



**UNIVERSIDAD PERUANA DE CIENCIAS APLICADAS**

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

Desarrollo de un sistema de degradación de aguas residuales de la industria  
textil de pantalones de vaquero utilizando la técnica de Foto-Fenton

**TESIS**

Para optar el título profesional de Ingeniero Mecatrónico

**AUTOR(ES)**

Chico Pachas, Hugo Gian Pool (0000-0002-6120-6227)

López Vera, Jorge André (0000-0003-1784-9505)

**ASESOR**

Klusmann Vieira, Hermann Mirko (0000-0003-3340-0126)

**Lima, 24 de julio de 2021**

*DEDICATORIA*

*A nuestros padres, por su sus enseñanzas, consejos, motivación y, por, sobre todo, su apoyo incondicional.*

## Agradecimientos

Primero queremos agradecerle a Dios por darnos las fuerzas para seguir adelante, por enseñarnos que no hay obstáculo que no pueda superarse y por darnos el entendimiento necesario para sobrellevar retos que se nos presentan día a día. Queremos agradecer a nuestros padres, quienes siempre tuvieron confianza en nosotros, por ser un buen ejemplo para nuestro desarrollo personal y profesional, por su amor incondicional, motivación y sacrificio en cada etapa de nuestra vida y por brindarnos todas las facilidades para alcanzar nuestras metas. Gracias a todos los profesores por habernos enseñado e inculcado la pasión por la ingeniería y, además, por compartir valores y aconsejarnos a partir de su experiencia. Gracias a todos nuestros familiares y amigos que estuvieron siempre presentes con su apoyo, confianza, solidaridad y paciencia, en los buenos y malos momentos. Gracias a nuestro asesor el ingeniero Mirko Klusmann por todo su apoyo y motivación para la culminación de nuestros estudios profesionales y la elaboración de esta tesis, al ingeniero Nikolai Vines por su tiempo compartido y por impulsar el desarrollo de nuestra formación profesional.

## Resumen

El trabajo propuesto consiste en el tratamiento de las aguas residuales que se generan en la industria textil, sobre todo en las pequeñas y medianas empresas de dicho rubro, ya que muchas de ellas no cuentan con un sistema de tratamiento de aguas residuales y las que sí, no realizan un sistema adecuado para dicha labor. Actualmente existen máquinas capaces de realizar un tratamiento de aguas residuales adecuado, pero no son del todo automatizadas y el precio de éstas son considerablemente altos. En base a esta problemática, se buscó una solución con que no cuente con un número excesivo de etapas, que no genere residuos durante el tratamiento, que sea un proceso automatizado y con un tiempo óptimo de proceso. Por estos motivos, se optó por el método del Foto-Fenton como la solución idónea para realizar el tratamiento de aguas residuales, el cual necesita que el efluente tenga un pH igual a 3 para lo cual que realizará un lazo de control. Adicionalmente, requiere dos soluciones químicas y una luz UV. Los resultados obtenidos de este proyecto fueron satisfactorios ya que se llegó a cumplir los estándares ambientales de NTU (Unidad de Turbidez Nefelométrica), los cuales indican que para poder botar el agua al alcantarillado, debe tener un máximo valor de 100NTU. Cabe resaltar que este proyecto realizará todo el proceso de forma automatizada y sólo se va a centrar en las aguas residuales provenientes del proceso de los pantalones de vaqueros de color azul.

Palabras clave: Tratamiento de aguas residuales; Foto-Fenton; lazo de control; NTU.

## **Abstract**

The proposed work consists of the treatment of wastewater generated in the textile industry, especially in small and medium-sized companies in this area, since many of them do not have a wastewater treatment system and those that do, not making an adequate system for such work. Currently there are machines capable of carrying out an adequate wastewater treatment, but they are not fully automated and the price of them is considerably high. Based on this problem, a solution was sought that does not have an excessive number of stages, that does not generate waste during the treatment, that is an automated process and with an optimal process time. For these reasons, the Foto-Fenton method was chosen as the ideal solution for treating wastewater, which requires the effluent to have a pH equal to 3 for a control loop to be performed. Also, two chemical solutions and one UV light are required. The results obtained from this project were satisfactory since the environmental standards of NTU (Nephelometric Turbidity Unit) were met, which indicate that in order to discharge the water to the sewer, it must have a maximum value of 100NTU. It should be noted that this project will execute the entire process in an automated way and will only focus on the wastewater from the blue jeans process.

**Keywords:** Wastewater treatment; Photo-Fenton; control loop; NTU.

## TABLA DE CONTENIDO

1	CAPÍTULO 1: SITUACIÓN PROBLEMÁTICA Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	13
1.1	Situación Problemática .....	13
1.2	Identificación del Problema .....	16
1.2.1	Árbol del Problema.....	16
1.2.2	Problema General .....	17
1.2.3	Problema Ingenieril .....	17
1.3	Estado del Arte .....	17
1.3.1	Productos y Soluciones Existentes .....	17
1.3.1.1	Espectrofotómetro: CM-3630 .....	17
1.3.1.2	Fotocolorímetro: LoviBond BS684 .....	18
1.4	Publicaciones científicas / ingenieriles.....	19
1.5	Justificación .....	21
1.5.1	Justificación respecto a beneficios para el usuario:.....	21
1.6	Justificación Ingenieril:.....	22
1.7	Objetivos .....	23
1.7.1	Árbol de Objetivo .....	23
1.7.2	Objetivo General .....	24
1.7.3	Objetivos Específicos e Indicador de Logro.....	24
1.8	Descripción de la Solución Hipotética Propuesta .....	25
1.8.1	P&ID.....	25
1.8.2	Pasos del funcionamiento .....	26
1.8.3	Diagrama de flujo de Filosofía de control .....	27
1.8.4	Limitaciones.....	28
1.8.5	Resultados esperados .....	28
1.9	Aplicaciones y usuarios potenciales.....	29
1.10	Viabilidad.....	29
1.10.1	Viabilidad técnica: .....	29
1.10.2	Viabilidad económica: .....	30
1.10.3	Viabilidad social:.....	30
1.10.4	Viabilidad operativa: .....	30
1.11	Comentarios adicionales .....	31
2	CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO.....	32
2.1	Aguas Residuales.....	32

2.1.1	Características de las Aguas Residuales .....	33
2.1.2	Composición de las Aguas Residuales de la industria textil.....	33
2.1.3	Contaminación .....	34
2.2	Variables de medición .....	34
2.2.1	Turbidez.....	34
2.2.2	pH .....	35
2.3	Proceso de oxidación .....	35
2.3.1	Proceso de oxidación avanzada (POA) .....	36
2.3.2	Tipos de Proceso de Oxidación avanzada .....	37
2.3.2.1	Proceso Fenton.....	37
2.3.2.2	Proceso Foto-Fenton .....	39
2.3.2.3	Fotocatálisis heterogénea .....	41
2.4	Industria Textil.....	43
2.4.1	Jeans .....	43
2.4.2	Colorantes y teñido .....	44
2.4.2.1	Proceso de teñido. ....	46
2.4.2.2	Componentes químicos.....	48
2.5	Sistema de control automático .....	49
2.5.1	Definición: .....	49
2.5.2	Control de lazo abierto.....	49
2.5.3	Control de lazo cerrado.....	50
2.5.3.1	Control ON/OFF.....	51
2.5.3.2	Control Proporcional .....	52
2.5.3.3	Control Integral .....	52
2.5.3.4	Control Derivativo .....	53
2.5.3.5	Control Proporcional e Integrativo (PI) .....	53
2.5.3.6	Control Proporcional, Integral, derivativo (PID).....	54
2.5.4	Control de razón.....	55
2.5.5	Control en cascada .....	56
2.6	Técnica de sincronización de controladores .....	57
2.6.1	Métodos de lazo cerrado .....	57
2.6.1.1	Método de Ziegler Nichols lazo cerrado .....	57
2.6.1.2	Método de Tyreus y Luyben en Lazo Cerrado.....	59
2.6.2	Métodos de lazo abierto .....	60
2.6.2.1	Método de Ziegler y Nichols lazo abierto .....	60
2.6.2.2	Método en Lazo Abierto de Cohen y Coon .....	62

2.7	Instrumentación industrial.....	63
2.7.1	Definición de sensores industriales.....	63
2.7.2	Característica de los sensores industriales .....	63
2.7.2.1	Campo de medida o rango (Range).....	63
2.7.2.2	Alcance .....	63
2.7.2.3	Error.....	64
2.7.2.4	Precisión .....	64
2.7.2.5	Exactitud.....	64
2.7.2.6	Zona muerta .....	65
2.7.2.7	Sensibilidad .....	65
2.7.2.8	Repetibilidad .....	66
2.7.2.9	Histéresis .....	66
2.7.2.10	Campo de medida con supresión de cero.....	66
2.7.2.11	Campo de medida con elevación de cero .....	66
2.7.3	Clasificación de los sensores industriales.....	67
2.7.3.1	Sensores discretos.....	67
2.7.3.2	Sensores Analógicos .....	70
2.7.4	Clasificación de los actuadores industriales.....	71
2.7.4.1	Motores eléctricos .....	72
2.7.4.2	Válvulas de control.....	73
2.7.4.3	Bombas.....	73
2.7.5	Controladores Lógicos Programables.....	76
2.8	Elementos de control industrial .....	76
2.8.1	Fuente de Voltaje alterno y continuo .....	76
2.8.2	Selectores .....	77
2.8.3	Pulsadores .....	78
2.8.4	ITM .....	79
2.8.5	Relé.....	79
3	CAPÍTULO 3: SOLUCIÓN PROPUESTA .....	79
3.1	Hardware del Proyecto .....	79
3.1.1	Elección de sensor y transmisor de pH. ....	80
3.1.1.1	Objetivos del avance .....	80
3.1.1.2	Posibles soluciones.....	80
3.1.1.3	Sustento teórico .....	82
3.1.1.4	Análisis del avance .....	83
3.1.2	Elección de sensor de Turbidez .....	85

3.1.2.1	Objetivos del avance .....	85
3.1.2.2	Posibles soluciones.....	86
3.1.2.3	Sustento Teórico .....	87
3.1.2.4	Comentarios y conclusiones.....	88
3.1.3	Ingreso de soluciones químicas.....	88
3.1.3.1	Objetivos del avance .....	88
3.1.3.2	Soluciones propuestas .....	88
3.1.3.3	Sustento Teórico .....	90
3.1.4	Elección del material para el diseño del tanque batch y la estructura metálica.	91
3.1.4.1	Objetivos del avance .....	91
3.1.4.2	Posibles soluciones.....	92
3.1.4.3	Análisis de estructuras .....	93
3.1.4.4	Comentarios y Conclusiones .....	96
3.1.5	Elección de controlador a utilizar.....	96
3.1.5.1	Objetivos del avance .....	96
3.1.5.2	Posibles soluciones.....	96
3.1.6	Tablero Eléctrico.....	98
3.1.6.1	Dimensión del tablero eléctrico:.....	98
3.1.6.2	Elementos usados para el armado del tablero eléctrico.....	99
3.1.6.3	Comentarios y Conclusiones .....	104
4	CAPÍTULO 4: DESARROLLO DE SOLUCIÓN PROPUESTA .....	105
4.1	Configuración de PLC Unitronics V570.....	105
4.1.1	Comentarios y Conclusiones .....	110
4.2	HMI.....	110
4.2.1	Descripción de Pantallas .....	110
4.3	Bomba Peristáltica .....	115
4.3.1	Comentarios y Conclusiones .....	118
4.4	Transmisor de pH .....	118
4.4.1	Comentarios y conclusiones.....	124
4.5	Validaciones finales del proceso .....	125
5	CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES .....	129
5.1	Conclusiones de resultados de proyecto .....	129
6	Referencias Bibliográficas .....	130

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Parámetros del controlador PID por el método de Ziegler y Nichols en lazo cerrado..	59
Tabla 2: Valores recomendados de sintonización - Método de Tyreus y Luyben en Lazo Cerrado.....	59
Tabla 3: Parámetros del controlador PID por el método de Ziegler y Nichols en lazo abierto...	62
Tabla 4: Parámetros del controlador PID por el método de Cohen y Coon en lazo abierto.....	62
Tabla 5: Posibles soluciones para el señor y transmisor de pH. ....	81
Tabla 6 Posibles soluciones para la elección del sensor y transmisor de Turbidez .....	86
Tabla 7 Posibles soluciones para controlar el ingreso de solución química .....	89
Tabla 8 Posibles soluciones para el material del tanque batch y la estructura .....	92
Tabla 9 Posibles soluciones para el controlador a utilizar .....	97
Tabla 10: Pulsos y seg necesarios para una determinada cantidad de mL .....	116
Tabla 11 Relación entre el amperaje (mA) y valor de pH.....	121
Tabla 12: Corrida 1 .....	126
Tabla 13: Corrida 2 .....	126

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Árbol del Problema.....	16
Figura 2 CM-3630 .....	17
Figura 3 LoviBond BS684 .....	18
Figura 4 Árbol de objetivos .....	23
Figura 5 Diagrama P&ID del proyecto a realizar .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Figura 6 Diagrama de Flujo.....	27
Figura 7. Respuesta al escalón en lazo abierto .....	32
Figura 8. Montaje experimental del proceso Fenton.....	38
Figura 9. Montaje experimental del proceso foto-Fenton.....	40
Figura 10. Esquema del proceso fotocatalítico sobre una partícula semiconductor.....	42
Figura 11. Pantalones Jeans .....	44
Figura 12. Representación de sistema de control de lazo abierto.....	49
Figura 13. Representación de sistema de control de lazo cerrado.....	50
Figura 14. Diagrama de bloques de control ON-OFF .....	51
Figura 15. Ejemplo de salida ON/OFF - Termostato.....	51
Figura 16. Diagrama de bloques de control proporcional .....	52
Figura 17. Diagrama de bloques un control integral.....	53
Figura 18. Diagrama de bloques un control derivativo.....	53
Figura 19. Respuesta temporal de un regulador PI.....	54
Figura 20. Diagrama de bloques de control Proporcional integral derivativo.....	55
Figura 21. Respuesta temporal de un regulador PID. ....	55
Figura 22. Ejemplo de control de flujo de razón.....	56
Figura 23. Ejemplo de control de flujo de razón.....	57
Figura 24. Respuesta oscilatoria de la señal medida a partir de la entrada de un impulso .....	58
Figura 25. Representación de respuesta a escalón, lazo abierto.....	60
Figura 26. Comportamiento sigmoïdal.....	61
Figura 27. Representación del punto de inflexión de la curva sigmoïdal .....	61
Figura 28. Diferencia entre precisión y exactitud. ....	65
Figura 29: Diferencia entre precisión y exactitud .....	66
Figura 30: Sensores Industriales.....	67
Figura 31. Sensores Capacitivos .....	68
Figura 32: Sensores inductivos.....	69
Figura 33. Funcionamiento de sensor óptico.....	70

Figura 34: Sensor de pH portátil .....	71
Figura 35: Sensor de pH industrial .....	71
Figura 36: Motor eléctrico Corriente Continua.....	72
Figura 37: Electroválvula de control asistido .....	73
Figura 39. Bomba centrífuga .....	75
Figura 40. Bomba de tornillo.....	75
Figura 41. PLC UNIVISION 1030.....	76
Figura 42. Gráfica de fuente de voltaje continuo.....	77
Figura 43. Gráfica de voltaje alterno .....	77
Figura 44. Selector eléctrico tipo manecilla .....	78
Figura 45:. Pulsador.....	78
Figura 46: ITM .....	79
Figura 47: Relé.....	79
Figura 48 Sensor y Transmisor pH a utilizar .....	82
Figura 49: Vista interna del Transmisor de pH con el cableado al adaptador BNC. ....	84
Figura 50: Vista interna del Transmisor de pH.....	84
Figura 51 Vista interna del Transmisor de pH con el cableado al Controlador.....	85
Figura 52 Sensor de Turbidez .....	87
Figura 53 Diagrama de principio de medición de turbidez .....	87
Figura 54 Bomba peristáltica de 24Vdc.....	90
Figura 55: Bomba peristáltica 12Vdc .....	91
Figura 56: Tanque Ensamblado.....	93
Figura 57: Tapa con la paleta rotativa.....	93
Figura 58: Estructura de acero. ....	94
Figura 59: Modelación 3D, de la estructura y tablero ensamblado.....	94
Figura 60: Estructura implementada junto al tablero eléctrico.....	95
Figura 61: Tanque batch montado a la estructura.....	95
Figura 62. PLC V570 Unitronic(Foto Referencial).....	98
Figura 63: Tablero eléctrico de 65x40x20 (Foto Referencial) .....	99
Figura 64: ITM-ABB.....	99
Figura 65: Fusible para riel DIN .....	100
Figura 66: Fuente de 24V para riel DIN .....	101
Figura 67. Borneras con Puentes para riel DIN. ....	101
Figura 68: Cable apantallado calibre 16.....	102
Figura 69: Cable de puesta a tierra .....	102
Figura 70: Canaleta 25x40.....	103

Figura 71: Tubo corrugado.....	103
Figura 72: Fundas helicoidales .....	104
Figura 73. Módulo V200-18-E3XB (Foto Referencial) .....	105
Figura 74. Indicaciones para retirar módulo de entradas y salidas .....	106
Figura 75. Indicaciones para retirar módulo de entradas y salidas .....	107
Figura 76: Vista interna de los Jumpers .....	108
Figura 77: Ubicación de los jumpers para cada salida analógica .....	108
Figura 78: Ubicación de los jumpers para cada Entrada analógica.....	109
Figura 79: Ubicación de los jumpers para salidas digitales tipo transistor.....	109
Figura 80: Pantalla Inicial.....	110
Figura 81: Pantalla para seleccionar modos.....	111
Figura 82: Pantalla 1 de actuadores manuales.....	111
Figura 83: Pantalla 2 de actuadores manuales.....	112
Figura 84: Pantalla principal del modo automático.....	113
Figura 85: Pantalla para cambiar el set point del pH.....	113
Figura 86: Pantalla escalar el pH.....	113
Figura 87: Pantalla de Info. Adicional.....	114
Figura 88: Pantalla del estado de los actuadores en modo automático.....	114
Figura 89: Pantalla 2 del estado de los actuadores en modo automático.....	114
Figura 90 Diagrama de Circuito para la validación de las bombas peristálticas.....	115
Figura 91 Gráfica mL vs Seg.....	117
Figura 92 Gráfica mL vs Pulsos .....	117
Figura 93 Solución Buffer pH 4.....	119
Figura 94 Solución Buffer pH 10.....	119
Figura 95 Solución Buffer pH 7.....	119
Figura 96 Recta y ecuación que debe seguir el transmisor de pH .....	120
Figura 97 Gráfica final con todos los puntos ubicados del transmisor de pH.....	121
Figura 98 Diagrama de lazo de control de pH.....	122
Figura 99 Lazo de control de pH.....	123
Figura 100 Ventana de Identificación de sistemas - Simulink.....	123
Figura 101 Función de Transferencia - Simulink .....	124
Figura 102 Comparativo de Sintonización real vs lo obtenido con la identificación de sistemas - Simulink.....	124
Figura 103: Gráfica NTU vs. Tiempo (Corrida 1).....	127
Figura 104: Gráfica NTU vs. Tiempo (Corrida 2).....	127
Figura 105: Muestras (Corrida 1) .....	128

Figura 106: Muestras (Corrida 2) ..... 128

# **1 CAPÍTULO 1: SITUACIÓN PROBLEMÁTICA Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA**

## **1.1 Situación Problemática**

La degradación del ecosistema es un problema actual que involucra a todos los habitantes del planeta, dicho problema incluye muchos sectores, dentro de los cuales se encuentra la contaminación del agua, el cual es uno de las más preocupantes, ya que no sólo es parte esencial de la naturaleza, sino que también es un recurso sumamente necesario para la subsistencia de toda la humanidad. Las causas de la contaminación del agua se dividen en dos tipos fundamentales Contaminación Natural y Contaminación Antrópica.

La Contaminación Antrópica como su nombre lo indica es ocasionada por el ser humano, esto va relacionado con la cantidad y calidad, ya que como se piensa que hay agua en cantidad no se piensa en la calidad que ésta debe tener, mientras más se contamine este recurso, será más difícil su tratamiento para el consumo humano, además del efecto negativo que puede llegar a tener en el ecosistema.

Al año se liberan más de diez mil diferentes tipos de pigmentos y colorantes sintéticos en diferentes industrias, como la textil, papelera, cosmética, farmacéutica, entre otras. El 59% del consumo total de agua en los países desarrollados se destina a uso industrial, el 30% a consumo agrícola y un 11% a gasto doméstico. El sector productor no sólo es el que más gasta, también es el que más contamina. Más de un 80% de los desechos peligrosos del mundo se producen en los países industrializados, mientras que en las naciones en vías de desarrollo un 70% de los residuos que se generan en las fábricas se vierten al agua sin ningún tipo de tratamiento previo, contaminando así los recursos hídricos disponibles. Estos datos aportan una idea de la importancia que tiene el tratamiento y la reutilización de aguas residuales en el sector industrial en el mundo.<sup>1</sup>

En el Perú se genera aproximadamente 2 217 946 m<sup>3</sup> por día de aguas residuales descargadas a la red de alcantarillado de las EPS<sup>2</sup> Saneamiento, siendo Lima la que

---

<sup>1</sup> Cortázar 2010

<sup>2</sup> EPS: Entidad Prestadora de Servicios

genera más del 50%. Así mismo sólo el 32% de estas aguas residuales reciben el tratamiento adecuado.

Dentro del sector industrial como ya se pudo apreciar hay muchas empresas que contribuyen a la generación de aguas residuales, dentro de las cuales está la industria textil, la que es una de las que más presencia tiene en este problema.

El agua residual de la industria textil tiene una gran variación en su composición. Además de colorantes, el agua residual textil contiene tensioactivos, ácidos, álcalis, aceites minerales y metales pesados. En el proceso de teñido se generan una gran cantidad de efluentes con colorantes ya que alrededor del 30% de estos compuestos se pierden debido a las ineficiencias del proceso de teñido y son descargados a los efluentes<sup>3</sup>. El uso de una amplia variedad de colorantes químicos da origen, en periodos cortos de tiempo, a efluentes extremadamente variados en su composición, que requieren de un tratamiento de aguas muy complejo. Cabe resaltar que la solución planteada se trabajará justo cuando acabe el proceso de teñido.

Lo ideal es que para cada fábrica se diseñe una planta de tratamiento de agua, especialmente proyectada para el proceso de producción en cuestión. En función de la cantidad de agua residual y del tipo de contaminación que ésta presente, será necesaria la aplicación de distintas clases de tratamientos. En este caso, el modelo de dicha planta sería de la siguiente manera.

Sin embargo, dichas plantas de tratamiento tienden a tener un costo muy elevado, por lo que para las medianas y pequeñas empresas dedicadas a la industria textil no es una solución viable. Por esta razón, los métodos que utilizan dichas empresas, en el mejor de los casos, es la de desechar los efluentes residuales al desierto árido o a algún lugar donde no contamine. Por otro lado, otras empresas optan por desechar sus efluentes contaminados al medio más cercano, ya sea las alcantarillas, ríos, lagos, entre otros.

