5.	Sensor ultrasónico	55
6.1.6.	Sensor RF capacitivo	57
6.1.7.	Sensor magnetoestrictivo	58
6.1.8.	Sensor radar de guía de onda	60

6.1.9.	Sensor de onda continua FM	61
6.1.10.	Consideraciones en la selección de sensor de nivel	62
6.2.	Sensores de temperatura	63
6.2.1.	Termómetro bimetalico	63
6.2.2.	Termómetro resistivo	66
6.2.3.	Termistores	68
6.2.4.	Termopar	70
6.2.5.	Pirómetro	72
6.2.6.	Consideraciones en la selección	74
6.3.	Medidores de pH	75
6.3.1.	Definición de pH	75
6.3.2.	Métodos electroquímicos de medición de pH	76
6.3.3.	Métodos ópticos de medición de pH	79
6.4.	Controlador lógico programable (PLC)	81
6.4.1.	Principios de operación del PLC	82
6.4.2.	Estructura interna del PLC	83
6.4.3.	Lenguajes de programación para PLC	88
6.5.	Selección equipo electrónico	90
6.5.1.	Selección de sensores de nivel	90
6.5.2.	Selección de sensores de temperatura	91
6.5.3.	Selección de medidores de pH	91
6.5.4.	Selección de PLC	92
7.	IMPLEMENTACIÓN FINAL	95
7.1.	Circuitos y diagramas	95
7.2.	Programa PLC	104
	CONCLUSIONES	111
	RECOMENDACIONES	113
	BIBLIOGRAFÍA	115
	APÉNDICE	119

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1	Diagrama de bloques para el sistema de tratamiento de aguas residuales	26
2	Elementos de una bomba centrífuga	28
3	Impulsor abierto	30
4	Impulsor cerrado	30
5	Impulsor semiabierto	30
6	Tipos de impulsores	31
7	Bomba con diafragma de disco de accionamiento hidráulico	34
8	Bomba con diafragma tubular sencillo	35
9	Válvula solenoide	37
10	Válvula hidráulica accionada por un solenoide	39
11	Válvula hidráulica accionada por dos solenoides	39
12	Válvula hidráulica accionada por dos solenoides auto centrada	39
13	Impulsor de flujo axial tipo turbina marina y tipo turbina con hojas inclinadas	42
14	Impulsor de flujo radial tipo turbina hojas curvas y hojas planas	43
15	Patrón de flujo axial con turbina de hojas inclinadas y de flujo radial con turbina de hojas planas	43
16	Flotador de bola	52
17	Sistema para sensores de conductividad	53
18	Sensor hidrostático	54
19	Operación del sensor ultrasónico	56
20	Sensor ultrasónico	56
21	Operación del sensor RF capacitivo	58

22	Detalle de flote del sensor magnetoestrictivo	59
23	Sensor magnetoestrictivo	60
24	Sensor de temperatura bimetálico	65
25	Sensor de temperatura resistivo	68
26	Medidor de pH por membrana de vidrio	78
27	Medidor de pH ISFET, incluye circuito amplificador	79
28	Arquitectura del PLC	84
29	Ejemplos de programación en distintos lenguajes para PLC	89
30	Ejemplo de programación en lenguaje SFC para PLC	90
31	Circuito de control para bombas de agua y válvulas	96
32	Circuito de control del nivel	97
33	Ubicación general de bombas y válvulas	98
34	Circuito de control del nivel completo con entradas al PLC	99
35	RTD sumergible de 100 ohms de platino y transmisor	100
36	Sensor de pH diferencial plano y preamplificador	101
37	Conexiones a la salida del preamplificador	102
38	PLC Logo Siemens básico 24V y sus partes	103
39	Conexiones Logo Siemens	103
40	Relé de estado sólido, modelo RSCDN-45A	104
41	Programa de control para Planta de Tratamiento de agua	109

TABLAS

I	Límites máximos de metales pesados y otros, permisibles en aguas residuales	18
II	Límites máximos permisibles de descargas de aguas residuales a cuerpos receptores	22
III	Características de los termopares según clasificación ANSI	71
IV	Tabla de verdad para circuito combinacional de control de nivel	97
V	Tabla de estados de niveles para activar bombas y válvulas	98
VI	Tabla de valores de resistencia del RTD contra temperatura	100

VII	Tabla de valores de mV a la salida del sensor contra pH	102
VIII	Tabla de entradas declaradas en programa PLC	106
IX	Tabla de salidas declaradas en programa PLC	107
X	Presupuesto de equipo eléctrico y electrónico sugerido	107
XI	Descripción de equipo eléctrico y electrónico cotizado	108

LISTA DE SÍMBOLOS

°C	Grados centígrados
hp	Caballos de potencia
ID	Corriente de drenaje
Khz	Kilohertz
kW	Kilowatts
m ³	Metros cúbicos
mA	Miliamperio
mg/l	Miligramos por litro
mph	Millas por hora
mV	Milivoltios
nm	Nanómetros
pH	Potencial de hidrógeno
rpm	Revoluciones por minuto
UC	Unidades de color
µm	Micrómetros

GLOSARIO

Absorbancia	Medida de la atenuación de una radiación al atravesar una sustancia.
Agua residual	Agua a la cual se le ha incorporado algún material de desecho.
Álabe	Paleta curva que se encuentra en el rodete y se encarga de transmitir la energía al fluido.
Bomba centrífuga	Máquina que transforma la energía mecánica de un impulsor en energía cinética y potencial requerida.
Bomba de diafragma	Mecanismo de impulsión, permite que el líquido obtenga energía cinética y la transforme en energía de presión para así aumentar la velocidad de flujo.
Coagulación	Agrupación de partículas, con la adición de químicos llamados coagulantes, con el propósito de formar partículas de mayor tamaño, y que sedimenten por la acción de la gravedad.
Coagulante	Producto químico, electrolítico, que se añade al agua para ayudar a la coagulación de las partículas coloidales.
Coloide	Partículas muy finas que presentan una gran estabilidad en el agua, debido a tener cargas superficiales del mismo signo, que impide que se aglomeren para sedimentar.

Constatán	Aleación generalmente formada por un 55% de cobre y un 45% de níquel.
Cribado	Separación por retención de sólidos de gran volumen.
Decantación	Separación de mezclas basada en la diferencia de densidad, de modo que las partículas más pesadas que el agua, sean separadas por la acción de la gravedad.
Decapado	Remoción de sedimentos de la superficie metálica, por medio de soluciones ácidas.
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)	Medida de la cantidad de oxígeno que es requerido por los microorganismos en la oxidación bioquímica de la materia orgánica. Es una medida indirecta del contenido de materia orgánica en el agua residual.
Demanda química de oxígeno (DQO)	Medida de la cantidad de oxígeno utilizado en la oxidación de la materia orgánica e inorgánica oxidable. Es una medida indirecta del contenido de materia orgánica e inorgánica oxidable en el agua residual.
Difusión	Absorción gradual de el soluto entre el solvente, mediante ponerlos en contacto.
Dilaceración	Fragmentación mecánica de los sólidos en suspensión de gran tamaño, con el fin de reducirlos de tamaño.
Floculación	Agrupación de partículas, con el propósito de formar partículas más grandes que luego sedimentan. Esta unión es favorecida con la adición de químicos y con agitación mecánica.

Floculación ortocinética	Floculación que se produce por el movimiento del fluido al agitar la mezcla, esto induce un movimiento en las partículas. También llamada convección forzada.
Floculación pericinéctica	Floculación debida al propio movimiento de las partículas o difusión browniana, por lo que es muy lenta. También llamada convección natural.
Flóculo	Grumo que aparece en una floculación.
Galvanizado	Proceso de recubrimiento de un metal con una fina capa protectora de zinc.
Homogeneización	Neutralización mediante la mezcla de corrientes de agua residuales, ácidas y alcalinas.
Luminiscencia	Propiedad de despedir luz sin elevación de temperatura y visible solo en la oscuridad.
Magnetostricción	Propiedad de los materiales magnéticos, que hace que cambien de forma al encontrarse en presencia de un campo magnético.
Movimiento Browniano	Movimiento aleatorio que se observa en algunas partículas nanoscópicas que se hallan en un medio fluido.
Neutralización	Método utilizado para obtener un pH medio, desde un agua residual con alto o bajo pH.
pH	Potencial de hidrógeno. Concentración de hidrógenos presentes en determinada sustancia. Intensidad de la condición alcalina o ácida de un líquido.

PLC	Siglas en inglés para Programable Logic Controller o Controlador Lógico Programable. Dispositivo electrónico que permite implementar funciones de control para automatizar procesos.
Rodete	Rotor situado dentro de una bomba centrífuga encargado de impulsar el fluido. También llamado impulsor o hélice.
Troncocónico	En forma de cono truncado.
Unidad de turbidez nefelométrica (UTN)	Unidad de medición de la turbidez del agua.
Voluta	Cámara o carcasa en forma de espiral de una bomba centrífuga dentro de la cual gira el rodete y que recoge el fluido propulsado radialmente por éste, dirigiéndolo hacia la salida.

RESUMEN

El agua, es sin duda uno de los recursos más importante para la conservación de la vida. Por lo cual es necesario realizar esfuerzos para su tratamiento y evitar el impacto que tienen las aguas residuales sobre los cuerpos de agua. El Estado de Guatemala, mediante el Congreso, ha creado varias leyes, cuyo espíritu es el de preservar la calidad del agua en el país. El marco legal presente, establece los máximos permisibles de una serie de contaminantes, para las aguas residuales, tanto para su reuso como para la descarga de las mismas, por los distintos métodos. Las industrias, para cumplir con la nueva legislación, deben incluir el tratamiento de las aguas residuales, dentro de sus procesos industriales.

Por su naturaleza, el agua residual proveniente del proceso de galvanizado, tiene un pH elevado, fuera de los límites actuales estipulados por la ley en vigencia. Para reducir los contaminantes del agua, se emplean los procesos de neutralización, coagulación y floculación, con el fin de eliminar los metales presentes y obtener un pH con un valor medio, lo que permite, ya sea su reutilización dentro de la misma empresa o para la descarga por los métodos actuales.

Mediante la neutralización se cambia el pH del agua, al verter ácido que, mediante romper lo enlaces iónicos del agua residual, se neutraliza el pH. La coagulación permite, mediante químicos, formar partículas más pesadas que sedimentan, mientras que en la floculación es necesaria, además de los químicos, una agitación mecánica.

Para establecer la mejor solución para el problema del tratamiento de agua, se analizaron dispositivos eléctricos tales como bombas de agua, válvulas solenoides hidráulicas y mezcladores. También se investigó dispositivos electrónicos como los sensores de nivel y de temperatura, medidores de pH y los controladores lógicos programables. Mediante la investigación bibliográfica de cada dispositivo, se realizó la selección más adecuada, que además se razonó técnicamente. Por último se expone como se interrelacionan los dispositivos seleccionados y se presenta una solución para el problema de las aguas residuales en la galvanizadora de lámina, por medio de un programa que automatiza el proceso, utilizando los dispositivos eléctricos y electrónicos seleccionados.

OBJETIVOS

General

Establecer la metodología que permita implementar los procesos de tratamiento de agua residual en una planta galvanizadora de lámina, para el cumplimiento de la ley vigente.

Específicos

1. Indicar los procesos de tratamiento de agua que sean aplicables a la planta galvanizadora de lámina.
2. Seleccionar dispositivos eléctricos para los procesos de tratamiento de agua en la planta galvanizadora de lámina.
3. Seleccionar dispositivos electrónicos que mejor se adapten a los procesos de tratamiento de agua en la planta galvanizadora de lámina.
4. Relacionar los dispositivos eléctricos y electrónicos, mediante automatizar el proceso por medio de un PLC.
5. Crear un programa para el PLC seleccionado, que se adecue a la solución propuesta para el tratamiento de agua residual.

INTRODUCCIÓN

Puesto que el agua es parte fundamental de la vida y por lo tanto del medio ambiente, y a su vez es un recurso no renovable, se desprende la necesidad de darle un uso consciente, así como evitar y/o reducir al máximo la contaminación de la misma. Debido a estos hechos se ha creado una conciencia ambiental que ha llevado a muchos a abordar el tema, desde distintos puntos de vista para realizar su propia aportación para el bien común.

Por ello se han realizado muchos estudios especializados sobre el agua, su contaminación por diversas causas, el efecto que tienen las diversas actividades sobre este vital recurso, métodos para erradicar o disminuir estos efectos nocivos así como la creación de legislaciones que regulen todo efecto perjudicial sobre el agua.

Este trabajo de investigación propone dar un aporte, al seleccionar los dispositivos eléctricos y electrónicos, además de hacer más efectivos los distintos métodos de tratamiento del agua residual en una planta galvanizadora de lámina, con lo que se minimiza el impacto negativo que esta actividad industrial, necesaria para el desarrollo productivo del país, tenga sobre el vital líquido, y además cumplir con las leyes vigentes en el Estado de Guatemala. Por ser un tema de tanto interés e importancia, se pretende dar un visión de todo el proyecto desde varios puntos de vista, que permitan explicar las diferentes disciplinas involucradas, y como estas se relacionan entre sí, para proponer una solución que sea viable legal, técnica, medioambiental y económicamente.

Para facilitar la selección final, se dividió en dos partes importantes, una es la implementación eléctrica y la otra la implementación electrónica, y al final se presentan los circuitos y programas necesarios para unir ambas partes y obtener un sistema automatizado para el tratamiento del agua residual en la galvanizadora de lámina.

1. PROCESO DE GALVANIZADO

El hierro desnudo y acero es vulnerable al ambiente, y el grado de corrosión depende de varios factores, siendo los más importantes: la composición y superficie del metal, el medio, y las condiciones locales. Por ello se hace necesaria la utilización de métodos para protegerlo. La excelente resistencia del zinc y sus aleaciones, a la corrosión, en situaciones normales, lo hace ser muy utilizado para la protección de aceros expuestos al agua natural y a las condiciones atmosféricas. La propiedad que da al zinc esta resistencia a la corrosión, es su habilidad para crear una capa protectora, consistente en óxido de zinc e hidróxido, o una variedad de sales básicas, dependiendo de la naturaleza del ambiente. Cuando esta capa cubre la superficie total del metal, el proceso de corrosión es reducido. A esta propiedad se le suma su fácil aplicación y su bajo costo, por lo que el uso del zinc para proteger metales es muy difundido.

1.1. Métodos de aplicación

Existen cinco métodos de aplicación de capas de zinc: el rociado, el enchapado, la difusión, la pintura rica en zinc y el galvanizado en caliente. El método a utilizar depende de la aplicación en que será utilizado el material, y en general se consideran como métodos complementarios, ya que es difícil identificar cual es el más adecuado para un propósito en particular.

1.1.1. Rociado del metal

El metal es colocado en un contenedor que permite su flujo, a través de una pequeña boquilla con orificio circular, mediante el cual es alimentado aire comprimido u otro gas. El metal fundido es dividido en pequeñas partículas, como un atomizador. Puesto que la presión del gas es alta, cada partícula adquiere una gran velocidad. Estas partículas golpean la superficie mientras el metal esta fundido, solidificándose ya aplicado. Tiene la ventaja de poder ser aplicado en sitio. En este método no hay formación de aleaciones. Y aunque es porosa, la capa cumple la función de prevenir la corrosión. Es el mejor método para capas delgadas de recubrimiento. No tiene limitaciones en cuanto al tamaño de la estructura. Produce un pequeño calentamiento en el acero. Es el más económico para grandes pesos y tamaños. Presenta buena adherencia. Las capas pueden tener un grosor de 100 a 200 μm , arriba de eso depende de la destreza del operador. Las piezas pueden ser soldadas finamente.

1.1.2. Enchapado

El sustrato metálico limpio es sumergido, en la celda de enchapado. La capa resultante es uniforme y no contiene aleaciones. El éxito del enchapado depende mucho en la parte inicial del proceso, por lo que hay restricciones para la composición del baño para el enchapado. Este método crea piezas muy dúctiles. Este método es normalmente usado por simple, y es muy apropiado para hojas continuas o cable. No envuelve calentamiento del acero. Se utiliza cuando las capas delgadas son suficientes, de 2 a 25 μm , pero es poco económico para capas más gruesas. Posee buena adherencia al metal. Resistente a pequeñas soldaduras.

1.1.3. Difusión

Ya que la corrosión es una reacción de la superficie, es posible modificar la composición química de la superficie para protegerla, por medio de la difusión. La capa por difusión es formada como resultado de la interacción de 2 procesos; el metal soluto es puesto en contacto con el solvente, a lo que le sigue la difusión propia, que es la absorción gradual de el soluto entre el solvente. Este proceso forma aleación, que típicamente contiene un 8 a 9% de hierro. Este proceso es apropiado para componentes pequeños y complejos. Es un proceso semi-continuo. Este método es más caro que el galvanizado en inmersión en caliente para una capa equivalente, por lo que generalmente es usado cuando el control de tolerancia es más importante que el grosor de la capa. Las capas aplicadas tienen un grosor de 12 a 40 μm . Buena adherencia. Posee una excelente resistencia al desgaste. Las piezas acabadas pueden ser pintadas si se requiere.

1.1.4. Pintura rica en zinc

Este proceso puede ser aplicado con brocha, atomizador o sumergido en sitio de ser necesario. Consiste en aplicar pintura al metal a proteger, dicha pintura puede contener un silicato inorgánico o un epoxi orgánico. La duración en un ambiente industrial moderado es de 16 años si es pintura inorgánica y de 7 años en el caso de ser pintura epoxi. Es un método de bajo costo, aunque el trabajo puede elevar los costos. Tiene buena adherencia. Las capas tienen un grosor de 40 μm y un poco mas con formulaciones especiales. Las hojas de metal pintadas pueden moldearse y resisten soldadura con poco daño. Esta pintura puede ser utilizada sola o como base bajo otras pinturas.

1.1.5. Galvanización por inmersión en caliente

Acá la capa no tiene una composición uniforme, pero es hecha con capas de aleación zinc hierro, las que se hacen más ricas en zinc hacia la superficie. Debido a la formación de esta aleación, se forma un fuerte vínculo entre la capa de zinc y el acero.

Galvanizado en caliente es el proceso mediante el cual un metal libre de oxido se recubre con una capa de zinc, lo que permite que el metal se mantenga libre de corrosión. El uso del zinc sobre otros metales, como el aluminio, cromo, estaño o níquel, se debe a su fácil aplicación y menor costo. Con este proceso se consiguen dos formas de protección: 1) Sirve de escudo al metal, ante las condiciones atmosféricas del entorno donde se encuentra el metal. 2) Al ser, el zinc más electronegativo que el hierro o acero, se consigue una protección catódica.

Generalmente este es el método más económico para aplicar capas de zinc con un grosor de 20 a 200 μm . Pueden ser galvanizadas piezas de más de 20 metros. Tiene buena uniformidad, y los sitios con pobre recubrimiento son fácilmente visibles. Muy resistente a los rasguños y a la soldaduras. Se puede aplicarle pinturas con cromatos o fosfatos para prevenir el desgaste por uso prolongado.

1.2. Proceso de galvanización por inmersión en caliente

El proceso de galvanizado consta básicamente de 4 etapas:

1.2.1. Limpieza alcalina de la superficie

La reacción de galvanización solamente se produce si las superficies de los materiales están químicamente limpias, por lo que éstos deben someterse previamente a un proceso de preparación superficial. Por ello se remueve los contaminantes orgánicos, aceites, grasas y partículas extrañas. El proceso consiste en rociar un detergente alcalino a una temperatura entre 60 a 80 °C, sobre el metal. La composición básica de esta limpieza es hidróxido sódico.

1.2.2. Decapado de la superficie

Se remueve sedimentos del proceso de laminado del acero y óxido de la superficie, por medio de soluciones ácidas, con el objeto de limpiar el metal, sin atacar la superficie del hierro. Para ello, se pasa el material a galvanizar por inmersión en una solución de ácido clorhídrico (HCl) a temperatura ambiente, con una concentración entre 15 a 20 % en volumen. Posteriormente se realiza una remoción de restos, por medio de rociar agua en la superficie.

1.2.3. Inmersión en baño zinc

El material es sumergido en un baño de zinc fundido con temperatura entre 438 a 460 °C, que además contiene aditivos metálicos. El tiempo que el material permanezca sumergido, depende de la pieza, grosor del acero, el precalentamiento y grosor del acabado. Durante la inmersión en el zinc fundido, se produce una reacción de difusión entre el zinc y el acero, que tiene como resultado la formación de diferentes capas de aleaciones zinc-hierro. Al extraer los materiales del baño de zinc, estas capas de aleación quedan cubiertas por una capa externa de zinc puro. El resultado es un recubrimiento

de zinc unido metalúrgicamente al acero base mediante diferentes capas de aleaciones zinc-hierro.

1.2.4. Enfriamiento de la superficie

El material ya galvanizado, se hace pasar en forma longitudinal en una torre de enfriamiento, de manera que existe un paso de aire en forma de un flujo perpendicular a la superficie de la lámina. Es en este momento en que el zinc se solidifica sobre el acero. Para enfriar por completo el material, se rocía con agua a temperatura ambiente.

2. TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

El agua producto del proceso de galvanizado debe de ser tratada antes de su reutilización o descarga a receptores de agua. Para la depuración de las aguas residuales, ya sea de origen domiciliar o industrial, se han creado una serie de procesos o tratamientos. Estos tratamientos pueden ser: físicos, químicos y biológicos. En la práctica el agua residual no es tratada con un solo tipo de proceso, generalmente para mejores resultados se combinan los físicos y los químicos.

2.1. Tratamientos físicos

Se utilizan para la eliminación de los contaminantes (sólidos en suspensión y disueltos). También son conocidos como operaciones unitarias. El tipo de tratamiento a utilizar depende mucho de las características físicas del contaminante o impurezas. Estos son los más importantes:

- a) Cribado (rejillas y tamices).
- b) Decantación.
- c) Desarenado.
- d) Desengrasado.
- e) Dilaceración.
- f) Flotación.
- g) Específicos:
 - 1) Adsorción.
 - 2) Intercambio iónico.
 - 3) Osmosis inversa.

- 4) Electro diálisis.
- 5) Micro filtración y ultra filtración.

2.2. Tratamientos químicos

Para la separación de contaminantes (sólidos en suspensión, disueltos, gérmenes patógenos), se utiliza la dosificación de productos químicos. También se conocen como tratamiento primario. El objetivo del tratamiento primario es la reducción del contenido de sólidos en suspensión del agua residual. El tratamiento a ser utilizado depende de las características químicas de las impurezas presentes en el agua. Entre este tratamiento tenemos los siguientes procesos:

- a) Coagulación – floculación.
- b) Desinfección.
- c) Neutralización.
- d) Oxidación – reducción.
- e) Precipitación.

2.3. Tratamientos biológicos

También conocidos como tratamiento secundario. Estos eliminan la materia orgánica, basándose en el empleo de microorganismos, principalmente bacterias y protozoos, los cuales se alimentan de las sustancias orgánicas que quedan en disolución en el agua residual, y que escaparon del tratamiento primario. En estos procesos, los compuestos orgánicos complejos son convertidos en simples, además de disminuir la demanda de oxígeno. Los más importantes son:

- a) Digestión anaerobia.
- b) Filtros percoladores.
- c) Lagunaje.
- d) Lodos activos.
- e) Tecnologías blandas (depuración de bajo coste):
 - 1) Lagunas de oxidación o estabilización.
 - 2) Biodiscos o Contactores Biológicos Rotativos (CBR).
 - 3) Lechos de turba.
 - 4) Filtros verdes.

2.4. Tratamientos a utilizar en planta de tratamiento de agua

Para este caso particular, el tratamiento de las aguas residuales de la galvanizadora de lámina, se estimó la utilización de los siguientes métodos como la mejor solución:

2.4.1. Decantación

La decantación es una operación unitaria, puramente física, de separación de mezclas, especialmente para heterogéneas. La decantación se basa en la diferencia de densidad entre los dos componentes, que hace que dejados en reposo, ambos se separen hasta situarse el más denso en la parte inferior del envase que los contiene. De esta forma, podemos vaciar el contenido por arriba. En el proceso de decantación, las partículas cuya densidad es mayor que el agua, sedimentan en el fondo del decantador por acción de la gravedad. Estas partículas se eliminan periódicamente del fondo del tanque de decantación. El agua clarificada, que queda en la superficie del decantador, es redirigida hacia un filtro. La velocidad de caída de las partículas es proporcional a su diámetro y masa volumétrica.

El proceso de decantación se basa en una disminución de la velocidad del líquido, de tal forma que permita que la materia más densa se deposite en el fondo del equipo. Obteniéndose un líquido claro en la superficie, y sólidos en forma de fangos en el fondo. La concentración de estos fangos dependerá de la naturaleza de los sólidos presentes.

La mezcla de agua bruta con coagulantes - floculantes se introduce en la base del decantador. En éste hay microarena, que se une a los flóculos y aumenta así su tamaño y peso. Así, los flóculos se depositan en el fondo del decantador. El agua decantada se evacua por la parte superior del tanque pero, antes, debe atravesar unos módulos laminares inclinados que fuerzan la decantación de las partículas más ligeras arrastradas por la corriente ascendente del agua. En el fondo del decantador, se bombea el fango sin interrupción y se envía a un hidrociclón que, gracias a la fuerza centrífuga, separa el fango y la microarena. Dicha arena se reinyecta en el decantador, mientras que los fangos se redirigen hacia la unidad de tratamiento de fangos.

2.4.2. Coagulación

Cuando los sólidos suspendidos tienen un diámetro muy pequeño (de 1 a 0.1 μm .) para sedimentar espontáneamente, se utiliza este método químico. Normalmente las partículas de arcilla, óxidos de metal, moléculas de proteínas grandes y microorganismos tienden a estar cargadas negativamente, por lo que generan fuerzas de repulsión superficial, las cuales están impidiendo la sedimentación por gravedad en tiempos cortos (de 0.5 a 3 horas). Al repelerse unas a otras, evitan la adición de partículas mayores, las cuales podrían entonces sedimentar fácilmente.

Para este proceso, se añade un coagulante al agua para desestabilizar las partículas e inducir las a formar partículas mayores conocidas como flóculos. Los coagulantes más comunes son sales de aluminio como sulfato de aluminio, hidróxido de aluminio, cloruro de polialuminio, así como sales de hierro, entre las cuales tenemos cloruro ferrico, sulfato ferrico entre otros, los cuales pueden ser usados, ya sea solamente uno o una combinación de varios.

La cantidad de coagulante añadida al agua es crítica; poca cantidad resulta inefectiva, y demasiada puede conducir a un exceso de productos químicos en el agua final. La coagulación está completa en un tiempo aproximado de 3 minutos a partir de la adición. Las sales de los metales reaccionan en el medio alcalino del agua para formar un precipitado insoluble del hidróxido del metal que enreda las partículas coloidales. Como todas las partículas de origen natural en el agua tienen un pequeño potencial eléctrico negativo en su superficie y los flóculos de los hidróxidos tienen un pequeño potencial eléctrico positivo, se produce entonces una atracción, formando partículas más grandes y pesadas que precipitan.

Otros factores que influyen en la coagulación son: el tipo de coagulante, el valor del pH del agua a tratar, tiempo de mezcla, fuerza de agitación, presencia de núcleos para la formación de flóculos, temperatura del agua, ya que cuanto más fría sea el agua más tiempo debe pasar para obtener una buena floculación. Las características del coagulante incluyen: tener carga opuesta al coloide para neutralizar las fuerzas electrostáticas, y con carga de valencia alta, para acelerar la ruptura de la estabilidad coloidal.

2.4.3. Floculación

Cuando las partículas de líquido colisionan, éstas se unen para formar partículas más grandes que sedimentan. Durante la sedimentación alcanzan a otras más pequeñas que sedimentaban a una velocidad más baja y así estas también se unen al agregado.

Esta unión de partículas descargadas es favorecida por la adición de algunos productos químicos, llamados floculantes. A diferencia de la coagulación, en este proceso se hace necesaria una agitación homogénea y además lenta, con el fin de no romper los flóculos formados. Este proceso tiene una duración de 10 a 30 minutos.

Durante esta mezcla se producen flóculos mayores que son eliminados fácilmente durante la clarificación. La floculación sucede de forma natural para partículas mayores de 1 nm, pero la velocidad de colisión es muy baja y para aumentarla se necesitan sistemas de agitación mecánica.

Existen 2 métodos de Floculación:

- 1 Floculación Pericinética: Las colisiones son causadas por el movimiento de las moléculas debido a la energía térmica, también llamado "movimiento Browniano".
- 2 Floculación Ortocinética: Las colisiones se producen por el movimiento del agua, es debida a gradientes de velocidad.

2.4.4. Neutralización

Muchas veces el agua residual de origen industrial contiene materiales ácidos o alcalinos con un pH muy alto o muy bajo, lo que requiere utilizar la neutralización antes de descargarla, o de aplicarle algún tratamiento biológico o químico. El agua residual con alto valor de pH, lo que la convierte en fuertemente básica, puede ser neutralizada con la adición de ácidos tales como el ácido sulfúrico (H_2SO_4) y ácido clorhídrico (HCl). En el caso de que el agua residual tenga un bajo valor de pH, esto es fuertemente ácida, se puede aplicar dióxido de carbono (CO_2) y dióxido de sulfuro (SO_2) en forma gaseoso, así mismo se puede agregar, óxido de calcio o cal (CaO), óxido de magnesio (MgO), hidróxido de calcio ($Ca(OH)_2$), hidróxido de magnesio ($Mg(OH)_2$), hidróxido de sodio (NaOH, o soda cáustica). Los neutralizantes más utilizados por su menor costo, fácil manejo y menores efectos dañinos son: soda cáustica, caliza, cal y ácido sulfúrico. Los de mayor costo y que presentan problemas de corrosión y emisión de gases tóxicos son: ácido clorhídrico, ácido nítrico, amoníaco y carbonato sódico.

Puesto que el pH tiene variación logarítmica, cuando los valores se encuentran en los extremos, se hace necesario realizar la neutralización en varias etapas, mediante varios tanques dispuestos escalonadamente. El tiempo de acción depende del químico que se utilice, en caso de utilizar ácidos muy fuertes, la neutralización puede ser instantánea.

Se distinguen dos métodos de neutralización: el primero es la homogeneización, que consiste en mezclar las corrientes de agua residual existentes, las cuales son ácidas y otras alcalinas. El segundo método es el control directo del pH, que consiste en agregar ácidos o bases para neutralizar el agua residual.

La homogeneización, además de ser utilizada con el objetivo de la neutralización, permite también aminorar las variaciones de ciertas corrientes de aguas residuales y aminorar las variaciones de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) del afluente al sistema de tratamiento.

El método de control directo del pH, conlleva la utilización de reactivos para la neutralización. Uno de los objetivos que se cubre con utilizar este método es el de romper los enlaces iónicos del agua residual. Los factores que permiten la selección del reactivo para la neutralización son los siguientes: 1) almacenamiento y vertido del reactivo, 2) capacidad de neutralización, 3) coste del reactivo y 4) velocidad de reacción.

3. LEGISLACIÓN GUATEMALTECA PARA TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

3.1. Antecedentes

Una de las primeras menciones en cuanto a la contaminación del agua, fue el Decreto del Congreso 1004-1953, con fecha 10 de agosto de 1953, el cual prohibía depositar o lanzar a las aguas de los ríos, riachuelos, manantiales y lagos, sustancias vegetales o químicas, desechos o residuos de la producción agrícola o industrial, o bien plantas o sustancias de cualquier especie.

El Estado de Guatemala, mediante el Congreso de la República, teniendo en consideración la importancia de la protección del medio ambiente y los recursos naturales, que el país aceptó la resolución de la conferencia de las Naciones Unidas en Estocolmo Suecia en el año 1972, y la inexistencia de un marco jurídico para la prevención del deterioro del medio ambiente, emitió una ley, Ley de protección y mejoramiento del medio ambiente, por medio del decreto 68-86.

Dicha ley tiene como objetivo, entre otros, el uso integral y manejo racional de los sistemas hídricos. Para lo cual, se establece que el Gobierno de la República, emita reglamentos con el fin de:

- a) Evaluar la calidad del agua.
- b) Controlar que el uso del agua no cause deterioro ambiental.

- c) Fijar requisitos para la disposición del agua contaminada.
- d) Investigar cualquier fuente de contaminación hídrica.
- e) Determinar los niveles de contaminación de los ríos, lagos y mares.

Para cumplir con este objetivo se creó la Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA), a quien le compete la aplicación de esta ley y todos sus reglamentos, así como la aplicación de las sanciones y/o multas, y en caso de delitos, dicha comisión los denunciará ante los tribunales correspondientes.

En el año 2000, el Congreso de la República crea la figura del Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, quien absorbe a CONAMA, mediante el decreto 90-2000. Entre las funciones asignadas a este Ministerio se destacan:

- a) Definir las normas ambientales de los recursos no renovables.
- b) Crear la política para el manejo del recurso hídrico del país.

Con el Acuerdo Gubernativo 23-2003, se creó el Reglamento de evaluación, control y seguimiento ambiental, el cual implementa la obligatoriedad de entregar un Diagnóstico Ambiental, para toda obra, industria o actividad, ya existente al momento de entrar en vigor este reglamento. Procede a categorizar los distintos proyectos, obras, industrias o actividades, de acuerdo al Estándar Internacional del Sistema CIIU, Código Internacional Industrial Uniforme y de acuerdo a la categoría de la actividad, se le dictará los requisitos a cumplir, así como las sanciones y multas, en caso de alguna falta. También describe las diferentes evaluaciones para todo proyecto.

Dicho acuerdo entraría en vigor tres meses después de su publicación en el Diario de Centro América, la cual fue el 29 de enero del 2003. Sin embargo, el 24 de abril del 2003, se aprueba el Acuerdo Gubernativo 240-2003, que extiende la fecha para entrar en vigencia, de dicho acuerdo. La nueva fecha es 1 de agosto del 2003.

Precisamente el día para que cobre vigencia este reglamento, se emitió el Acuerdo Gubernativo 424-2003, que extiende nuevamente la fecha. La nueva fecha es 15 de octubre del 2003. El 6 de noviembre, se aprueba el Acuerdo Gubernativo 704-2003, que hace varias reformas a los artículos del Acuerdo 23-2003, este entra en vigor un día después de su publicación en el Diario de Centro América, la cual fue el 11 de noviembre del 2003.

El 18 de febrero del 2005 se publicó en el Diario de Centro América el Acuerdo Gubernativo 66-2005, que contiene el Reglamento de descargas de aguas residuales a cuerpos receptores. Este ya incluye parámetros de medición para determinar las características del agua, así como los valores máximos permisibles de distintos contaminantes del agua. Entre los parámetros más importantes mencionados en el Artículo 5 literal a) están:

- a) Temperatura en grados Celsius ($^{\circ}\text{C}$).
- b) Potencial de hidrógeno, en unidades pH.
- c) Demanda bioquímica de oxígeno a 20°C (DBO) como miligramo por litro de oxígeno (mg de O_2/l).
- d) Demanda química de oxígeno (DBQ) como miligramo por litro de oxígeno (mg de O_2/l).

- e) Metales como miligramo por litro de dicho metal.
- f) Color, unidades de color como unidades de turbidez Nefelométricas (UTM).

En el Artículo 6, se enumeran todos los máximos permisibles de los distintos parámetros enumerados en el Artículo 5, para las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores, atendiendo al tipo de cuerpo receptor y al tipo de metal pesado u otros. En la siguiente tabla se describen los parámetros de acuerdo al metal pesado que contenga el agua residual.

Tabla I. Límites máximos de metales pesados y otros, permisibles en aguas residuales

PARÁMETROS	UNIDAD	LÍMITE MÁXIMO
Arsénico	Miligramo por litro (mg/l)	0.1
Cadmio	Miligramo por litro (mg/l)	0.1
Cianuros	Miligramo por litro (mg/l)	0.5
Cobre	Miligramo por litro (mg/l)	4
Cromo	Miligramo por litro (mg/l)	0.5
Mercurio	Miligramo por litro (mg/l)	0.005
Níquel	Miligramo por litro (mg/l)	2
Plomo	Miligramo por litro (mg/l)	0.2
Zinc	Miligramo por litro (mg/l)	10
Color	Unidades de color (UC)	40

Fuente: **Reglamento de descargas de agua residuales a cuerpos receptores.** Artículo 6, literal B), Capítulo III del Acuerdo Gubernativo 66-2005.

Este reglamento también incluyó los requisitos para un ente generador de descargas de aguas residuales a cuerpos receptores. Indica la cantidad y periodicidad de las muestras para su análisis y para la entrega de un informe de los resultados obtenidos.

3.2. Legislación vigente

Mediante el Acuerdo Gubernativo 134-2005, publicado el 16 de mayo del 2005 en el Diario de Centro América, se aprueba el Listado taxativo de proyectos, obras, industrias o actividades, tomando como base el Estándar Internacional del Sistema CIIU, o Código Internacional Industrial Uniforme. Primeramente establece que una pequeña empresa tiene hasta 25 empleados, una mediana empresa, hasta 60, y una empresa considerada grande, toda aquella que sobrepase estos valores. Además categoriza los riesgos de la siguiente manera:

- a) Alto impacto ambiental y riesgo ambiental: A.
- b) De moderado a alto impacto ambiental y riesgo ambiental: B1.
- c) De moderado a bajo impacto ambiental y riesgo ambiental: B2.
- d) Bajo impacto ambiental y riesgo ambiental: C.

Bajo la división 2892 incluye el diseño, construcción y operación de empresas relacionadas con actividades de tratamiento y revestimiento de metales (enchapado, pulimento grabadura y soldadura). Bajo esta división se considera a una gran empresa con un riesgo B1, a una mediana empresa con el riesgo B2, y a una pequeña empresa como C.

El 11 de mayo del 2006, se publicó en el Diario de Centro América el Reglamento de las descargas y reuso de aguas residuales y de la disposición de lodos. Esto bajo el Acuerdo Gubernativo 236-2006, que deroga el Acuerdo Gubernativo 66-2005. Este nuevo reglamento tiene como característica el clasificar las descargas de aguas residuales y cada clasificación le asigna límites máximos permisibles, además se incluye reducciones progresivas calendarizadas, divididas en etapas para cada una de ellas, hasta llegar a cumplir la meta final de reducción. Tanto para proyectos ya existentes como para los nuevos.

En el Artículo 16 de dicho reglamento se detallan todos los parámetros de medición para determinar las características del agua residual, que aunque no aplican en su totalidad para este proyecto en particular, se detallan a continuación:

- a) Temperatura.
- b) Potencial de hidrógeno.
- c) Grasas y aceites.
- d) Materia flotante.
- e) Sólidos suspendidos totales.
- f) Demanda bioquímica de oxígeno a los cinco días a 20 °C.
- g) Demanda química de oxígeno.
- h) Nitrógeno total.
- i) Fósforo total.
- j) Arsénico.
- k) Cadmio.
- l) Cianuro total.
- m) Cobre.
- n) Cromo hexavalente.

- o) Mercurio.
- p) Níquel.
- q) Plomo.
- r) Zinc.
- s) Color y
- t) Coliformes fecales.

Dentro de las tablas de límites máximos permisibles de la descarga de aguas residuales, se encuentran una para los proyectos ya en funcionamiento, una para los nuevos proyectos, otra más para cuando la descarga es en un estero, una para cuando la descarga sea de origen municipal o de urbanizaciones, otra para descarga en alcantarillado público tanto para proyectos ya en funcionamiento, como para nuevos. Y se incluye las prohibiciones de descargar aguas residuales a flor de tierra, en canales abiertos y en el alcantarillado pluvial.

También se caracterizan las aguas de reuso en cinco tipos: para riego agrícola en general, para cultivos comestibles, para acuacultura, para pastos y otros cultivos, y finalmente para usos recreativos. En este reglamento se consideran parámetros máximos permisibles para lodos, productos del tratamiento de aguas residuales.

Por último se establece el seguimiento y el cumplimiento del reglamento, así como las sanciones pertinentes, según sea el caso e infracción cometida. Y la obligatoriedad por parte de cualquier responsable de generar aguas residuales, para realizar un estudio técnico de acuerdo al reglamento, en un plazo de un año, a partir de la entrada en vigencia.

Tabla II. Límites máximos permisibles de descargas de aguas residuales a cuerpos receptores

			Fecha máxima de cumplimiento			
			2-05-2011	2-05-2015	2-05-2020	2-05-2024
			Etapa			
Parámetros	Dimensionales	Valores Iniciales	Uno	Dos	Tres	Cuatro
Temperatura	Grados Celsius	+/- 7	+/- 7	+/- 7	+/- 7	+/- 7
Grasas y aceites	mg / l	1500	100	50	25	10
Materia flotante	Ausencia / presencia	Presente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente
Sólidos suspendidos	mg / l	3500	600	400	150	100
Nitrógeno total	mg / l	1400	100	50	25	20
Fósforo total	mg / l	700	75	30	15	10
pH	Unidades pH	6 a 9	6 a 9	6 a 9	6 a 9	6 a 9
Coliformes fecales	Número probable 100ml	< 1x10 ⁶	< 1x10 ⁶	< 1x10 ⁵	< 1x10 ⁴	< 1x10 ⁴
Arsénico	mg / l	1	0.5	0.1	0.1	0.1
Cadmio	mg / l	1	0.4	0.1	0.1	0.1
Cianuro total	mg / l	6	3	1	1	1
Cobre	mg / l	4	4	3	3	3
Cromo	mg / l	1	0.5	0.1	0.1	0.1
Mercurio	mg / l	0.1	0.1	0.02	0.02	0.01
Níquel	mg / l	6	4	2	2	2
Plomo	mg / l	4	1	0.4	0.4	0.4
Zinc	mg / l	10	10	10	10	10
Color	Unidades platino cobalto	1500	1300	1000	750	500

Fuente: **Reglamento de descargas y reuso de agua residuales y de la disposición de lodos.** Artículo 20, Capítulo V del Acuerdo Gubernativo 236-2006.

El 5 de octubre del 2007, se publicó en el Diario de Centro América, el Reglamento de evaluación, control y seguimiento ambiental, como Acuerdo Gubernativo 431-2007, que deroga el 23-2003. Dicho reglamento incluye como nuevo instrumento de evaluación ambiental, el diagnóstico ambiental, que tiene como fin el de determinar los impactos ambientales de los distintos proyectos, obras, industrias o actividades ya existentes, para determinar las acciones correctivas necesarias, con el objetivo de mitigar los impactos adversos.

También establece nuevos procedimientos para la evaluación ambiental, de acuerdo con la categoría del proyecto nuevo, según el listado taxativo, el cual es revisado y modificado periódicamente. Toda vez cumplido los requisitos, se extenderá una licencia de evaluación ambiental, la cual conlleva la responsabilidad de cumplir todas las regulaciones, procedimientos, normas técnicas y requisitos legales y ambientales vigentes en el país.

Se incluye la figura de seguro ambiental, que será impulsado por el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, para garantizar que los potenciales riesgos ya identificados, tengan cobertura de su ocurrencia, durante el proceso de evaluación ambiental.

Se extiende la participación pública, y se establece como requisito para la evaluación ambiental del proyecto, por lo que cualquier persona puede presentar observaciones, e incluso manifestar su oposición al desarrollo del proyecto evaluado. Por último se incluyen incentivos para los proyectos que se certifiquen internacionalmente y/o adopten procedimientos y actividades con estándares de protección del medio ambiente internacionalmente reconocidos.

4. PROPUESTA PARA TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

De acuerdo a lo investigado y con base en las metas a cumplir en los límites establecidos por la ley vigente, se determina que la propuesta para el tratamiento de las aguas residuales en la planta galvanizadora de lámina, debe incluir procesos físicos como los son la decantación y la filtración. Además de procesos químicos tales como la neutralización, la coagulación y la floculación.

4.1. Diagrama general

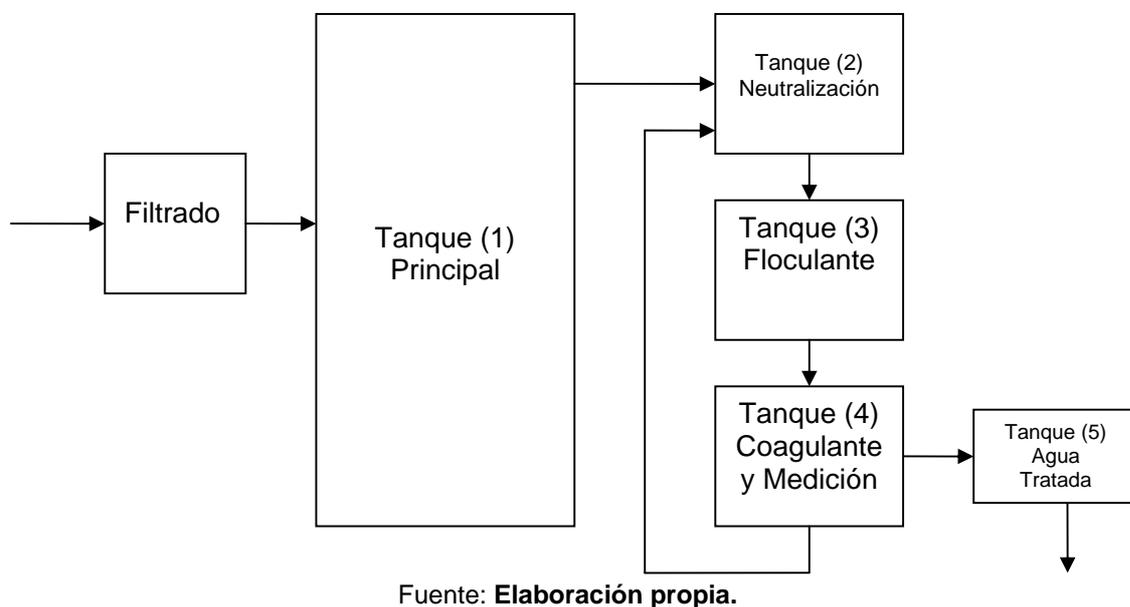
Como primer paso, para determinar la solución al problema del tratamiento de las aguas residuales, se realiza un diagrama de bloques en forma general, donde se aprecia los distintos tratamientos seleccionados anteriormente.

El tanque principal, es donde se recolecta toda el agua residual del proceso de galvanizado, por lo que es de mayor tamaño. Aunque el agua residual contiene en su mayoría, metales pesados, no se descarta la presencia de algún residuo sólido, por lo que se incluye antes de ingresar a este tanque, el filtrado. Además, dentro del tanque principal esta incluido un medio poroso que realiza un filtrado adicional.

Los tres tanques siguientes, que tienen un menor tamaño, se utilizan para la neutralización, floculación y coagulación respectivamente. En el caso del tanque de coagulación, se sitúa un medidor de pH, para determinar si el valor esta dentro de lo permitido. Si la medición esta dentro del rango aceptable, el agua es enviada al último tanque, que contiene el agua tratada,

de no ser aceptable el valor, el agua es devuelta al Tanque de Neutralización para iniciar el proceso.

Figura 1. Diagrama de bloques para el sistema de tratamiento de aguas residuales



4.2. Diagrama de flujo

Gracias al diagrama de bloques realizado, se puede establecer todos los pasos específicos que son necesarios para la implementación de la solución propuesta, para el tratamiento de aguas residuales. Para ello, se realizara un diagrama de flujo detallado, donde aparecen todos los procesos y variables de decisión implicados, con el fin de facilitar la solución final propuesta. Este diagrama es muy importante además, para el control y automatización del proceso completo. El diagrama completo puede ser consultado en el Apéndice.

5. IMPLEMENTACIÓN ELÉCTRICA

5.1. Bombas de agua

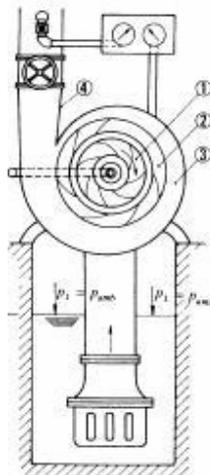
Una bomba es una máquina que absorbe energía mecánica y la transforma en energía hidráulica que es aplicada al líquido que la atraviesa, en este caso particular el agua. En general las bombas se clasifican en dos grandes tipos: dinámicas o rotodinámicas y de desplazamiento positivo. En el caso de las bombas dinámicas, la energía es aplicada al líquido que se bombea, por medio de un impulsor o una hélice que gira en un eje, esto significa que en estas bombas, el movimiento que transmite la energía es rotativo y se bombea volúmenes de manera continua. La energía de velocidad aplicada al fluido por el impulsor se convierte en energía de presión cuando el líquido sale del impulsor y avanza a lo largo de una voluta o carcasa de difusor estacionarias. En las bombas de desplazamiento positivo, se aplica energía al líquido dentro de un volumen fijo de desplazamiento, tal como una carcasa o un cilindro y dicha energía es aplicada periódicamente lo que hace que el bombeo sea de volúmenes en forma fraccionada.