Por los motivos mencionados, es necesario implementar un nuevo proceso con los métodos adecuados, los cuales tienen que cumplir con las especificaciones requeridas

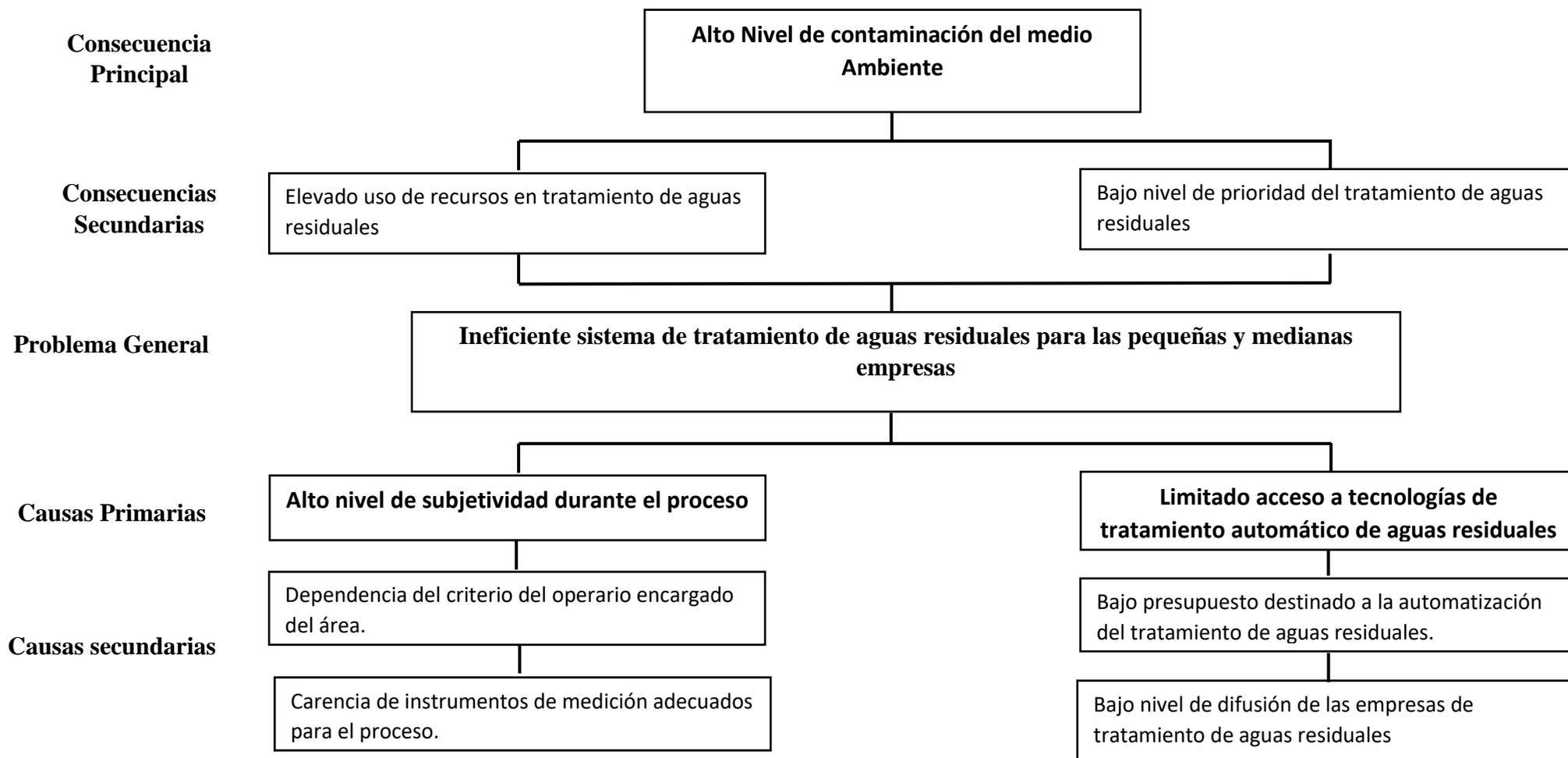
---

<sup>3</sup> Cortázar 2010

para este problema, es decir, el correcto tratamiento de los efluentes residuales. Además, dicho proceso no debe tener un costo elevado, ya que debe ser accesible económicamente para las medianas y pequeñas empresas, para que de esta forma se pueda convertir en una solución viable, pero sobre todo se pueda reducir la contaminación que este sector industrial genera al medio ambiente.

## 1.2 Identificación del Problema

### 1.2.1 Árbol del Problema



Fuente: Elaboración Propia  
Figura 1 Árbol del Problema

## 1.2.2 Problema General

La empresa “Textiles Ate S.A.C.” cuenta con un ineficiente sistema de tratamiento de aguas residuales.

## 1.2.3 Problema Ingenieril

¿Qué consideraciones tecnológicas e ingenieriles de diseño mecatrónico y diseño de software se tienen que llevar en cuenta, a fin de desarrollar **un sistema de tratamiento de efluentes residuales para la empresa “Textiles Ate S.A.C.”**<sup>4</sup> que satisfaga los requerimientos **ambientales y éticos** con el objetivo de disminuir **la contaminación que genera la empresa en mención.**

## 1.3 Estado del Arte

### 1.3.1 Productos y Soluciones Existentes

#### 1.3.1.1 Espectrofotómetro: CM-3630

Son sistemas utilizados para poder verificar, en función de la longitud de onda, la relación entre valores de magnitud fotométrica las concentraciones o reacciones químicas que se miden en una muestra. Es de tipo de absorción molecular, conocido como espectrofotómetro UV<sup>5</sup>-VIS. Este producto se muestra en la **Figura 2.**



**Fuente:** Konica Minolta Website  
**Figura 2** CM-3630

---

<sup>4</sup> Textiles Ate S.A.C. RUC: 20601146046

<sup>5</sup> UV: Ultravioleta

### Ventajas

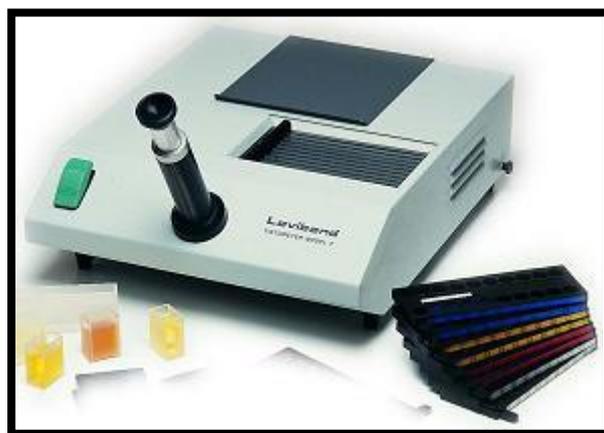
- Capacidad de medir en 10 nm en un rango completo de longitudes de onda que van de 360 a 740nm.
- Control Numérico UV patentado. Realiza calibraciones y ajustes de blancura en forma rápida y sencilla.
- Puede controlarse desde una PC usando el software del SpectraMagic NX.
- Posee 3 diámetros de medición: 25.4 mm, 8 mm y 4 mm para poder medir diversos tamaños de muestra.

### Desventajas

- Solo se puede analizar 1 muestra a la vez.
- El control se realiza directamente conectado a una computadora por medio del protocolo RS-232.
- Intervalos mínimos entre mediciones: 4-6 segundos.
- Peso de 15.5 kg.
- Tiene un costo de aproximadamente \$5 000.

#### **1.3.1.2 Fotocolorímetro: LoviBond BS684**

Es una variedad de colorímetro (medidor de color). Utilizado para determinar la concentración de sustancias disueltas en líquidos o sólidos mientras sean transparentes, ante un haz de luz, midiendo y comparando sus colores. Este producto se muestra en la **Figura 3**.



**Fuente:** LoviBond Website  
**Figura 3** LoviBond BS684

### **Ventajas**

- Posee dos modos de escaneo: Transmitancia y Reflectancia.
- Lectura directa por comparación visual.
- Rango: 0.1 - 79.9 Rojo, Amarillo; 0.1 - 49.9 Azul; 0.1 - 3.9 Neutro.

### **Desventajas**

- Permite el análisis de una sola muestra.
- La unidad de medición esta brindada por la misma empresa llamadas unidades LoviBond.
- Dimensiones: 330x410x320 mm y Peso: 8.3 Kg.
- Se necesita utilizar una medida patrón que será utilizada como referencia para los procesos siguientes.

## **1.4 Publicaciones científicas / ingenieriles**

Eric R. Bandala et al. (2002), en la publicación titulada “Tratamiento de Agua Residual proveniente de la industria textil mediante fotocatalisis solar” en el XXVIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, presenta una comparación entre dos procesos fotocatalíticos para la remoción de color en el efluente de una empresa textil mediante fotocatalisis solar. Se determinó que el proceso homogéneo (Foto-Fenton) es más eficiente que el proceso heterogéneo ( $\text{TiO}_2/\text{UV}$ ) en la eliminación del contaminante. Se pudo determinar la influencia que posee la concentración de catalizador en la fotocatalisis homogénea es directamente proporcional a la velocidad de la reacción de la degradación. El método afirma que para cierto tipo de tinte y mediante concentraciones diversas establecidas puede removerse el porcentaje de concentración alrededor del 85%, el cual ya se encuentra apto para poder pasar las normas establecidas de dicho país con respecto al tratamiento de aguas residuales. Sin embargo, solo se usó un tipo de concentración para poder validar dicha hipótesis, lo cual hace que los resultados no abarquen todos los casos posibles [5].

GilPavas et al. (2014), en la publicación “Tecnologías Sostenibles para el tratamiento de aguas residuales de la industria textil”, plantea que a partir de la década de los 60

empezó a tomarse en consideración el efecto que poseía la actividad humana sobre el ambiente y que, según el reporte del Programa Mundial de Evaluación de los recursos Hídricos (WWAP) de las Naciones Unidas, el 80% de los efluentes residuales no son tratados, poniendo en riesgo las fuentes de agua limpia para el consumo humano y la agricultura, haciendo crítica la situación en vías de desarrollo como el nuestro. También indica que los tratamientos de los efluentes residuales en las industrias textiles no se precipitan químicamente en el caso de los colorantes y que los Procesos Avanzados de Oxidación (PAO's) han demostrado ser exitosos en el tratamiento de aguas residuales textiles y que el proceso Foto-Fenton logra una remoción del 98.37 % de turbidez. Sin embargo, no presenta una prueba precisa en el cual dicha afirmación pueda ser sustentada con datos tangibles de dicha remoción [6].

Milena Silva et al. (2009), en la publicación titulada “Tratamiento de contaminantes orgánicos por Foto-Fenton con luz artificial”, presenta un método con el cual se pretende minimizar el efecto contaminante de los residuos líquidos orgánicos solubles y medianamente solubles generados en los laboratorios de la Universidad de Medellín por medio de la fotodegradación sensibilizada (Foto-Fenton), usando luz artificial como fuente de radiación. Bajo los diferentes ensayos de Foto-Fenton que se realizaron con radiación artificial con la ayuda de una lámpara de mercurio de baja presión, la cual se encuentra rodeada por una carcasa de acero inoxidable. La lámpara posee una radiación UV monocromática a una longitud de onda de 254 nm. Dicho sistema incluye un tanque de almacenamiento, una bomba de recirculación sumergible y un sistema de agitación, para garantizar la homogeneización y la turbulencia para proveer oxígeno disuelto en la solución. Se concluyó que el tratamiento con radiación artificial es viable para depurar las aguas residuales en un 70% [7].

Salas C. et al. (2010), en la publicación titulada “Tratamiento por oxidación avanzada (Reacción Fenton) de aguas residuales de la Industria Textil”, presenta que los procesos avanzados de Oxidación (AOX) se basan en su capacidad de generación de radicales hidroxilos, especie con un elevado potencial de oxidación mediante un agente oxidante con un catalizador. El pH del medio de reacción posee una influencia determinante en el proceso de oxidación Fenton y encuentra el valor de pH en torno a 3 para lograr un proceso óptimo. Asimismo, la cantidad de  $Fe_{2+}$  óptima es de 200 mg/L y de  $H_2O_2$  es de 3612 mg/L. Bajo estos parámetros se logró disminuir en un tiempo de 40 minutos el 975

de la demanda química de oxígeno (DQO). Sin embargo, no se ha detallado las demás variables que pueden ser eliminadas con este proceso que son importantes para poder realizar un análisis más completo [8].

## **1.5 Justificación**

### **1.5.1 Justificación respecto a beneficios para el usuario:**

La solución a la problemática planteada beneficiará al cliente en los siguientes aspectos:

- **Cumplimiento de estándares normativos respecto al desecho de aguas residuales de la textil:**

El decreto Supremo N° 015-2015-MINAM publicado el sábado 19 de diciembre de 2015 en el diario “El Peruano”, indica que los valores admisibles para el potencial de Hidrógeno, medido en unidad de pH, se encuentra entre 5,5 a 9 y de turbidez que es de como máximo 100 NTU, con el desarrollo del presente proyecto se podrán cumplir ambos estándares.

- **Optimización del proceso de tratamiento de aguas residuales de la textil**

El proceso Foto-Fenton, tiene como una de sus principales características que luego de la degradación no produce sólidos, lo que hace que sea un sistema independiente y no requerirá subprocesos o procesos adicionales para que el tratamiento sea completado.

- **Implementación de tecnología que cumpla con sus expectativas técnicas y económicas**

Las plantas de tratamientos de aguas residuales suelen tener de costos elevados de implementación y operación, las empresas textiles que en su mayoría son PYMES<sup>6</sup>, no cuentan con los recursos económicos suficientes para implementar estos sistemas. El presente proyecto hará posible que mayores empresas puedan implementar el sistema sin realizar una inversión que afecte sus márgenes de producción.

---

<sup>6</sup> PYME: Pequeña y Mediana Empresa

## 1.6 Justificación Ingenieril:

A nivel científico, tecnológico e ingenieril, el proyecto implica la ejecución de los siguientes diseños e implementaciones:

- **Desarrollo de un sistema mecánico independiente para evitar contaminación residual al proceso:**

Se realiza un reactor de tipo *Batch*<sup>7</sup> que tendrá la capacidad de poder almacenar los efluentes provenientes de la empresa textil. Se tendrá que realizar los debidos cálculos matemáticos para poder saber las dimensiones de dicho reactor y conocer las restricciones de forma y tamaño.

- **Control del pH y Turbidez (NTU<sup>8</sup>) mediante un sistema de medición.**

Dada la importancia del sistema de medición para conseguir un diagnóstico preciso, se debe considerar la sensibilidad, precisión, ubicación y alimentación para poder escoger el sensor más ideal para dicho proceso.

- **Implementación de un sistema de control para ingreso de soluciones química en proporción a la contaminación del agua:**

Se usan los conceptos teóricos para el desarrollo del algoritmo de control que permite poder ingresar la cantidad deseada de agentes que se encarga de realizar el proceso Foto-Fenton con la mejor efectividad posible.

- **Implementación del interfaz Humano - Máquina:**

Se realiza la implementación de un *HMI*<sup>9</sup>, para la manipulación de los usuarios durante la ejecución del proceso.

---

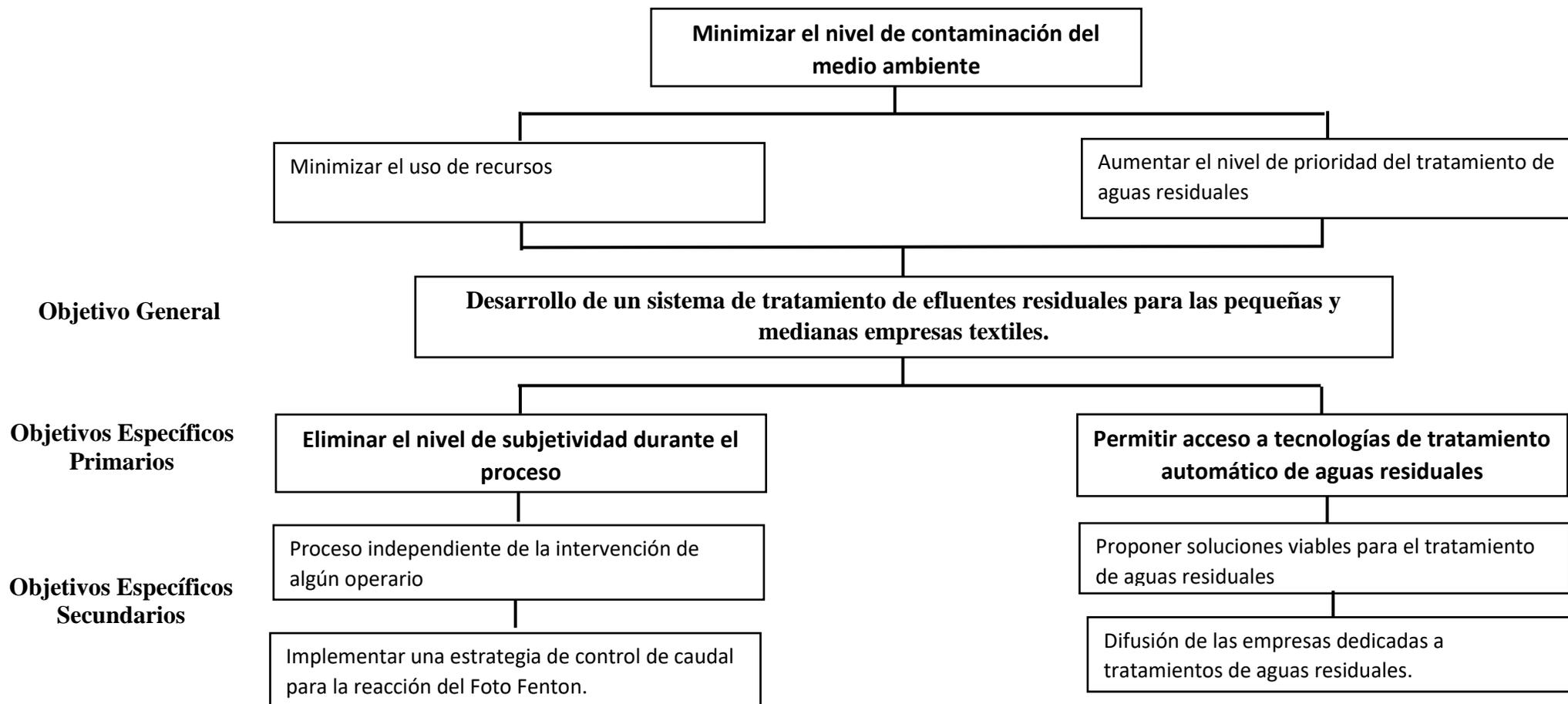
<sup>7</sup> Batch: Lote, porción

<sup>8</sup> NTU: Unidad nefelométrica de Turbidez

<sup>9</sup> HMI: Interfaz Humano Maquina

## 1.7 Objetivos

### 1.7.1 Árbol de Objetivo



Fuente: Elaboración Propia

Figura 4 Árbol de objetivos

## 1.7.2 Objetivo General

Desarrollar un sistema de tratamiento de efluentes residuales para las pequeñas y medianas empresas textiles.

## 1.7.3 Objetivos Específicos e Indicador de Logro

- Implementar un sistema que sea capaz de realizar el tratamiento de aguas residuales de manera automática.

**Indicador: Implementación de una máquina prototipo que realice el tratamiento de aguas residuales de la industria textil de manera autónoma.**

- Desarrollar un software de control que permita realizar el tratamiento de aguas residuales, así como monitorear los parámetros, las etapas del proceso y el estado de los instrumentos.

**Indicador: Funcionamiento del sistema de control del proceso e implementación de un HMI para visualizar los parámetros, etapas del proceso y estado de los instrumentos.**

- Desarrollar un proceso de tratamiento de aguas residuales que cumpla con los parámetros establecidos por los entes reguladores del medio ambiente.

**Indicador: Llevar al agua residual hasta los estándares ambientales de NTU, menor o igual a 100NTU, y pH, permanecer en un intervalo de 7 a 9.**

- Disminuir el tiempo de desinfección o tratamiento, pero sin que se vea afectada el cumplimiento de los estándares mencionados en el ítem anterior.

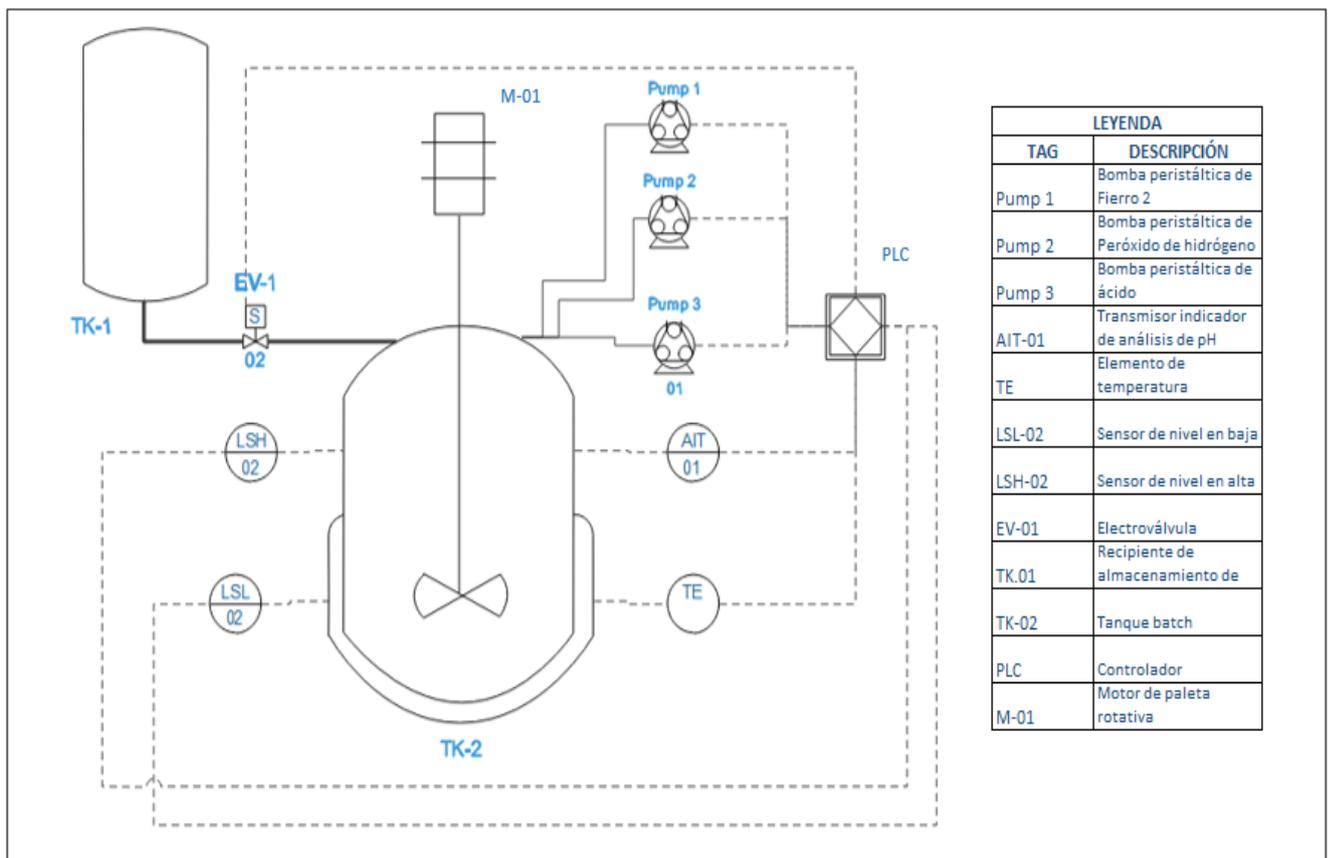
**Indicador: Implementar un sistema que tenga un tiempo de proceso que no exceda los 50 minutos, para lo cual utilizará el método Foto-Fenton.**

## 1.8 Descripción de la Solución Hipotética Propuesta

En las siguientes secciones se describe la solución propuesta y la metodología de diseño e implementación.