Para determinar la mejor solución para el traslado del agua residual de la planta de tratamiento de agua, entre los distintos tanques, se consideró dos tipos de bombas. La primera es una bomba centrífuga que se clasifica entre las bombas dinámicas y una bomba de diafragma que se considera de desplazamiento positivo.

5.1.1. Bomba centrífuga

La bomba centrífuga produce una ganancia de carga estática en el fluido que la atraviesa. Con lo que transmite energía a dicho fluido, proveniente de la energía mecánica que se encuentra en el eje por medio del motor que produce el movimiento. La bomba centrífuga es una turbo-máquina, del tipo radial, cuyo flujo es del interior hacia fuera, y que tiene generalmente, un área de paso para el fluido relativamente reducido en relación al diámetro del impulsor. Esto es con el objetivo de obligar al fluido a realizar un recorrido radial largo y aumentar la fuerza centrífuga, que tiene como resultado en un incremento en la carga estática.

Figura 2. Elementos de una bomba centrífuga



Fuente: Claudio Mataix. **Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas. Página 370.**

En la Figura 2 se observa los elementos constitutivos de una bomba centrífuga, los que se describen a continuación: Rodete (1), parte giratoria, unida al eje de la máquina y que consta de determinado número de álabes, que son los que transmiten la energía al fluido, ya sea en forma cinética o de

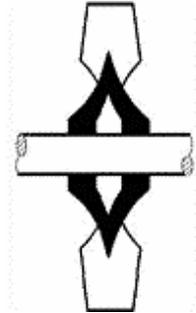
presión. También llamado impulsor. Corona directriz (2) también conocida como corona de álabes fijos, que reúne el líquido del rodete y transforma la energía cinética comunicada por el rodete en energía de presión, ya que la sección de paso aumenta en dicha corona, en la dirección del flujo. Esta corona hace más eficiente a una bomba, sin embargo encarece su construcción, por lo que no se encuentra en todas las bombas. Caja espiral (3) esta también transforma la energía dinámica en energía de presión, y recoge con pequeñas pérdidas de energía, el fluido que sale del rodete, y lo conduce hasta la tubería de salida o de impulsión. Tubo difusor troncocónico (4) realiza una tercera transformación de energía dinámica en energía de presión.

Sin embargo, la parte principal, ya que de ella depende mucho la eficiencia de la bomba centrífuga, es el impulsor o rodete. De hecho, su variación, hace que la bomba centrífuga sea eficiente para diferentes condiciones o tipos de fluidos. Se pueden diferenciar tres tipos principales de impulsores.

Impulsor abierto: Por tener sus álabes abiertos, este impulsor se debe instalar con una holgura mínima entre sus caras y las paredes de la carcasa, para reducir el deslizamiento o recirculación del fluido dentro de la bomba. La facilidad de accesos a los álabes es una ventaja en el mantenimiento y reparación. Sin embargo, sus desventajas son su fragilidad estructural al no tener refuerzo y menor eficiencia con respecto a los impulsores cerrados.

Impulsor cerrado: Este impulsor guía el fluido con las paredes propias del impulso, en lugar de hacerlo con las paredes de la carcasa, con lo que se reducen el deslizamiento y el desgaste de sus paredes. La recirculación es mínima por las pequeñas holguras entre la pared delantera y la pared de la carcasa en la entrada de succión.

Figura 3. Impulsor abierto



Fuente: www.quiminet.com

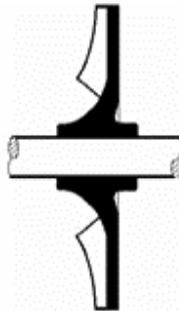
Figura 4. Impulsor cerrado



Fuente: www.quiminet.com

Impulsor semiabierto: Este impulsor tiene una sola pared o bóveda y la segunda se ha sustituido, ya sea por una placa de desgaste fija o por una cara de desgaste fundida integral con la carcasa. La holgura entre los álabes del impulsor y las caras de desgaste tiene una gran influencia en el rendimiento de la bomba, por lo que se incluye en la mayoría de las bombas con este tipo de impulsor, un sistema de ajuste de holgura, donde no sea necesario el desarme de la bomba.

Figura 5. Impulsor semiabierto



Fuente: www.quiminet.com

Figura 6. Tipos de impulsores



Fuente: www.schneider.ind.br

El funcionamiento en general de una bomba centrífuga, inicia con el fluido ingresando axialmente por la tubería de aspiración, hasta el centro del impulsor, el que se encuentra girando por la acción del motor, experimentando un cambio de dirección brusco, pasando a ser en forma radial, y adquiriendo una aceleración. Los álabes del impulsor, someten a las partículas del líquido a un movimiento de rotación muy rápido, siendo proyectadas hacia el exterior por la fuerza centrífuga, de manera que abandonan el impulsor hacia la voluta o carcasa a gran velocidad, aumentando su presión en el impulsor, según la distancia al eje. La elevación del fluido, se produce por la reacción entre éste y el impulsor que se encuentra sometido al movimiento de rotación. En la voluta se transforma parte de la energía dinámica adquirida en el impulsor, en energía de presión, siendo el líquido lanzado contra las paredes del cuerpo de la bomba y expulsados por la tubería de impulsión.

La carcasa tiene una forma de caracol, de manera que la separación entre ella y el impulsor es mínima en la parte superior, y dicha separación aumenta hasta que las partículas del líquido, se encuentran frente a la abertura de impulsión. Los álabes son los encargados de guiar el fluido a la salida del

impulsor antes de introducirlo a la voluta. Otra función de la voluta, es transformar la energía dinámica creada en el impulsor a energía de presión, al disminuir la velocidad, lo que aumenta la presión del líquido a medida que la separación entre el impulsor y la voluta aumenta.

5.1.2. Bomba de diafragma

Esta es una bomba de desplazamiento positivo de construcción especial. El diafragma actúa como pistón cuando recibe un movimiento alternativo con un varillaje mecánico, líquido hidráulico o aire comprimido, desde una fuente externa que los envía en forma de pulsos. El diafragma también actúa como sello entre la fuerza de accionamiento y el líquido que se bombea. Esta cualidad, hace que sea muy utilizada para mover ácidos contaminantes o corrosivos, donde no se pueden permitir fugas, aunque esto la convierta en una bomba más costosa.

En este tipo de bombas, el diafragma actúa como interconexión entre el émbolo y el líquido del proceso. El émbolo se mueve en un cilindro, pero no actúa directamente sobre el líquido, por lo que no lo desplaza. El émbolo acciona el diafragma, y éste es el que transmite la energía necesaria. En el lado opuesto del diafragma, se succiona una cantidad proporcional del líquido, hacia una cámara de desplazamiento y se descarga en cada ciclo del émbolo. Los diafragmas pueden ser de accionamiento mecánico, esto es con conexión directa con el émbolo, o de accionamiento hidráulico, donde hay un equilibrio entre dos líquidos a modo de disminuir el esfuerzo en el diafragma y aumentar las presiones de descarga.

En el caso de los diafragmas con accionamiento hidráulico, se debe mantener el volumen adecuado de líquido en la cámara hidráulica. Por ello, en

muchos casos, se instala un sistema de tres válvulas para mantener el líquido hidráulico libre de gases atrapados o aire, y además sirve de protección contra presión elevada, tanto en el líquido hidráulico, como en el líquido del proceso. Estas tres válvulas son: 1) Válvula de reabastecimiento. Esta actúa como un control o rompedora del vacío, mantiene el volumen de líquido hidráulico constante, ya que reabastece el que se escapa de la cámara. 2) Válvula de purga de gas. Su función es eliminar las burbujas de aire o gas en el líquido hidráulico. 3) Válvula de desahogo. Protege contra altas presiones del líquido hidráulico y del de proceso, en la cámara hidráulica. Se puede reconocer tres tipos de bombas de diafragma.

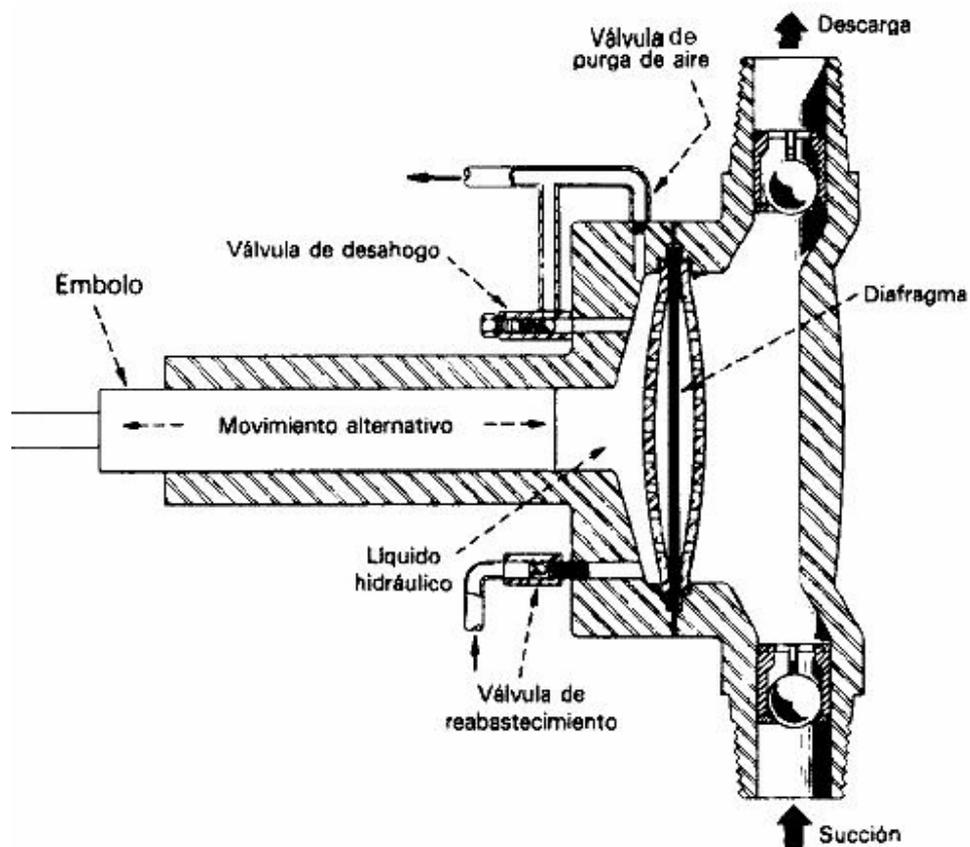
La bomba de diafragma de disco, donde el diafragma generalmente es de tetrafluoroetileno (TFE), el cual se flexiona entre dos placas de soporte cóncavas, que tienen agujeros para circulación. Estas placas también llamadas placas de contorno, retienen el diafragma y evitan su desgarramiento con alguna alta presión.

Este sistema elimina el problema de las fugas de fluido por los sellos del émbolo y es eficaz para bombear líquidos corrosivos, como los ácidos, o cualquier aplicación donde no se puede permitir fugas. Aunque puede producir problemas cuando se manejan fluidos viscosos o pastas aguadas. Con los primeros, ocurre una caída de presión notoria en los agujeros de flujo en las placas cóncavas, que a menudo produce cavitación en la succión. La formación de burbujas de gas en el fluido reduce la exactitud de la bomba.

La bomba con diafragma tubular, utiliza un émbolo reciprocante como el ya descrito, pero se emplea un diafragma tubular de elastómero que se dilata o se contrae con la presión ejercida por el fluido hidráulico. La dilatación o contracción del diafragma, combinada con la acción de las válvulas de

retención, de succión y descarga, envía un impulso de líquido dosificado por la bomba. Al no utilizar placas cóncavas en el lado del proceso del diafragma, se reducen los problemas de cavitación.

Figura 7. Bomba con diafragma de disco de accionamiento hidráulico

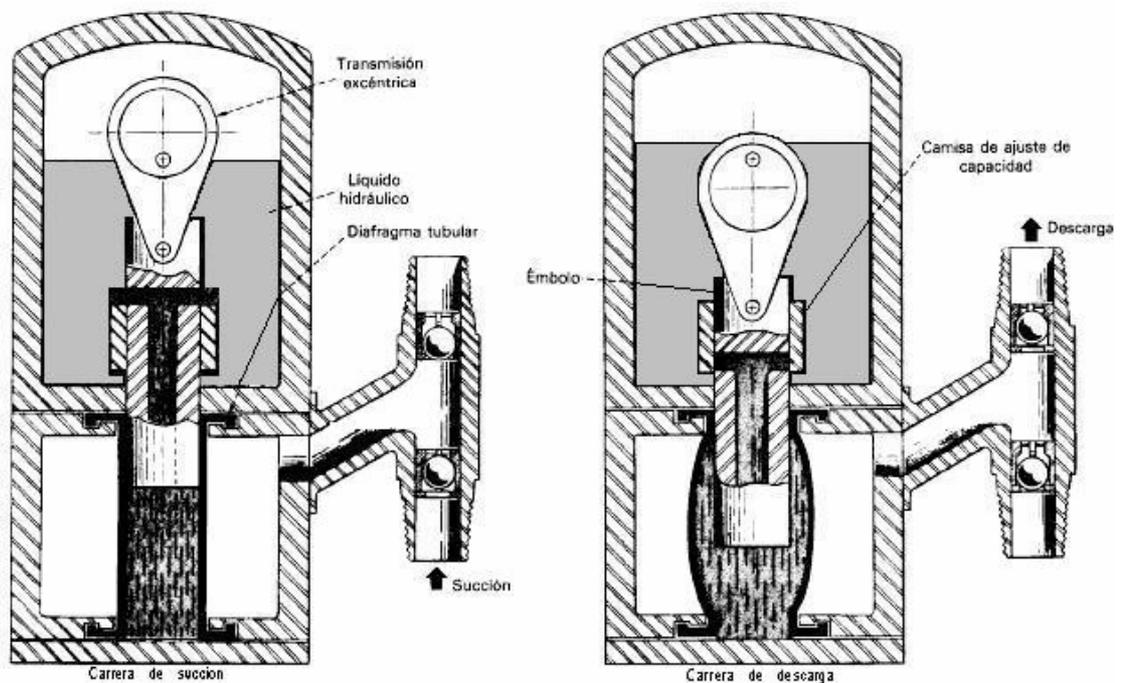


Fuente: J. Kennth. **Bombas selección, uso y mantenimiento. Página 258.**

En la bomba con diafragma tubular, el émbolo se encuentra colocado dentro de dicho diafragma. Durante la succión se produce un vacío en el diafragma cuando se retrae el émbolo. Esto hace que se contraiga el diafragma y succione cierta cantidad de fluido del proceso por la válvula de retención de succión hacia la cámara de desplazamiento que está en el exterior del

diafragma. Durante la descarga ocurre lo opuesto. La aplicación de presión al fluido dentro del diafragma hace que se dilate y desplace una cantidad proporcional de fluido de proceso por la válvula de descarga.

Figura 8. Bomba con diafragma tubular sencillo



Fuente: J. Kenneth. **Bombas selección, uso y mantenimiento. Página 259.**

Existen variantes del diafragma tubular, donde el diafragma es doble o una combinación de diafragma de disco y tubular. En las de doble diafragma, el émbolo aplica líquido hidráulico a presión para flexionar el diafragma primario, el que a su vez flexiona el secundario por medio de un líquido intermedio. Una de las ventajas de este diafragma doble, es que el diafragma secundario y que maneja el fluido, aísla la cabeza de la bomba con el fluido, en caso de ser corrosivo, y esto elimina la necesidad de utilizar materiales costosos para evitar

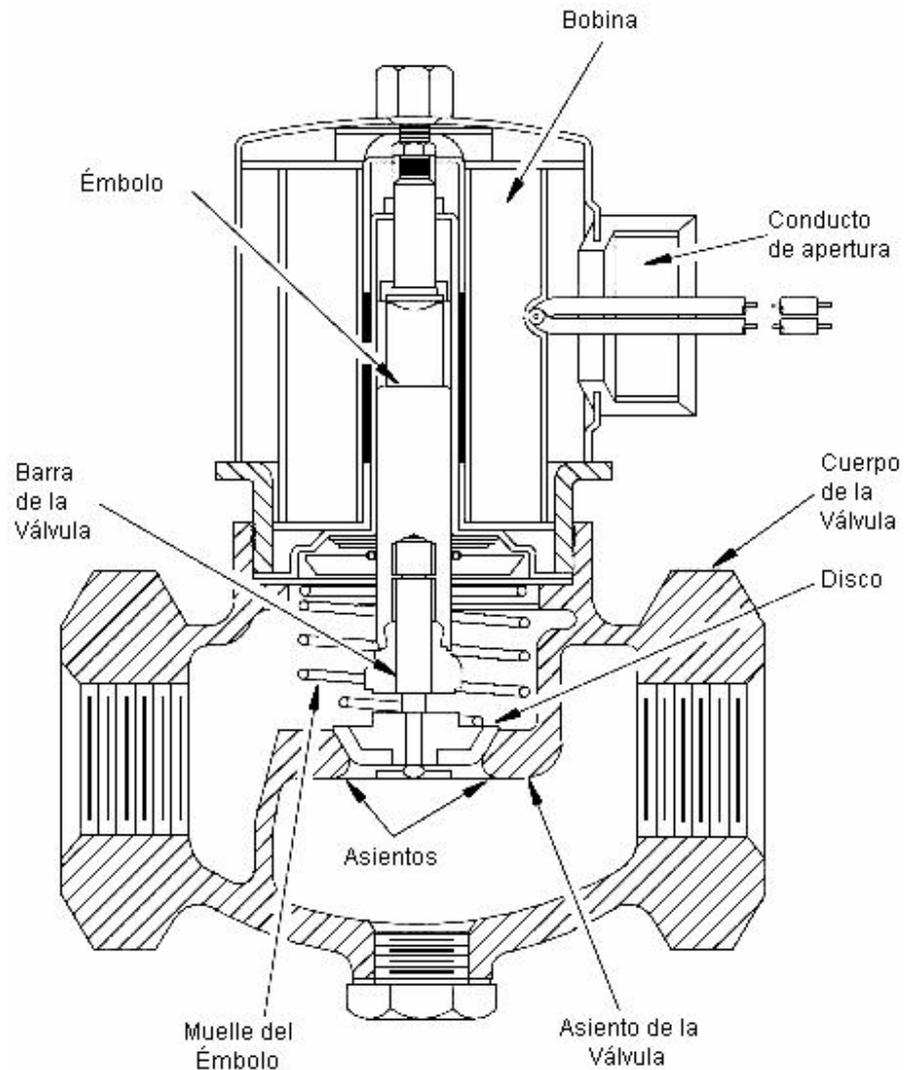
la acción del fluido sobre ella. El diafragma secundario presenta poca resistencia al fluido, por lo que no afecta la eficiencia de la bomba. Además ofrece seguridad en caso de fallo del primario, complementado con el hecho de utilizar un fluido hidráulico inerte entre ambos diafragmas. Lo que es útil si se manejan productos que pueden tener una reacción violenta con los aceites hidráulicos.

El tercer tipo de bomba de diafragma es con diafragma doble de disco hecho de tetrafluoroetileno (TFE), que combina la seguridad de un diafragma doble, con el hecho de poder colocar las cabezas de diafragma separadas por la distancia. El diafragma de disco recibe el líquido hidráulico y ejerce una fuerza sobre la cabeza remota, que es un diafragma tubular, que se encarga de trasladar esa presión al fluido del proceso. Esta separación entre las cabezas permite manejar productos peligrosos, tales como líquidos criogénicos, con elevada temperatura o radiactivos. Son útiles también, cuando no hay espacio para instalar toda la unidad. Su desventaja principal son sus piezas metálicas que elevan el precio de estas bombas.

5.2. Válvulas solenoides hidráulicas

Las válvulas solenoides hidráulicas son actuadores eléctricos, que tiene un núcleo de hierro blando, el que se mueve dentro de un campo eléctrico producido por una bobina que lo circunda. Usualmente son utilizadas en emergencia, ya que es posible accionar su apertura o cierre, incluso en fracciones de segundo. Además presentan otras características como una baja presión diferencial, permiten el manejo de fluidos densos, y resisten operaciones frecuentes. Estas válvulas son utilizadas frecuentemente como válvulas piloto, que controlan otras válvulas más grandes. La mayoría de las válvulas solenoides tiene además, un accionamiento manual.

Figura 9. Válvula solenoide



Fuente: www.energy.gov

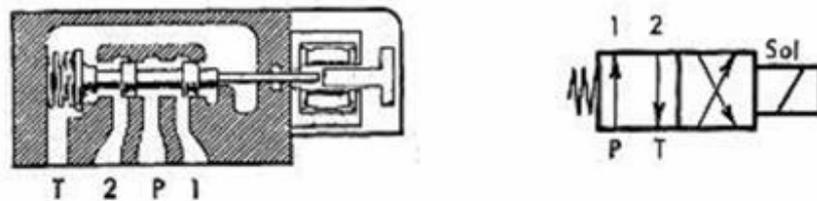
Se puede distinguir entre 9 tipos de válvulas solenoides: 1) Disco deslizante. 2) Núcleo de disco. 3) Tapa de disco. 4) Diafragma flotante. 5) De palanca. 6) Diafragma colgante. 7) De retención. 8) De pistón. Y 9) De bobina.

La posición de la válvula solenoide hidráulica está determinada por la atracción magnética de la barra de hierro blando. La presión del émbolo, actúa en contra del movimiento de la barra, cuando el pulso eléctrico es aplicado. Este tipo de válvula puede ser ajustada, de manera que el movimiento de atracción del solenoide, abra o cierre la válvula hidráulica. Cuando el pulso eléctrico es removido, el muelle o resorte hace que la barra de la válvula regrese a su posición opuesta. Algunas válvulas tienen 2 solenoides, lo que permite abrir o cerrar, de acuerdo al pulso aplicado.

La siguiente figura, la número 10, es de una válvula de cuatro vías, dos posiciones. El resorte de la izquierda es el que aplica el retorno, mientras que a la derecha está el electroimán que acciona a la válvula. Cuando se energiza el solenoide, la barra es empujada por la acción del solenoide, hacia la izquierda, y conecta la presión a la cara 2 del cilindro, mientras que la cara 1 queda drenando al tanque. Dicha posición se mantiene, mientras este energizado el solenoide. Al desenergizar el solenoide el resorte empuja la barra hacia la derecha, hacia la posición original.

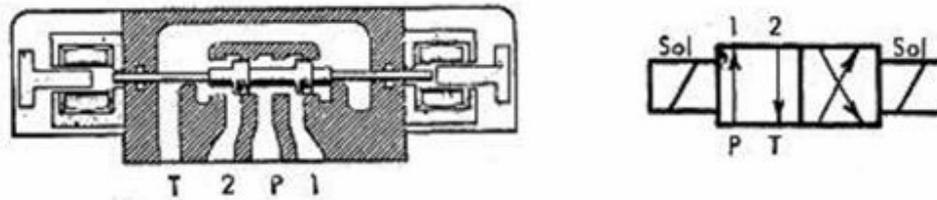
Sin embargo, en algunas ocasiones es necesario, que la válvula mantenga su posición de energizada, aunque solamente reciba un pulso. Para ello se sustituye el resorte mostrado en la anterior figura, por otro solenoide, de manera que la barra es movida hacia cualquiera de los dos extremos, por la acción de empuje de cualquiera de dichos solenoides. En ambos casos presentados, las válvulas son de 2 posiciones. Ahora bien, si a la válvula con dos solenoides, se le agregan dos resortes iguales, colocados en ambos extremos, se obtiene una válvula de cuatro vías, tres posiciones y auto centrada por resortes. Esto permite colocar la válvula en cualquier posición. El único cuidado que se debe tener, es de nunca accionar ambos solenoides simultáneamente.

Figura 10. Válvula hidráulica accionada por un solenoide



Fuente: www.sapiensman.com

Figura 11. Válvula hidráulica accionada por dos solenoides



Fuente: www.sapiensman.com

Figura 12. Válvula hidráulica accionada por dos solenoides auto centrada



Fuente: www.sapiensman.com

Para la selección de una válvula solenoide, se deben de considerar varios parámetros de operación y físicos. Entre los cuales se puede mencionar:

Presión: La presión de una válvula solenoide debe sobrepasarse para que accione y permita el flujo de líquido. Esta es una medida llamada diferencial máximo de presión de operación. El diferencial mínimo de presión de operación, es la presión mínima que debe estar presente para que exista un flujo a través de la válvula. La presión estática segura, es la máxima presión a la que puede estar sujeta la válvula en condiciones normales.

Temperatura: Se deben considerar la temperatura ambiente en condiciones normales, la máxima y mínima temperatura ambiental y la máxima temperatura del fluido que atraviesa la válvula.

Viscosidad: Es muy dependiente de la temperatura y para conocer la viscosidad de un fluido, se debe considerar la temperatura real del fluido.

Tiempo de respuesta: Es el tiempo que transcurre desde que se energiza o desenergiza la válvula de solenoide hasta que la válvula responde. Este parámetro es dependiente del tamaño y el modo de operación de la válvula, el tipo de corriente (alterna o continua), el tipo de fluido que atraviesa la válvula, la temperatura, la presión de entrada y la caída de presión.

Una buena selección de las válvulas de solenoide incluye considerar el tamaño de las mismas, puesto que se presentan problemas tanto si se sobredimensionan, como si se subdimensionan. El sobredimensionar una válvula puede resultar en: 1) Costo innecesario en equipo. 2) Flujo variable o errático a través de la válvula. 3) Reducción de la vida útil de algún tipo de válvula por la oscilación de partes internas. 4) Operación errática de algunos

tipos de válvulas. 5) Desgaste del asiento de la válvula de algunos tipos, al operar en la posición cercana al cierre. En el caso de la subdimensión pueden ocurrir: 1) Bajo flujo. 2) Intermitencia de líquidos o vapores a la salida. 3) Baja presión en la salida. 4) Una sustancial baja presión en el sistema de tubería.

5.3. Mezcladores

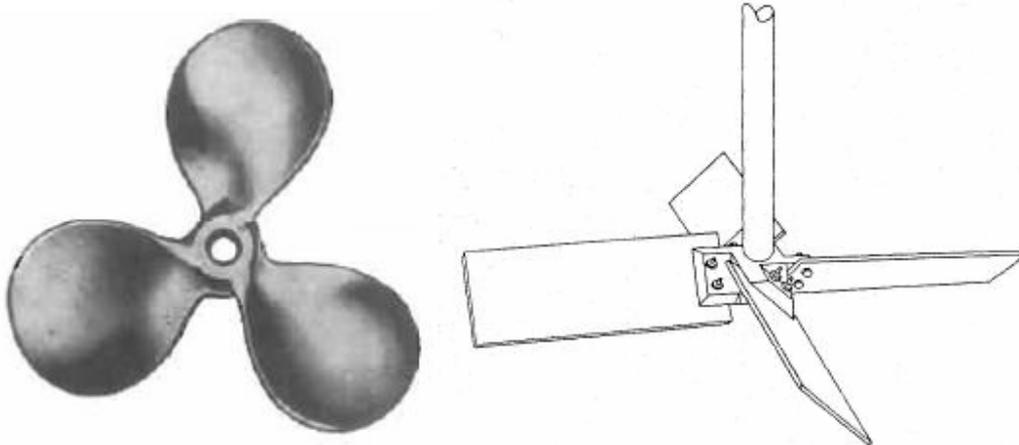
Para llevar a cabo el proceso del mezclado, es necesario establecer los factores significativos de la aplicación. El desempeño del mezclador es a menudo relacionado en términos de la velocidad de flujo durante la agitación, la capacidad de bombeo generado por un impulsor y por el flujo total en el tanque. Los procesos que pueden ser implementados en los depósitos con impulsores rotativos son: mezclado de líquidos miscibles, dispersión de líquidos que no son miscibles, dispersión de un gas en un líquido, transferencia de calor a un líquido desde una superficie, suspensión o dispersión de partículas sólidas en un líquido para producir uniformidad y promover transferencia de masa (tal como disolución) o iniciar una reacción química, y reducir el tamaño de las partículas aglomeradas.

El mezclado es llevado a cabo por la acción de la rotación de un impulsor en un fluido. Esta acción divide el fluido, levantando remolinos que se mueven a través del cuerpo de líquido. En general el movimiento del fluido envuelve: la masa del fluido por largas distancias y remolinos a pequeña escala o turbulencias que mueven el fluido por distancias cortas.

Sin duda la parte más importante en el mezclador son los impulsores, los cuales podemos dividir en 2 clases: impulsores de flujo axial e impulsores de flujo radial. Esta clasificación depende del ángulo que forme la hoja o paleta del impulsor con el plano de la rotación del impulsor.

Impulsores de flujo axial. Entre estos impulsores están todos los que forman un ángulo menor de 90 grados entre la paleta y el plano de rotación. Entre los que se encuentran la hélice y la turbina con hojas inclinadas. Las hélices son a menudo para agitar tanques pequeños de aproximadamente 1000 galones. Se pueden utilizar en alta y baja velocidad. La velocidad baja se utiliza cuando hay sólidos en suspensión. Mientras que la velocidad alta se utiliza para una dispersión o reacción rápida.

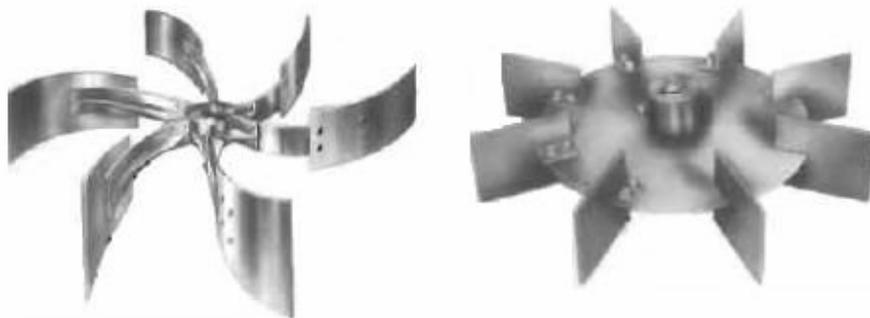
Figura 13. Impulsor de flujo axial tipo turbina marina y tipo turbina con hojas inclinadas



Fuente: Ludwin Ernest. **Applied process design for chemical and petrochemical plants.**
Página 290 & 292.

Impulsores de flujo radial. Los impulsores de flujo radial tienen las paletas paralelas al eje de rotación del eje. Las de tamaño muy pequeño son llamadas también turbinas. El diámetro de la turbina es normalmente entre 0.3 y 0.6 el diámetro del tanque. El impulsor de turbina viene en variedad de tipos, tal como la turbina de hojas curvas o con hojas planas.

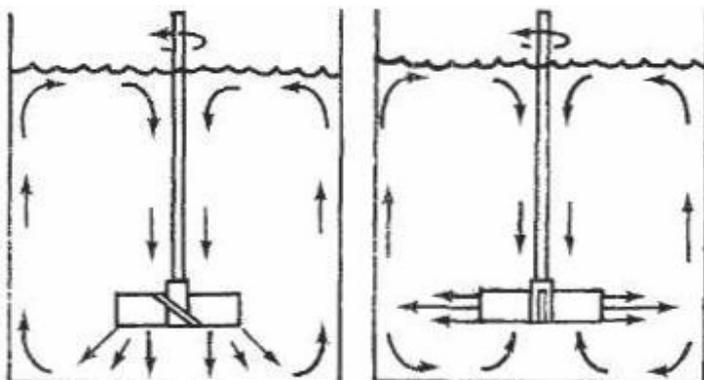
Figura 14. Impulsor de flujo radial tipo turbina hojas curvas y hojas planas



Fuente: Ludwin Ernest. **Applied process design for chemical and petrochemical plants.**
Página 292, 294.

Es muy importante considerar el patrón del movimiento del líquido durante el mezclado, el cual varía según el tipo de flujo utilizado, para obtener así los resultados esperados.

Figura 15. Patrón de flujo axial con turbina de hojas inclinadas y de flujo radial con turbina de hojas planas



Fuente: Ludwin Ernest. **Applied process design for chemical and petrochemical plants.**
Página 291.

A continuación se describen las características más importantes de varios tipos de impulsores, considerando la importancia de esta pieza en los mezcladores.

Hélice tipo marino: La circulación es por flujo axial, paralelo al eje y su patrón es modificado por deflectores, normalmente un flujo hacia abajo. Operan en un amplio rango de velocidades. Pueden ser montados en distintos ángulos. Muy resistente a baja velocidad. Economiza potencia. Generalmente se auto limpia. No es efectiva en líquidos viscosos. De costo moderado.

Turbina radial abierta: Líquido circula en forma radial, por la fuerza centrífuga, lo que permite buena circulación en los extremos del tanque. Generalmente limitada para velocidades altas y con un rango muy estrecho. Es efectiva en tanques con fondo en forma de cono, levantando el material del fondo del tanque y mezclarlo con la mayor parte del líquido. Efectiva en aplicaciones de gran viscosidad. Generalmente requiere bajas velocidades. Costo moderado.

Turbina axial abierta con 4 hojas: Montadas con las hojas a 45 grados y con un ancho de hoja en función del diámetro. Hechas con un amplio rango de tamaños, para ser utilizadas en diámetros desde 18 a 120 pulgadas. Primordialmente para utilizar en aplicaciones con sólidos en suspensión y transferencia de calor. Costo moderado.

Turbina axial abierta con 3 hojas: Proporciona mayor flujo y menor partición del líquido en comparación con la de 4 hojas. Produce una velocidad uniforme a través de toda el área. Rango de tamaño desde 20 hasta 120 pulgadas de diámetro. Rango de velocidad entre 56 a 125 rpm. Costo moderado, menor que la hélice marina.

Impulsor de doble espiral: Utilizada para materiales viscosos. Tiene trayectorias hacia el interior y hacia el exterior. Las trayectorias interiores empujan hacia abajo, mientras que las trayectorias exteriores empujan hacia arriba. El diámetro de las trayectorias interiores es un tercio del diámetro del impulsor. La altura del impulsor es igual a su diámetro. Disponibles en diámetros de 20 a 120 pulgadas. Con rango de velocidad desde 5.5 hasta 45 mph. Costo moderado.

Turbina cubierta: Circulación radial, por la fuerza centrífuga. Buena circulación. Con un rango de velocidad limitado. Resistente a velocidades razonables. Flujo limitado, relativamente bajo. Efectiva en aplicaciones con gran viscosidad. Costo relativamente alto.

De paletas: Circulación radial, pero no tiene circulación vertical a menos que se utilicen deflectores. Para aplicaciones con viscosidad. En operación es muy resistente. No fácilmente falla. La capacidad de flujo puede ser elevado con múltiples hojas. Costo relativamente bajo.

Ancla de dos hojas: Para aplicaciones de alta viscosidad. Los requerimientos de potencia varían directamente con la relación de altura diámetro del impulsor. Utilizado para licuar y para transferencia de calor. Con rango de velocidad desde 5.5 hasta 45 mph. Con diámetros de 24 a 120 pulgadas.

Para el diseño de mezcladores, se deben considerar varios factores entre ellos: Los requerimientos del proceso, las propiedades de flujo del líquido en proceso, los costos del equipo y los materiales necesarios para la construcción de todo el proceso.

Idealmente, el equipo completo debe de ser seleccionado de manera que el costo total sea el menor. Este costo total incluye depreciación y costos de operación tales como mantenimiento y costos de potencia. Usualmente la optimización del proceso, es hecho en base a otras experiencias anteriores, aún así, en algunos casos es necesario llevar a cabo pruebas, con el fin de identificar plenamente el diseño satisfactorio y encontrar la velocidad mínima de rotación y potencia necesarias. Puesto que no hay guías específicas para determinar el mejor equipo para determinado proceso, se pueden dar lineamientos generales sobre el tipo de mezclador a utilizar.

5.3.1. Hélices de entrada superior

Para depósitos menores de 1.8 metros de diámetro, con sujeción por abrazaderas o en brida, la selección inicial para un amplio rango de procesos es la utilización de hélices de entrada superior fuera del centro o en forma angular sin deflectores. El valor altura-diámetro debe estar entre 0.75 y 1.5, y el volumen del líquido no debe exceder los 4 m³ o 1000 galones. Para la mezcla de líquidos miscibles y obtener uniformidad, el rango de velocidad esta entre 350 y 420 rpm, mientras que para la dispersión de partículas en líquidos puede utilizarse una velocidad de 1750 rpm.

El tamaño de la hélice, el tipo de montaje y la velocidad deben de ser seleccionados por modelos o por experiencias anteriores. El diámetro de la hélice y la potencia del motor deben de ser la mínima que necesite el proceso.

5.3.2. Turbinas

Para depósitos con volumen entre 4 y 200 m³ una turbina colocada dentro del depósito, con 4 o más deflectores puede ser la elección inicial. El valor altura-diámetro debe estar entre 0.75 y 1.5. Las turbinas a utilizar pueden ser de 4 o 6 hojas planas. Si la viscosidad del líquido aumenta, el diámetro del impulsor debe hacerlo también. El consumo de potencia decrece, así como la tasa de descarga de la turbina, cuando el diámetro de la turbina es aumentado manteniendo el torque constante. Esto significa que para una tasa de descarga estipulada, una mayor eficiencia es obtenida (baja potencia y torque), con una turbina relativamente grande operando a una velocidad baja. Consecuentemente, si la potencia es mantenida constante y decrece el diámetro de la turbina, resulta en un aumento de la velocidad periférica y disminución del torque. Para obtener uniformidad en el líquido, el impulsor debe de ser colocado a un tercio de profundidad del líquido.

5.3.3. Hélices de entrada lateral

Para depósitos con volumen de 4 m³ una hélice con ingreso lateral, puede resultar más económica que una hélice con entrada superior. Incluso para depósitos tan grandes como 38 m³ la ventaja económica es muy atractiva. En el caso de depósitos más grandes de hasta 380 m³ una solución práctica es la instalación de 2 o 3 unidades de 56 kW dentro del tanque. Para líquidos con partículas de lento precipitado, la velocidad y el diámetro del agitador deben de ser seleccionado de acuerdo a pruebas. Sin embargo en el caso de la presencia de partículas abrasivas, los costos de mantenimiento del sello de entrada de las hélices sobre el depósito pueden ser muy altos, haciendo esta solución poco económica.

5.3.4. Mezcladores a propulsión

Los mezcladores a propulsión en depósitos, está restringido a la mezcla de líquido miscibles o para el mantenimiento de sedimentos con baja velocidad de precipitado. Para sedimentos con rápido precipitado, esta no es la solución adecuada.

5.4. Selección equipo eléctrico

Luego de revisar el equipo eléctrico que interviene en el proceso de la planta de tratamiento de agua y de especificar las posibles soluciones, se presenta la selección del equipo eléctrico que más se acomoda a los requerimientos del proyecto. En dicha selección intervienen principalmente razonamientos técnicos.

5.4.1. Selección de las bombas de agua

Las bombas de agua son las encargadas de trasladar el agua entre los distintos tanques. Puesto que, ni la profundidad de los tanques ni la distancia al siguiente tanque es grande, no se hace necesario la utilización de bombas de agua de mucho caballaje. Basta con que dichas bombas sean de 1 hp como máximo.

Como se describió anteriormente, hay dos posibles bombas que se pueden utilizar con el fin de trasladar el agua residual con metales pesados entre los tanques. Las posibilidades son: bombas centrífugas y bombas de diafragma. Generalmente, la bomba de diafragma es más eficiente y recomendada para su utilización en soluciones como la que se esta

recomendando, para la planta de tratamiento de aguas residuales. Sin embargo, en este caso se seleccionó bombas centrífugas.

La principal razón para dicha selección, es el hecho de que las aguas residuales a ser tratadas, por su propia naturaleza, únicamente poseen metales pesados y producen un nivel de lodo bastante bajo, prácticamente no hay sedimento. En aplicaciones donde la producción de lodos es muy alta, se hace necesaria la utilización de bombas de diafragma. Puesto que al utilizar bombas de diafragma en este caso particular, se produce un sobre dimensionado, que además afecta en el costo de la solución propuesta para el proyecto, se seleccionó a las bombas de agua centrífugas como la mejor solución.

5.4.2. Selección de las válvulas solenoides hidráulicas

En el diseño inicial del capítulo 4, se consideraba la colocación de bombas de agua para el traslado del agua residual desde el tanque principal hasta el tanque final ya con el agua tratada y disponible para su reutilización o su descarga en las condiciones estipuladas por la ley. Sin embargo, se determinó que estas bombas, las cuales se seleccionaron del tipo centrífuga, fueran colocadas únicamente en el paso del agua desde el tanque principal hacia el tanque de neutralización y luego de este último al tanque de floculación.

Sin embargo, a partir de este tanque, se hace necesario la utilización de otro medio para el traslado del agua. Esto se debe al hecho de que, al utilizar bombas de agua para este fin, se producen rompimiento de los enlaces formados en el tanque de floculación, por lo que esta última acción perdería validez, y no se conseguiría el adecuado tratamiento del agua residual.

Por ello, se plantea como solución ante este inconveniente, la utilización de válvulas hidráulicas de solenoide. Estas válvulas permiten el traslado del agua entre los siguiente tanques, desde el de floculación hacia el de coagulación y medición de valores, y de dicho tanque hacia el tanque final. La razón principal para el uso de las válvulas hidráulicas de solenoide, es el hecho de que estas no rompen los enlaces iónicos ya formados y que son necesarios para el adecuado tratamiento de las aguas residuales y que estas cumplan con los requisitos legales para la posterior descarga o reutilización.

5.4.3. Selección de los mezcladores

En el proceso del tratamiento de aguas residuales, se hace necesaria la inclusión de dos mezcladores, para colocarse en los tanques de neutralización, pero principalmente en el de floculación que es la columna vertebral en todo proceso de tratamiento de aguas residuales. En el primer caso la agitación debe ser rápida y por un espacio corto de tiempo. En el segundo caso es necesario que exista una agitación suave y de larga duración, se maximice el flujo y se minimice los cortes en el líquido para permitir el contacto y la aglomeración de partículas para formar el flóculo, para sedimentar y filtrar. Al cumplir estos requisitos se evita cualquier daño al flóculo. El mezclador que se adapta mejor a estos requerimientos es el axial con cuatro hojas inclinadas, a baja velocidad.

6. IMPLEMENTACIÓN ELECTRÓNICA

6.1. Sensores de nivel

Para la implementación de la solución recomendada, en la planta de tratamiento de aguas residuales, una de las variables más importantes, es el nivel del agua dentro de los distintos depósitos. Para ello se hace necesario incluir medidores o sensores para determinar el nivel, y de acuerdo a esta respuesta, controlar el proceso en sus distintas fases. Puesto que cada posible solución recomendada, tiene su propio requerimiento en la adquisición de los datos de nivel, se presentan varios métodos para la medición de esta variable.

6.1.1. Indicador de cristal

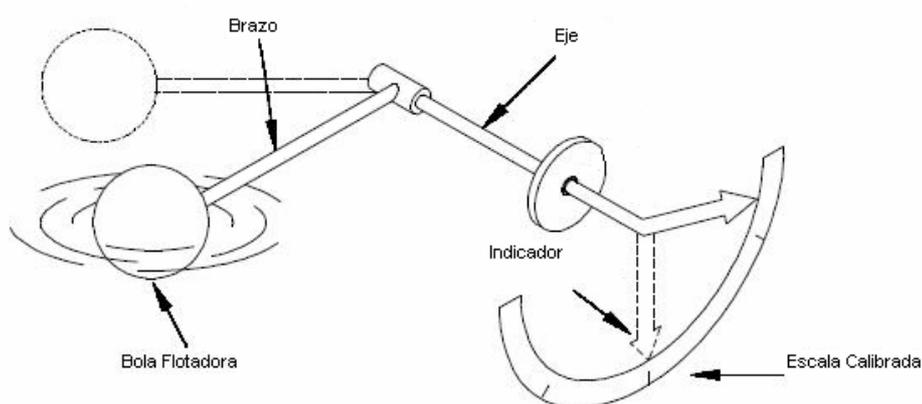
Este es probablemente el método más sencillo y más utilizado de medir el nivel, es por medio del indicador de cristal. Estos tipos de indicadores sirven para varias aplicaciones y se pueden utilizar tanto para recipientes abiertos como para cerrados. El indicador consiste en un tubo de vidrio, por lo que también se le conoce como medidor de nivel tubular, en el caso del indicador de bajas presiones y de un vidrio plano en el caso del indicador para altas presiones, montadas entre dos válvulas, las cuales se utilizan para sacar de servicio el indicador sin necesidad de parar el proceso. El líquido sube por el tubo hasta que iguala el existente dentro del depósito o tanque. Este método presenta como limitantes, el no poder soportar grandes presiones o temperaturas, no resiste grandes impactos, no se puede utilizar con líquidos que manchen el vidrio interiormente, y la más importante, por el hecho de no poder automatizar la medición.

6.1.2. Flotador de bola

Este método es un mecanismo de lectura directa del nivel de líquido. El diseño más práctico para el flotador es una bola hueca de metal o esfera. No presenta restricciones de tamaño, forma o material ha utilizar. El diseño consiste en un flotador de bola unido a una barra, la cual está conectada a un eje rotativo, que indica el nivel en una escala calibrada. La operación es relativamente simple. El flotador de bola está en la parte superior del líquido dentro del tanque. Al cambiar de nivel dentro del tanque, el flotador sigue al líquido y cambia la posición del indicador del eje rotativo.

El cambio de nivel por el flotador de bola, esta limitado por su diseño a un cambio máximo de 30 grados en cualquier dirección, de la horizontal que forma la superficie del líquido, y al ser un método visual, no puede automatizarse la medición.

Figura 16. Flotador de bola

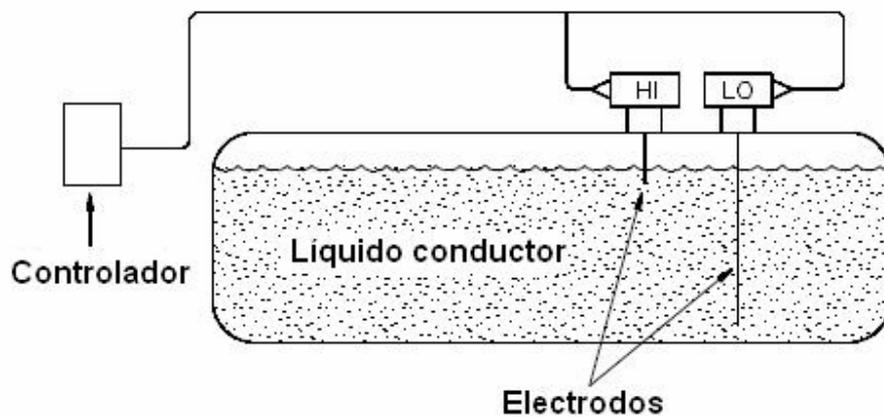


Fuente: US Dep. of Energy. **DOE fundamentals handbook instrumentation and control.**

6.1.3. Sensor de conductividad

Este tipo de medidor consiste en uno o más detectores de nivel, un interruptor y un controlador. Cuando el líquido hace contacto con cualquiera de los electrodos, una corriente eléctrica fluye entre el electrodo y la referencia. Esta corriente, energiza el interruptor, causando que los contactos abran o cierren, de acuerdo al estado en el proceso. El interruptor puede operar una alarma, una bomba, una válvula o simplemente enviar un pulso a un equipo externo de control, como un PLC. Usualmente se utilizan tres electrodos, uno para el nivel más alto, otro para el nivel medio y uno más para el nivel bajo.

Figura 17. Sistema para sensores de conductividad



Fuente: US Dep. of Energy. **DOE fundamentals handbook instrumentation and control.**

Página 6.

6.1.4. Diferencial de presión o sensor hidrostático

El medidor de nivel usando la diferencia de presión hidrostática, está basado en el hecho de que existe un diferencial de la presión entre la parte superior y el fondo del tanque que contiene el líquido y está relacionada con la densidad del líquido y la altura de la columna de líquido. Puesto que la presión se incrementa con la profundidad y la gravedad específica de cada líquido es diferente, además que grandes variaciones de temperatura tienen el efecto de aumentarla, se hace necesario que los sensores sean calibrados de acuerdo a la aplicación en particular.