### 1.8.1 P&ID

En la **Figura 5**, se muestra el diagrama P&ID donde se visualiza los tanques de almacenamiento, antes de entrar al tanque *batch*, además de los transmisores, bombas, electroválvulas, entre otros.



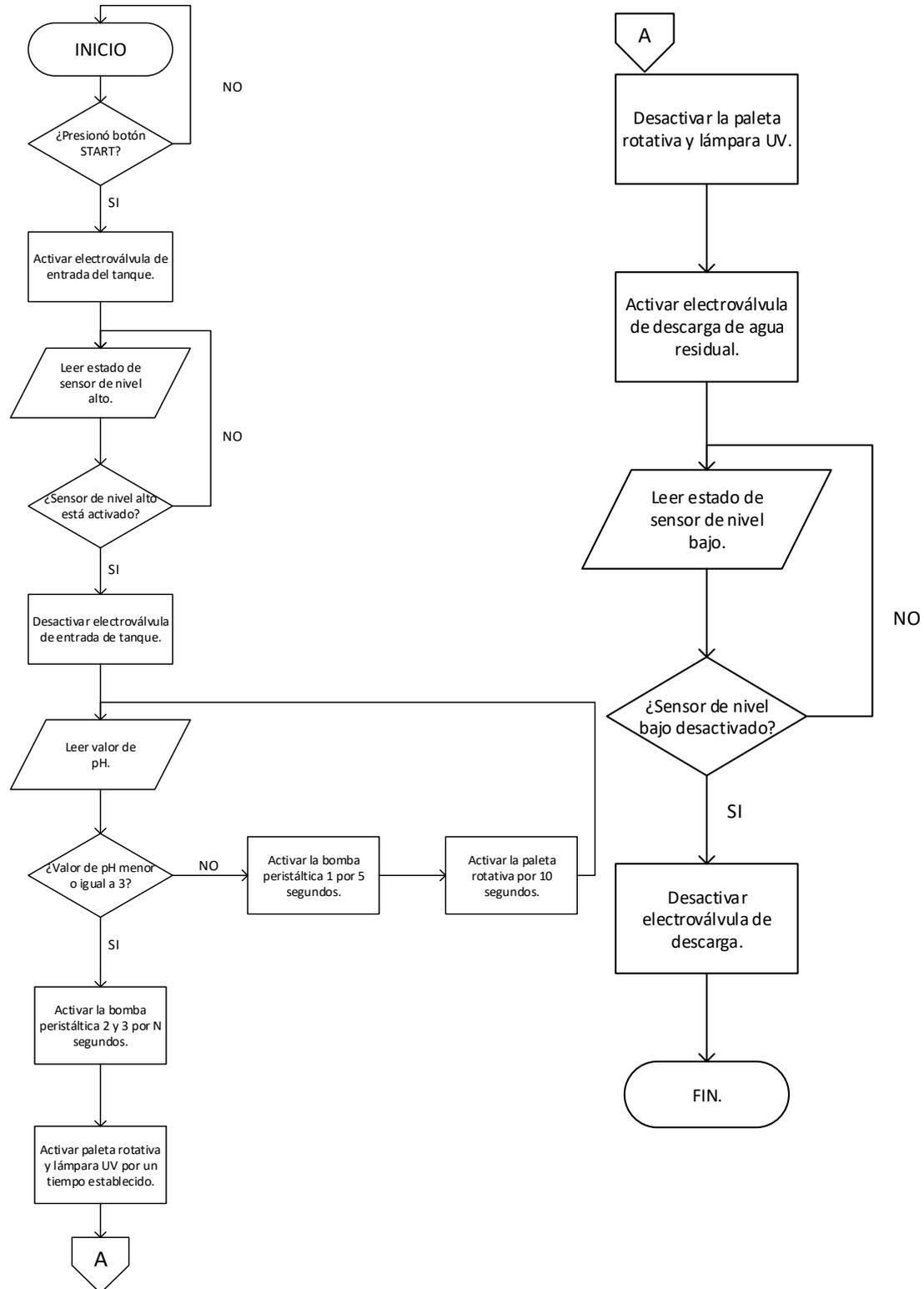
## 1.8.2 Pasos del funcionamiento

A continuación, se detallan los pasos que se realizan durante el tratamiento de aguas residuales automatizado por cada *batch* del sistema, el cual es el mismo que debe seguir el proyecto final implementado.

- I. El sistema se inicia con el llenado del tanque (*batch*) hasta el nivel de sensor en alto.
- II. Se analiza el nivel de pH mediante un transmisor, luego se ingresan las soluciones químicas y a la vez se homogeniza el efluente con una paleta rotativa motorizada. El proceso continúa hasta llegar a un nivel óptimo de pH igual a 3.
- III. Se inicia con el proceso Foto-Fenton, se ingresan las soluciones químicas (Fierro 2 y el Peróxido de Hidrógeno) y se encenderá la Luz UV.
- IV. Se deja el *batch* con las soluciones y la Luz UV encendida por un tiempo de 45 minutos para obtener la degradación de turbidez esperada.
- V. Se descarga el *batch* por completo para reiniciar el proceso.

### 1.8.3 Diagrama de flujo de Filosofía de control

A continuación, en la **Figura 6** se muestra el diagrama de flujo que se desarrolló en la filosofía de control:



**Fuente:** Elaboración Propia  
**Figura 6** Diagrama de Flujo

#### **1.8.4 Limitaciones**

El proyecto desarrollado tiene ciertas limitaciones, que se describen a continuación:

- El producto solo debe aplicarse a los tipos de colorante específicos brindados por la empresa.
- El diseño mecánico está destinado para un volumen establecido de 20 litros.
- La validación del sistema se realiza bajo un sensor espectrofotométrico el cual es brindado por la empresa.
- El movimiento de la paleta rotativa debe ser a una velocidad constante (18-20 rpm) para que las turbulencias no interfieran en la correcta medición de los sensores.
- El operador debe revisar eventualmente los tanques de los químicos para su llenado.
- El sistema está diseñado para desechar en un lugar específico, alcantarillado.

#### **1.8.5 Resultados esperados**

La implementación de este proyecto busca conseguir ciertos resultados que se describen a continuación:

- El desarrollo de un sistema mecánico resistente y robusto que no encuentre inconvenientes al momento de utilizar un reactivo y catalizador de altas consecuencias con algún material no admisible.
- Un sistema de control que permita cumplir correctamente con los pasos establecidos del proceso.
- El desarrollo de un sistema de registro de cada proceso para una futura investigación a abarcar mayores tipos de tinte y diferentes concentraciones.
- Realizar un proceso que cuente con el número mínimo de etapas y que además no genere ninguna clase de residuos posteriores que puedan contaminar.
- Disminuir el nivel de contaminación por parte de las empresas textiles al momento de botar por el alcantarillado las aguas residuales provenientes de sus distintos procesos.

- Difundir nuevos métodos de tratamientos de aguas residuales, que cumplan con los estándares requeridos.

## **1.9 Aplicaciones y usuarios potenciales**

La aplicación del presente proyecto está destinada al tratamiento de aguas residuales de los pantalones de vaqueros (jeans) de la industria textil; los usuarios potenciales son las textiles, específicamente las que se han catalogado como PYMES, que se dedican a la producción de los pantalones de vaqueros (jeans).

## **1.10 Viabilidad**

### **1.10.1 Viabilidad técnica:**

Se estima que, para desarrollar el proyecto, se requieren principalmente conocimientos de desarrollo de software, procesos de oxidación, automatización industrial, diseño mecánico y manufactura. Estos conocimientos se han desarrollado en los siguientes cursos:

- **Estrategias de Control:** Modelamiento de Sistemas Físicos, Ingeniería de Control.
- **Procesos de oxidación:** Operaciones Unitarias, Termodinámica Aplicada.
- **Instrumentación:** Electrónica Industrial, Sensores y Actuadores.
- **Automatización Industrial:** Sistemas de Automatización Industrial., control de procesos.
- **Diseño Mecánico:** Dibujo de Ingeniería, Mecánica para ingenieros.

Además, se contará con acceso a equipamiento de la universidad, como son osciloscopios, multímetros, computadoras, herramientas y espacios de trabajo. Los componentes a adquirir se pueden comprar o en distribuidores locales o importar del extranjero con facilidad, pues no se requieren permisos especiales. Finalmente, se concluye que técnicamente el proyecto es viable, pues se tienen los conocimientos necesarios para su desarrollo, se cuenta con la infraestructura adecuada y la adquisición de materiales no presenta mayores inconvenientes.

### **1.10.2 Viabilidad económica:**

El proyecto es económicamente viable debido a que los costos que implican la implementación pueden ser cubiertas por los autores (\$/5,490.00).

La solución propuesta presenta un gran mercado potencial en el tratamiento de aguas residuales para medianas empresas textiles y laboratorios de pruebas de los mismos.

### **1.10.3 Viabilidad social:**

Si bien es cierto la solución industrial propuesta cumplirá el estándar de los entes reguladores para evitar posibles sanciones medio ambientales. El cumplimiento del tratamiento de las aguas residuales hasta llegar los parámetros permitidos apoya socialmente a toda la población ya que se fomenta la conservación de una de las sustancias fundamentales para la existencia de la vida humana. Se concluye que el proyecto es socialmente viable.

### **1.10.4 Viabilidad operativa:**

Los requerimientos operativos para el funcionamiento de la solución industrial son, básicamente, acceso a una conexión eléctrica de 220VAC para la alimentación de todo el sistema eléctrico/control, implementación del tablero con fuentes de 24VDC para energizar la instrumentación del sistema.

En cuanto al espacio necesario para la instalación, la solución propone un diseño compacto y desmontable, para que pueda ser instalado y transportado con facilidad.

Además, el proyecto tendrá en el tablero de control un HMI sencillo y de fácil interpretación para los usuarios finales. Por tanto, se puede concluir que es viable operativamente.

## 1.11 Comentarios adicionales

A partir de la experiencia obtenida en la investigación, acerca de posibles formas de brindar soluciones al problema planteado por la empresa del ineficiente sistema de tratamiento de aguas residuales para las pequeñas y medianas empresas textiles, se concluye lo siguiente:

- Se tiene que realizar una investigación sobre las posibles soluciones que brinda el mercado actual, analizando las ventajas y desventajas de esos productos, además, de los costos que implican adquirirlos.
- Para que el desarrollo del proyecto se pueda llevar a cabo, se tuvo que analizar los requerimientos de la empresa, además de los parámetros más importantes a tomar en cuenta, que deberán ser controlados.
- Para poder desarrollar el proceso de la manera más eficiente se tendrá que realizar pruebas sobre el arreglo idóneo de la ubicación de las luces artificiales UV, además de calcular la cantidad de solución química que se tendrá que agregar por cada litro de agua que se tratará.
- El resultado de las mediciones de las variables que se van a tomar en cuenta se debe contrastar con los estándares ambientales que se deben cumplir, para corroborar la confiabilidad del proceso, en este caso que sea menor a 100NTU.
- El proyecto es viable técnica, económica, social y operativamente.
- El desarrollo del proyecto ayudará a eliminar la subjetividad del proceso.
- El fundamento teórico de la base química será brindado por la empresa.
- Se verificará la solución final con un turbidímetro y ph-metro propios de la empresa.

## 2 CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

### 2.1 Aguas Residuales

Las aguas residuales (figura 7) son aquellas que tienen composición variada, provenientes de las descargas de usos municipales, industriales, comerciales, de servicios agrícolas, pecuarios, domésticos incluyendo fraccionamientos y en general de cualquier otro uso, que hayan sufrido degradación en su calidad original<sup>10</sup>



Fuente: Ecured, 2020

**Figura 7.** Respuesta al escalón en lazo abierto

Las aguas residuales se pueden definir como aquellas que por uso del hombre, representan un peligro y deben ser desechadas, porque contienen gran cantidad de sustancias y/o microorganismos<sup>11</sup>.

---

<sup>10</sup> (Bermeo, 2016).

<sup>11</sup> Espigares y Perez, 1985

## **2.1.1 Características de las Aguas Residuales**

### **Características de Aguas residuales urbanas**

- Gran cantidad de sólidos presentes.
- Abundancia de sustancias biodegradables.
- Presencia de un gran número de microorganismos.

### **Características de Aguas residuales industriales**

- Los efluentes industriales deben su diversidad a los procesos de los que proceden.
- Pueden tener una composición más o menos constante, o estar sujeta a variaciones cualitativas y/o cuantitativas considerables, según los horarios de funcionamiento de las industrias, la demanda del mercado o la posible influencia estacional en la producción<sup>12</sup>.

## **2.1.2 Composición de las Aguas Residuales de la industria textil**

Las aguas residuales generadas en los procesos de tintura y acabados textiles presentan las siguientes características:

- Gran variabilidad de caudal y carga contaminante
- Bajo contenido de materia coloidal y en suspensión
- La mayor parte de contaminantes son solubles y moderadamente biodegradables
- Su carga orgánica media (DQO) es aproximadamente el doble que la de un efluente urbano
- Su toxicidad es baja comparada con otros sectores industriales
- A menudo son deficitarias en nutrientes (N, P)
- Exentas de microorganismos patógenos
- Sus principales características específicas son su elevada coloración y salinidad<sup>13</sup>.

---

<sup>12</sup> (Bermeo, 2016).

<sup>13</sup> (Aguasimple, 2020)

### **2.1.3 Contaminación**

Las aguas residuales, debido a la gran cantidad de sustancias (algunas de ellas tóxicas) y microorganismos que portan, pueden ser causantes y medios de transporte de contaminación, en aquellos lugares donde son evacuadas sin ningún tratamiento previo. Se puede definir la polución del agua como una modificación, generalmente provocada por el hombre, de la calidad del agua, haciéndola impropia y peligrosa para el consumo humano, la industria, la agricultura, la pesca, las actividades recreativas, así como para los animales domésticos y la vida natural<sup>14</sup>.

Las aguas residuales generadas por la industria textil se clasifican como las más contaminantes entre todos los sectores industriales. El control de estas aguas residuales se ha vuelto cada vez más importante en años recientes. El endurecimiento de la regulación junto con una mayor aplicación está obligando a las industrias textiles a tratar efluentes residuales a un nivel cada vez más alto.

## **2.2 Variables de medición**

### **2.2.1 Turbidez**

La turbidez es una medida de la claridad del agua en arroyos, ríos, lagos y el océano. La turbidez describe la cantidad de luz dispersada o bloqueada por partículas suspendidas en una muestra de agua. El agua clara tiene poca turbidez y el agua turbia tiene un nivel de turbidez más alto. La turbidez es causada por partículas de suelo, materia orgánica, metales o materias similares suspendidas en la columna de agua.

La turbidez se mide comúnmente en Unidades de Turbidez Nefelométrica (NTU). El método nefelométrico compara cómo se dispersa la luz en una muestra de agua con la cantidad de luz dispersa en una solución de referencia. A menudo se utiliza un medidor de mano electrónico para medir la turbidez. Las mediciones también pueden ser realizadas mediante el uso de un disco Secchi o un instrumento similar..

---

<sup>14</sup> Espigares y Perez, 1985

## 2.2.2 pH

Medida cuantitativa de la acidez o basicidad de soluciones acuosas u otras soluciones líquidas. El término, ampliamente utilizado en química, biología y agronomía, traduce los valores de la concentración del ion hidrógeno, que normalmente varía entre 1 y  $10^{-14}$  equivalentes gramo por litro, en números entre 0 y 14. En agua pura, que es neutra (ni ácida ni alcalina), la concentración del ion hidrógeno es de  $10^{-7}$  equivalentes-gramos por litro, lo que corresponde a un pH de 7. Una solución con un pH inferior a 7 se considera ácida; una solución con un pH superior a 7 se considera básica o alcalina.

## 2.3 Proceso de oxidación

Los contaminantes en el aire y el agua pueden crear una atmósfera tóxica y pueden ser perjudiciales para la vida humana. Los cambios en el ciclo acuoso en combinación con la contaminación directa e indirecta por contaminantes disminuyen la calidad y disponibilidad del agua. Solo una pequeña fracción del agua del mundo es viable para el consumo humano, pero su disponibilidad y calidad están disminuyendo. Los contaminantes orgánicos presentes en las aguas residuales que provienen de productos farmacéuticos, productos químicos domésticos, productos de cuidado personal y desechos industriales amenazan los entornos acuáticos y el agua dulce, que son esenciales para la supervivencia<sup>15</sup>.

Claramente, se necesitan tecnologías de remediación ambiental efectivas para la purificación del aire y el agua para mejorar la calidad de vida a escala mundial. Una solución para tratar los micros contaminantes orgánicos es el uso de procesos de oxidación avanzada, que incluyen una amplia gama de reacciones de oxidación que son aplicables tanto a medios gaseosos como acuosos.

Los procesos de oxidación avanzada (POA) son métodos de eliminación de contaminantes mediante descomposición<sup>16</sup>. Los POA son deseables para la purificación de contaminantes del aire y el agua, ya que abarcan una amplia gama de reacciones radicales que pueden destruir las impurezas orgánicas.

---

<sup>15</sup> Jaciw *et al.*, 2020 y Khare *et al.*, 2020

<sup>16</sup> Jaciw *et al.*, 2020

### 2.3.1 Proceso de oxidación avanzada (POA)

Los POA se consideran tecnologías de tratamiento de aguas residuales altamente efectivas para eliminar contaminantes de baja biodegradabilidad, refractarios, inhibidores o de alta estabilidad química. Los mecanismos de la POA se basan en la formación in situ de especies oxidantes altamente reactivas, principalmente radicales hidroxilos ( $\bullet\text{OH}$ ). Los radicales  $\bullet\text{OH}$  son altamente efectivos, poderosos, difundidos por naturaleza y no selectivos con comportamiento electrofílico y un potencial redox de 2.8V, que aceleran la oxidación y degradación de una amplia gama de contaminantes en las aguas residuales al separar un átomo de hidrógeno del carbono alifático, o agregar un átomo de hidrógeno a los dobles enlaces y anillos aromáticos<sup>17</sup>. El  $\bullet\text{OH}$  destruye los compuestos e incluso los mineraliza en dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ) y sales inorgánicas hasta cierto punto.

#### **Especie orgánica + $\bullet\text{OH}$ $\rightarrow$ $\text{CO}_2$ + $\text{H}_2\text{O}$ + Iones inorgánicos**

##### ***Leyenda***

$\bullet\text{OH}$ : Oxhidrilo

$\text{CO}_2$ : Dióxido de Carbono

$\text{H}_2\text{O}$ : Hidruro de Oxígeno

Los compuestos orgánicos que contienen dobles enlaces carbono-carbono en su estructura son más reactivos hacia el  $\bullet\text{OH}$ . Sin embargo, la vida útil del  $\bullet\text{OH}$  es extremadamente corta ( $t < 10^{-3}\text{s}$ ), y una vez que el  $\bullet\text{OH}$  se ha formado, puede dar lugar a varias reacciones elementales. Los POA también funcionan a temperatura ambiente. Otros radicales y especies de oxígeno activo generadas en POA son los radicales superóxidos ( $\bullet\text{O}_2^-$ ), los radicales hidroperoxilo ( $\bullet\text{HO}_2^-$ ), los radicales sulfatos ( $\bullet\text{SO}_4^-$ ) y los radicales orgánicos peroxilo ( $\bullet\text{ROO}$ ). Estos radicales se forman a partir de un oxidante primario menos reactivo como el peróxido de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) o el ozono ( $\text{O}_3$ )<sup>18</sup>. La generación de estos agentes reactivos se puede lograr mediante varios procesos, que incluyen sonólisis, procesos basados en ozono (ozonización), irradiación ultravioleta

---

<sup>17</sup> Khare et al., 2020

<sup>18</sup> Kumar et al., 2020

(UV), oxidación de Fenton, oxidación de foto-Fenton, ultrasonido, fotocatalisis y varias combinaciones de estas tecnologías, como Fenton (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> / Fe<sup>2+</sup>), foto-Fenton (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/UV/Fe<sup>2+</sup>), peroxidación combinada con luz ultravioleta (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/UV), peroxona (O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), peroxona combinada con luz ultravioleta (O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/UV) , el sistema O<sub>3</sub>/UV, O<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub>/ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y O<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> / irradiación con haz de electrones<sup>19</sup>.

## 2.3.2 Tipos de Proceso de Oxidación avanzada

### 2.3.2.1 Proceso Fenton

La oxidación de Fenton (figura 8) es una tecnología muy eficaz y avanzada para tratar aguas residuales complejas. Además de mejorar la biodegradabilidad del efluente, el proceso Fenton elimina la demanda química de oxígeno (DQO) remanente, la toxicidad y el color de las aguas residuales. En el proceso de tratamiento de Fenton, el reactivo de Fenton, una mezcla de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y sales de hierro ferroso (Fe<sup>2+</sup>), genera radicales altamente reactivos (•OH), que implica una secuencia de reacción compleja y, en última instancia, conduce a la eliminación orgánica de las aguas residuales. El Fe<sup>2+</sup> inicia y cataliza la descomposición de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> en condiciones ácidas, lo que resulta en la generación de •OH<sup>20</sup>.

El mecanismo del proceso de Fenton se presenta mediante las siguientes reacciones:



#### **Leyenda**

*Fe<sup>2+</sup>: Ion Ferroso*

*Fe<sup>3+</sup>: Ion Férrico*

*H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>: Peróxido de Hidrógeno*

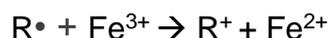
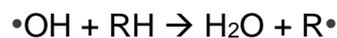
*OH<sup>-</sup>: Hidroxilo*

*RH: Reactivo Ácido*

*R•: Reactivo Cargado*

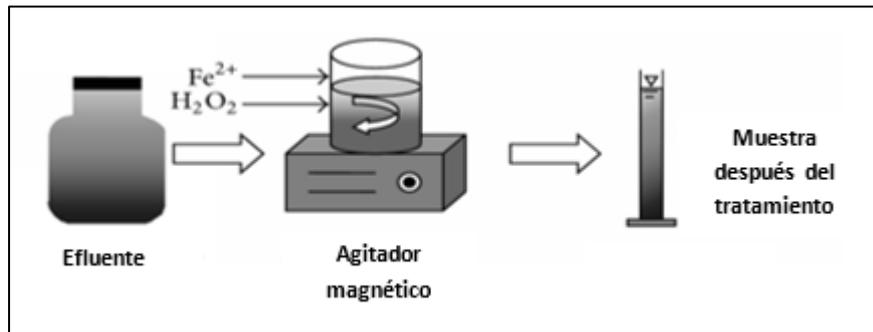
*R<sup>+</sup>: Reactivo Iónico*

*•OH: Oxhidrilo*



<sup>19</sup> Fernandes et al., 2018

<sup>20</sup> Fernandes et al., 2018



Fuente: Hindawi, 2018

**Figura 8.** Montaje experimental del proceso Fenton

Aunque los procesos de oxidación basados en la reacción de Fenton son químicamente muy efectivos para tratar una amplia gama de contaminantes orgánicos en las aguas residuales, tienen varias limitaciones que incluyen una alta formación de lodos; operación a valores de pH adversos (2-3); la adición de cantidades relativamente grandes de  $\text{Fe}^{2+}$ ; la concentración de  $\text{H}_2\text{O}_2$ ; ralentización de la reacción de Fenton después de la conversión inicial de  $\text{Fe}^{2+}$  en iones férricos ( $\text{Fe}^{3+}$ ); la presencia de otros iones como fosfato, sulfato, fluoruro, bromuro y cloruro; la inactivación de iones de metales pesados en el lodo mediante la formación de complejos de hidróxido; y la necesidad de separar el catalizador después del proceso<sup>21</sup>.

Además, otra característica limitante del proceso de oxidación basado en la reacción de Fenton es la generación de intermedios recalcitrantes, que pueden restringir la mineralización completa de los contaminantes. Incluso con la existencia de estas limitaciones latentes, los procesos de reacción de Fenton convencionales se han utilizado ampliamente en el tratamiento de aguas residuales industriales a pequeña escala o en la eliminación de contaminantes especiales.

---

<sup>21</sup> Meng *et al.*, 2018

### 2.3.2.2 Proceso Foto-Fenton

En busca de las limitaciones del proceso clásico de Fenton, se ha desarrollado varios otros procesos a partir de este. El primero consistió en acoplar la energía luminosa de fuentes UV o las emisiones del sol en un proceso llamado fotooxidación Fenton. El proceso de foto-Fenton ( $\text{H}_2\text{O}_2$  /  $\text{Fe}^{2+}$  / UV) implica la formación de  $\bullet\text{OH}$  a través de la fotólisis de  $\text{H}_2\text{O}_2$  en presencia de radiación UV. De este modo, el  $\text{Fe}^{3+}$  producido se convierte fotocatalíticamente en  $\text{Fe}^{2+}$ , con la formación de un equivalente adicional de  $\text{OH}^{22}$  (figura 9).



**Leyenda**

$\text{Fe}^{3+}$ : Ion Férrico

$\text{H}_2\text{O}$ : Hidruo de Hidrógeno

$\text{Fe}^{2+}$ : Ion Ferroso

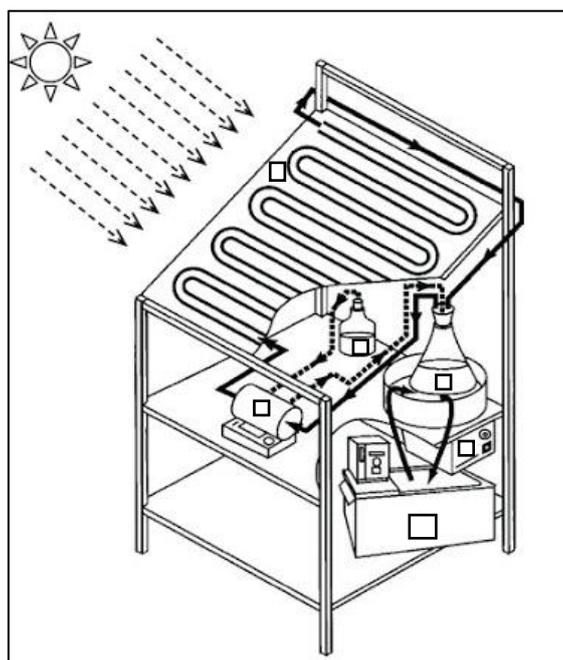
$\text{H}^+$ : Protón

$\bullet\text{OH}$ : Oxhidrilo

La reacción de foto-Fenton proporciona velocidades más rápidas y grados más altos de mineralización en comparación con el proceso Fenton convencional. Esta reacción puede ser impulsada por fotones de baja energía y también puede lograrse mediante irradiación solar. Este hecho puede reducir significativamente el costo operativo del tratamiento. Además, este proceso ha sido fundamental para mejorar la cinética y el rendimiento del proceso clásico de Fenton, incluida la disminución de la demanda del catalizador y la mejora de la eliminación del color.

---

<sup>22</sup> Ghanbarzadeh *et al.*, 2018



Fuente: Hindawi, 2018

**Figura 9.** Montaje experimental del proceso foto-Fenton

Nota: El montaje experimental es muy similar al del proceso Fenton, con la diferencia que el efluente en tratamiento se bombea a través de un conducto que está expuesto a radiación UV. Esta radiación puede ser solar, como proveniente de lámparas. En la mayoría de casos el efluente es recirculado para mejorar el rendimiento del proceso.<sup>23</sup>

Sin embargo, el proceso de foto-Fenton no aborda las otras limitaciones, especialmente la operación con pH bajo y el problema de iones de metales pesados altos en las aguas residuales finales. También hay informes de un rendimiento mejorado en la eliminación de DQO, un aumento de la biodegradabilidad y la desintoxicación de aguas residuales complejas después del tratamiento con oxidación foto-Fenton<sup>24</sup>. La toxicidad del H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> para varios microorganismos y el uso de cantidades excesivas posiblemente podrían deteriorar la eficiencia de degradación general en los casos en los que el proceso de Fenton va seguido de oxidación biológica. Además, la

---

<sup>23</sup> Samet et al. 2012

<sup>24</sup> Wang et al., 2016

necesidad de acidificación de las aguas residuales debido al rango óptimo de pH bajo (pH 3) para que ocurra la reacción de foto-Fenton y la necesidad inevitable de eliminar el catalizador al final de la reacción son limitaciones adicionales de estos POA. Otra modificación clave del proceso clásico de Fenton tiene como objetivo eliminar las limitaciones de la operación de pH bajo y la recuperación de catalizadores gastados de las aguas residuales mediante el uso de procesos heterogéneos de Fenton.

Implica incrustar el catalizador ferroso y el grupo ácido en un material portador. Al limitar el suministro de catalizador en el efluente, el método asegura que se forme un lodo mínimo por el proceso de coagulación. Además, se minimiza la cantidad de iones de metales pesados en el lodo y el efluente tratado. Se supone que los iones del catalizador se liberan lentamente del empotramiento donde reaccionan con el  $\text{H}_2\text{O}_2$  para formar los radicales<sup>25</sup>.

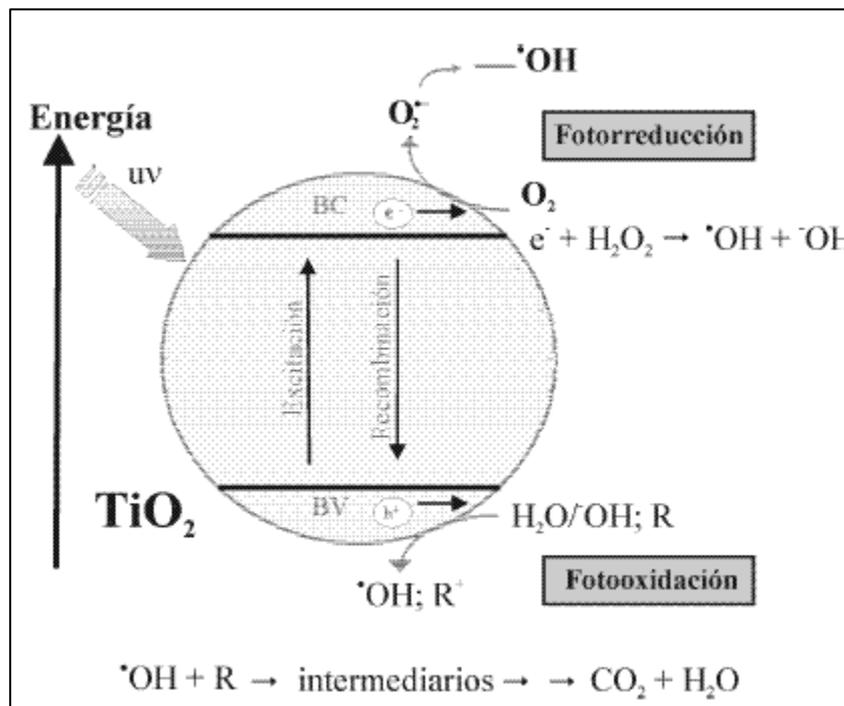
### **2.3.2.3 Fotocatálisis heterogénea**

En este caso, a los procesos de oxidación antes mencionados se ha introducido una nueva clase de catalizador clasificado como catalizador heterogéneo. Los catalizadores heterogéneos se preparan dispersando las nanopartículas de hierro y titanio sobre diferentes sustratos mesoporosos y microporosos. La alúmina activada, las partículas de sílice y el carbón gráfico son algunos ejemplos comunes de sustratos que se utilizan con frecuencia para mejorar la alta dispersión de nanopartículas. Los catalizadores heterogéneos debido a la alta dispersión y el área de superficie alta pueden ayudar a aumentar la generación de especies reactivas para los POA. Se han informado estudios de POA con varios contaminantes orgánicos dopando / dispersando las diferentes nanopartículas metálicas e iones metálicos, incluidos  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MnO}_2$ ,  $\text{TiO}_2\text{-Me}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  y  $\text{Mn}^{2+}$  en varios sustratos. Por tanto, estos procesos se clasifican como catálisis heterogénea. Los pasos básicos involucrados en los diferentes POA para la mineralización exitosa de compuestos orgánicos complejos a  $\text{CO}_2$  y agua

---

<sup>25</sup> Wang *et al.*, 2016

son muy similares a los del proceso Foto-Fenton<sup>26</sup>. Ver proceso en la **Figura 10**.



Fuente: Sarria, 2005.

**Figura 10.** Esquema del proceso fotocatalítico sobre una partícula semiconductor

<sup>26</sup> Zhou, 2016

## 2.4 Industria Textil

La industria textil es la industria que involucra las secciones como investigación, diseño, desarrollo, fabricación y distribución de textiles, tejidos y confecciones.

Esta se caracteriza por la actividad económica cuyo objetivo está centrado en la producción de fibras, hilados, tejidos, confecciones y artículos textiles para el hogar y decoración, así como para fines técnicos e industriales. Dentro de la manufactura, el textil es uno de los sectores más antiguos y complejos que incluye un gran número de subsectores que cubren todo el ciclo productivo, desde las materias primas y productos intermedios, hasta la producción de productos finales<sup>27</sup>.

Las actividades de la industria textil presentan diferentes subdivisiones, cada una con sus propias características. La duración del proceso textil y la variedad de sus procesos técnicos propician la convivencia de diferentes sectores en cuanto a su estructura e integración empresarial. La industria textil está desarrollando aplicaciones de sistemas expertos para aumentar la producción, mejorar la calidad y reducir los costos<sup>28</sup>.

### 2.4.1 Jeans

Fue a fines de la década de 1850 y Estados Unidos estaba en crisis. El oro de California casi se había acabado y la economía de los países estaba en problemas. Este fue un momento de supervivencia para los estadounidenses y de encontrar un nuevo comienzo. Gracias al marketing intensivo de productos durante finales de 1800 y principios de 1900 permitió que la prenda floreciera en un clima económico difícil<sup>29</sup>.

Era el año 1873 y el Sr. Levis Strauss y el Sr. Davis se asociaron para resolver el problema de calidad que los mineros de oro encontraron con su ropa de trabajo.

La Segunda Guerra Mundial cambió el mundo de los jeans para siempre. Levis ya no era el único dueño de jeans (figura 12), pero otros emprendedores comenzaron a fabricar sus propias marcas, como Lee y Wrangler, por

---

<sup>27</sup> Pérez *et al.*, 2017

<sup>28</sup> Pérez *et al.*, 2017

<sup>29</sup> Eklund, 2014

mencionar algunos. Los soldados estadounidenses marcaron las tendencias, la moda si se quiere, y los jeans ahora formaron parte de la globalización<sup>30</sup>.



Fuente: Sarria, 2005.

**Figura 11.** Pantalones Jeans

Durante la época de la guerra, el gobierno estadounidense ordenó a las empresas de jeans más grandes que produjeran en masa prendas para soldados. Había una escasez de textiles de mezclilla y con eso los jeans ganaron un prestigio de propiedad aún mayor. La escasez hizo que todos añoraran un par de jeans; no solo en Estados Unidos sino en muchas partes del mundo. Este fue el comienzo de la globalización masiva de los jeans. Los jeans ya no solo se comercializan como ropa de trabajo fuerte y duradero, sino que se aceptan en nuevos entornos y con eso los jeans adquirieron una identidad extendida; los jeans se convirtieron en parte de la vida diaria de las personas y de la moda<sup>31</sup>.

## 2.4.2 Colorantes y teñido

Un colorante es una sustancia capaz de impartir su color a un sustrato determinado, como pintura, papel o algodón, en el que está presente. No todos los colorantes son tintes. Un tinte debe ser soluble en el medio de aplicación, generalmente agua, en algún momento durante el proceso de coloración. Por lo

---

<sup>30</sup> (Eklund, 2014)

<sup>31</sup> Ciurana, 2015

general, también exhibirá cierta existencia para el material que se está teñiendo y se absorberá de la solución acuosa.

Por otro lado, los pigmentos son colorantes compuestos por partículas insolubles en el medio de aplicación. No tienen sustentividad para el material. Dado que las partículas son demasiado grandes para penetrar en el sustrato, normalmente están presentes en la superficie del sustrato. Por tanto, el pigmento se elimina fácilmente a menos que se fije con un adhesivo. La mayoría de los procesos de teñido de textiles implican inicialmente la transferencia del producto químico coloreado, o su precursor, desde la solución acuosa a la superficie de la fibra; un proceso llamado adsorción. A partir de ahí, el tinte puede difundirse lentamente en la fibra. Esto ocurre en los poros o entre las moléculas de polímero de fibra, dependiendo de la estructura interna de la fibra. El proceso general de adsorción y penetración del tinte en la fibra se denomina absorción<sup>32</sup>.

La absorción es un proceso reversible. Por lo tanto, el tinte puede volver al medio acuoso desde el material teñido durante el lavado, un proceso llamado desorción. Además de la absorción directa, la coloración de una fibra también puede implicar la precipitación de un tinte dentro de la fibra, o su reacción química con la fibra. Ya hemos visto que estos dos tipos de procesos dan como resultado una mejor solidez al lavado, porque son procesos esencialmente irreversibles. Para la difusión en una fibra, los tintes deben estar presentes en el agua en forma de moléculas individuales. Suelen ser aniones coloreados; por ejemplo, sales de sodio de ácidos sulfónicos como el rojo Congo. También pueden ser cationes o moléculas neutras con ligera solubilidad en agua, como tintes dispersos. El tinte debe tener cierta atracción por la fibra en las condiciones de teñido para que la solución se agote gradualmente<sup>33</sup>.

---

<sup>32</sup> Broadbent, 2001

<sup>33</sup> Broadbent, 2001

### 2.4.2.1 Proceso de teñido.

El objetivo del teñido es la coloración uniforme de la masa de fibras que constituyen el material, generalmente para que coincida con un color predeterminado. Cualquier diferencia significativa en el color del solicitado por el cliente, y cualquier desnivel del color de una tela, será inmediatamente evidente<sup>34</sup>. Muchos factores pueden influir en la apariencia final del color. Estos incluyen las características de la fibra como el brillo, la longitud de la fibra, la textura y la sección transversal, así como la construcción de la tela. Dado que la muestra coloreada de un cliente rara vez es del mismo material que la que se va a teñir, los laboratorios de tintorería dedican un tiempo considerable a las pruebas de teñido destinadas a desarrollar recetas para reproducir el color deseado en los productos dados. La coloración de un material textil se consigue de diferentes formas:

- a. Teñido directo, en el que el tinte en la solución acuosa en contacto con el material se absorbe gradualmente en las fibras debido a su sustantividad inherente.
- b. Teñir con un precursor soluble del tinte, que forma un pigmento insoluble en la profundidad de las fibras en el tratamiento después del teñido.
- c. Teñido directo seguido de reacción química del tinte con grupos apropiados en la fibra.
- d. Adhesión del tinte o pigmento a la superficie de las fibras utilizando un aglutinante apropiado.

Todos estos métodos, excepto el último, requieren que las fibras, en algún momento, absorban el tinte, o un precursor apropiado, de una solución acuosa. Este proceso es esencialmente reversible. Sin embargo, se debe tener en cuenta que la precipitación de un pigmento y la reacción con la fibra son procesos químicos irreversibles. El teñido es un proceso de agotamiento por lotes o un proceso continuo de impregnación y fijación. En la técnica de extracción, todo el tejido está en contacto repetido con todo el licor de tinte durante el teñido y las fibras absorben gradualmente los tintes<sup>35</sup>.

---

<sup>34</sup> Broadbent, 2001

<sup>35</sup> Eklund, 2014

A menudo es necesario un control cuidadoso de la temperatura de teñido, el pH y las concentraciones de químicos auxiliares para obtener teñidos nivelados y bien penetrados. Esto es esencial si el tinte absorbido inicialmente no puede migrar de áreas muy teñidas a mal teñidas durante el proceso. En los métodos de impregnación continua, la tela pasa a través de un pequeño baño que contiene la solución de tinte y luego dos rodillos cubiertos de caucho exprimen el exceso de solución. Este proceso se llama relleno. No hay migración del tinte desde el punto de impregnación, excepto en las fibras, que es asistido por los rodillos de presión. Cada pequeño segmento de tela se encuentra con el licor de tinte solo una vez, por lo que el acolchado debe ser uniforme en todo el ancho de la tela y en toda su longitud. Después del relleno, los tintes deben difundirse en las fibras. Este paso se llama fijación. Puede ser tan simple como enrollar la tela y mezclarla durante varias horas, o tan compleja como un tratamiento térmico rápido en un horno de vapor o de aire caliente<sup>36</sup>.

Otras operaciones a menudo preceden o siguen al proceso real de teñido. Los pretratamientos incluyen fregado y blanqueo, a veces como operaciones continuas separadas o como procesos por lotes en la máquina de teñir. Estos eliminan las impurezas naturales y sintéticas de los productos y deben dar como resultado una absorción de agua uniforme. Después de teñir, el material se enjuaga para eliminar la solución adherida, pero es posible que necesite un tratamiento adicional mientras aún está en la máquina de teñir. Estos tratamientos posteriores pueden incluir:

- a. Lavado con detergente, al hervir o cerca del punto de ebullición, para eliminar cualquier tinte no fijado o pigmento poco adherido de las superficies de las fibras; este proceso se denomina enjabonado.
- b. Tratamiento con productos químicos para mejorar las propiedades de solidez del teñido; esto a menudo provoca un cambio de tono y complica la combinación de colores.
- c. Aplicación de productos químicos de acabado simples como suavizantes.

---

<sup>36</sup> Eklund, 2014

### 2.4.2.2 Componentes químicos

Además de las fibras, el agua y los tintes, y los productos químicos específicos para los procesos de preparación y acabado, la industria textil consume grandes cantidades de productos químicos auxiliares, distintos de los ácidos simples, las bases y las sales. Estos productos auxiliares incluyen muchos tipos de productos químicos orgánicos complejos utilizados como detergentes, agentes humectantes, auxiliares de tintura, agentes dispersantes y emulsionantes, productos químicos de postratamiento de teñido, lubricantes y suavizantes. Sirven para mejorar los procesos húmedos utilizados en el acabado textil. Su consumo en la industria textil supera al de los colorantes y muchos se utilizan en la fabricación de otro tipo de productos como papel, pinturas y detergentes domésticos.

Desafortunadamente, al igual que los colorantes, las marcas y los códigos de identificación de estos productos auxiliares ofrecen poca o ninguna información sobre su composición. Los productos auxiliares comerciales son frecuentemente mezclas, que a menudo contienen mucha agua. Cualquier producto que se venda para un propósito específico puede tener múltiples funciones tales como capacidad de control de humectación, detergente, dispersión y teñido. Por estas razones, el papel de los productos químicos auxiliares en el procesamiento y teñido en húmedo de textiles es confuso<sup>37</sup>.

---

<sup>37</sup> Broadbent, 2001

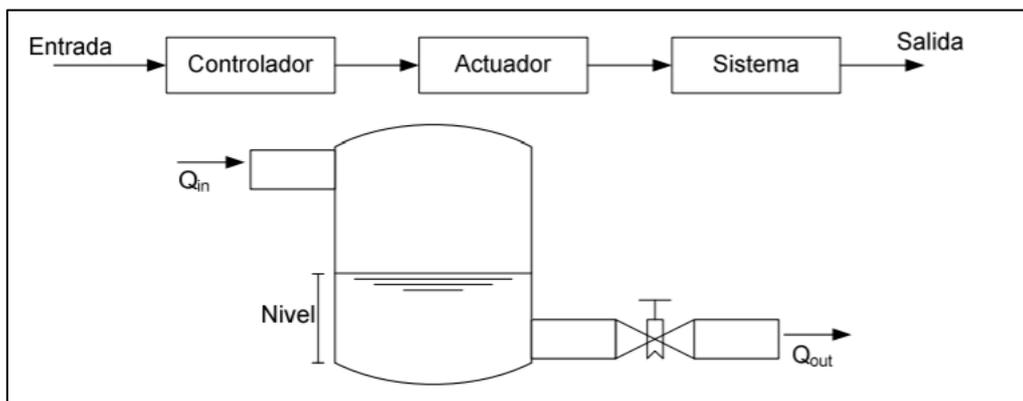
## 2.5 Sistema de control automático

### 2.5.1 Definición:

Un sistema automático de control es un conjunto de componentes físicos conectados o relacionados entre sí, de manera que regulen o dirijan su actuación por sí mismos, es decir sin intervención de agentes exteriores (incluido el factor humano), corrigiendo además los posibles errores que se presenten en su funcionamiento. Actualmente, cualquier mecanismo, sistema o planta industrial presenta una parte actuadora, que corresponde al sistema físico que realiza la acción, y otra parte de mando o control, que genera las órdenes necesarias para que esa acción se lleve o no a cabo<sup>38</sup>.

### 2.5.2 Control de lazo abierto

Un sistema de control en lazo o bucle abierto, es aquél en el que la señal de salida no influye sobre la señal de entrada. La exactitud de estos sistemas depende de su calibración, de manera que al calibrar se establece una relación entre la entrada y la salida con el fin de obtener del sistema la exactitud deseada.<sup>39</sup> Figura 12.