Transmisores inteligentes de diferencial de presión pueden ser adaptados para medición de nivel y están siendo extensamente utilizados en la industria. Estos sensores inteligentes conjuntamente con las señales de corriente, usualmente de 4 a 20 mA, se utilizan para comunicarse, desde y hacia, el sistema remoto de control, controladores lógicos programables (PLC) y otros sistemas. La medición de nivel puede ser digitalizada por una red, para acceso remoto desde una computadora.

Figura 18. Sensor hidrostático



Fuente: www.drexelbrook.com

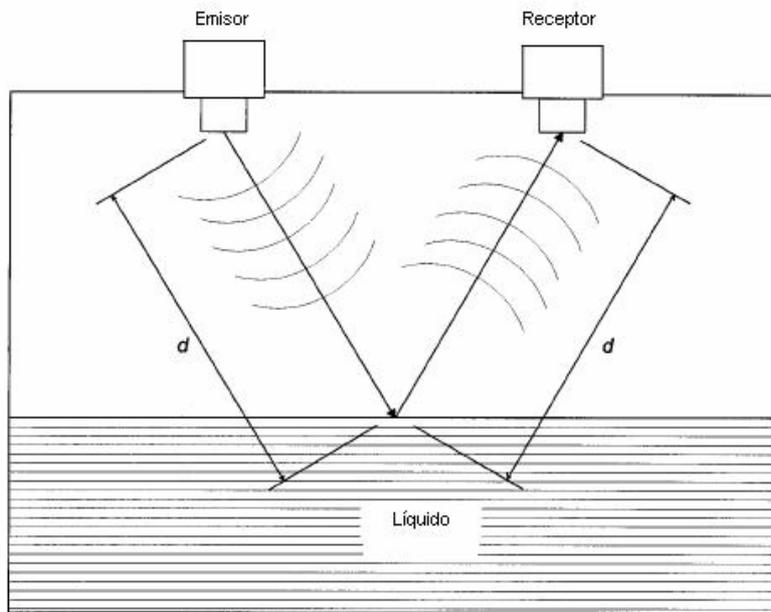
Para uso en tanques abiertos, donde un sensor no puede ser montado en la parte inferior del tanque, existe una versión que puede ser suspendido desde un cable dentro del tanque en el fondo hasta el punto donde se hará la medición. Debe estar diseñado para sellar el interior del propio sensor, del líquido que lo rodea.

6.1.5. Sensor ultrasónico

El medidor de nivel ultrasónico emite ondas de sonido, que la superficie del líquido refleja de vuelta hacia la fuente. El tiempo que transcurre desde que se emite la señal y se recibe, es proporcional a la distancia entre la superficie del líquido y el transmisor. Este método es ideal, para evitar el contacto con el líquido. Las ondas sonoras emitidas tiene una frecuencia entre 20 y 40 Khz. Las ondas ultrasónicas necesitan un medio de propagación, el cual es la atmósfera sobre el líquido a medir. El sonido se propaga a una velocidad aproximada de 340 m/s en el aire, pero este valor puede aumentar de acuerdo a la temperatura. En el vacío, las ondas ultrasónicas no pueden propagarse.

Sin embargo se debe considerar que la espuma en la superficie del líquido puede absorber el sonido. La velocidad del sonido varía con la temperatura. Turbulencias en el líquido pueden causar errores en la medición. La presencia de obstáculos en el trayecto de las ondas, causan mediciones erróneas.

Figura 19. Operación del sensor ultrasónico



Fuente: John Webster. **The Measurement, instrumentation and sensors handbook.** Página 383.

Figura 20. Sensor ultrasónico



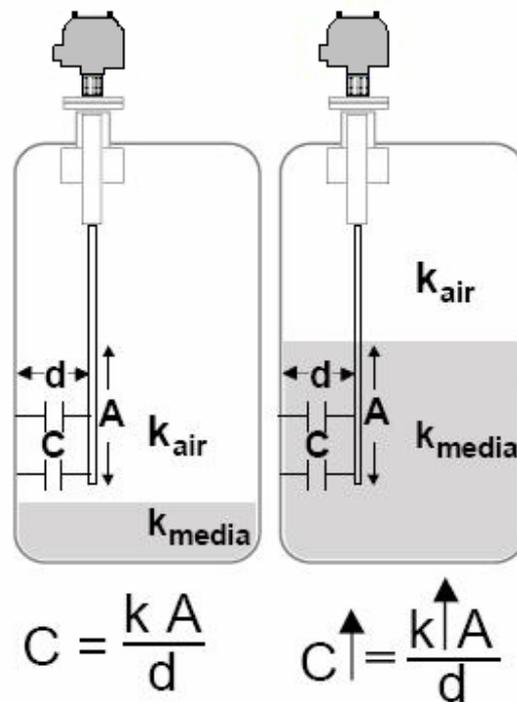
Fuente: www.drexelbrook.com

6.1.6. Sensor RF capacitivo

El medidor de nivel capacitivo, trabaja bajo el principio de que un circuito capacitivo puede ser formado entre una sonda y la pared del tanque que almacena el líquido. La sonda se encuentra aislada, si el líquido es conductor, en caso contrario se utiliza una sonda no aislada. La pared metálica del tanque actúa como el electrodo de referencia. En el caso de que el tanque no sea metálico, se introducen dos sondas. Este medidor de nivel se basa en medir la variación de la capacitancia de un condensador, a medida que varía el medio dieléctrico entre sus placas. Las placas están representadas por la sonda y una la pared del tanque, si este es metálico. El dieléctrico lo representa el líquido. La capacitancia cambia con el cambio de nivel del líquido, esto gracias al hecho de que todos los líquidos comunes, tienen una constante dieléctrica mucho más alta que el aire.

La sonda se conecta a un transmisor de RF situado externamente del tanque. Generalmente la transmisión de la información del nivel se realiza directamente a una computadora, a un PLC o a cualquier otro sistema de control. Estos sensores son utilizados en monitoreo de niveles de líquidos orgánicos o químicos. Las sondas son fáciles de usar, no contienen partes móviles y son sencillas de limpiar. Pueden construirse para muy altas temperaturas y con aplicación de presión elevada. Existen dos variaciones de estos sensores RF, uno es el sensor de impedancia y otro de admitancia, que ofrecen algunas mejoras con respecto al de capacitancia RF, como mayor fiabilidad y un rango mas amplio de aplicaciones.

Figura 21. Operación del sensor RF capacitivo



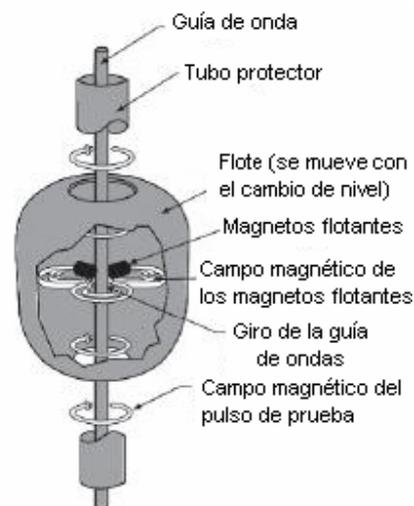
Fuente: www.drexelbrook.com

6.1.7. Sensor magnetoestrictivo

Un campo magnético produce pequeños cambios en las dimensiones físicas de un material ferromagnético, estos cambios son de varias partes por millón en el acero y por el contrario una deformación física o torsión, produce un cambio de magnetización en el material. El sensor magnetoestrictivo está basado en el principio de que un campo magnético externo puede causar la reflexión de una onda electromagnética en una guía de onda construida de material magnetoestrictivo.

La sonda esta compuesta de 3 partes concéntricas. La más externa es un tubo protector, dentro del cual se encuentra la guía de ondas, que esta formada por un elemento de material magnetostrictivo. Un pulso de baja corriente es generado en el transmisor, y es aplicado a la guía de ondas, que crea un campo electromagnético en todo su largo. Cuando el campo magnético interactúa con el campo magnético permanente del magneto montado dentro del flote, se produce un pulso de torsión o un giro en la guía de ondas. El giro en la guía de ondas, es detectado como un pulso de retorno. El tiempo entre el inicio del pulso de baja corriente, también llamado pulso de prueba, y la detección del pulso de retorno es usado para determinar el nivel del líquido con un alto grado de exactitud y fiabilidad.

Figura 22. Detalle de flote del sensor magnetostrictivo



Fuente: Jon Wilson. **Sensor technology handbook. Página 252.**

Figura 23. Sensor magnetoestrictivo



Fuente: www.drexelbrook.com

6.1.8. Sensor radar de guía de onda

Conocido por sus siglas en inglés (GWR), también conocido como radar de impulso de micro potencia. Este sensor utiliza pulsos de energía electromagnética, que se emiten desde la base del transmisor hacia la guía de onda, que puede ser un cable o una barra. Cuando la señal alcanza un punto donde ocurre un cambio de la constante dieléctrica, usualmente en la superficie del líquido, algo de esta señal es reflejada. La cantidad de señal reflejada es proporcional a la diferencia en la constante dieléctrica entre la guía de onda y el líquido. El líquido con una constante alta de dieléctrico produce una señal fuerte de retorno.

El nivel medido, es función del tiempo desde que la señal electromagnética es emitida hasta que es recibida la señal de eco o retorno. La propagación de la señal a través de la guía de onda, elimina falsos ecos y ayuda a minimizar pérdidas de señal, por el polvo o vapores. Al igual que en todos los equipos de medición por radar, los materiales con baja constante dieléctrica causan problemas, así como la guía de onda puede dañarse o corroerse. Están disponibles sistemas con una o con dos guías de onda, de acuerdo a la aplicación. Los sistemas con dos guías, presentan más flexibilidad y son adecuados para mediciones con materiales con baja constante dieléctrica, o donde hay espuma.

6.1.9. Sensor de onda continua FM

También conocido por sus siglas en inglés FMCW. Sensor que utiliza microondas, las que viajan sobre el líquido del cual será medido el nivel. Se emite una señal de barrido en forma continua. La distancia es calculada de la diferencia de frecuencia, entre la señal transmitida y la recibida en cualquier momento. Aunque esta técnica provee una aproximación de la medida, esta puede ser bastante exacta. Sin embargo, debido al nivel de la señal de procesamiento asociada a este sensor, es necesario la utilización de dos indicadores para aplicaciones simples, aunque la mayoría de aplicaciones requiere cuatro.

Seleccionar un tipo y tamaño apropiado de antena es un muy importante factor para capturar la señal de retorno. Tanto las antenas cónicas como las parabólicas son usadas en estas técnicas. La diferencia entre cada una de ellas, es el hecho de que las antenas cónicas tienden a mantener la señal de

bajada en un espectro angosto. Mientras que las antenas parabólicas producen una trayectoria de la señal mas ancha. Factores como la espuma en el tanque, obstrucciones y turbulencias pueden afectar el tamaño y forma de la antena a elegir.

6.1.10. Consideraciones en la selección de sensor de nivel

Cuando se escoge un método de medición de nivel, para cualquier aplicación, hay muchos factores a tomar en cuenta más allá de los costos iniciales. Los más importantes al diseñar la solución para determinado proyecto son:

- a) Tipo y características del material a medir. Tales como la consistencia (sólido, líquido, en polvo o granular). La constante dieléctrica. Viscosidad, densidad, conductividad y consistencia.
- b) Información del proceso que se lleva a cabo. Presión, temperatura, grado de turbulencia y material con que esta hecho el tanque o depósito.
- c) Uso del tanque que contiene el material a ser medido (almacenamiento, separación, colector), tamaño y forma, así como la ubicación de cualquier obstrucción.

6.2. Sensores de temperatura

La temperatura puede definirse como la cantidad de energía térmica en un objeto o en un sistema. Esta energía está directamente relacionada con la energía molecular, a más energía térmica, más grande es la energía molecular. Los sensores de temperatura, detectan cambio en los parámetros físicos, tales como resistencia, voltaje o corriente, que corresponden a los cambios de la temperatura. Existen dos tipos de medición de la temperatura. El primero es donde existe contacto, por lo que el sensor requiere estar directamente en contacto físico con el objeto o el medio a ser monitoreado. Este puede ser sólido, líquido o gaseoso y se puede efectuar en un amplio rango de temperaturas. El segundo tipo de medición es el que no requiere contacto. El sensor interpreta la energía radiante de la fuente de calor, en forma de energía emitida en el espectro electromagnético en el segmento de energía infrarroja. Se puede utilizar en sólidos y líquidos, pero no es efectivo en gases por su natural transparencia. Los sensores pueden dividirse en tres tipos: resistivos electromecánicos y electrónicos.

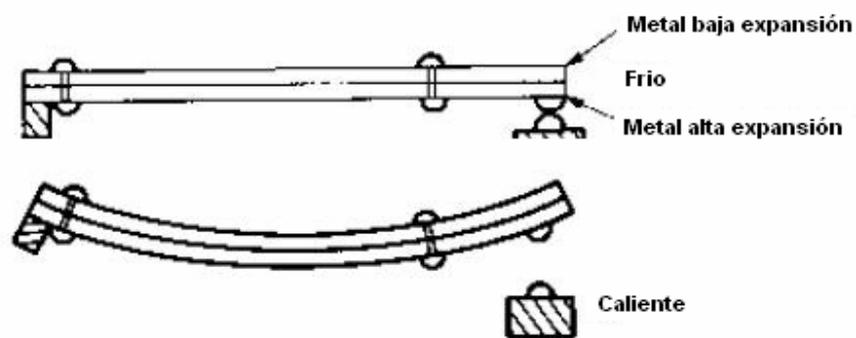
6.2.1. Termómetro bimetálico

Este tipo de sensor consiste en dos láminas metálicas, con diferente coeficiente de dilatación, las cuales están unidas sólidamente por sus extremos. Este tipo de termómetro, puede utilizarse como un control o como un medidor de temperatura. El efecto de la temperatura, hace que el sensor se dilate y deforme, produciendo un desplazamiento mecánico cuya fuerza activa el mecanismo de control, o mueve una aguja indicadora, y esto permite la medición de la temperatura en una escala dispuesta para este efecto.

El movimiento del contacto bimetalico se consigue aprovechando las distintas relaciones de expansión de los dos metales. Proporciona una temperatura de tolerancia muy estrecha y un diferencial pequeño. Se pueden distinguir dos tipos de sensores y esta de acuerdo a la velocidad de operación. Mientras que unos tienen una actuación rápida, ya sea el paso de abierto a cerrado o de cerrado a abierto. Otros tienen una conmutación mucho más lenta. Los de actuación rápida, tienen un diferencial de temperatura muy pequeño, incluso algunos no lo tienen, y responden a cambios de temperatura de duración relativamente corta.

En el caso de los de actuación lenta, se han diseñado para operar lentamente a la temperatura establecida. Algunos poseen un diferencial de temperatura entre los valores de apertura y cierre. Este tipo de conmutación es útil en aplicaciones donde se utiliza el interruptor como dispositivo de protección cuando la temperatura del proceso o del medio, tiene cambios muy rápidos. El tiempo de actuación, compensa los cambios, y evita que el sensor opere innecesariamente. Algunos sensores tienen un tornillo que permite el cambio de la geometría del mismo, cambiando así el valor de la temperatura para su operación. La velocidad de la conmutación esta determinada por los metales seleccionados y por el promedio de cambio de temperatura en la aplicación. Los sensores bimetalicos tienen un amplio rango de temperatura para su actuación, desde 0 hasta 500 °C con una precisión de 1%. Existe además una configuración helicoidal de los sensores bimetalicos.

Figura 24. Sensor de temperatura bimetalico



Fuente: Ian Sinclair. **Sensor and transducer. Página 88.**

Las ventajas que presenta un termómetro bimetalico son:

- a) Interfase directa con las aplicaciones para repuesta rápida.
- b) No requiere circuitos o componentes adicionales.
- c) Disponibles con y sin sellos herméticos.
- d) Capacidad de manejar altas corrientes.
- e) Amplio rango de temperatura.

Las desventajas que presenta un termómetro bimetalico son:

- a) Menor precisión que los sistemas electrónicos.
- b) Mayor tamaño que los sistemas basados en electrónica.
- c) Pueden fallar al acercarse al fin de su vida útil.

6.2.2. Termómetro resistivo

Este tipo de sensor es también conocido como RTD por sus siglas en inglés (Resistance Temperature Detector). En este sensor se utiliza el cambio de la resistencia eléctrica para medir o controlar la temperatura, y proveen una lectura de temperatura bastante precisa, con una variación máxima de ± 0.1 °C. La resistencia eléctrica de ciertos metales, cambia en una manera conocida y predecible, de acuerdo al cambio de la temperatura. Si esta se eleva, la resistencia eléctrica se incrementa, y si la temperatura disminuye, la resistencia eléctrica decrece. Este es un comportamiento lineal.

La parte sensitiva de un RTD, es una bobina de diámetro muy pequeño y de alambre de metal de alta pureza, usualmente platino, cobre o níquel. Sin embargo, el platino es la selección más común, ya que presenta mayor estabilidad a las altas temperaturas por más tiempo, además es químicamente inerte, resistente a la oxidación y con un amplio rango de operación en altas temperaturas. También puede ser fabricado con una película muy delgada, con los conductores grabados en ella. Se coloca en cerámica y sellado con cemento cerámico o vidrio.

En la operación de medición, se aplica una corriente constante a través del RTD, un valor usual está entre 0.8 mA a 1.0 mA. Al variar la temperatura, la resistencia cambia y el cambio de voltaje es medido. Este valor es convertido a un valor correspondiente a la temperatura por una unidad central, ya sea un microprocesador, un PLC o una computadora. Para mejorar la eficiencia del termómetro resistivo, el elemento metálico debe de colocarse en una posición donde pueda percibir los cambios de temperatura.

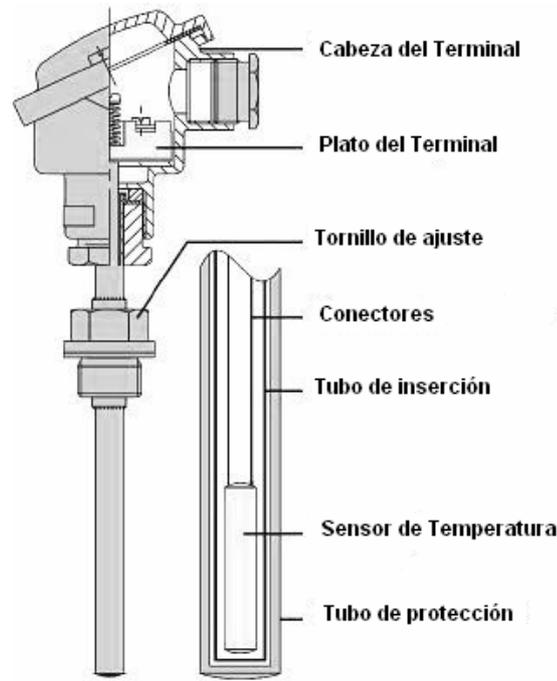
Las ventajas para un termómetro resistivo son:

- a) Muy preciso.
- b) Amplio rango de temperatura (-200 a 650 °C).
- c) Mayor voltaje de salida que un termopar.
- d) Excelente linealidad en la resistencia.
- e) Resistente a la corrosión y ambientes hostiles.

Entre las desventajas que presenta están:

- a) Mayor costo y tamaño que los termistores o el termopar.
- b) Auto calentamiento puede afectar la precisión de la medición.
- c) Menos duración de vida que el termopar en altas vibraciones o golpes.

Figura 25. Sensor de temperatura resistivo



Fuente: www.jumo.us

6.2.3. Termistores

Los termistores son dispositivos que cambian su resistencia eléctrica en relación con la temperatura. Están fabricados por dos o tres óxidos de metal que se encuentran unidos por una base cerámica y con cables soldados a la oblea semiconductora. A diferencia de los RTD, hay dos diferentes tipos, uno con un coeficiente de temperatura positivo, conocido por sus siglas en inglés como (PTC) y el segundo con un coeficiente de temperatura negativo (NTC). La resistencia de los termistores se puede hacer virtualmente lineal, mediante el uso de circuitos de soporte como el Puente Wheatstone. Los termistores pueden ser construidos en una variedad de formas. En general el comportamiento de los termistores no es lineal.

Los termistores con coeficiente negativo presentan cambios de resistencia con el incremento de la temperatura. Esta característica no es lineal, sino más bien exponencial, y no presenta problemas de histéresis. Son más utilizados con respecto a los termistores de coeficiente positivo, ya que usualmente tienen coeficiente de temperatura mucho más amplio que los PTC. El rango de operación es de -100 a 300 °C, que es mucho más pequeño que el de los RTD, sin embargo esto permite que sean de menor precio.

Las ventajas para el termistor son:

- a) Bajo costo.
- b) Rápida respuesta.
- c) Con un menor tamaño, lo que lo hace versátil.
- d) Excelente linealidad en la resistencia.
- e) Disponibles con una resistencia lineal.

Entre las desventajas están:

- a) Necesarios dispositivos adicionales en los casos no lineales.
- b) Auto calentamiento puede afectar la precisión de la medición.
- c) Rango de medición muy pequeño.
- d) Valor bajo de temperatura de exposición.

6.2.4. Termopar

El termopar es sin duda el sensor de temperatura más utilizado, por su versatilidad, simplicidad y fácil uso. Este utiliza una propiedad termoeléctrica llamada efecto Seebeck, que básicamente convierte una diferencia de temperatura en electricidad. El termopar está construido por la unión de dos metales diferentes que producen un pequeño voltaje, que es función de la diferencia de la temperatura entre un extremo llamado punto o unión caliente, con respecto al otro extremo conocido como punto o unión fría o de referencia. La diferencia de temperatura entre las dos uniones o puntos, que constituyen el termopar, permite la medición de un voltaje de unos pocos milivoltios. Dicho voltaje es cero si las dos uniones están a la misma temperatura, y crece cuando se detecta una diferencia de temperatura, hasta un punto de transición, donde el efecto se revierte. El voltaje es una función de la composición del material y de la estructura del metal conductor.

El hecho de que el voltaje sea muy bajo, hace que sea necesario la utilización de un amplificador, a menos que el termopar sea usado juntamente con un milivoltímetro sensible. Por otro lado, si la salida del termopar es usada para manejar más que un medidor de temperatura, se hace indispensable el utilizar un amplificador de DC, por ejemplo un amplificador operacional. Sin embargo se debe ser muy cuidadoso al seleccionar el amplificador, el cual debe tener una buena estabilidad.

Tabla III. Características de los termopares según clasificación ANSI

TIPO	PAR DE METALES	RANGO DE TEMP. (°C)	VOLTAJE A 400°C (mV)	Tolerancia ±	APLICACIÓN
B	PtRh/PtRh	870 a 1700	0.787	0.25%	Altas temperaturas. Baja salida.
E	NiCr/CuNi	-200 a 870	28.946	1.0 °C o 0.40%	Atmósfera inerte. Alto voltaje de salida.
J	Fe/CuNi	0 a 760	21.848	1.1 °C o 0.40%	Eficaz en el vacío. Atacado por oxígeno y ácidos
K	NiCr/NiAl	-200 a 1260	16.397	1.1 °C o 0.40%	Buena resistencia a corrosión
N	NiSi/NiCrSi	0 a 1260	12.974	1.1 °C o 0.40%	Alta resistencia a corrosión
R	PtRh/Pt	0 a 1480	3.408	0.6 °C o 0.10%	Para alta temperatura. Necesita cubierta de cerámica. Utilizado en Industria
S	PtRh/Pt	0 a 1480	3.259	0.6 °C o 0.10%	Para alta temperatura. Necesita cubierta de cerámica. Utilizado en Laboratorio.
T	Cu/CuNi	-200 a 370	20.81	0.5 °C o 0.40%	En atmósferas inertes o al vacío. No sujeto a corrosión. Para baja temperatura.

Fuente: John Webster. **The Measurement, instrumentation and sensors handbook. Página 1004.**

Se han hecho esfuerzos para estandarizar los distintos tipos de termopares, y el Instituto Nacional Estadounidense de Estándares (ANSI por sus siglas en inglés) ha designado 8 letras para identificarlos. Y en general se distingue dos grupos, los del tipo metal base, cuyos metales son el hierro y el constantán (Cu-Ni) y el tipo de metal noble, tales como platino-rodio y platino como segundo metal. Los de metal noble, llamados así por su resistencia a los ácidos, son utilizados en los termopares para altas temperaturas, aunque tienen

un nivel muy bajo de salida y necesitan una cubierta de cerámica para prevenir la oxidación. Los termopares que utilizan hierro como uno de los metales, requieren protección contra la herrumbre y contra la atmósfera con agentes oxidantes.

6.2.5. Pirómetro.

El pirómetro es un método de medición de temperatura sin contacto. Se basa en la Ley de Stefan – Boltzmann, que establece que toda materia que se encuentre a una temperatura distinta del cero absoluto y no sea infinita, radia energía como resultado de la agitación atómica asociada con su temperatura. La intensidad de la energía radiada por la superficie del cuerpo, aumenta proporcionalmente a la cuarta potencia de la temperatura absoluta del cuerpo. Existe entonces, una correlación directa entre la energía infrarroja emitida por un cuerpo y su temperatura.

El sensor piroeléctrico debe medir la energía emitida desde el objeto en una guía de onda de 4 a 20 μm y convertir esta medición en voltaje. Generalmente se utilizan lentes para concentrar la energía radiada. El voltaje de salida resultante, es amplificado y acondicionado para mostrar una lectura de temperatura. Sin embargo, hay factores que afectan dicha medición, como la reflexibilidad, que es la medida de la habilidad del material a reflejar la energía infrarroja. Emisividad, que es la capacidad de un material para emitir energía radiante. Si un objeto tiene una emisividad de 0.0 es un perfecto reflector, mientras que un objeto con un valor de 1.0 emite o absorbe el 100% de la energía infrarroja aplicada, y este es llamado cuerpo negro, el cual no existe en la realidad. En general se pueden distinguir tres tipos de pirómetros:

- a) Pirómetro óptico: el método de medición es mediante la comparación visual de la luminosidad del objeto radiante con un filamento de una lámpara incandescente. Esto se logra superponiendo ambas ondas luminosas, haciendo variar la corriente eléctrica de la lámpara hasta que deja de ser apreciable a la vista, la diferencia. La variación de corriente da el valor de la temperatura, su rango es de 0.45 a 0.75 μm . Su inconveniente es el hecho de tener que calibrar la luminosidad de la lámpara previamente. Este fue uno de los primeros aparatos de pirometría, y ya no son tan comunes.

- b) Pirómetros de radiación total: Tiene detectores que captan simultáneamente todas las radiaciones emitidas en la zona del espectro entre 0.3 y 20 μm . Dichos detectores son de tipo térmico, y están formados por varios termopares en serie. La energía radiante que reciben les eleva la temperatura y generan una tensión en milivoltios. La respuesta, sin embargo, es lenta y se deben utilizar lentes y filtros, lo que reduce la energía útil.

- c) Pirómetro de dos colores: Este tipo cuenta con dos detectores similares, pero cada uno recibe radiación en una longitud de onda diferente, debido a que tienen distintos filtros. La relación entre las dos señales permite calcular la temperatura del objeto sin necesidad de introducir el factor de emisividad.

Las ventajas para el pirómetro son:

- a) Permite mediciones sin contacto, como objetos en movimiento o peligrosos.

b) Rango de temperatura de -18 a 538 °C con un $\pm 1\%$ de precisión.

Entre las desventajas están:

a) Precisión es afectada por la superficie.

b) La temperatura ambiental puede afectar la medición.

c) Costo elevado, sobre todo si necesita circuitos de control.

d) La calibración es dificultosa y costosa.

e) Polvo, gas u otros vapores en el ambiente pueden afectar la medición.

6.2.6. Consideraciones en la selección

Una importante consideración para seleccionar un sensor de temperatura es el material del cual está hecho, ya que este puede tener limitaciones en determinado rango o condición. Además son importantes características como la tolerancia y la precisión. Sin embargo, una de las principales características que debe cumplir el sensor, es la seguridad del usuario. Esto implica, el seleccionar el tipo que ofrezca mejor rendimiento, y seguir los lineamientos y las recomendaciones del proveedor.

Entre las primeras consideraciones a realizar para la selección de los sensores de temperatura están: Determinar si el sensor requiere estar en contacto para realizar la medición. El rango de temperatura a la que será expuesto el sensor. Se debe conocer con qué rapidez cambia la temperatura.

Conocer la exactitud con la que se debe medir la temperatura. Se debe conocer el medio donde trabajará el sensor, si hay corrosión, vibraciones, humedad o cualquier otra condición que pueda averiar determinado tipo de sensor.

6.3. Medidores de pH

6.3.1. Definición de pH

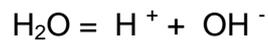
La medición de pH es la prueba más común en los laboratorios químicos, lo que refleja la importancia del agua como un solvente y reactivo. Desde el uso de un electrodo para determinar la concentración del ión de hidrógeno, el electrodo de vidrio y sus variantes han madurado en herramientas de análisis químico más precisas. Recientemente, se han desarrollado transistores de efecto de campo sensibles al pH, de un alto grado de miniaturización, conocidos como pHFETS, los cuales han producido medidores de pH de bolsillo, que soportan altas temperaturas y presiones.

El pH de una solución es la medida de la concentración de iones de hidrógeno y su cálculo es mediante el logaritmo inverso de la concentración de iones de hidrógeno:

$$\text{pH} = -\log_{10} (\text{H}^+)$$

Un valor de pH de 7.0 es considerado neutral. Esto significa que con un pH de 7.0 la concentración de iones de hidrógeno (H^+) es igual a los iones de hidróxido (OH^-). Es precisamente un valor de 7.0 el que se encuentra en el

agua pura. Considerando que el agua esta formada por la suma de los iones de hidrógeno y de hidróxido:



Y que en cualquier solución acuosa, la concentración de iones de hidrógeno multiplicada por la concentración de iones de hidróxido es constante:

$$K_w = (\text{H}^+) (\text{OH}^-)$$

El valor de K_w , aunque depende de la temperatura del líquido, se considera constante para una determinada temperatura. Con esto claro, se puede identificar los resultados de agregar ácidos o bases al agua. Al disolver ácidos en el agua, la concentración de iones de hidrógeno se incrementa, y puesto que el producto $(\text{H}^+) (\text{OH}^-)$ se debe mantener constante, los ácidos entonces disminuyen la concentración de iones de hidróxido. Por otro lado, el agregar una base al agua, tiene el efecto opuesto. Estos incrementan la concentración de iones de hidróxido y el valor de la concentración de iones de hidrógeno decrece. Para la medición del pH, se pueden distinguir dos métodos, el método electroquímico y el método óptico.

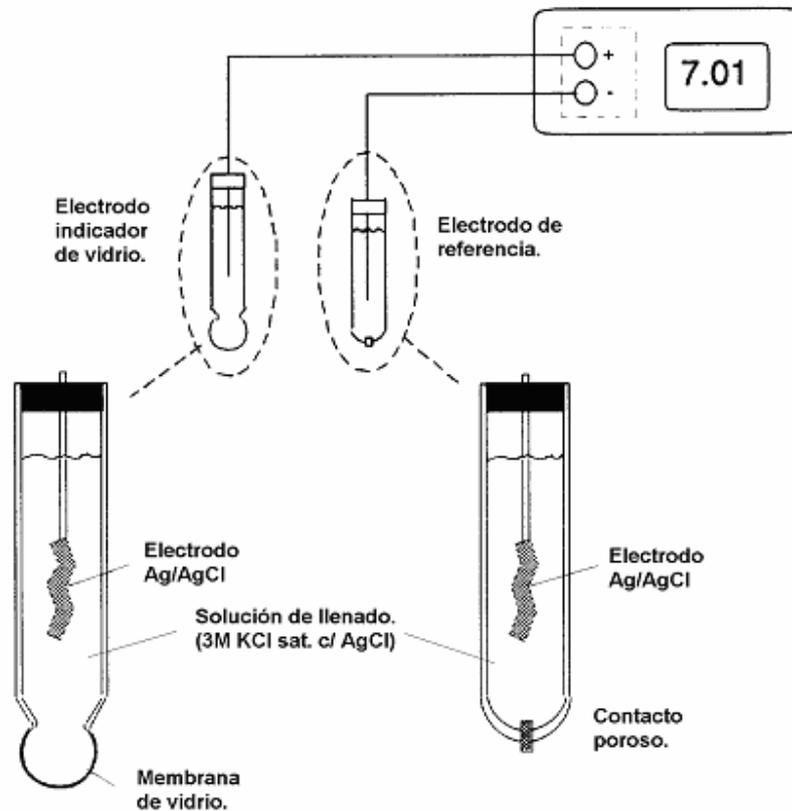
6.3.2. Métodos electroquímicos de medición de pH

El método electroquímico de medición de pH utiliza transductores, que convierten la actividad química del ión de hidrógeno a una señal electrónica, tal como una diferencia de potencial eléctrico o un cambio en la conductancia eléctrica. El método más utilizado es el del electrodo de membrana de vidrio. El medidor de pH registra una diferencia de potencial o voltaje, que se desarrolla entre un electrodo con membrana de vidrio y un electrodo de

referencia inmerso en la muestra. La membrana de vidrio del electrodo indicador intercambia iones entre los iones de hidrógeno de la solución y cationes univalentes de la membrana de vidrio. La sensibilidad del electrodo de membrana de vidrio a los cambios de pH es pequeña, así un adecuado electrodo de referencia y una impedancia de entrada alta, son necesarios para obtener una medición precisa. La membrana de vidrio, actúa como transductor de pH, y tiene un lado en contacto con la muestra, mientras que el otro lado está en contacto con una solución de llenado, que es un electrolito con una composición y pH definido. El electrodo de referencia también está sumergido en un electrolito, y es de un material cerámico poroso, que hace que el electrodo tenga contacto físico y eléctrico con la muestra.

El otro método electroquímico es el de pHFETs, método que ha sido desarrollado recientemente, y está basado en el uso de un transistor de efecto de campo sensible a iones (ISFET por sus siglas en inglés), que es una variante derivado de los MOSFET (FET de metal óxido conductor), pero se diferencia de éste, por el hecho de que el ISFET no posee una compuerta metálica y el dieléctrico de esta misma región se expone directamente a la solución y es de un material que es sensible al pH, tal como nitrato de silicón, óxido de aluminio o de tantalio. Esto significa que utilizan como principio de medida, la modulación del canal del transistor, mediante la diferencia de tensión que se establece entre la muestra y la puerta del dispositivo. La tensión de salida del transistor es función del pH de la muestra. En el ISFET, la corriente I_D fluye a través del canal, y depende del potencial de interfaz que se desarrolla entre el óxido y la muestra. Este tipo de medidor es utilizado en soluciones fuertemente alcalinas, donde el método convencional por membrana de vidrio, reacciona con los iones de sodio y ocasiona lecturas bajas erróneas.

Figura 26. Medidor de pH por membrana de vidrio

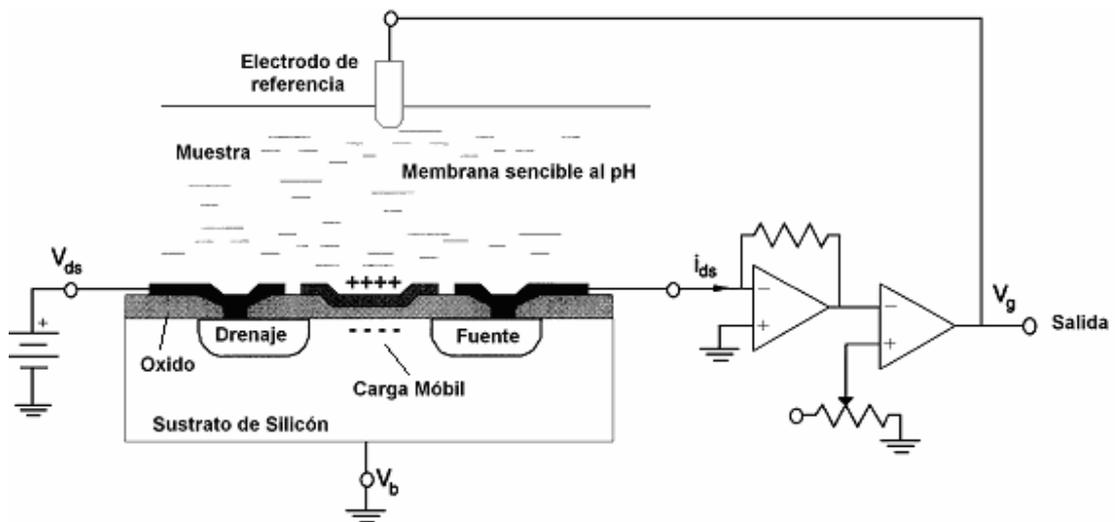


Fuente: John Webster. **The Measurement, instrumentation and sensors handbook**. Página 1927.

Entre sus ventajas también está el hecho de ser más pequeño que los de membrana de vidrio. Sin embargo se debe considerar que son sensibles a la luz, y esto se debe a la ausencia de un metal sobre el dieléctrico de la puerta del ISFET, y por el hecho de que se deja descubierto tanto parte de las difusiones como la puerta selectiva a iones que está en contacto con la solución a analizar. Además se hace necesario que el sensor funcione a temperatura constante para lograr resultados confiables, ya que presenta inestabilidad térmica. El proceso de encapsulación y aislamiento de los contactos eléctricos,

es de vital importancia durante la fabricación, ya que de esto depende mucho la vida útil del dispositivo. Una filtración de la solución líquida, provoca corriente de fuga entre los contactos y puede producirse un cortocircuito, estropeando el dispositivo.

Figura 27. Medidor de pH por ISFET, incluye circuito amplificador



Fuente: John Webster. **The Measurement, instrumentation and sensors handbook**. Página 1932.

6.3.3. Métodos ópticos de medición de pH

Este método se basa en los indicadores ópticos de pH, los cuales cambian sus propiedades ópticas en función de la muestra. Depende de la propiedad óptica que cambia, los sensores pueden clasificarse en sensores de absorbancia o luminiscencia. En los primeros, la relación entre intensidad de la luz incidente y la luz reflejada están en directa relación con el valor de pH de la muestra. En tanto que en los de luminiscencia, la dependencia con el pH viene dada por el cambio en la longitud de onda entre la luz incidente y la reflejada.

El sensor óptico más conocido es probablemente el de tira de pH. Consiste en un tira de papel o plástico que tiene impregnado un indicador óptico, el cual hace que la tira cambie de color según el valor de pH, lo que lo hace un método simple, barato y rápido, aunque presenta los inconvenientes de no ser automático y poco preciso, ya que esta en unidad de pH. Esto ha incentivado el desarrollo de sensores de fibra óptica, también llamados optodos y optrodos. En general, un sensor de fibra óptica, consiste en un indicador inmovilizado, cuyas propiedades ópticas se modifican en función de la concentración de la muestra. La señal óptica generada es enviada a través de una fibra óptica hasta un detector, y luego amplificada y procesada convenientemente. En el caso de los sensores que funcionan por absorbancia, se rigen por la ley de Lambert – Beer, que establece una relación de proporcionalidad directa entre la concentración de sustancia absorbente y la cantidad de luz absorbida por ésta, para una determinada longitud de onda.

Las ventajas que tienen los sensores de fibra óptica son varias, entre ellas está el hecho de no requerir señal de referencia, lo que aumenta la estabilidad de la medida y reduce los costos de fabricación. Al utilizar fibras de baja pérdida como guías de onda, permite la medida a grandes distancias, y por su gran ancho de banda, se puede transmitir más información, que en un par eléctrico. Por su flexibilidad y la separación física que éstas introducen entre la terminal sensible y el transductor, así como el hecho de que soportan medios hostiles como la presencia de radiaciones electromagnéticas o ionizantes, condiciones extremas de temperatura o el ataque de ácidos o bases presentes en las muestras, posibilita su uso en multitud de procesos.

Sin embargo, entre las limitantes de estos sensores se puede mencionar, el que la señal óptica detectada por el equipo de medida debe proceder única y exclusivamente del indicador, por lo que debe evitarse exposición de la terminal

a la luz ambiente. Los indicadores pueden sufrir degradación por la exposición constante del sensor a la fuente de luz. En algunos casos presentan tiempos de respuesta elevados. Y la principal desventaja es que no miden actividad, sino concentración, siendo por ello su señal analítica fuertemente dependiente de la fuerza iónica del medio.

6.4. Controlador lógico programable (PLC)

El controlador lógico programable o PLC (por sus siglas en inglés Programmable Logic Controller) es un dispositivo electrónico que forma parte de la familia de las computadoras, que utiliza circuitos integrados en lugar de dispositivos electromecánicos, para implementar funciones de control y permite automatizar procesos secuenciales industriales. Tiene la capacidad de almacenar instrucciones, tales como secuencias, tiempos, conteos, funciones aritméticas, manipulación de datos, operaciones lógicas y booleanas, comunicación y control de maquinaria industrial y procesos. El control, coordinación y supervisión de los procesos se lleva a cabo gracias a un hardware adecuado a la aplicación y un programa específico del proceso.

Las principales ventajas que se obtienen al utilizar un controlador programable son:

- a) Flexibilidad. Facilita cambios en hardware y/o software, sea por ampliación, mejoras o nuevas aplicaciones.
- b) Confiabilidad. Trabaja autónomamente, evitando manipulación constante.

- c) Potencia. Por sus avanzadas funciones, permiten un control de procesos sofisticados.
- d) Modularidad. Permite aumento o reducción en las funciones, con ahorro de tiempo, espacio y costo.
- e) Espacio. Ocupa muy poco espacio comparado con otras soluciones.
- f) Tiempo. Ahorro significativo en tiempo de instalación, programación, puesta en servicio, mantenimiento preventivo y mantenimiento correctivo, lo que redundará en un corto tiempo fuera de servicio.

Entre las desventajas están:

- a) Costo de inversión inicial elevado.
- b) La velocidad relativamente baja, en aplicaciones con muchos datos.
- c) En algunos casos el adiestramiento debe ser específico.

6.4.1. Principios de operación del PLC

En general un PLC se divide en dos secciones básicas: La unidad central de proceso y el sistema de interfases de entrada/salida. La unidad central de proceso (CPU por sus siglas en inglés), se encarga de gobernar todas las actividades del PLC, y puede subdividirse en tres componentes: Procesador, sistema de memoria y sistema de alimentación. El procesador es el cerebro del PLC y ejecuta las instrucciones del programa. El sistema de memoria almacena el programa y los datos de entrada y el resultado de operaciones

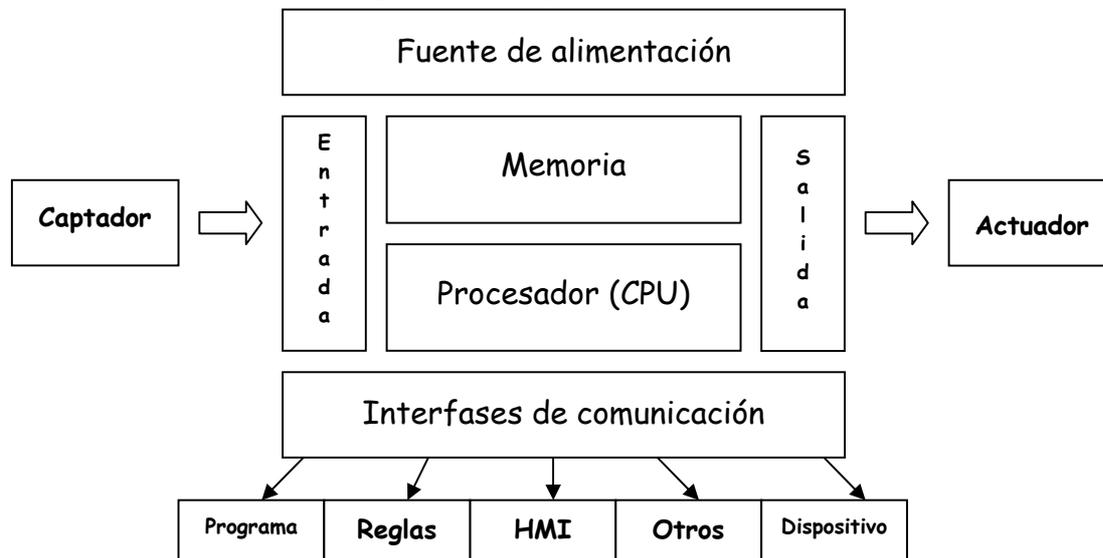
ejecutadas por el procesador. El sistema de alimentación provee todos los voltajes requeridos para la operación de las unidades del CPU. El sistema de interfases de entrada/salida, envía respuestas y recibe señales de los distintos dispositivos, desde y hacia la unidad central de proceso. Aunque generalmente no es considerado parte del controlador, el dispositivo de programación, ya sea una computadora personal o una unidad de programación portátil, es requerido para almacenar en memoria el programa de control.

La operación de un controlador programable o PLC es simple. El sistema de entrada/salida está físicamente conectado los dispositivos utilizados en el control del proceso. Estos dispositivos pueden ser digitales o analógicos y puede ser un interruptor, una botonera, un arrancador, algún tipo de transductor o medidor, un relé, o simplemente un diodo tipo led. Las interfases de entrada/salida, proveen la conexión entre el CPU y la información de entrada y los dispositivos de control de salida. Durante su operación, el CPU completa los siguientes procesos: 1) Lee o acepta los datos de entrada desde los dispositivos de campo vía el interfaz de entrada. 2) Ejecuta el programa almacenado en el sistema de memoria de acuerdo con los valores de entrada y 3) escribe o actualiza los dispositivos de salida, vía el interfaz de salida.

6.4.2. Estructura interna del PLC

Un PLC se puede dividir en dos partes básicas: Unidad Central de Proceso o en forma abreviada CPU y las interfases de entrada/salida también llamadas en forma abreviada como I/O (derivadas del ingles Input/Output). El CPU es dividido en otras tres partes importantes: Microprocesador, Memoria y Sistema de alimentación. Si embargo, para que un PLC sea operativo son necesarios otros elementos tales como: interfases, consola de programación y dispositivos periféricos.

Figura 28. Arquitectura del PLC



Fuente: <http://materias.fi.uba.ar/6528/>

El CPU es el cerebro del PLC. En el pasado eran microcontroladores de 8 bits tal como el 8051, sin embargo en la actualidad se encuentran microcontroladores de 16 y 32 bits. El CPU toma control de las comunicaciones, interconexión entre las partes del PLC, ejecución del programa, operación de la memoria, supervisión de las entradas, y ajuste de las salidas. Además realiza un sinnúmero de chequeos a la memoria para verificar que no tenga daño, así como verificar errores dentro del PLC.

El procesador, esta constituido por el microprocesador, el reloj o generador de onda cuadrada, y algún chip auxiliar. Se encarga de realizar una gran cantidad de operaciones entre las que se encuentran: Operaciones de tipo lógico, operaciones de tipo aritmético y operaciones de control de la transferencia de información dentro del PLC. Internamente el microprocesador

se puede dividir en lo siguiente: 1) Unidad aritmética y lógica o ALU, donde se realizan los cálculos y decisiones lógicas. 2) Unidad de control (UC) o decodificador de instrucciones, que se encarga de decodificar las instrucciones leídas de la memoria y generar señales de control. 3) Acumulador, que se encarga de almacenar el resultado de la última operación realizada por el ALU. 4) Flags, o indicadores de resultado, que pueden ser consultados por el programa. 5) Contador de programa, que se encarga de la lectura de las instrucciones. 6) Bus interno, es más bien una zona donde en forma paralela, se transmiten datos, direcciones, instrucciones y señales de control entre las partes del microprocesador.

La memoria, permite el almacenamiento de datos, programas y configuración. Para ello se utilizan memorias tipo RAM, ROM, EPROM y EEPROM. La memoria tipo RAM se utiliza principalmente como memoria interna y en los casos que es posible asegurar el mantenimiento de dichos datos por medio de una batería exterior, almacenan los programas. La memoria ROM, se utilizan para almacenar el firmware del sistema, instalado por el fabricante. La memoria EPROM se utiliza para almacenar programas de usuario. Las memorias EEPROM se emplean para almacenar programas, aunque actualmente es frecuente el uso de una combinación de RAM y EEPROM, donde esta última sirve de seguridad para almacenar el contenido de las RAM. Al reanudar la alimentación, el contenido de las EEPROM se traslada a las RAM, ya que este método es más eficiente al de RAM con batería. La memoria se puede dividir en tres tipos: 1) Memoria de datos, donde se almacenan los datos, tales como estado de bits, palabras, tiempos, resultados entre otros. 2) Memoria de programa, guardan las líneas del programa a ejecutar. 3) Memoria de configuración, donde se almacenan configuraciones del PLC y módulos así como los valores de las variables.