Fuente: Departamento de automatización Industrial, 2012

**Figura 12.** Representación de sistema de control de lazo abierto.

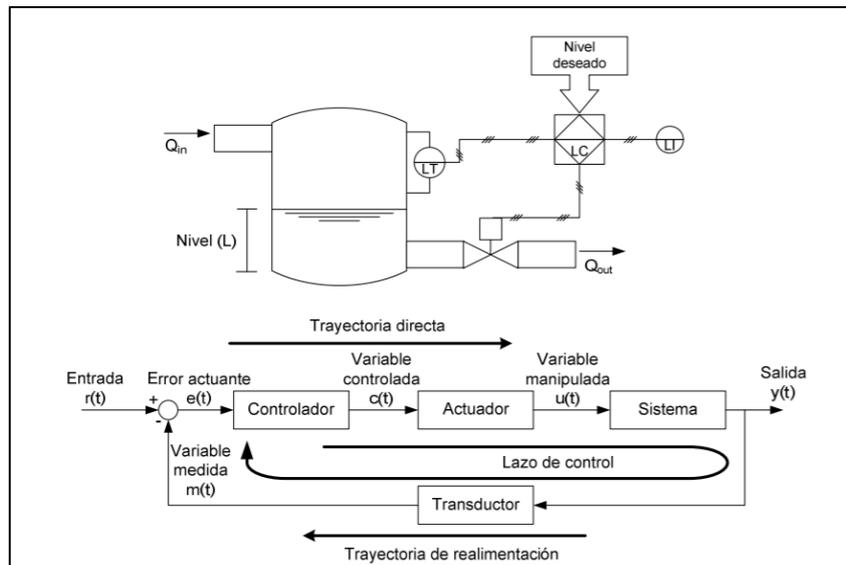
<sup>38</sup> Benjamin C. Kuo, 1996

<sup>39</sup> Benjamin C. Kuo, 1996

### 2.5.3 Control de lazo cerrado

Un sistema de control de lazo cerrado, es aquél en el que la acción de control es, en cierto modo, dependiente de la salida. La señal de salida influye en la entrada. Para esto es necesario que la entrada sea modificada en cada instante en función de la salida. Esto se consigue por medio de lo que llamamos realimentación o retroalimentación (feedback).

La realimentación es la propiedad de un sistema en lazo cerrado por la cual la salida (o cualquier otra variable del sistema que esté controlada) se compara con la entrada del sistema (o una de sus entradas), de manera que la acción de control se establezca como una función de ambas. A veces también se le llama a la realimentación, transductor de la señal de salida, ya que mide en cada instante el valor de la señal de salida y proporciona un valor proporcional a dicha señal entre la entrada y la salida con el fin de obtener del sistema la exactitud deseada.<sup>40</sup>Figura 13.



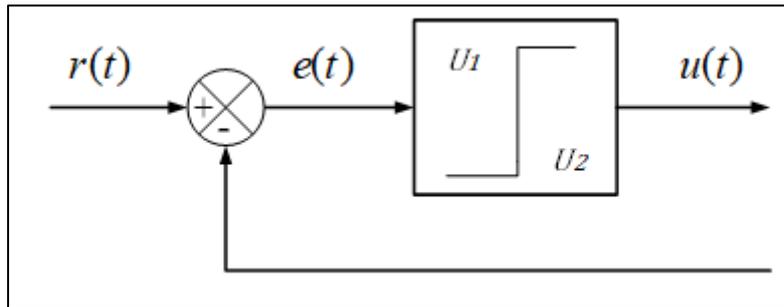
Fuente: Departamento de automatización Industrial, 2012

**Figura 13.** Representación de sistema de control de lazo cerrado.

<sup>40</sup> Benjamin C. Kuo, 1996

### 2.5.3.1 Control ON/OFF

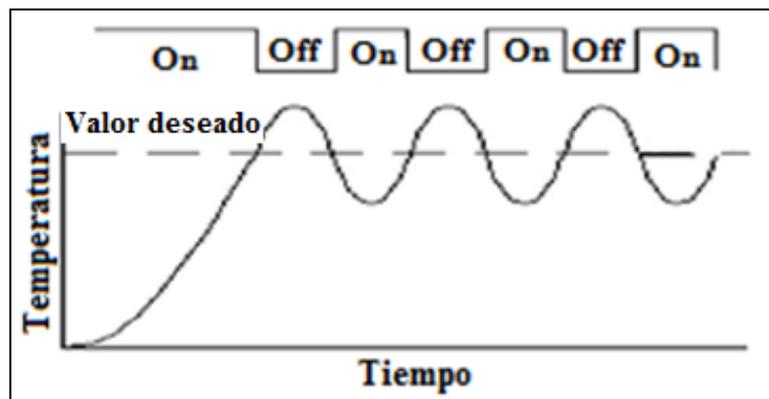
El control ON-OFF, también llamado todo-nada o abierto-cerrado, es la forma más simple de control por realimentación, es un control de dos posiciones en el que el elemento final de control sólo ocupa una de las dos posibles posiciones, en el cual la salida del controlador va de un extremo a otro cuando el valor de la variable controlada se desvía del valor deseado<sup>41</sup>.



Fuente: Desarrollo de un sistema automático para el proceso de vulcanización de neumáticos et. al 2020

**Figura 14.** Diagrama de bloques de control ON-OFF

En la figura 15, se puede apreciar el gráfico de Temperatura vs Tiempo de un termostato y la salida que este brinda antes un control ON/OFF.



Fuente: Fuente: Departamento de automatización Industrial, 2012

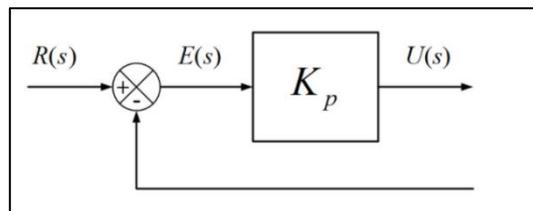
**Figura 15.** Ejemplo de salida ON/OFF - Termostato

<sup>41</sup> Universidad Tecnológica del Valle, 2012

### 2.5.3.2 Control Proporcional

Un sistema de control proporcional es un tipo de sistema de control de realimentación lineal<sup>42</sup>. El sistema de control proporcional es más complejo que un sistema de control encendido/apagado, pero más sencillo que un sistema de control proporcional-integral-derivativo (PID) que se puede utilizar para controlar la velocidad de crucero de un automóvil.

El sistema de control tipo encendido/apagado será adecuado en situaciones donde el sistema en general tiene un tiempo de respuesta relativamente largo, pero dará lugar a un comportamiento inestable si el sistema que está siendo controlado tiene un tiempo de respuesta breve. El control proporcional resuelve este problema de comportamiento mediante la modulación de la salida del dispositivo de control, la representación del modelo matemático que representa este sistema de control es el siguiente:



Fuente: Desarrollo de un sistema automático para el proceso de vulcanización de neumáticos et. al 2020

**Figura 16.** Diagrama de bloques de control proporcional

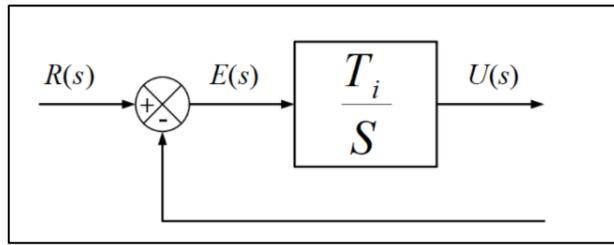
### 2.5.3.3 Control Integral

Un sistema de control integral es una acción de control que provoca un cambio en la señal de salida respecto del tiempo a una razón proporcional de la cantidad de error (la diferencia entre el valor de PV y SP) tiene como objetivo reducir el error del sistema en régimen permanente.<sup>43</sup> La acción de control integral recibe a veces el nombre de control de reposición o restablecimiento.

---

<sup>42</sup> Ogata, 1998

<sup>43</sup> Benjamin C. Kuo, 1996

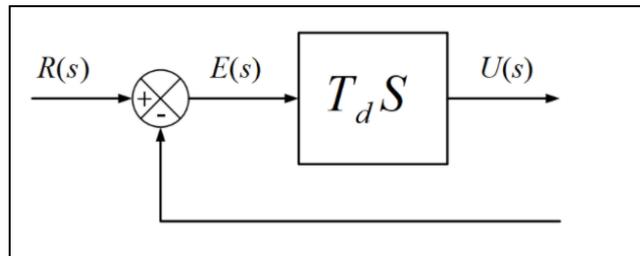


Fuente: Desarrollo de un sistema automático para el proceso de vulcanización de neumáticos et. al 2020

**Figura 17.** Diagrama de bloques un control integral.

#### 2.5.3.4 Control Derivativo

La derivada, algunas veces llamado rate(razón) o pre-act, es una acción de control que realiza un desplazamiento en la señal de salida proporcional a la tasa a la cual cambia la entrada<sup>44</sup>. La acción derivativa del controlador reacciona a que tan rápido cambia la entrada respecto al tiempo, alterando la señal de salida en proporción con la tasa de cambio de entrada.



Fuente: Desarrollo de un sistema automático para el proceso de vulcanización de neumáticos et. al 2020

**Figura 18.** Diagrama de bloques un control derivativo.

#### 2.5.3.5 Control Proporcional e Integrativo (PI)

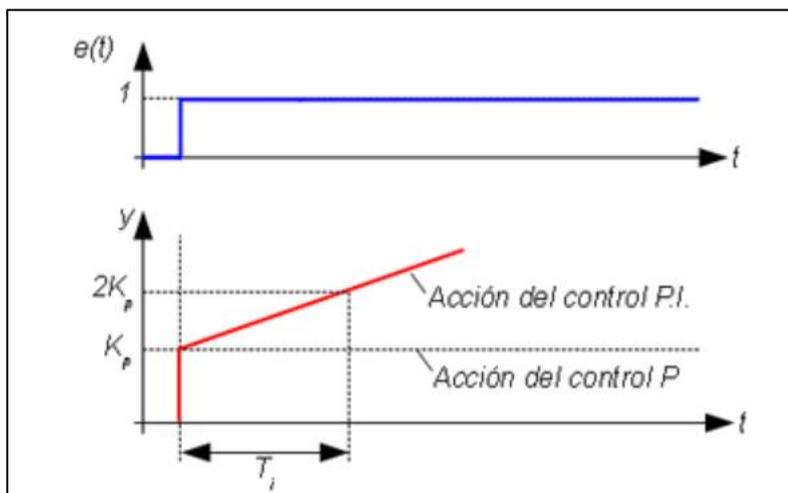
La acción integrativa permite que no exista un error de régimen estacionario en la respuesta a escalón del sistema. Al aplicar esta acción, se puede dar el caso de que la señal de salida de control tenga un valor diferente de cero cuando el error estacionario es cero. Para la obtención de este tipo de acción

---

<sup>44</sup> Benjamin C. Kuo, 1996

se añade a la parte proporcional el resultado de integrar la señal de error con una cierta constante denominada constante de integración<sup>45</sup>.

Donde  $K_p$  y  $T_i$  son parámetros que se pueden modificar según las necesidades del sistema. Si  $T_i$  es grande la pendiente de la rampa, correspondiente al efecto integral será pequeña y, su efecto será atenuado, y viceversa.



Fuente: Ogata, Ingeniería de control moderna, 2010.

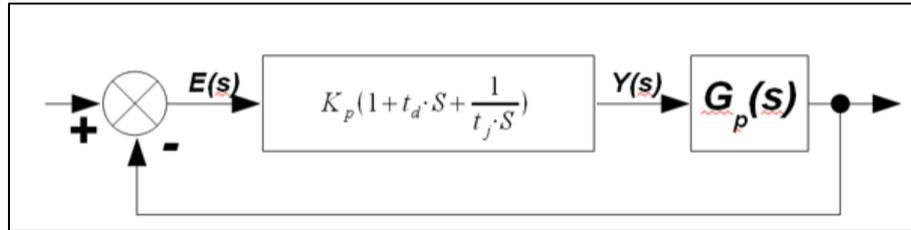
**Figura 19.** Respuesta temporal de un regulador PI.

### 2.5.3.6 Control Proporcional, Integral, derivativo (PID)

Un PID es un elemento clásico de control que está compuesto por tres partes, Proporcional, Integral, y Derivativo. Es un sistema de regulación que trata de aprovechar las ventajas de cada uno de los controladores de acciones básicas, de manera, que si la señal de error varía lentamente en el tiempo, predomina la acción proporcional e integral y, mientras que si la señal de error varía rápidamente, predomina la acción derivativa.<sup>46</sup> Tiene la ventaja de ofrecer una respuesta muy rápida y una compensación de la señal de error inmediata en el caso de perturbaciones.

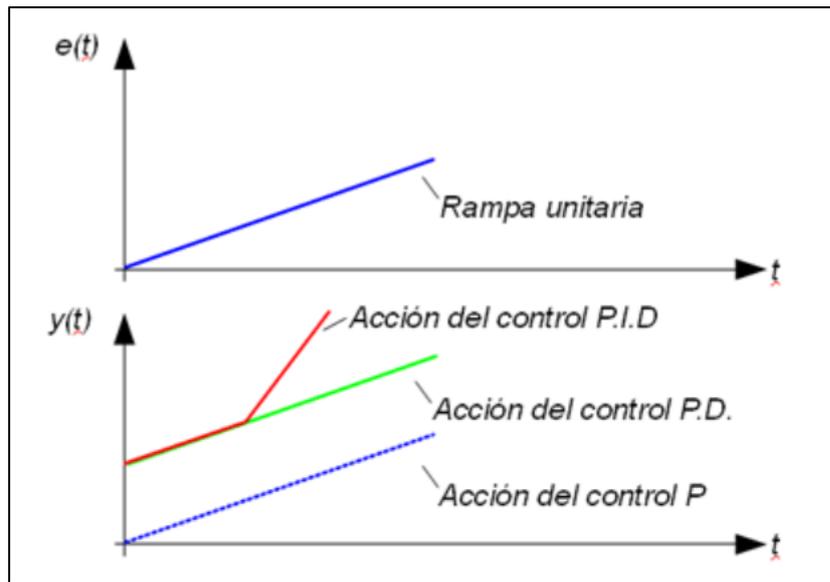
<sup>45</sup> Benjamin C. Kuo, 1996

<sup>46</sup> Ogata, 2018



Fuente: Desarrollo de un sistema automático para el proceso de vulcanización de neumáticos et. al 2020.

**Figura 20.** Diagrama de bloques de control Proporcional integral derivativo.



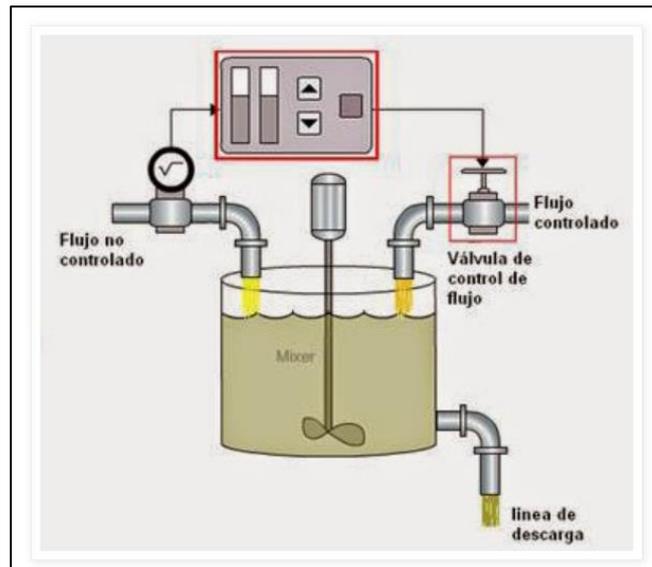
Fuente: Ogata, Ingeniería de control moderna, 2010.

**Figura 21.** Respuesta temporal de un regulador PID.

## 2.5.4 Control de razón

Se utiliza en los casos en que se requiera que dos o más reactivos, u otros elementos, se tengan que mezclar en una cierta proporción instante a instante (no es posible pesar uno y luego el otro para juntarlos de una vez). Unas de las aplicaciones para los que se usa el control de razón son los siguientes:

- Control aire-combustible para un proceso de combustión. El flujo de combustible es controlado por un controlador de temperatura o presión. La medida del flujo de combustible es luego usada para determinar el set point de un controlador de flujo de aire
- Control de flujo de un producto en función a la velocidad de alimentación, como una forma de control de posición.



Fuente: Departamento de automatización Industrial, 2012

**Figura 22.** Ejemplo de control de flujo de razón.

### 2.5.5 Control en cascada

Se define como la configuración donde la salida de un controlador de retroalimentación es el punto de ajuste para otro controlador de retroalimentación. El control de cascada involucra sistemas de control de retroalimentación o circuitos que estén ordenados uno dentro del otro<sup>47</sup>.

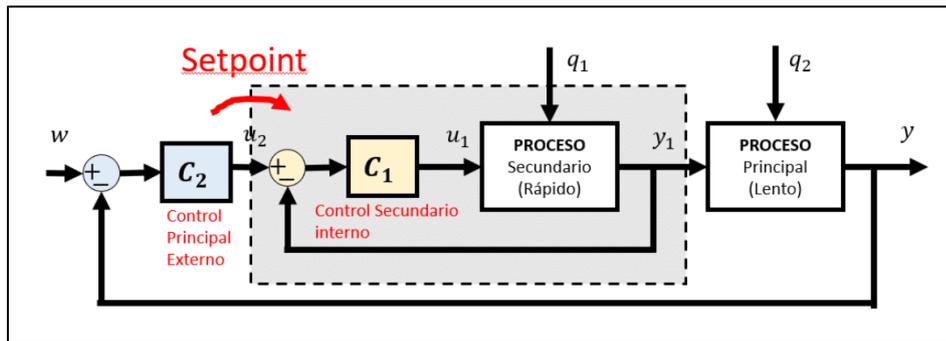
El control en cascada tiene dos lazos un lazo primario con un controlador primario también llamado "maestro" y un lazo secundario con un controlador secundario también denominado "esclavo", siendo la salida del primario el punto de consigna del secundario. La salida del controlador secundario es la que actúa sobre el proceso. Ver figura 23.

Dentro de las funciones principales se encuentran:

- Reduce los efectos de una perturbación en la variable secundaria sobre la variable primaria.
- Reduce los efectos de los retardos de tiempo.
- El controlador primario recibe ayuda del controlador secundario para lograr una gran reducción en la variación de la variable primaria.

---

<sup>47</sup> Benjamin C. Kuo, 1996



Fuente: Departamento de automatización industrial, 2018.

**Figura 23.** Ejemplo de control de flujo de razón.

## 2.6 Técnica de sincronización de controladores

Para poder sintonizar un controlador tipo PID, se debe establecer el valor que deben tener los parámetros de ganancia  $K_p$  (Banda Proporcional), tiempo integral  $T_i$  (Reset) y tiempo derivativo  $T_d$  (Rate), para que el sistema responda acorde a lo que requiera el proceso. La primera etapa de todo procedimiento de sintonización consiste en obtener la información estática y dinámica del lazo. Existen muchas formas de poder ajustar los parámetros de los controladores PID, pero todos se dividen en los de lazo cerrado y lazo abierto.<sup>48</sup>

### 2.6.1 Métodos de lazo cerrado

Lazo cerrado refiere a la operación del sistema de control con sus dispositivos de control en modo “automático”, donde el flujo de información desde el elemento sensor seguido por el transmisor, controlador, elemento de control, proceso y regresando al sensor representa un lazo realimentado continuo (“cerrado”).<sup>49</sup>

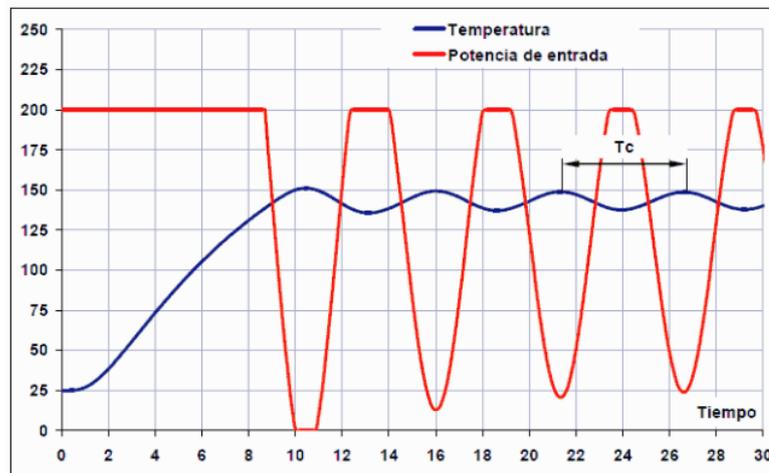
#### 2.6.1.1 Método de Ziegler Nichols lazo cerrado

Este método no requiere retirar el controlador PID del lazo cerrado. En este caso solo hay que reducir al mínimo la acción derivativa y la acción integral del regulador PID. El ensayo en lazo cerrado consiste en aumentar poco a poco la ganancia proporcional hasta que el sistema oscile de forma mantenida ante cualquier perturbación. Esta oscilación debe ser lineal, sin

<sup>48</sup> Ogata, 2018

<sup>49</sup> Ogata, 2018

saturaciones. En este momento hay que medir la ganancia proporcional, llamada ganancia crítica o  $K_c$ , y el periodo de oscilación  $T_c$  en segundos.



Fuente: Departamento de automatización industrial, 2018

**Figura 24.** Respuesta oscilatoria de la señal medida a partir de la entrada de un impulso

Una vez medidos estos dos valores, se pueden calcular los parámetros del controlador PID con acción solo proporcional (P), proporcional e integral (PI), proporcional y derivativa (PD) o proporcional integral y derivativa (PID):<sup>50</sup>

---

<sup>50</sup> Ogata, 1998

Control	Kp	Ki	Kd
P	$0.5 \times Kc$		
PI	$0.45 \times Kc$	$0.54 \times \frac{Kc}{Tc}$	
PD	$0.80 \times Kc$		$0.075 \times Kc \times Tc$
PID	$0.59 \times Kc$	$1.18 \times \frac{Kc}{Tc}$	$0.075 \times Kc \times Tc$

Fuente: Godinez de La Cruz, 2016

**Tabla 1:** Parámetros del controlador PID por el método de Ziegler y Nichols en lazo cerrado.

La constante Kp corresponde a la ganancia proporcional, Ki es la ganancia integral y Kd es la ganancia derivativa.

### 2.6.1.2 Método de Tyreus y Luyben en Lazo Cerrado

Este método, como el anterior, evalúa los parámetros del controlador a partir de la Ganancia Última  $Kcu$  y el Período Último  $\tau_u$ . Propone ajustes más relajados que el de Ziegler y Nichols y se aplica fundamentalmente a plantas que poseen un integrador. Los valores recomendados de sintonización son:<sup>51</sup>

Controlador	Kp	Ki	Kd
PI	$\frac{Kcu}{3.2}$	$\frac{\tau_u}{0.45}$	
PD	$\frac{Kcu}{2.2}$	$\frac{\tau_u}{0.45}$	$\frac{\tau_u}{6.3}$

Fuente: Godinez de La Cruz, 2016

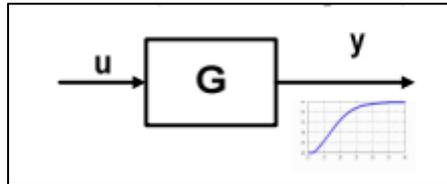
**Tabla 2:** Valores recomendados de sintonización - Método de Tyreus y Luyben en Lazo Cerrado.