El sistema o fuente de alimentación proporciona las tensiones necesarias para el funcionamiento de los distintos circuitos del sistema. Las alimentaciones más usuales son las de continua a 24 voltios y en el caso de alternas a 110/220 voltios. Es la propia CPU que alimenta las interfaces conectadas a través del bus interno. La alimentación de los circuitos de I/O se realizan con valores alternos de 48, 110 y 220 voltios, y en caso de valores continuos de 12, 24 o 48 voltios. En algunos casos se incluye una batería como alimentación extra en caso de fallo de la alimentación externa.

Las interfases de entrada adaptan y codifican en forma comprensible para el CPU, las señales provenientes de los dispositivos conectados a su entrada o captadores. Mientras que las interfases de salida, trabajan en forma inversa a las entradas, ya que decodifican las señales procedentes del CPU y las amplifican, para gobernar los dispositivos de salida o actuadores. Tanto las entradas como las salidas, se pueden encontrar en dos tipos, analógicas y digitales.

Las entradas analógicas permiten que el PLC trabaje con captadores analógicos y lean señales de tipo analógicas tales como temperatura, presión o nivel. Los módulos analógicos de entrada convierten una magnitud analógica en un número que se almacena en una variable interna. Para ello se lleva a cabo una conversión analógica digital. Los módulos de entrada analógica pueden leer tensión o corriente. El proceso de adquisición consta de las siguientes etapas: 1) Filtrado. 2) Conversión analógica a digital y 3) Memoria interna.

Las entradas digitales, permiten conectar al PLC captadores de dos estados o binarios. Los módulos de entrada digitales trabajan con señales de tensión, así que la tensión alta representa un 1 y la baja un 0. El proceso de

adquisición de la señal digital consta de varias etapas: 1) Protección contra sobre tensiones. 2) Filtrado. 3) Puesta en forma de la onda y 4) Aislamiento galvánico o por optoacoplador.

Las salidas analógicas permiten que el valor de una variable numérica interna del PLC se convierta en tensión o corriente. Esta conversión se realiza con una precisión o resolución determinada y cada cierto intervalo de tiempo. Esta tensión o corriente sirve para el mando de actuadores analógicos como variadores de velocidad, reguladores de temperatura, entre otras. El proceso de envío de la señal analógica consta de varias etapas: 1) Aislamiento galvánico. 2) Conversión digital a analógico. 3) Circuitos de amplificación y adaptación y 4) Protección electrónica de la salida.

Las salidas digitales, permiten al PLC actuar sobre actuadores digitales. Sin embargo, los módulos de salida estáticos al suministrar tensión, solo pueden actuar sobre elementos que trabajen a la misma tensión todos, en cambio los módulos de salida electromecánicos, al ser libres de tensión, pueden actuar sobre elementos que trabajen a tensiones distintas. Las etapas para el envío de señales digitales son: 1) Puesta en forma. 2) Aislamiento. 3) Circuito de mando (relé interno). 4) Protección electrónica y 5) Tratamiento de cortocircuitos.

También se debe considerar el tipo de módulo de salida, los cuales son:

- 1) Módulos de salida a relé: Son usados en circuitos de corriente continua y alterna. Están basados en la conmutación mecánica, por la bobina del relé, o de un contacto eléctrico.
- 2) Módulos de salida a transistores: El uso de este tipo de módulos es exclusivo de los circuitos de corriente continua. Al igual que los triacs, es utilizado en circuitos que necesiten maniobras de conexión y desconexión muy rápidas.
- 3) Módulos de salida a triacs: Se utilizan en

circuitos de corriente continua y corriente alterna que necesiten maniobras de conmutación muy rápidas.

6.4.3. Lenguajes de programación para PLC

La Comisión Electrotécnica Internacional (conocida por sus siglas del inglés IEC para International Electrotechnical Commission) establece en su norma IEC 61131 en la parte 3 publicada en 1993 bajo el título Lenguajes de programación, la estructura del software y los lenguajes de ejecución de programas. Con esta normativa, más conocida como norma IEC 61131-3, se definen los 5 lenguajes de programación para su utilización en el control de un PLC, y se estandariza la sintaxis y semántica de los mismos. Cada lenguaje presenta aspectos que facilitan su aplicación para solucionar determinados problemas de control.

Los lenguajes establecidos por la norma son: 1) Lista de instrucciones (Instruction List IL). Este es un tipo de lenguaje textual y característico de los modelos sencillos, con un procesador y solamente un registro. Basado en una lista de instrucciones que se ejecutan en orden secuencial, cada instrucción contiene una sola operación y únicamente son funciones básicas, por lo que se utilizan en aplicaciones simples. 2) Diagrama Ladder (Ladder Diagram LD). También conocido como diagrama de contactos y es un lenguaje de programación gráfico, derivado del diagrama del circuito, utiliza la simbología estándar americana para los esquemas funcionales, y utiliza elementos básicos como contactos y bobinas, aunque incluye bloques con operaciones aritméticas

Figura 29. Ejemplos de programación en distintos lenguajes para PLC

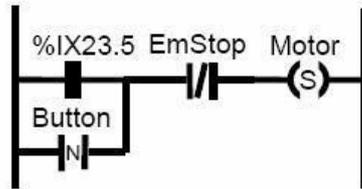


Diagrama Ladder (LD)

LD	%IX23.5
ORN	Button
ANDN	EmStop
S	Motor

Lista de Instrucciones (IL)

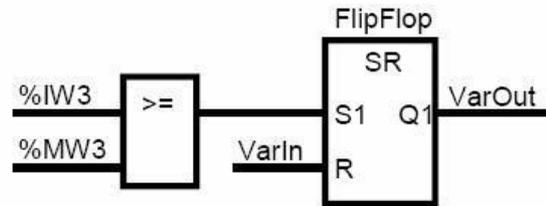


Diagrama de Bloques Funcionales (FBD)

```
FlipFlop ( S1 := (%IW3 >= %MW3),
           R := VarIn );
VarOut := FlipFlop.Q1;
```

Texto Estructurado (ST)

Fuente: John Karl-Heinz. **IEC 61131-3: Programming industrial automation systems.**

Página 24

y lógicas básicas, contadores, comparadores y es muy útil en aplicaciones de encendido y apagado. 3) Diagrama de bloques funcionales (Function Block Diagram FBD). Lenguaje gráfico que se origina del diagrama lógico para el diseño, las funciones tiene variables de entrada y de salida y utiliza el concepto de librerías de bloque y este representa muy bien la interacción entre distintos dispositivos y el proceso físico. 4) Texto estructurado (Structured Text ST). Lenguaje de alto nivel basado en Pascal, y consiste en expresiones e instrucciones, facilita las funciones de control avanzadas y cálculos complejos. 5) Gráfico funcional de secuencias (Sequential Function Chart SFC). Es un lenguaje para la estructuración de programas orientados al control y procesos secuenciales y sus elementos básicos son las etapas o acciones y transiciones o eventos, permite la estructura jerárquica del programa.

Figura 30. Ejemplo de programación en lenguaje SFC para PLC

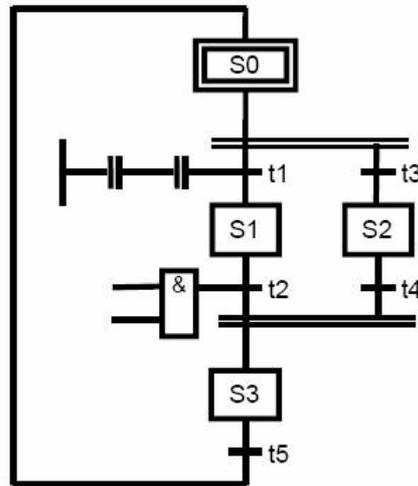


Gráfico Funcional de Secuencias (SFC)

Fuente: John Karl-Heinz. **IEC 61131-3: Programming industrial automation systems.**

Página 25

6.5. Selección equipo electrónico

Luego de documentar todo el equipo electrónico que podría ser utilizado en el proceso de tratamiento de agua y de especificar las posibles soluciones, se presenta la selección de dicho equipo electrónico que permita tener un buen funcionamiento y una implementación más acorde a las necesidades del proyecto. El razonamiento de la selección es principalmente técnico.

6.5.1. Selección de sensores de nivel

Después de considerar varios tipos de sensores de nivel, se seleccionó el de conductividad, ya que permite conocer hasta tres niveles: alto, medio y bajo, en un solo dispositivo. La señal de respuesta que se necesita es

solamente un pulso, lo que se adapta perfectamente a la entrada de un PLC. El sensor de conductividad permite el envío de un pulso alto o bajo, de acuerdo al nivel del tanque, por lo que es un interfaz apropiado entre el PLC y el nivel de los tanques. Puesto que también puede operar un dispositivo de mayor consumo, como una bomba de agua, en forma directa, es posible su utilización como interruptor directo, en el caso de que se suprima el PLC por un período de tiempo o definitivamente.

6.5.2. Selección de sensores de temperatura

En el caso de los sensores de temperatura, se escogió el tipo RTD o termómetro resistivo PT100, que es estándar para entradas de PLC. Esto se debe a que es bastante preciso, tiene un rango amplio de medición de temperatura, el voltaje de salida es relativamente alto lo que evita el tener que usar un amplificador y permite una mayor certeza en la medición al existir una mayor diferencia por cada variación de temperatura. La respuesta presenta buena linealidad y un aspecto muy importante es que resiste la corrosión, y aunque es frágil en caso de vibraciones o golpes, al estar sujeto en el tanque, permite su utilización en este proyecto en particular.

6.5.3. Selección de medidores de pH

El método seleccionado de medición de pH es el electroquímico que utiliza transductores, que convierten la actividad química del ión de hidrógeno a una señal electrónica, ya sea una diferencia de potencial eléctrico o un cambio en la conductancia eléctrica. Para ello es utilizado el electrodo de membrana de vidrio. El medidor de pH registra una diferencia de potencial o voltaje, que

se desarrolla entre un electrodo con membrana de vidrio y un electrodo de referencia inmerso en la muestra. Los electrodos tienen una composición Ag/AgCl y permiten un rango completo de medición de 0 a 14, que incluyen modelos sumergibles. Además tiene una salida 4 a 20 mA que es compatible con una entrada estandarizada analógica de PLC.

6.5.4. Selección de PLC

Existen varias marcas de PLC en el mercado local que ofrecen varias facilidades y que se adaptan al proyecto. Sin embargo, se seleccionó el PLC Logo Siemens, por su economía, prestaciones, funcionalidad, adaptación y facilidad al programar. Entre sus facilidades se pueden mencionar las siguientes:

Integración: Control, unidad de operación y visualización, fuente de alimentación.

Extensión. Pueden adicionarse módulos de acuerdo a la cantidad de entradas y salidas.

Modificaciones. Estas se pueden realizar, en el dispositivo propio, vía módulo de memoria, o vía PC.

Funciones. Tiene 34 funciones, entre básicas y especiales, así como reloj temporizador y marcas binarias.

Entradas. Digitales y analógicas (0 a 10 V., 0 a 20 mA y PT100) estándar para varios tipos de sensores.

Salidas. Digitales. Tipo relay hasta 10A y tipo transistor hasta 0.3A.

Simulación. Potente software que permite la simulación fuera de línea, con simulación del tiempo que permite pausas y ejecución por ciclos, indicación en tiempo real de los estados de cada bloque funcional y de las salidas así como la variación de los valores de las entradas analógicas.

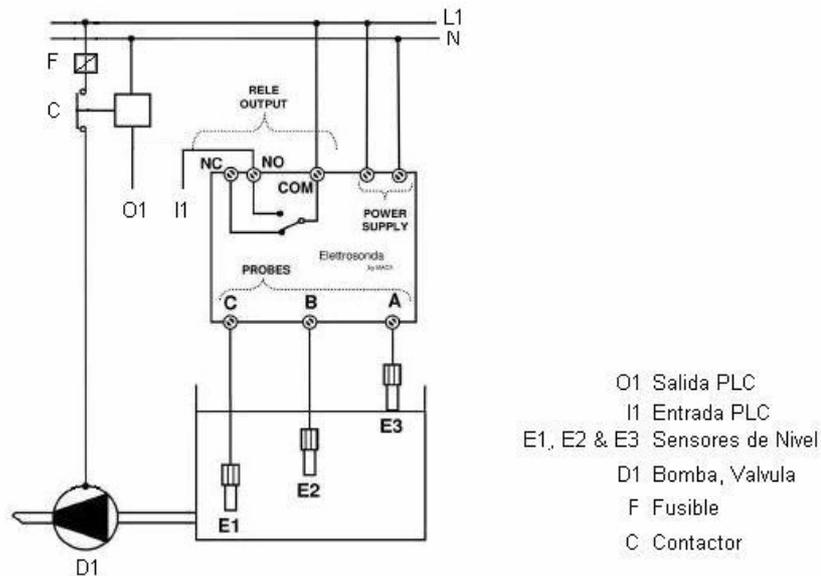
7. IMPLEMENTACIÓN FINAL

7.1. Circuitos y diagramas

Una vez seleccionados todos los dispositivos eléctricos y electrónicos, es posible crear los circuitos que, en general, puedan ser aplicados en la implementación de la planta de tratamiento de agua. Para la solución eléctrica final, las bombas centrífugas de agua, las válvulas solenoides y los mezcladores, ya que se pueden considerar eléctrica y funcionalmente parecidos, la solución propuesta para su control es la misma. En el caso de las bombas de agua y de las válvulas solenoides, la señal de activación es enviada por el PLC, toda vez el tanque precedente y el posterior tengan los niveles adecuados, esto es nivel alto el primero y nivel bajo el segundo, para lo cual se utilizan los sensores de nivel seleccionados. Dicha verificación se mostrará en un circuito posterior. En el caso de los mezcladores, se activan al estar el tanque en el nivel alto y por medio de un temporizador en el programa, actúan por determinado tiempo.

Para poder controlar las bombas de agua o válvulas, es necesario conocer el nivel de los tanques que conectan dichos dispositivos. El sistema de los sensores de nivel seleccionados, también conocidos como electro sonda, poseen tres electrodos o sensores y se muestra en la siguiente figura. Cuando el nivel del agua es bajo, únicamente E1 esta inmerso, y el contacto esta en la posición NC. Ahora bien, cuando el nivel del agua sube hasta el nivel más alto, hasta cubrir E3, el contacto conmuta hacia la posición NO y permanece en esta posición, hasta que el nivel desciende de nuevo hasta el mas bajo.

Figura 31. Circuito de control para bombas de agua y válvulas.



Fuente: www.mac3.it Adaptado

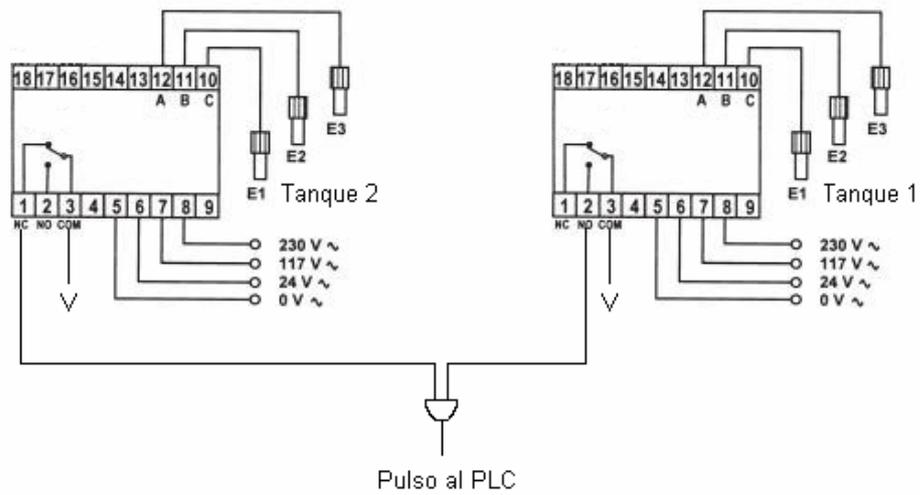
De acuerdo a estas especificaciones, se construye el circuito para controlar el nivel. Es necesario conocer el momento en que el tanque que precede a la bomba o válvula esté lleno y que el tanque siguiente se encuentre en el nivel más bajo, para que cuando se dé este caso, se active la bomba o válvula, que transfiera el líquido de un tanque al otro. Con esto se puede realizar la tabla de verdad para realizar el circuito combinacional. Y a continuación se pueden establecer las condiciones, para accionar las distintas bombas y válvulas de acuerdo al esquema general de la ubicación de cada una de ellas.

Tabla IV. Tabla de verdad para circuito combinacional de control de nivel

Tanque 1	Nivel			
	Bajo	Bajo	Alto	Alto
Tanque 2	Bajo	Alto	Alto	Bajo
	1	0	1	1
	0	0	0	1
Pulso al PLC	0	0	0	1

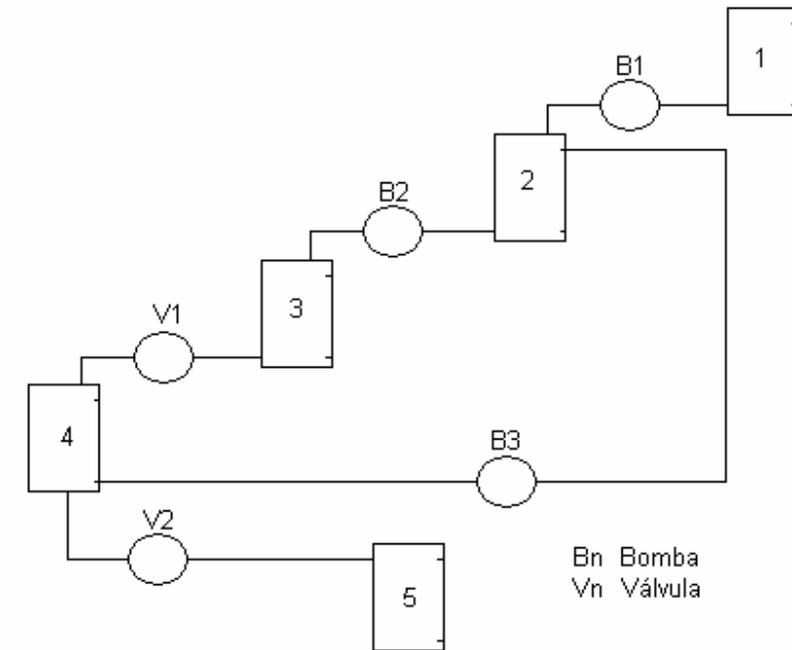
Fuente: **Elaboración propia.**

Figura 32. Circuito de control del nivel



Fuente: **www.mac3.it Adaptado**

Figura 33. Ubicación general de bombas y válvulas



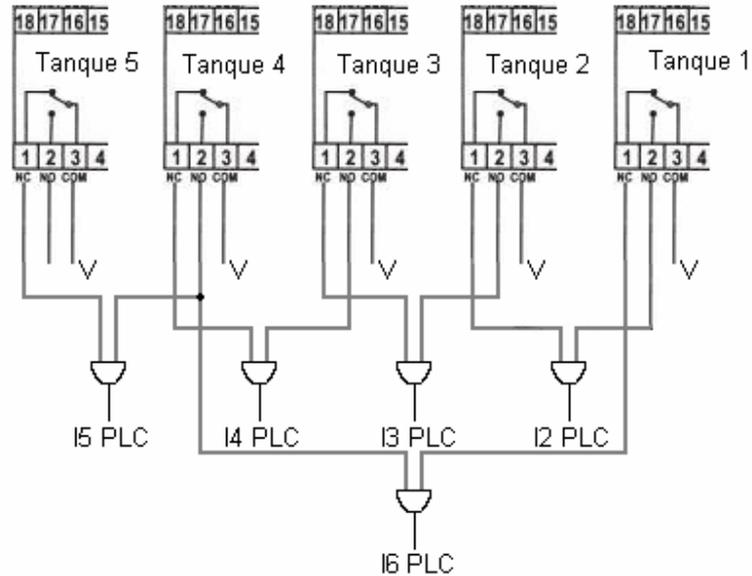
Fuente: **Elaboración propia.**

Tabla V. Tabla de estados de niveles para activar bombas y válvulas

Nivel Bajo	Nivel Alto	Activar
Tanque 2	Tanque 1	B1
Tanque 3	Tanque 2	B2
Tanque 1	Tanque 4	B3
Tanque 4	Tanque 3	V1
Tanque 5	Tanque 4	V2

Fuente: **Elaboración propia.**

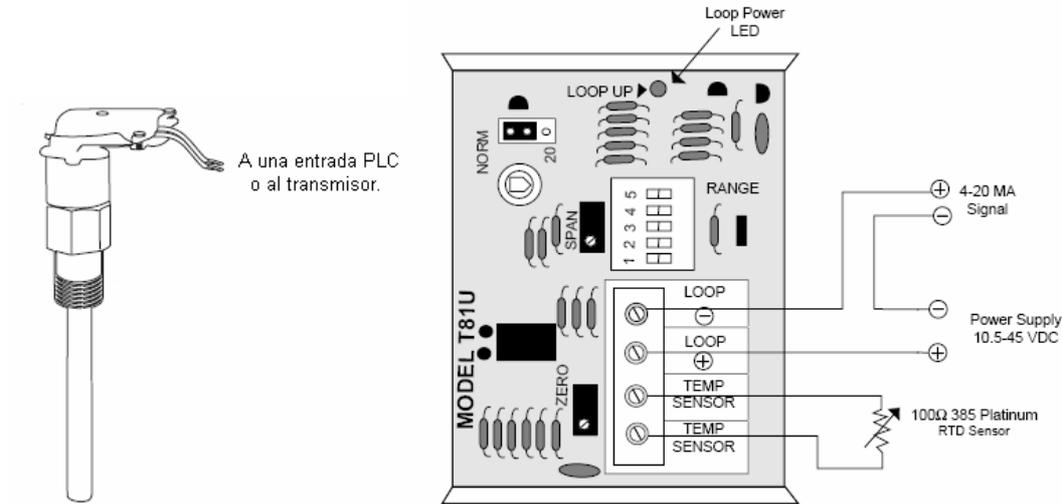
Figura 34. Circuito de control del nivel completo con entradas al PLC



Fuente: **Elaboración propia.**

Para la conexión del sensor de temperatura o RTD, se pueden escoger entre dos variantes. La primera es instalando únicamente el sensor, el cual es sumergible. La temperatura medida por el mismo, es interpretada por el valor de resistencia que presenta, según la tabla dada por el fabricante y que es lineal para la mayor parte del rango, lo que hace posible conocer la temperatura en todo momento. La segunda variante es utilizar un transmisor que reciba el valor de resistencia del sensor, de acuerdo a la temperatura y convierte este dato un valor de salida del tipo 4 a 20 mA, el cual puede ser interpretado por el PLC en una entrada analógica.

Figura 35. RTD sumergible de 100 ohms de platino y transmisor



Fuente: www.kele.com

En general, la temperatura de las aguas residuales no debe variar mucho de la temperatura ambiente, por lo que no es necesario manejar un rango muy amplio de temperatura, tanto en el RTD como en el transmisor. A continuación se muestra la tabla de valores de resistencia que presenta el sensor de temperatura RTD 100 ohms de platino en un rango de 0 a 100 °C, lo que permite interpolar los valores medidos en la recta de operación del dispositivo.

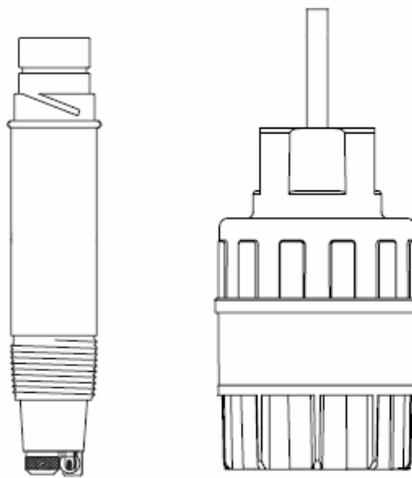
Tabla VI. Tabla de valores de resistencia del RTD contra temperatura

°C	Ohms
0	100.000
10	103.904
20	107.795
30	111.675
40	115.543
50	119.399
60	123.243
70	127.075
80	130.895
90	134.703
100	138.500

Fuente: www.kele.com

Para la medición de pH, es necesaria la utilización de un sensor y de un preamplificador, cuya salida es estándar de 4 a 20 mA, que puede ser interpretada por el PLC. El sensor seleccionado utiliza la técnica de 3 electrodos diferenciales. El electrodo de pH y el de referencia se comparan contra un electrodo de tierra. Lo novedoso de esta medición se basa en el electrodo de referencia, el cual tiene un puente salino reemplazable y la cámara electrolítica que puede rellenarse de nuevo y se encuentra dentro de un bulbo de vidrio. Esto ayuda a extender la vida del electrodo y reducir el mantenimiento y reemplazo. También es del tipo plano, que permite un eficaz auto limpieza, reduciendo el mantenimiento preventivo. Tanto, el sensor como el preamplificador, son sumergibles, lo que permite una medición en línea, más fiable y segura.

Figura 36. Sensor de pH diferencial plano y preamplificador

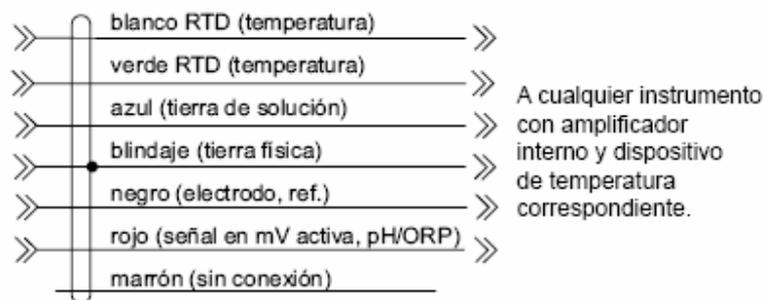


Fuente: www.gfsignet.com

La salida del preamplificador, puesto que tiene el estándar de 4 a 20 mA., puede ser enviada al PLC para que sea interpretada, y se tome la acción necesaria. El agua residual se puede considerar propiamente tratada si el pH esta en el rango de 6 a 9, todo valor diferente a este rango, produce que el

agua residual sea enviada de vuelta al tanque Neutralizante para que pase por el proceso de nuevo. El transmisor se encarga de convertir los valores de mV al estándar 4 a 20 mA., y mediante la introducción de parejas de valores de mA. contra valores de pH ya puede ser interpretado por el PLC.

Figura 37. Conexiones a la salida del preamplificador



Fuente: www.gfsignet.com

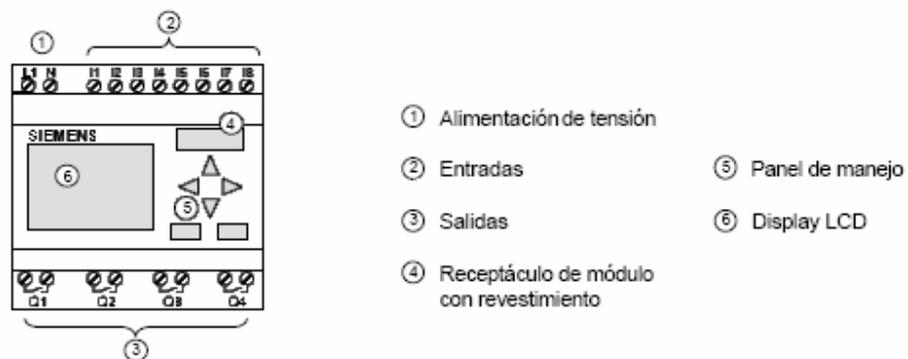
Tabla VII. Tabla de valores de mV a la salida del sensor contra pH

Valores de mV a 25 °C	
pH	mV
0	+413mV
1	+354 mV
2	+295 mV
3	+236 mV
4	+177 mV
5	+118 mV
6	+59 mV
7	0 mV
8	-59 mV
9	-118 mV
10	-177 mV
11	-236 mV
12	-295 mV
13	-354 mV
14	-413mV

Fuente: www.gfsignet.com

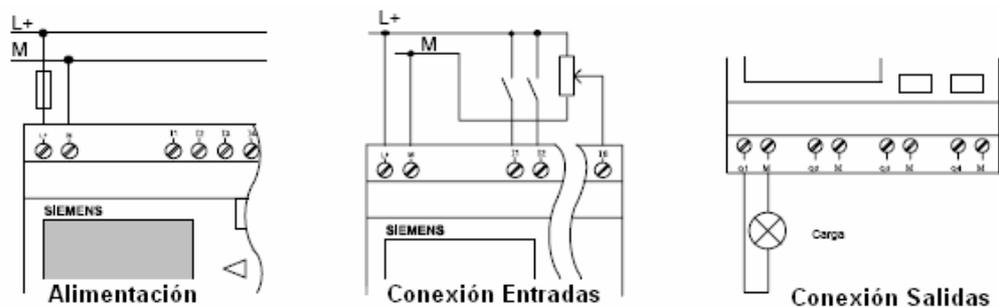
Para el control general se determinó que la mejor solución es un PLC Logo Siemens en su variante de 24V, que incluye pantalla LCD con luz para mostrar estados de entradas y salidas, valores de variables, tiempo, textos y mensajes. En su versión estándar tiene 8 entradas, de las cuales 4 pueden ser analógicas y 4 salidas digitales a transistor. Puesto que son necesarias más salidas, se adiciona dos módulos de expansión que proporciona 8 entradas digitales y 8 salidas digitales más. Para alimentación se incluye un módulo transformador de 110V a 24 V y hasta 4 amperios.

Figura 38. PLC Logo Siemens básico 24V y sus partes



Fuente: www.automation.siemens.com

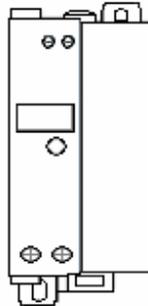
Figura 39. Conexiones Logo Siemens



Fuente: www.automation.siemens.com

Puesto que las salidas a transistor del PLC son de bajo amperaje, un máximo de 0.3 A., se hace necesario la utilización de dispositivos que separen el PLC de las cargas, que tiene un consumo mucho mayor. Para este fin, se seleccionó el relé de estado sólido, también conocido por sus siglas en inglés de RSC. Estos tienen una entrada de bajo voltaje y consumo, que se adaptan a la salida del PLC de 24 V. A la salida pueden conectar cargas de 110 V, 1.5 HP y hasta 45 A.

Figura 40. Relé de estado sólido, modelo RSCDN-45A



Fuente: www.idec.com

7.2. Programa PLC

Para el funcionamiento y la interacción de los circuitos descritos anteriormente, la solución final propuesta del proyecto incluye la realización de un programa para un PLC Logo Siemens, para la cual se utiliza el programa propietario LOGO! Soft Comfort Versión 6.1.5. La programación en dicho software se realiza en el lenguaje de programación FBD o Diagrama de Bloques Funcionales, aunque posteriormente puede ser trasladado al lenguaje tipo LD o Diagrama Ladder.

Para ello se consideraron 6 entradas digitales (I1 hasta I6) y dos entradas analógicas (AI1 y AI2). Para el caso de las entradas digitales, es necesario activarlas por medio de un pulso alto, tal como se estableció en el circuito de los niveles de tanques. Mientras que las entradas analógicas reciben la información de los sensores, de pH y de temperatura, ya en el estándar 4 a 20 mA.

La entrada digital I1 es el arranque del programa, toda vez este en alto, el programa iniciará su funcionamiento. Las entradas digitales I2, I3 e I6 activan cuando los niveles de los tanques sean los adecuados, controlan por lo tanto a las bombas de agua, B1, B2 y B3, respectivamente. Las entradas digitales I4 e I5 controlan niveles para las válvulas solenoides V1 y V2 en su orden. La bomba de agua B3 y la válvula solenoide V2 son excluyentes, ya que funcionan de acuerdo al valor de pH medido en el tanque 4. Si el valor de pH está dentro del rango adecuado, esto es de 6 a 9, se activa V2 para llenar el tanque final o tanque 5. Por lo contrario, si el valor de pH esta fuera del rango, se activa la bomba B3, para retornar el líquido al tanque 2 e iniciar el proceso nuevamente.

La entrada analógica AI1, recibe datos del sensor de pH. El transmisor del sensor de pH posee la programación de los valores o parejas de datos que relacionan el valor del pH medido con la salida 4 a 20 mA, para enviar a la entrada del PLC el valor que permita decidir si el agua residual está dentro del rango permitido o no. La entrada analógica AI2, está relacionada con la medición de temperatura, por lo que esta declarado como sensor PT100. La temperatura tiene efectos directos en la medición del pH, por lo que se incluyó en la solución propuesta. Sin embargo, ya que el sensor de pH tiene compensación por temperatura y que durante el proceso, no hay una variación significativa en la temperatura, esta es únicamente mostrada en pantalla, si la variación es no mayor de ± 10 °C, la medición de pH no debe de ser corregida.

Tabla VIII. Tabla de entradas declaradas en programa PLC

Entrada	Tipo	Señal Entrante	Observaciones
I1	Digital	Arranque	Inicio del proceso
I2	Digital	B1	Activa bomba entre tanque 1 y 2
I3	Digital	B2	Activa bomba entre tanque 2 y 3
I4	Digital	V1	Activa válvula entre tanque 3 y 4
I5	Digital	V2	Activa válvula entre tanque 4 y 5
I6	Digital	B3	Activa bomba entre tanque 4 y 2
AI1	Analógica	pH	4 a 20mA.
AI2	Analógica	Temperatura	PT100. Salida a pantalla

Fuente: **Elaboración propia.**

En el caso de las salidas, se declaran 10, todas digitales. Mediante estas se activan las bombas de agua, las válvulas solenoides y los mezcladores. En el caso de las bombas de agua B1, B2 y B3, están controladas por las salidas Q1, Q4 y Q10 respectivamente. Las válvulas solenoides V1 y V2 son activadas por medio de las salidas Q7 y Q9. Los mezcladores de neutralizante y de floculante están activados por las salidas Q3 y Q6. Las válvulas para administrar neutralizante, floculante y coagulante se activan con las salidas Q2, Q5 y Q8 en su orden.

Para los mezcladores se determinó el tiempo de funcionamiento, para el tanque del neutralizante o tanque 2 se mantiene activo durante 7 minutos, mientras que para el tanque del floculante o tanque 3 el tiempo es de 15 minutos. En cada caso, se activa la bomba B2 y la válvula V1 un minuto después del final del mezclado, que permite vaciar el tanque hacia el siguiente. Para las 3 válvulas que administran el neutralizante, floculante y coagulante, se activan durante 2 segundos. Todos los tiempos son administrables en el programa, si es necesaria su variación más adelante.

Tabla IX. Tabla de salidas declaradas en programa PLC

Salida	Tipo	Activa	Observaciones
Q1	Digital	Bomba 1	Activa por sensores de nivel
Q2	Digital	Válvula Neutralizante	Activa por 2 segundos
Q3	Digital	Mezclador Neutralizante	Activa por 7 minutos
Q4	Digital	Bomba 2	Activa por sensores de nivel
Q5	Digital	Válvula Floculante	Activa por 2 segundos
Q6	Digital	Mezclador Floculante	Activa por 15 minutos
Q7	Digital	Válvula 1	Activa por sensores de nivel
Q8	Digital	Válvula Coagulante	Activa por 2 segundos
Q9	Digital	Válvula 2	Activa por sensores de nivel y pH
Q10	Digital	Bomba 3	Activa por sensores de nivel y pH

Fuente: **Elaboración propia.**

Tabla X. Presupuesto de equipo eléctrico y electrónico sugerido

No.	Cantidad	Descripción	Valor Unidad (Q)	Valor Total (Q)	Sitio
1	3	Bombas Centrífugas	3424	10272	Hidrotecnia
2	5	Válvulas solenoides	630	3150	Hidrotecnia
3	1	Mezclador	6000	6000	Mainco
4	1	Mezclador	6000	6000	Mainco
5	5	Sensores de Nivel	810	4050	Disselectro
6	1	Sensor de Temperatura	300	300	Disselectro
7	1	Medidor de pH	6075	6075	Esinsa
8	1	PLC Logo	1030	1030	Siemens
9	2	Modulo Expansión Logo	560	1120	Siemens
10	1	Fuente Logo	740	740	Siemens
11	7	Relé de Estado Sólido	395	2765	Siselec
Total			25964	41502	

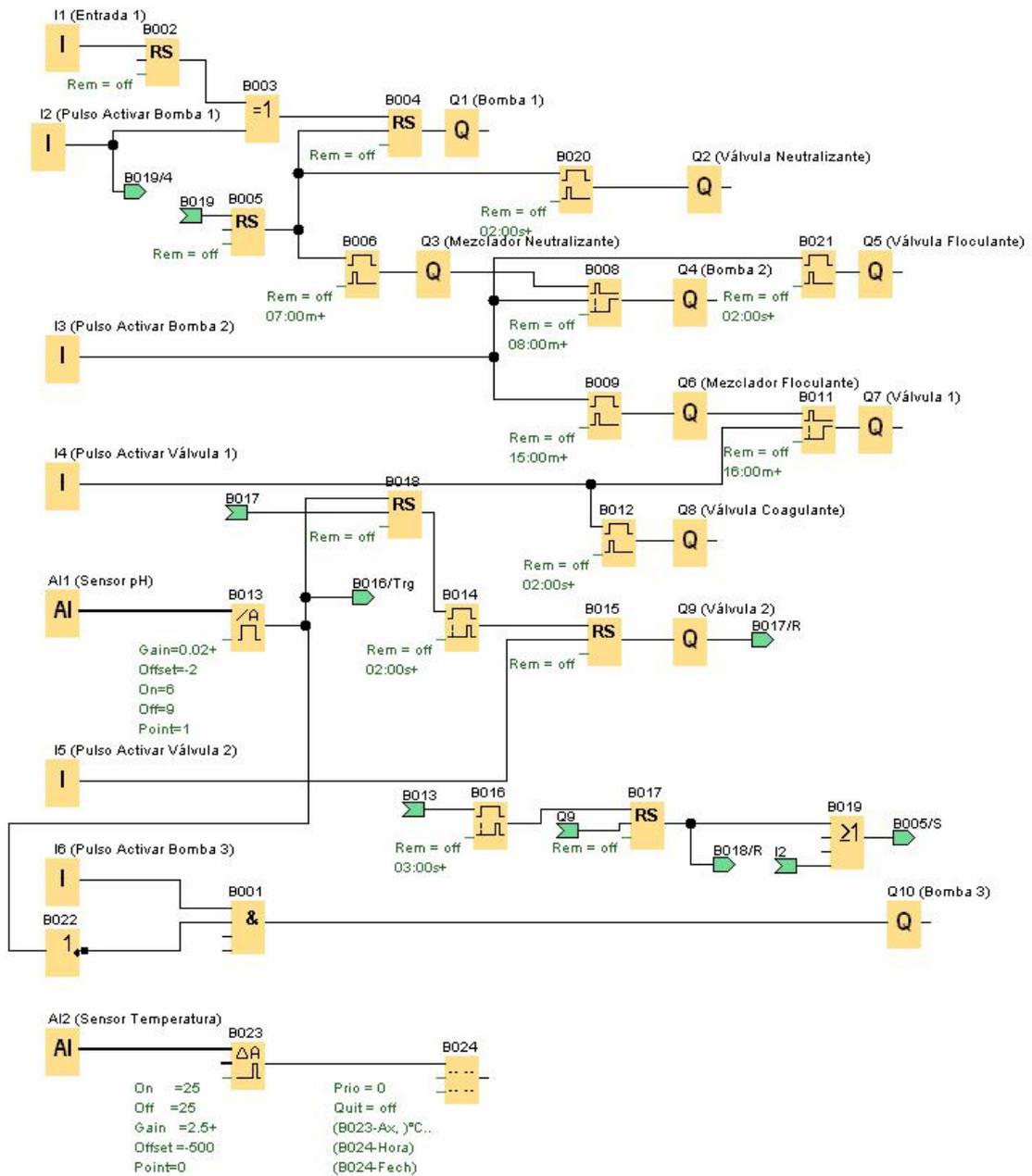
Fuente: **Elaboración propia.**

Tabla XI. Descripción de equipo eléctrico y electrónico cotizado

No.	Marca	Modelo	Características
1	Sta Rite	PD2HEL	Bombas monofásicas 110V 1 Hp Anticorrosivas 15A
2	Hunter	PGV-201 2"	Electroválvula 2" Anticorrosiva 24 VDC 400mA
3	Inoxpa	BMI	Mezclador con motor monofásico a 1500 rpm
4	Inoxpa	NRI	Mezclador con motor monofásico a 70 rpm
5	MAC3	Q3-M	110V, 3 sondas
6	Kele	ST-W81-XW	RTD sumergible PT100 de platino
7	GF Signet	2764	Electrodo Diferencial PH plano y Transmisor salida 4-20 mA
8	Siemens	6ED1052-1CC00-0BA6	24V. 8 Entradas 4 Salidas Transistor
9	Siemens	6ED1055-1CB00-0BA0	Expansión 4 Entradas. 4 Salidas
10	Siemens	6EP1331-1SH02	110 V In. 24V 1.3 A Out
11	IDEC	RSCDN-45A	24V / 110V 45A.

Fuente: **Elaboración propia.**

Figura 41. Programa de control para Planta de Tratamiento de agua



Fuente: Elaboración propia.

CONCLUSIONES

1. Con la metodología presentada, se establece una guía completa que permite proponer una solución para la implementación eléctrica y electrónica de la planta de tratamiento de agua, en una galvanizadora de lámina. Logrando que los dispositivos seleccionados puedan interconectarse y ser automatizados, con la ayuda de un PLC.
2. Aunque la solución final es específica para el proyecto presentado, es posible utilizar alguna de las soluciones documentadas para cualquier otro proyecto de tratamiento de agua, ya sea para reuso o para la descarga de la misma a cuerpos de agua.
3. Los procesos de neutralización, floculación y coagulación son los que más se adaptan a las necesidades del proyecto y que permiten que la solución pueda ser implementada, y obtener resultados dentro del margen establecido por la ley.
4. Las bombas de diafragma son las más recomendables en una planta de tratamiento de agua, sin embargo, en este caso particular, al no producirse un gran volumen de lodo, las bombas centrifugas pueden ser utilizadas, lo que contribuye a reducir los costos de la solución.

5. El diseño original contemplaba uso de bombas únicamente para todo el traslado del agua residual. Sin embargo, a partir de la floculación se cambiaron por válvulas hidráulicas de solenoide, ya que las bombas producen el rompimiento de los enlaces. Mientras que las válvulas propuestas no rompen los enlaces iónicos ya formados.

RECOMENDACIONES

1. Revisar periódicamente los límites máximos permisibles según la ley, para verificar el cumplimiento con las metas propuestas, programadas en los distintos periodos, con el fin de realizar las modificaciones que sean necesarias en la solución propuesta.
2. Realizar mantenimiento preventivo y calibración mensual al sensor del medidor de pH colocado en el tanque de coagulación, verificando el buen funcionamiento y sustituir el electrodo cuando presente una variación mayor de 50mV en la medición realizada a una muestra con pH conocido a 25 °C de temperatura.
3. Nunca permitir que el sensor de medición de pH se deshidrate, lo que sucede al no tener contacto con algún líquido. Ya que esto tiene efectos destructivos en el mismo, y significa la sustitución prematura del mismo, elevando los costos del mantenimiento correctivo.

4. Calibrar periódicamente el RTD, verificando su linealidad natural, para poder aplicar correctamente la desviación sobre la medición de pH realizado por el sensor, cuando la temperatura sea diferente a 25 °C en un margen mayor de ± 10 °C.

5. Tener siempre disponible un back-up del programa del PLC en algún medio externo, el cual se realiza directamente con el programa propuesto por la marca propietaria del PLC, que además hace posible obtener el programa cargado en el PLC y realizar una copia, en caso de pérdida del mismo del medio externo. Además se debe obtener un nuevo respaldo, al momento de realizar cambios al programa cargado.

BIBLIOGRAFÍA

1. Bryan, L.A. **Programmable controllers. Theory and implementation.** 2ª Edición. USA: Editorial Industrial Text Company, 1997. 1035 pp.
2. Carnicer, Enrique y Concepción Mainar. **Bombas centrífugas.** 2ª Edición. España: Editorial Thomson Paraninfo, 2004. 120 pp.
3. Cheremisinoff, Nicholas P. **Handbook of water and wastewater treatment technologies.** USA: Editorial Butterworth Heinemann, 2002. 636 pp.
4. Dichenson, Christopher. **Valves, piping & pipelines handbook.** 3ª Edición. USA: Editorial Elsevier, 1999. 871 pp.
5. Greene, Richard. **Válvulas. Selección, uso y mantenimiento.** USA: Editorial McGraw-Hill, s.a. 278 pp.
6. Karl-Heinz, John y Michael Tiegelkamp. **IEC 61131-3: Programming industrial automation systems.** Alemania: Editorial Springer, 2001. 400 pp.
7. Kenneth, J. **Bombas. Selección, uso y mantenimiento.** USA: Editorial McGraw-Hill, s.a. 373 pp.
8. Ludwig, Ernest. **Applied process design for chemical and petrochemical plants. Volumen 1.** 3ª Edición. USA: Editorial Butterworth Heinemann, 1999. 630 pp.
9. Mataix, Claudio. **Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas.** 2ª Edición. España: Editorial McGraw-Hill, 1986. 660 pp.
10. Ramalho, R.S. **Tratamiento de aguas residuales.** Canada: Editorial Reverté, s.a. 705 pp.

11. Shreir, Lionel Louis y otros. **Corrosion. Volumen 2.** 3ª Edición. Gran Bretaña: Editorial Butterworth Heinemann, 2000. 1460 pp.
12. Sinclair, Ian R. **Sensor and transducer.** 3ª Edición. Gran Bretaña: Editorial Newnes, 2001. 306 pp.
13. Smith, Peter. **Valve. Selection Handbook.** 5ª Edición. USA: Editorial Elsevier, 2004. 399 pp.
14. U.S. Department of Energy. **DOE fundamentals handbook instrumentation and control.** USA: s.e., 1992. 280 pp.
15. Webster, John G. **The measurement, instrumentation and sensors handbook.** 5ª Edición. USA: Editorial CRC Press, 1999. 2608 pp.
16. Wilson, Jon. **Sensor technology handbook.** USA: Editorial Elsevier, 2005. 704 pp.
17. Cerón García, Juan Carlos y otros. **Contaminación y tratamientos de aguas.** Tesis Maestría de Ing. Ambiental. España: Universidad de Huelva, 2005. 177 pp.

Bibliografía electrónica

<http://materias.fi.uba.ar/6528/>. Enero, 2009.

<http://www.agua.org.mx/>. Febrero, 2008.

<http://www.atteg.es/>. Febrero, 2008.

<http://www.automation.siemens.com>. Marzo, 2009.

<http://www.balluff.com/Balluff/>. Octubre, 2008.

<http://www.congreso.gob.gt/>. Enero, 2008.

<http://www.drexelbrook.com/>. Octubre, 2008.

http://www.gfsignet.com. Marzo, 2009.

http://www.honeywell.com. Octubre, 2008.

<http://www.hss.energy.gov/NuclearSafety/techstds/standard/hdbk1018/h1018v2.pdf>.
Junio, 2008.

<http://www.hunterindustries.com/>. Marzo, 2009.

<http://www.idec.com/>. Marzo, 2009.

<http://www.jumo.us/>. Noviembre, 2008.

http://www.kele.com. Marzo, 2009.

http://www.koboldusa.com. Octubre, 2008.

<http://www.lightninmixers.com/>. Septiembre, 2008.

<http://www.mac3.it/english/controlori.htm>. Febrero, 2009.

<http://www.nmenv.state.nm.us/swqb/Programs/PSRS/FOT/WWSG/>. Octubre, 2008.

<http://www.quiminet.com/>. Junio, 2008.

<http://www.schneider.ind.br/>. Junio, 2008.

APÉNDICE

Diagrama de flujo de la solución propuesta para el tratamiento de aguas residuales en una galvanizadora de lámina.