---

<sup>51</sup> Godinez de la Cruz, 2016

## 2.6.2 Métodos de lazo abierto

Las características estáticas y dinámicas de la planta (Elemento Final de Control + Proceso + Transmisor) se obtienen de un ensayo en lazo abierto, generalmente la respuesta a un escalón (Curva de Respuesta).<sup>52</sup>



Fuente: Godinez de La Cruz, 2016

**Figura 25.** Representación de respuesta a escalón, lazo abierto.

### 2.6.2.1 Método de Ziegler y Nichols lazo abierto

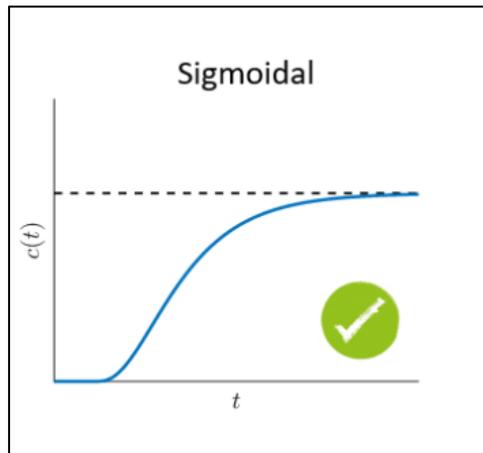
Por ser un método en lazo abierto, primero se realiza un ensayo en lazo abierto, esto quiere decir que la planta, en su entrada recibirá una entrada del tipo escalón (generalmente escalón unitario) y a partir de la respuesta de salida se obtienen los parámetros del PID. Este es el método de la curva de reacción de ziegler y nichols<sup>53</sup>.

Sin embargo, para poder usar este método es necesario que el sistema tenga un comportamiento del tipo sigmoïdal o forma de S, esto quiere decir que la respuesta no puede tener sobre impulsos en lazo abierto, ni poseer una dinámica integradora que crezca constantemente con el tiempo.

---

<sup>52</sup> Godinez de la Cruz, 2016

<sup>53</sup> Godinez de la Cruz, 2016



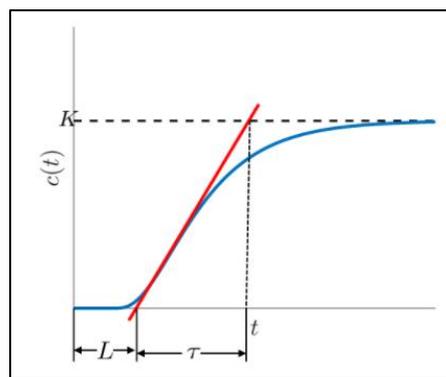
Fuente: Godinez de La Cruz, 2016

**Figura 26.** Comportamiento sigmoideal.

La curva S está definida por 2 constantes. Por el retardo en el tiempo  $L$  y por la constante de tiempo  $\tau$ , es decir viene dado por un sistema de primer orden con retardo, cuya función de transferencia es:

$$G_p(s) = \frac{C(s)}{U(s)} = \frac{K \times e^{-Ls}}{\tau s}$$

Por lo tanto, podemos obtener los parámetros del sistema de primer orden con retardo de la siguiente forma: El retardo y la constante de tiempo se obtiene dibujando la tangente en el punto de inflexión de la curva sigmoideal y determinar las intersecciones de la línea tangente con el eje del tiempo y el eje donde  $c(t)=K$  como se muestra en la siguiente figura:<sup>54</sup>



Fuente: Godinez de La Cruz, 2016

**Figura 27.** Representación del punto de inflexión de la curva sigmoideal

<sup>54</sup> Godinez de la Cruz, 2016

La respuesta anterior, también puede ser obtenida aproximando a un sistema de segundo orden sobreamortiguado a dinámicas semejantes a un sistema de primer orden.

De esa forma Ziegler y Nichols sugirieron un ajuste PID estableciendo los valores de  $K_p$ ,  $\tau_i$  y  $\tau_d$  de acuerdo con los siguientes valores.<sup>55</sup>.

Control	$K_p$	$\tau_i$	$\tau_d$
P	$\frac{\tau}{K \times L}$	$\infty$	0
PI	$0.9 \times \frac{\tau}{K \times L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2 \times \frac{\tau}{K \times L}$	$2 \times L$	$0.5 \times L$

. Fuente: Godinez de La Cruz, 2016

**Tabla 3:** Parámetros del controlador PID por el método de Ziegler y Nichols en lazo abierto

### 2.6.2.2 Método en Lazo Abierto de Cohen y Coon

Se emplea el mismo test que el método anterior. La sugerencia para los parámetros tiene en cuenta el grado de autorregulación de la planta, mensurado por la relación R:<sup>56</sup>

Controlador	$K_c$	$T_i$	$T_d$
P	$\frac{1}{K \times R} \left[ 1 + \frac{1}{3} \times R \right]$	$\infty$	0
PI	$\frac{1}{K \times R} \left[ 0.9 + \frac{1}{12} \times R \right]$	$L \times \left[ \frac{30 + 3 \times R}{9 + 20 \times R} \right]$	0
PD	$\frac{1}{K \times R} \left[ \frac{5}{4} + \frac{1}{6} \times R \right]$		$L \times \left[ \frac{6 - 2 \times R}{22 + 3 \times R} \right]$
PID	$\frac{1}{K \times R} \left[ \frac{4}{3} + \frac{1}{4} \times R \right]$	$L \times \left[ \frac{32 + 6 \times R}{13 + 8 \times R} \right]$	$L \times \left[ \frac{4}{11 + 2 \times R} \right]$

. Fuente: Godinez de La Cruz, 2016

**Tabla 4:** Parámetros del controlador PID por el método de Cohen y Coon en lazo abierto

<sup>55</sup> Godinez de la Cruz, 2016

<sup>56</sup> Godinez de la Cruz, 2016

## **2.7 Instrumentación industrial**

### **2.7.1 Definición de sensores industriales.**

Un sensor industrial es un dispositivo que capta un estímulo en su entorno y traduce la información. Dicha información se convierte en un impulso eléctrico que posteriormente es procesado por una serie de circuitos que generan una acción predeterminada en un sistema.

Los sensores industriales tienen diferentes características que nos permiten seleccionar cuál es el más adecuado en función del proceso para el que será empleado<sup>57</sup>.

### **2.7.2 Característica de los sensores industriales**

#### **2.7.2.1 Campo de medida o rango (Range).**

El rango o alcance define la capacidad de medida del instrumento entre los valores mínimo o límite inferior y máximo o límite superior para los cuales el equipo ha sido diseñado. En un transmisor suelen emplearse las siglas LRV (lower range value) y URV (upper range value).

##### **LRV (VALOR DE RANGO MÍNIMO)**

El valor mínimo de la variable medida que un dispositivo está ajustado para medir.

##### **URV (VALOR DE RANGO MÁXIMO)**

El valor máximo de la variable medida que un dispositivo está ajustado para medir.<sup>58</sup>

#### **2.7.2.2 Alcance**

Es la diferencia entre el valor superior (URV) e inferior (LRV) del campo de medida. Es la diferencia algebraica entre los valores superior e inferior del campo de medida del instrumento.<sup>59</sup>

---

<sup>57</sup> Creus, 2001

<sup>58</sup> Creus, 2001

### 2.7.2.3 Error

El error es la diferencia algebraica entre el valor medido o transmitido por el instrumento y el valor real de la variable medida por un instrumento patrón. El error normalmente se indica como un porcentaje, conocido como error relativo y está dado por la siguiente relación: Ver Ecuación 1.

$$\%Error = \frac{Valor\ medido - Valor\ real}{Valor\ real} \times 100$$

Fuente: Creus, 2001.

**Ecuación 1.** Fórmula de cálculo de % de error de un instrumento.

### 2.7.2.4 Precisión

La precisión es el grado de concordancia entre una serie de valores obtenidos luego repetir la medición bajo mismas o diferentes condiciones y se expresa como la desviación estándar relativa (dispersión) o el coeficiente de variación. Cuanto menor sea la desviación estándar, es mejor la precisión. La precisión es función de la repetibilidad y la resolución. Ver ejemplo en la figura 28.

### 2.7.2.5 Exactitud

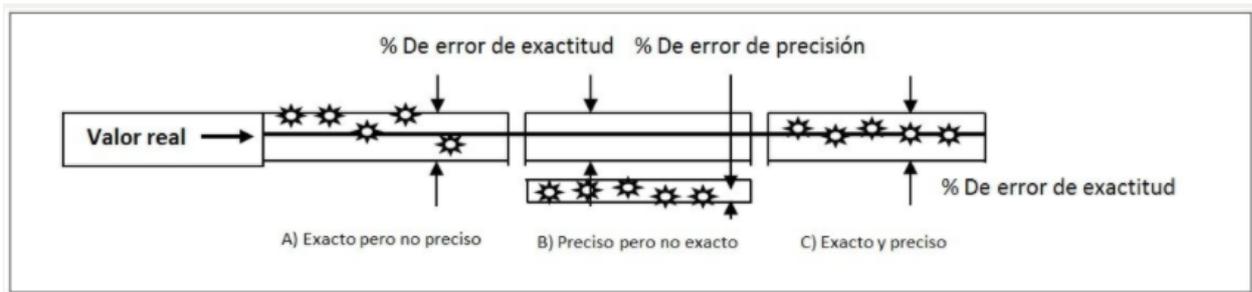
La exactitud es la cualidad de un instrumento para dar lecturas próximas al verdadero valor de la magnitud medida. Es función de la repetibilidad, resolución y de la calibración del instrumento. Ver ejemplo en la figura 28.

La exactitud se expresa en términos de porcentaje, ya sea del span calibrado, del URL o de la lectura<sup>60</sup>.

---

<sup>59</sup> Creus, 2001

<sup>60</sup> Creus, 2001



Fuente: Característica de los instrumentos de medición, 2018.

**Figura 28.** Diferencia entre precisión y exactitud.

### 2.7.2.6 Zona muerta

La zona muerta es el campo de valores de la variable operacional que no hace variar la indicación o la señal de salida del instrumento; es decir, ante cambios de la magnitud de la variable operacional el instrumento no produce respuestas<sup>61</sup>.

### 2.7.2.7 Sensibilidad

Es la relación entre la variación de la lectura del instrumento y el cambio en el proceso que causa este efecto<sup>62</sup>.

<sup>61</sup> Creus, 2001

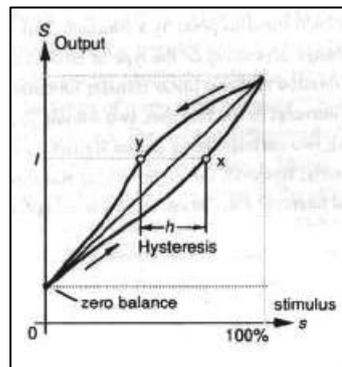
<sup>62</sup> Creus, 2001

### 2.7.2.8 Repetibilidad

Es la capacidad de un instrumento de repetir el valor de una medición, de un mismo valor de la variable real en una única dirección de medición<sup>63</sup>.

### 2.7.2.9 Histéresis

Similar a la repetibilidad, pero en este caso el proceso de medición se efectuara en ambas direcciones. Un error de histéresis es la desviación de la señal de salida del sensor en un punto específico de la señal de entrada. Cuando se le aproxima al punto desde direcciones opuestas<sup>64</sup>. Ver ejemplo en la figura 29.



Fuente: Característica de los instrumentos de medición, 2018.

**Figura 29:** Diferencia entre precisión y exactitud.

### 2.7.2.10 Campo de medida con supresión de cero

Es aquel rango de un instrumento cuyo valor mínimo se encuentra por encima del cero real de la variable.

### 2.7.2.11 Campo de medida con elevación de cero

Es aquel rango de un instrumento cuyo valor mínimo se encuentra por debajo de cero de las variables.

---

<sup>63</sup> Creus, 2001

<sup>64</sup> Creus, 2001

### 2.7.3 Clasificación de los sensores industriales

La manera en la cual un sensor industrial traduce la información es mediante un estímulo que recibe del lugar en el cual trabaja. Dicha información posteriormente pasa a convertirse en una señal eléctrica la cual puede ser utilizada en un sistema.

Con dicha información captada, se puede tomar una decisión en el sistema del proceso en el cual se está utilizando. Podríamos decir que convierte una acción natural en una variable eléctrica para que pueda así procesarse en cualquier método de control y automatización.

Los sensores a nivel industrial son muy importantes en estas aplicaciones ya que ofrecen un grado de seguridad que permite garantizar el desarrollo completo del proceso que se lleva a cabo<sup>65</sup>.



Fuente: Mesurex, 2020.

**Figura 30:** Sensores Industriales

#### 2.7.3.1 Sensores discretos

Son aquellos que emiten una señal de verdadero o falso, es decir, si cumple cierto requisito establecido, emite una señal verdadera, caso contrario se torna falso o viceversa.

Se pueden clasificar de diversas maneras como por su tipo, la forma de uso, el voltaje que emplea y la manera en la cual actúa.

##### 2.7.3.1.1 Sensores de Proximidad

Estos sensores pueden ser implementados en diversos campos con la particularidad de que sólo se requiere la proximidad del objeto a sensar sin la

---

<sup>65</sup> Parra, 2013

necesidad de contacto físico para que este pueda excitarse y emitir una señal digital. Dentro de sus ventajas se encuentran el poco desgaste que presentan y por ello la alta duración, la alta precisión eléctrica, no existe fatiga ni rebotes y por lo tanto evita las falsas señales y su resistencia en ambientes hostiles.

#### **2.7.3.1.1.1 Sensores Capacitivos**

Están diseñados para la medición sin contacto de desplazamiento, distancia y posición de cualquier objeto, así como la medición de espesores.

Pueden ser utilizados tanto en voltaje alterno como en voltaje continuo, según la especificación de cada fabricante y el uso que se vaya a dar.

Su funcionamiento es como un condensador abierto que se introduce como sonda en el objeto a probar. En la cara del sensor se establece un campo eléctrico el cual reacciona mediante el pase de una conductividad mayor que el aire generando así un cambio de capacitancia y excitando al relé interior.

La gran desventaja que presenta es que, de presentarse un objeto extraño o invasivo al proceso, lo puede tomar como medición correcta generando interferencias. Dicho problema puede ser resuelto aislando completamente el campo de trabajo de dicho sensor como en el caso de medir el nivel de líquido de un recipiente.

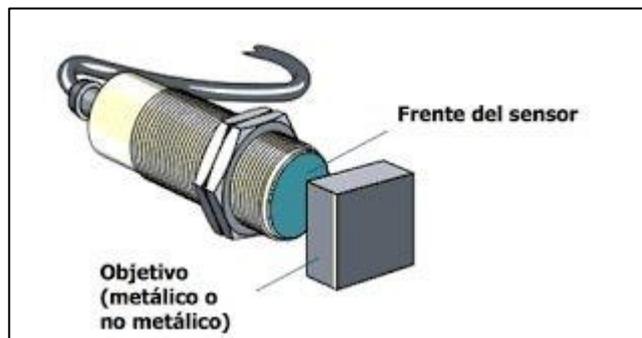


Fuente: EcuRed, 2018

**Figura 31.** Sensores Capacitivos

### 2.7.3.1.1.2 Sensores Inductivos

Los sensores de proximidad inductivos pueden detectar objetos metálicos que se acercan, sin tener contacto físico con los mismos. Los sensores de proximidad inductivos se clasifican en los siguientes tres tipos, de acuerdo con su principio de funcionamiento: el tipo de oscilación de alta frecuencia que utiliza la inducción electromagnética; el tipo magnético que emplea un imán; y el tipo de capacitancia que aprovecha los cambios en la capacidad eléctrica. Este tipo de sensor ignora objetos no metálicos<sup>66</sup>



Fuente: UASLP, 2015

**Figura 32:** Sensores inductivos

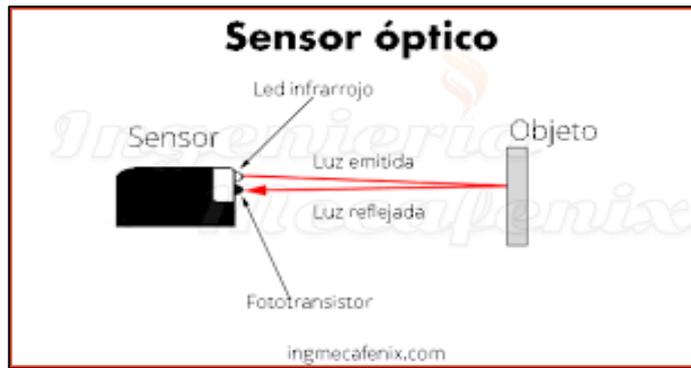
### 2.7.3.1.1.3 Sensores Ópticos

Los sensores ópticos funcionan mediante ondas que son emitidas y al ser reflejadas por un objeto genera una señal digital que trabaja como respuesta para un sistema establecido.

Trabajan con la ayuda de un emisor y receptor para generar la onda propagadora y gracias a ello puede detectar objetos a grandes distancias sin la necesidad de que se vea afectada por el ambiente de trabajo.

---

<sup>66</sup> Canto C., 2015



Fuente: Mecafenix, 2014

**Figura 33.** Funcionamiento de sensor óptico

### 2.7.3.2 Sensores Analógicos

Son aquellos que, como salida, emite una señal comprendida por un campo de valores instantáneos que varían en el tiempo, y son proporcionales a los efectos que se están midiendo.

#### 2.7.3.2.1 Sensores de pH

Sirven para medir la concentración de iones de hidrógeno de una solución para poder saber la acidez o alcalinidad de esta. Usualmente se usan en un proceso de laboratorio, pero también pueden ser tomados de manera continua para un proceso en particular.

##### 2.7.3.2.1.1 Sensores de pH portátiles

Ofrecen mediciones rápidas en entornos industriales. Se encuentran diseñados para su fácil uso en un entorno productivo y sirven para poder encontrar una respuesta directa en cualquier ambiente que se requiera medir.



Fuente: Mettler Toledo, 2016  
**Figura 34:** Sensor de pH portátil

### 2.7.3.2.1.2 Sensores de pH industriales

La gran diferencia con los otros tipos es que presenta mayor robustez hacia diferentes ambientes de trabajo y señal eléctrica fácil de procesar de distintas maneras por parte de la industria. Otro beneficio que presenta es al tener una respuesta mucho más rápida en comparación con otros tipos de sensores, puede trabajar sin ningún problema en una operación en línea. El bulbo el cual necesita estar sumergido en el líquido a analizar está fabricado con un material tal manera que sea resistente y duradero.



Fuente: ABB, 2012  
**Figura 35:** Sensor de pH industrial

### 2.7.4 Clasificación de los actuadores industriales

El actuador como su mismo nombre lo dice, es un elemento que interviene con un movimiento mecánico establecido para llevar a cabo un cambio al proceso de control. La señal de accionamiento es controlada bajo un sistema de control elaborado particularmente en cada proceso.

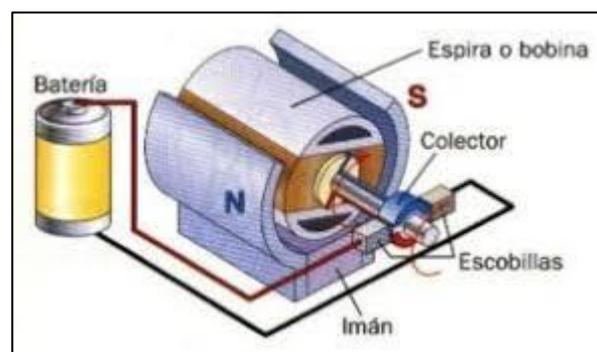
El elemento final de control o elemento de corrección es el dispositivo que permanece conectado físicamente con el proceso, dentro de un sistema de control, y que transforma la salida de un controlador en un cambio de la variable manipulada para producir un cambio en la variable controlada<sup>67</sup>.

Cada actuador está diseñado para un requerimiento de proceso en específico y son los encargados de intervenir en el proceso para así poder llegar hacia el resultado esperado. Por lo tanto, son el final de la línea del proceso de control.

### 2.7.4.1 Motores eléctricos

Existen de dos tipos: Motores de corriente directa (DC) y de corriente alterna (AC). Son utilizados en sistemas de control ya sea de velocidad o posición. La manera de operación es mediante de atracción y repulsión de polos magnéticos, el de la aparición en un conductor que se mueve por un campo magnético y la aparición de un campo magnético a través de un conductor por medio de una corriente.

El motor de corriente continua es una máquina que convierte la energía eléctrica en mecánica, provocando un movimiento rotatorio. Esta máquina de corriente continua es una de las más versátiles en la industria. Su fácil control de posición, paro y velocidad la han convertido en una de las mejores opciones en aplicaciones de control y automatización de procesos<sup>68</sup>.



Fuente: MOTOREX, 2009

**Figura 36:** Motor eléctrico Corriente Continua

---

<sup>67</sup> Bolton, 2004

<sup>68</sup> Garcia Naranjo, 2007

### 2.7.4.2 Válvulas de control

Son el dispositivo que permite variar el fluido que pasa por una conexión modificando la disminución de carga en la misma mediante una señal variable. Los ocho tipos de válvulas son: de bola, de mariposa, de globo, de pellizco, de obturador, de diafragma Saunders, de compuerta y digitales<sup>69</sup>. La válvula actúa por medio de una señal que es aplicada al final de un tubo capilar. Si dicha señal aumenta, la presión en la cámara aumenta y tiende a cerrar la válvula con respecto a la fuerza de compresión del resorte. Las electro - válvulas de bola son utilizadas para dejar el paso de un fluido con respecto a una señal eléctrica que, con la ayuda de una bobina, permite el accionamiento de dicha válvula.



Fuente: AIRTAC, 2005

**Figura 37:** Electroválvula de control asistido

### 2.7.4.3 Bombas

Las bombas pueden ser una alternativa a las válvulas de control. Por ejemplo, las bombas dosificadoras son accionadas por actuadores neumáticos o electrónicos y se utilizan para el envío de cantidades precisas de líquidos para mezclas, como en el control de pH, tratamiento de aguas y adición de productos en industrias alimenticias<sup>70</sup>.

Estas unidades funcionan con un motor eléctrico y, por lo general, utilizan pistones o hélices con movimiento alternado para así poder crear el centrifugado y bombear el fluido deseado.

---

<sup>69</sup> Altmann, 2005

<sup>70</sup> Creus, 2001

### 2.7.4.3.1 Bombas Peristálticas

Uno de los tipos de bombas es la peristáltica que es un elemento de tipo hidráulico que permite el desplazamiento de diversos fluidos. La particularidad es que dichos fluidos son contenidos en una manguera flexible en forma de “C” de tal manera que con un movimiento rotacional va enviando el fluido del interior de tubo. De las grandes ventajas que encontramos en este tipo de bombas es el poder transportar fluidos abrasivos ya que no interfiere directamente con las partes móviles de la bomba.



Fuente: Cramix, 2008

**Figura 38.** Bomba peristáltica

### 2.7.4.3.2 Bombas centrífugas

La bomba centrífuga es la maquinaria capaz de convertir la energía en presión, para poder mover el mayor volumen de líquido posible según el caballaje y especificación técnica de la misma.

Mueve líquidos en contra de la presión para así poder generar el desplazamiento deseado del mismo.



Fuente: PEROZZI, 2007

**Figura 39.** Bomba centrífuga

### 2.7.4.3.3 Bomba de Tornillo

La bomba de tornillo utiliza un tornillo helicoidal excéntrico que se desplaza dentro de una camiseta para así hacer fluir el líquido entre el tornillo y la camisa. Está diseñada para bombear fluidos viscosos como la goma o fango.



Fuente: HIDROSTAL, 2010

**Figura 40.** Bomba de tornillo

## 2.7.5 Controladores Lógicos Programables

Dispositivo de estado sólido, basado en Microprocesadores, utilizado para controlar la operación de una máquina, proceso o planta por intermedio de un programa o algoritmo almacenado, recibiendo información realimentada desde el proceso mediante instrumentos y dispositivos de entrada y salida<sup>71</sup>.



Fuente: Unitronics, 2014

Figura 41. PLC UNIVISION 1030

## 2.8 Elementos de control industrial

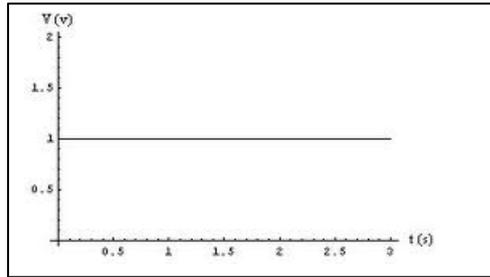
### 2.8.1 Fuente de Voltaje alterno y continuo

La electricidad es hoy en día, una de las energías más importantes por sus aplicaciones en todos los ámbitos de la vida. La energía eléctrica es transmitida por el movimiento de los electrones y otras partículas con carga eléctrica a través de un material conductor. En función del comportamiento del flujo de electrones, dentro del conductor distinguimos 2 tipos de corrientes eléctricas (continua y alterna).

**Voltaje Continuo:** En la corriente continua, los electrones viajan siempre en la misma dirección y la cantidad de electrones se mantiene constante en el tiempo. Es decir, la tensión y la intensidad de corriente son siempre las mismas.

---

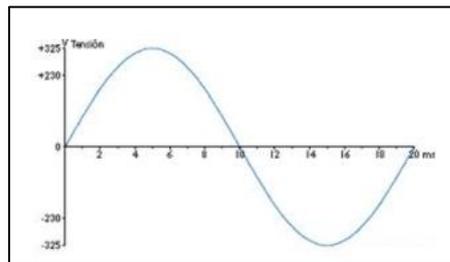
<sup>71</sup> Leal, 2015



Fuente: Fuente de alimentación, 2015.

**Figura 42.** Gráfica de fuente de voltaje continuo.

**Voltaje Alterna:** En la corriente alterna, tanto la dirección en la que se mueven los electrones en el interior del conductor, como la cantidad de electrones que circulan por el conductor (intensidad de la corriente), varían constantemente. El número de veces en que la corriente alterna cambia de dirección e intensidad es de 50 veces por segundo, o lo que es lo mismo (50HZ), que coincide con las veces por segundo que giran las espiras del rotor del alternador.



Fuente: Fuente de alimentación, 2015.

**Figura 43.** Gráfica de voltaje alterno.

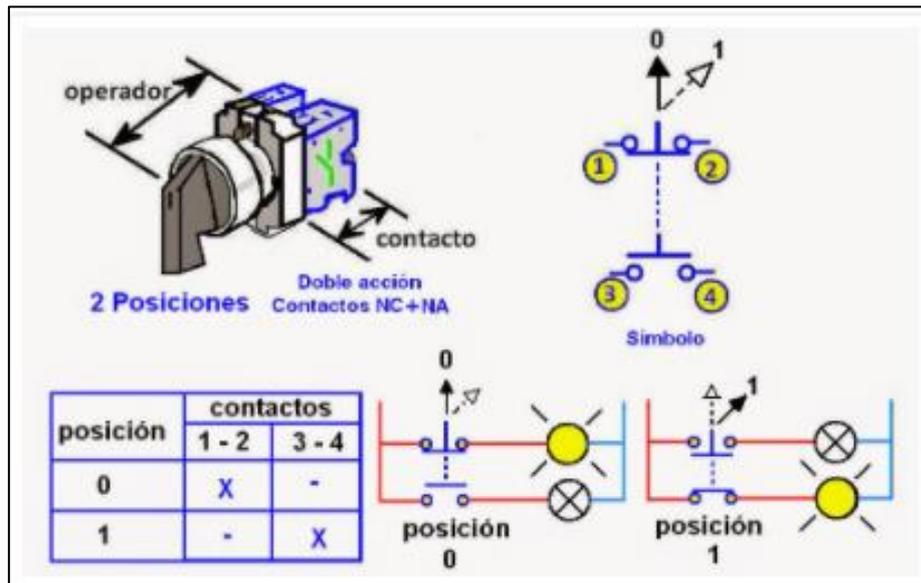
Las fuentes de alimentación DC son dispositivos que a partir de la tensión de red son capaces de proporcionarnos una señal de tensión continua para alimentar al circuito al que se conecta.

Una fuente de alimentación de alterna es un dispositivo que a partir de la tensión de red es capaz de proporcionarnos una señal de alterna pero, de tensión variable y, habitualmente, de frecuencia variable.

## 2.8.2 Selectores

El selector-conmutador e interruptor de control eléctrico, es un dispositivo utilizado para desviar ó interrumpir el curso de una corriente eléctrica, mediante el accionamiento manual de un eje que se rota a posiciones definidas, a fin de cambiar simultáneamente el estado eléctricos de contactos internos del equipo. Está diseñado para ser utilizado casi ilimitadamente en el campo de control y

medición en baja tensión para sistemas eléctricos de potencia. También tiene amplia aplicación en el control de motores.

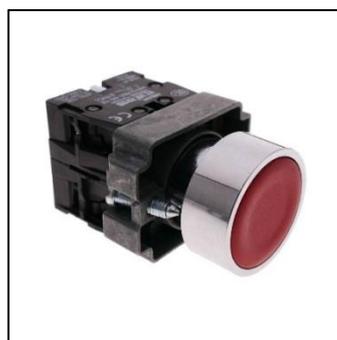


Fuente: Componentes electrónicos, 2005.

**Figura 44.** Selector eléctrico tipo manecilla

### 2.8.3 Pulsadores

Un pulsador es un interruptor o switch cuya función es permitir o interrumpir el paso de la corriente eléctrica de manera momentánea, a diferencia de un switch común, un pulsador solo realiza su trabajo mientras lo tenga presionado, es decir sin enclavamiento. Existen pulsadores NC (NC) y NA (NO), es decir normalmente cerrados y normalmente abiertos.



Fuente: Componentes electrónicos, 2005.

**Figura 45:** Pulsador

## 2.8.4 ITM

Un interruptor magnetotérmico, interruptor termomagnético, llave térmica o breaker, es un dispositivo capaz de interrumpir la corriente eléctrica de un circuito cuando esta sobrepasa ciertos valores máximos.



Fuente: ABB, 2015.

**Figura 46:** ITM

## 2.8.5 Relé

Un relé es un dispositivo electromecánico que permite a un procesador como un PLC a controlar cargas a un nivel tensión o intensidad muy superior a las que su electrónica puede soportar. Los relés son aptos para accionar cargas tanto de corriente alterna como continua.



Fuente: Componentes electrónicos et al. 2015.

**Figura 47:** Relé

# 3 CAPÍTULO 3: SOLUCIÓN PROPUESTA

## 3.1 Hardware del Proyecto

En el presente capítulo se abordará la arquitectura y el funcionamiento general de la etapa de hardware de la presente tesis, así como sus diferentes etapas Elección del sensor y transmisor de pH, Elección del sensor y transmisor de

turbidez, Ingreso de la solución química y Diseño del tanque batch para el prototipo del Proyecto.

### **3.1.1 Elección de sensor y transmisor de pH.**

El sensado y transmisión de la unidad de pH representa un elemento fundamental para el funcionamiento del proyecto planteado, ya que, se basa en mantener un valor predeterminado para que funcione el proceso químico llamado Foto-Fenton.

#### **3.1.1.1 Objetivos del avance**

El objetivo principal del desarrollo de este avance es el de elegir un tipo específico de sensor para poder obtener la señal con la mejor calidad de resolución y que pueda ser ingresada a un controlador. Además, la adquisición de la señal se debe realizar de forma rápida y su salida debe ser la idónea con respecto a voltaje o corriente. De esta manera, se podrá realizar mejor el proceso que involucra la reacción Foto-Fenton UV en las industrias textiles.

A partir de lo planteado, el sensor a elegir debe satisfacer los requerimientos de resolución, velocidad de transmisión y formato de salida analógica. Estas características se explicarán más adelante en el sustento teórico del presente avance.

#### **3.1.1.2 Posibles soluciones**

Existen diversos tipos de sensores y transmisores en el mercado que pueden ser acoplados a nuestro sistema con el que se trabajará para la adquisición de la señal. Cada posible solución representa a una alternativa de uso para poder sensar la señal de pH y luego pasar al procesador por medio de una entrada analógica.

En la **Tabla 5**, se presentarán 3 tipos de sensores y transmisores con sus respectivas características a evaluar para la idónea selección.

<b>Tabla 5: Posibles soluciones para el sensor y transmisor de pH.</b>			
	<b>Solución 1</b>	<b>Solución 2</b>	<b>Solución 3</b>
<b>Tipo</b>	Sensor y transmisor pH (Arduino)	Sensor y transmisor pH Industrial.	Sensor pH-Metro.
<b>Descripción</b>	Módulo que captura la señal de la unidad de pH en base a un sensor de tipo BNC que luego es pasada a un transmisor y envía la señal analógica. Funciona mediante librerías dedicadas para arduino.	Dispositivo electrónico que captura la señal de la unidad de pH en base a un sensor de tipo BNC que luego es pasada a un transmisor y envía la señal analógica. El tipo de salida está adecuada para que sean utilizados en PLC.	Dispositivo electrónico utilizado en el método electroquímico para medir el pH de una solución. Es utilizado en pruebas de laboratorio y no posee señal de salida.
<b>Parámetros</b>	<b>Marcas:</b> DFRobot, Gravity, Alvin Instrument, etc. <b>Precio:</b> S/.60.00 - S/.85.00 <b>Resolución:</b> ±0.1pH <b>Tiempo sumergible:</b> <2hrs <b>Tipo de la señal analógica:</b> 0.00-5.00 V <b>Tiempo respuesta:</b> <1min	<b>Marcas:</b> ABB, Hanna, Siemens, etc. <b>Precio:</b> S/.1000.00 – S/.3500.00 <b>Resolución:</b> ±0.01pH <b>Tiempo sumergible:</b> En línea. <b>Tipo de la señal analógica:</b> 0.00-10.00 V 0.00-20.00 mA 4.00-20.00 mA <b>Tiempo respuesta:</b> <0.5seg	<b>Marcas:</b> Hanna, Mettler Toledo, EcuRed, PCE, etc. <b>Precio:</b> S/.400 – S/.850 <b>Resolución:</b> ±0.1pH <b>Tiempo sumergible:</b> <15min <b>Tipo de la señal analógica:</b> - <b>Tiempo respuesta:</b> <10seg

*Fuente: Elaboración Propia*

El ítem elegido para la realización del proyecto mecatrónico es la solución 2, es decir, la utilización del sensor y transmisor pH industria **ABB TS82**, pues el sistema con el cual se desarrollará el proceso final será un proceso industrial y es necesario que el sensor admita los valores en línea sin ningún tipo de variación con respecto a la turbulencia del efluente.



*Fuente:* [www.wateronline.com](http://www.wateronline.com)  
**Figura 48** Sensor y Transmisor pH a utilizar

### 3.1.1.3 Sustento teórico

Los sensores poseen diferentes parámetros que los caracterizan y en la cuales se distinguirán para poder elegir el equipo adecuado para el desarrollo del siguiente proyecto. Para el caso del sensor y transmisor del pH SEN0161 se deben verificar los mismos parámetros que se usarían para el proceso industrial.

La determinación de pH consiste en medir el potencial que se desarrolla a través de una fina membrana de vidrio que separa dos soluciones con diferente concentración de protones. La varita de soporte del electrodo es de vidrio común y no es conductor, mientras que el bulbo sensible, que es el extremo sensible del electrodo, está formado por un vidrio polarizable (vidrio sensible de pH). El voltaje en el interior del bulbo es constante, ya que se mantiene un pH constante de manera que la diferencia de potencial solo depende del pH del medio externo. El alambre que se sumerge al interior (normalmente Ag/AgCl) permite conducir este potencial hasta un amplificador el cual se encarga, en este caso, de transmitir la señal hacia la entrada analógica del controlador.

$$E_H = E_o - \frac{RT \ln[H^+]_M}{F}$$

$E_H =$  *Potencial Medido*,       $E_o =$  *Potencial Constante*

$R =$  *Constante de los gases*,

$T =$  *Temperatura en Grados Kelvin*

$F =$  *Constante de Faraday*

$\ln(H^+) =$  *Logaritmo neperiano de la concentración de iones H*

**Ecuación 2** Ecuación del sensor de pH

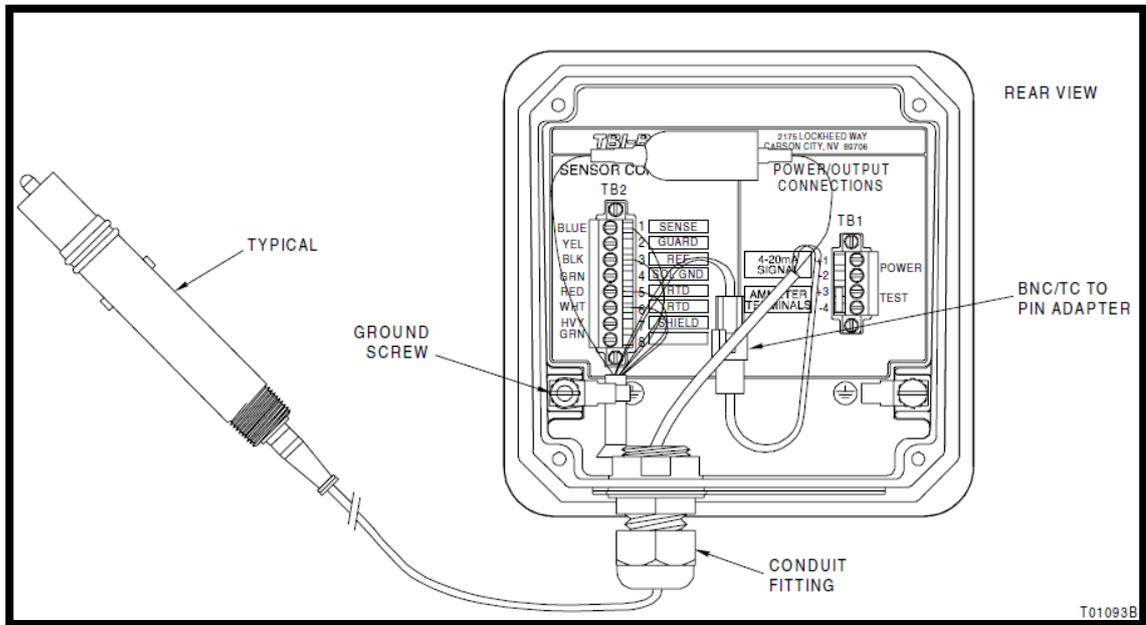
#### 3.1.1.4 Análisis del avance

El avance de esta parte del proyecto tiene como finalidad realizar el cableado y conexionado del transmisor al controlador, para de esa forma poder realizar la calibración del mismo, y por último la verificación de la linealidad que dicho transmisor debe seguir.

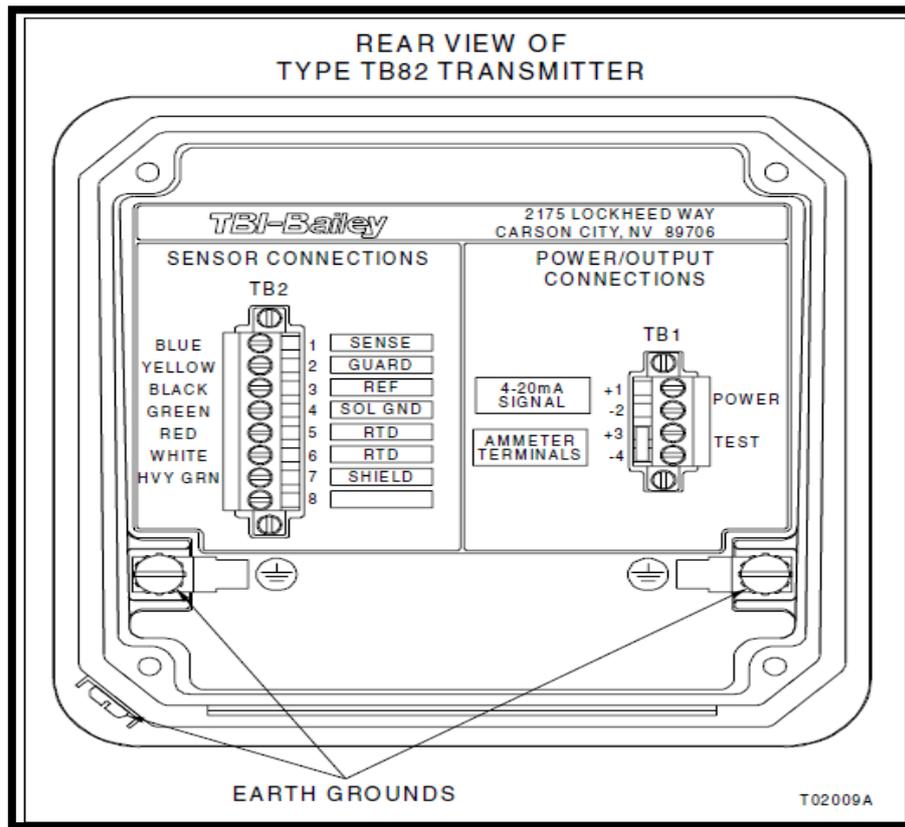
##### **Cableado**

Para realizar esta parte se debió seguir los esquemas que se especifican en el manual y seguir ciertas indicaciones, en la **Figura 49** se muestra en primer lugar a qué parte del transmisor se deben conectar las tierras, para evitar cualquier tipo de descarga eléctrica al momento que se manipule. Así mismo, el transmisor cuenta con su propio display, y para que este pueda mostrar los valores que está sensando se tiene que realizar la conexión con un adaptador del tipo BNC tal y como se muestra en la **Figura 50**, en el cual también se puede visualizar que el ingreso del cable, que viene desde la externa, es decir desde el sensor, es mediante una prensaestopa que es propia del transmisor, en otras palabras, estaba incluido en el paquete de compra.

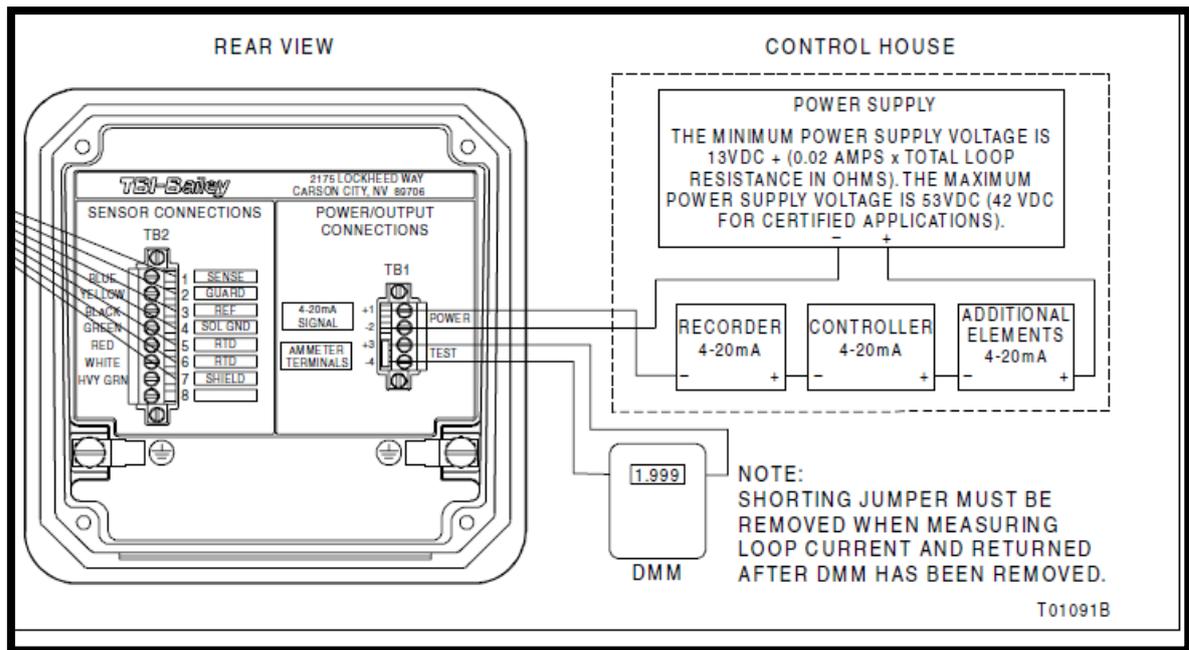
Por último, en la **Figura 51**, se muestra cómo se debe realizar la conexión del transmisor junto a un controlador para que se puedan comunicar.



**Fuente:** Manual TB82 Transmitter ABB  
**Figura 49:** Vista interna del Transmisor de pH con el cableado al adaptador BNC.



**Fuente:** Manual TB82 Transmitter ABB  
**Figura 50:** Vista interna del Transmisor de pH.



**Fuente:** Manual TB82 Transmitter ABB  
**Figura 51** Vista interna del Transmisor de pH con el cableado al Controlador.

### 3.1.2 Elección de sensor de Turbidez

El sensado de la unidad de turbidez representa un elemento fundamental para el funcionamiento del proyecto planteado, ya que, se basa en llegar a un valor determinado por el Ministerio del Ambiente en nuestro país para que el efluente proveniente de la empresa textil pueda ser desechado a la alcantarilla.

#### 3.1.2.1 Objetivos del avance

El objetivo principal del desarrollo de este avance es el de elegir un tipo específico de sensor para poder obtener la señal con la mejor calidad de resolución y que pueda ser ingresada a un controlador. Además, la adquisición de la señal se debe realizar de forma rápida y su salida debe ser la idónea con respecto a voltaje o corriente. De esta manera, se podrá realizar mejor el proceso que involucra la reacción Foto-Fenton UV en las industrias textiles.

A partir de lo planteado, el sensor a elegir debe satisfacer los requerimientos de resolución, velocidad de transmisión y formato de salida analógica. Estas

características se explicarán más adelante en el sustento teórico del presente avance.

### 3.1.2.2 Posibles soluciones

Existen diversos tipos de sensores y transmisores en el mercado que pueden ser acoplados a nuestro sistema con el que se trabajará para la adquisición de la señal. Cada posible solución representa a una alternativa de uso para poder sensar la señal de turbidez y luego pasar al procesador por medio de una entrada analógica.

En la **Tabla 6**, se presentarán 3 tipos de sensores y transmisores con sus respectivas características a evaluar para la idónea selección.

<b>Tabla 6 Posibles soluciones para la elección del sensor y transmisor de Turbidez</b>			
	Solución 1	Solución 2	Solución 3
<b>Tipo</b>	Sensor y transmisor Turbidez (Arduino)	Sensor y transmisor Turbidez Industrial	Sensor Turbidímetro
<b>Descripción</b>	Módulo que captura la señal de la unidad de turbidez en base a un sensor que luego es pasada a un transmisor y envía la señal analógica. Funciona mediante librerías dedicadas para arduino.	Dispositivo electrónico que captura la señal de la unidad de turbidez en base a un sensor que luego es pasada a un transmisor y envía la señal analógica. El tipo de salida está adecuada para que sean utilizados en PLC.	Dispositivo electrónico utilizado en el método electroquímico para medir la turbidez de una solución. Es utilizado en pruebas de laboratorio y no posee señal de salida.
<b>Parámetros</b>	<p><b>Marcas:</b> DFRobot, Gravity, Alvin Instrument, etc.</p> <p><b>Precio:</b> S/.60.00 - S/.100.00</p> <p><b>Resolución:</b> ±10 NTU</p> <p><b>Tiempo sumergible:</b> &lt;30 min</p> <p><b>Tipo de la señal analógica:</b> 0.00-5.00 V</p> <p><b>Tiempo respuesta:</b> &lt;0.5seg</p>	<p><b>Marcas:</b> FTS, Thermo Scientific, ABB, MJK, etc.</p> <p><b>Precio:</b> S/.2000.00 – S/.5000.00</p> <p><b>Resolución:</b> ± 1 NTU</p> <p><b>Tiempo sumergible:</b> En línea.</p> <p><b>Tipo de la señal analógica:</b> 0.00-20.00 mA 4.00-20.00 mA</p> <p><b>Tiempo respuesta:</b> &lt;2seg</p>	<p><b>Marcas:</b> PCE, Lutron, Hanna, OMEGA PERU, etc.</p> <p><b>Precio:</b> S/.800 – S/.1250</p> <p><b>Resolución:</b> ±2 NTU</p> <p><b>Tiempo sumergible:</b> &lt;15min</p> <p><b>Tipo de la señal analógica:</b> -</p> <p><b>Tiempo respuesta:</b> &lt;10seg</p>

**Fuente:** Elaboración Propia

El ítem elegido, es el sensor de laboratorio HANNA HI93703C ya que se utilizará para realizar diversas curvas y validar el proceso mediante tiempos y una serie de receta principal a seguir para el producto final.

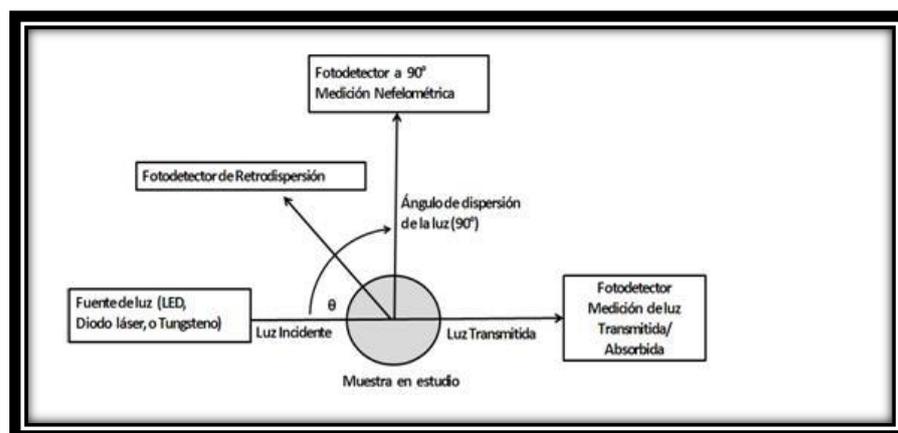


Fuente: [www.wateronline.com](http://www.wateronline.com)

Figura 52 Sensor de Turbidez

### 3.1.2.3 Sustento Teórico

Un nefelómetro, llamado turbidímetro, es un instrumento para medir partículas suspendidas en un líquido. Esto lo hace empleando una fotocelda colocada en un ángulo de  $90^\circ$  con respecto a una fuente luminosa. La densidad de partículas es entonces una función de luz que se refleja por las partículas a la fotocelda. Así, se establece una correlación de trabajo entre turbidez y el haz de luz.



Fuente: <http://revista.cnic.edu.cu/>

Figura 53 Diagrama de principio de medición de turbidez

#### **3.1.2.4 Comentarios y conclusiones**

El avance de la adquisición del sensor de turbidez corresponde a la parte de validación de que el producto cumple las normas establecidas, ya que para poder desechar el efluente al alcantarillado es necesario una turbidez menor igual a 100 NTU.

Se tiene que hallar una desviación estándar del tiempo que se demora en realizarse el proceso, ya que no se va a contar con un transmisor en línea. La validación se realizará mediante pruebas hasta encontrar el tiempo adecuado en el que el proceso cumpla con los parámetros permitidos.

#### **3.1.3 Ingreso de soluciones químicas**

El ingreso de la solución química, el cual incluye la que va a ingresar para regular el ph y la turbidez, es una parte muy importante del proyecto, ya que debe ser contralada y debe ingresar al tanque batch con un caudal pequeño.

##### **3.1.3.1 Objetivos del avance**

El objetivo principal del desarrollo de este avance es el de elegir un tipo específico de instrumento para poder controlar de la mejor manera posible el ingreso de la solución química a nuestro proceso, teniendo en consideración que para el proyecto a realizar no se requiere ingresar en grandes cantidades dicha solución.

A partir de lo planteado, el sensor a elegir debe satisfacer los requerimientos de entrada analógica, velocidad regulable para la entrada de la solución química y se pueda incluir al proceso sin realizar tantas adaptaciones. Estas características se explicarán más adelante en el sustento teórico del presente avance.

##### **3.1.3.2 Soluciones propuestas**

Existen algunas soluciones en el mercado para poder controlar el ingreso de la solución química. Cada posible solución representa a una alternativa de

uso para poder ser controlada mediante las diferentes salidas analógicas con la que se cuentan.

En la **Tabla 7**, se presentarán 3 tipos instrumentos con sus respectivas características a evaluar para la idónea selección.

<b>Tabla 7 Posibles soluciones para controlar el ingreso de solución química</b>			
	Solución 1	Solución 2	Solución 3
Tipo	Bombas peristálticas.	Sensor de flujo	Caudalímetro
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tipo actuador.</li> <li>• Entrada 12vdc.</li> <li>• La velocidad es constante.</li> <li>• Sólo se necesita acoplar mangueras para hacer llegar la solución.</li> <li>• Para conductos de diámetro muy reducido.</li> <li>• Adquisición accesible.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tipo sensor ON/OFF.</li> <li>• Entrada 12vdc.</li> <li>• Para tuberías de ¼ de pulgada a más.</li> <li>• Adquisición accesible.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tipo sensor en línea.</li> <li>• Entrada 12v.</li> <li>• No es necesario mantener un flujo constante del líquido.</li> <li>• Adquisición accesible.</li> </ul>
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se necesita un encoder para realizar su validación, para saber a qué cantidad de vueltas ingresa cierta cantidad de solución.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se necesita realizar pruebas de cuanta cantidad de solución entra a un flujo constante. Y cerrarlo después de un tiempo determinado, en caso el flujo varíe este se cierra y se comienza de nuevo el proceso, lo que complicaría su validación.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Para regular la cantidad de líquido que ingresa, se tiene que realizar la multiplicación del (caudal x tiempo en segundos). Además, si el caudal ha presentado variaciones se tendría que realizar la operación repetidas veces, con lo que se complicaría su validación.</li> </ul>

**Fuente:** Elaboración Propia

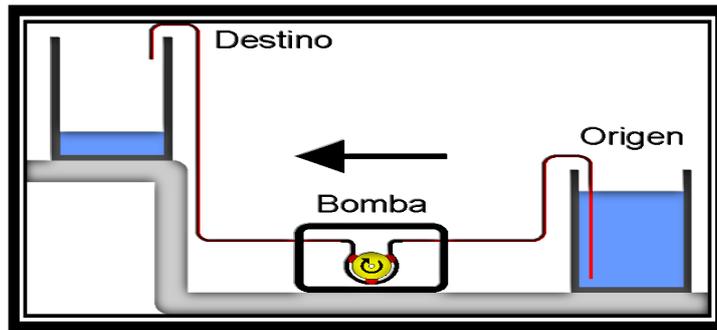
El ítem elegido es la solución 1 ya que se trata de suministrar la solución química en proporciones pequeñas, para que de esa forma se pueda realizar un mejor control. En la **Figura 54**, se muestra una foto de la bomba peristáltica.



**Fuente:** Elaboración propia.  
**Figura 54** Bomba peristáltica de 24Vdc.

### 3.1.3.3 Sustento Teórico

Una bomba peristáltica es un tipo de bomba hidráulica de desplazamiento positivo usada para bombear una variedad de fluidos. El fluido es contenido dentro de un tubo flexible empotrado dentro de una cubierta circular de la bomba. Un rotor con un número de 'rodillos', 'zapatas' o 'limpiadores' unidos a la circunferencia externa comprimen el tubo flexible. Mientras que el rotor da vuelta, la parte del tubo bajo compresión se cierra (o se ocluye) forzando, de esta manera, el fluido a ser bombeado para moverse a través del tubo. En la **Figura 55**, se muestra un ejemplo del funcionamiento de la bomba peristáltica.



Fuente: [http://www.sadelplata.org/articulos/groel\\_060906.html](http://www.sadelplata.org/articulos/groel_060906.html)

Figura 55: Bomba peristáltica 12Vdc.

### 3.1.4 Elección del material para el diseño del tanque batch y la estructura metálica.

El tanque batch es el recipiente en el cual se va a realizar todo el proceso del tratamiento de aguas residuales. Por lo que se debe tener en cuenta ciertas consideraciones para su elaboración. Al igual que la estructura que es donde se va a ubicar el tanque batch como el tablero eléctrico.

#### 3.1.4.1 Objetivos del avance

El objetivo del avance es elegir el material que se va a utilizar para la elaboración de la estructura y del tanque batch, el cual se tiene que adecuar con líquido, tener en cuenta el alcance monetario, entre otras cosas. Luego se debe ver en qué lugares se deben realizar los orificios, para la entrada de solución química, entrada del agua residual, los orificios que este debe tener para los sensores y transmisores. Además, en donde debe ir ubicado la luz UV, y a qué distancia debe estar la paleta rotativa.

### 3.1.4.2 Posibles soluciones

Existen distintos tipos de materiales a tomar en cuenta para la elaboración del tanque batch, en este caso se van a analizar 2 en partículas tal y como se muestra en la **Tabla 8**, donde se van a mostrar 2 materiales que se tomaron en cuenta.

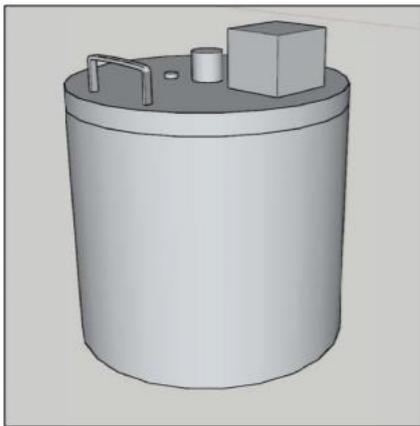
<b>Tabla 8 Posibles soluciones para el material del tanque batch y la estructura</b>			
	<b>Solución 1</b>	<b>Solución 2</b>	<b>Solución 3</b>
<b>Tipo</b>	Acrílico	Acero	Acero inoxidable
<b>Ventajas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Transparente.</li> <li>• La lámina de acrílico es excelentemente resistente a la mayoría de las sustancias, incluyendo soluciones de álcalis y ácidos como el amoníaco y el ácido sulfúrico.</li> <li>• No es un material pesado.</li> <li>• Aislante eléctrico.</li> <li>• Bajo costo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Resistente a los golpes.</li> <li>• Es un material uniforme.</li> <li>• Resistente a la mayoría de sustancias, soluciones de álcalis y ácidos.</li> <li>• La naturaleza dúctil de los aceros comunes les permite fluir localmente, con lo cual se puede moldear con facilidad.</li> <li>• Se puede soldar con facilidad.</li> <li>• Costo intermedio.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Resistente a los golpes.</li> <li>• Es un material uniforme.</li> <li>• Resistente a la mayoría de sustancias, soluciones de álcalis y ácidos.</li> <li>• Elemento muy usado para procesos alimenticios.</li> <li>• Se puede soldar con facilidad.</li> </ul>
<b>Desventajas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No es tan resistente a golpes como el acero.</li> <li>• No soporta altas temperaturas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Costo de mantenimiento, por la corrosión.</li> <li>• El peso, varía de acuerdo al espesor.</li> <li>• Conductor de calor.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Costo elevado.</li> <li>• Pesado.</li> <li>• Conductor de calor.</li> </ul>

**Fuente:** Elaboración propia.

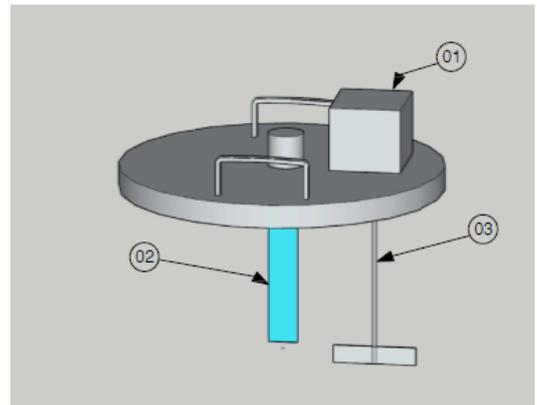
El ítem elegido es la solución 2 ya que debe soportar un volumen adecuado y lo que se va a realizar tanto como para la estructura y tanque batch va a tener que soportar un peso considerable, además que no es un proceso alimenticio para el consumo humano se escoge el acero y no el acero inoxidable.

### 3.1.4.3 Análisis de estructuras

En el avance se realizó el diseño del tanque batch, se tuvo que tener en consideración los orificios para los componentes que se van a ubicar dentro del mismo. El cual incluye, la posición del sensor de pH, los switch de nivel alto y bajo, la ubicación de la paleta rotativa y otro para el ingreso del recipiente para la luz ultra violeta, entre otras consideraciones. Ver representaciones en la **Figura 56** y **67**.



**Fuente:** Fuente Elaboración Propia  
**Figura 56:** Tanque Ensamblado.



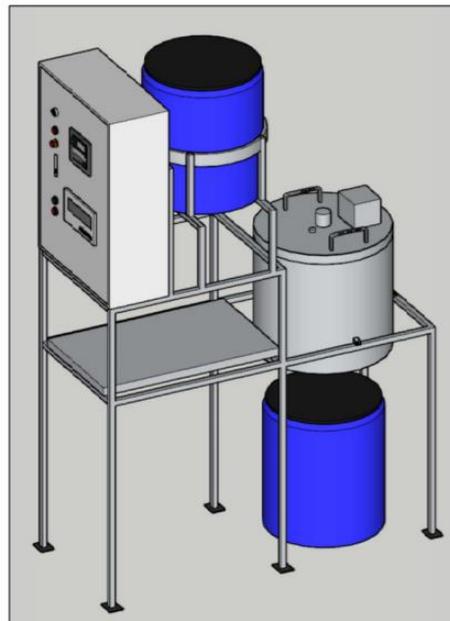
**Fuente:** Fuente Elaboración Propia  
**Figura 57:** Tapa con la paleta rotativa.

### Diseño de la estructura

Para realizar la estructura del prototipo se tomaron como consideraciones principales la distribución del tanque batch, el tablero eléctrico y el recipiente que va a contener el agua residual.



**Fuente:** Fuente Elaboración Propia  
**Figura 58:** Estructura de acero.



**Fuente:** Fuente Elaboración Propia  
**Figura 59:** Modelación 3D, de la estructura y



**Fuente:** Fuente Elaboración Propia  
**Figura 60:** Estructura implementada junto al tablero eléctrico.



**Fuente:** Fuente Elaboración Propia  
**Figura 61:** Tanque batch montado a la estructura.

#### **3.1.4.4 Comentarios y Conclusiones**

En este avance fue para el diseño tanto del tanque batch y la estructura metálica, se tuvo que tomar en consideración el peso que debía aguantar, tanto por parte del tablero eléctrico y la cantidad de agua que esta iba a cargar. Además, el material escogido debía ser resistente a trabajar con agentes químicos y que no se oxide con facilidad.

#### **3.1.5 Elección de controlador a utilizar**

El controlador a utilizar representa un elemento fundamental para el funcionamiento del proyecto planteado, ya que debe ser el ideal para poder realizar un control exacto de todo el proceso, con los tiempos de medición y ejecución exacta de cada paso del proceso llamado Foto-Fenton.

##### **3.1.5.1 Objetivos del avance**

El objetivo principal del desarrollo de este avance es el de elegir un tipo específico de controlador para poder obtener el control total del proceso de una manera adecuada y amigable. Además, la lectura de las señales analógicas, procesamiento del desarrollo del bloque PI y salida del actuador a utilizar debe ser en un tiempo aceptable para que pueda ser visualizado por el usuario y no afecte al proceso.

Además, con este controlador de debe poder manejar de forma adecuada los sensores y actuadores que se van a utilizar.

##### **3.1.5.2 Posibles soluciones**

Existen diversos tipos de controladores en el mercado que pueden ser acoplados a nuestro sistema con el que se trabajará para el control del proceso final. Cada posible solución representa a una alternativa de uso para poder ingresar las variables analógicas y la salida a la bomba peristáltica.

En la **Tabla 9** se presentarán 3 tipos de controladores con sus respectivas características a evaluar para la idónea selección.

<b>Tabla 9 Posibles soluciones para el controlador a utilizar</b>			
	<b>Solución 1</b>	<b>Solución 2</b>	<b>Solución 3</b>
<b>Tipo</b>	Módulo PIC18F4550	PLC V570 UNITRONIC	PLC LOGO 8! Siemens
<b>Descripción</b>	Módulo que se basa en el PIC18F4550 de la marca Microchip que es programado mediante el programa libre MPLABX y que posee diversos periféricos que pueden ser utilizados en el proceso.	Módulo PLC de la marca UNITRONIC, que posee 45 E/S entre digitales y analógicas. Además, cuenta con su pantalla HMI y es controlado mediante el programa VISIOLOGIC.	Módulo más básico de la gama de PLCs de Siemens que posee entradas y salidas digitales y es controlado mediante el programa LOGO!
<b>Parámetros</b>	<p><b>Marcas:</b> Microchip</p> <p><b>Precio:</b> S/.50.00 - S/80.00</p> <p><b>Entradas/Salidas:</b> 35 pines I/O disponibles ( de los cuales 2 dan salida PWM) 6 Entradas Analógicas</p> <p><b>Memoria RAM:</b> 2048</p> <p><b>Velocidad de reloj:</b> Hasta 48MHz</p>	<p><b>Marcas:</b> Unitronic.</p> <p><b>Precio:</b> S/.1500.00</p> <p><b>Entradas/Salidas:</b> 32 I/O digitales 24Vdc, 4 Entradas Analógicas y 4 Salidas Analógicas.</p> <p><b>Pantalla HMI:</b> 5.7"</p>	<p><b>Marcas:</b> Siemens</p> <p><b>Precio:</b> S/.400 – S/.650</p> <p><b>Entradas/Salidas:</b> 8 Entradas 24Vdc 4 Salidas tipo Relay</p> <p><b>Memoria RAM:</b> 2048</p> <p><b>Velocidad de reloj:</b> Sin reloj.</p>

**Fuente:** Elaboración propia.

El ítem elegido para la realización de Proyecto Mecatrónico 2 es la solución 2, es decir, el PLC V570 como controlador con el cual se contará para el desarrollo de todo el proceso. Ver Figura 62.



Fuente: <http://www.side-automatizacion.com>

**Figura 62.** PLC V570 Unitronic(Foto Referencial)

### 3.1.6 Tablero Eléctrico

En este ítem se explicará cuáles fueron los materiales utilizados para armar el tablero eléctrico, así como también cuáles fueron las consideraciones para elegir el tamaño de este.

#### 3.1.6.1 Dimensión del tablero eléctrico:

Se dimensionó el tablero de acuerdo a los sensores y actuadores que se iban a utilizar, la cantidad de borneras, el tamaño de la fuente de alimentación, y la ubicación que iba a tener el PLC y el transmisor de pH dentro del mismo, por lo que se optó por un tablero de 65x40x20 cm. En la **Figura 63** se muestra una figura referencial del tablero escogido.



*Fuente:* <http://www.cymelectro.com>

**Figura 63:** Tablero eléctrico de 65x40x20 (Foto Referencial)

### **3.1.6.2 Elementos usados para el armado del tablero eléctrico.**

#### **ITM**

Un interruptor termomagnético o llave térmica, es un dispositivo capaz de interrumpir la corriente eléctrica de un circuito cuando ésta sobrepasa ciertos valores máximos. Su funcionamiento se basa en dos de los efectos producidos por la circulación de corriente en un circuito: el magnético y el térmico (efecto Joule). El dispositivo consta, por tanto, de dos partes, un electroimán y una lámina bimetálica, conectadas en serie y por las que circula la corriente que va hacia la carga. Para el caso de este proyecto, se estima un valor máximo aproximado de consumo de energía de 6A, por lo que se usó un ITM de estas características, tal y como se muestra en la **Figura 64** se muestra una foto referencial.



*Fuente:* <http://new.abb.com/products>

**Figura 64:** ITM-ABB

## Fusibles

En electricidad, se denomina fusible a un dispositivo, constituido por un soporte adecuado y un filamento o lámina de un metal o aleación de bajo punto de fusión que se intercala en un punto determinado de una instalación eléctrica para que se funda (por Efecto Joule) cuando la intensidad de corriente supere (por un cortocircuito o un exceso de carga) un determinado valor que pudiera hacer peligrar la integridad de los conductores de la instalación con el consiguiente riesgo de incendio o destrucción de otros elementos. Para este proyecto se usaron fusibles de 4A, que pertenece a la norma IEC 60269, debido a que es un fusible de potencia de bajo voltaje. Además, dicho fusible se colocó en una porta fusible para riel DIN. Foto Referencial en la **Figura 65**.



**Fuente:** <http://new.abb.com/product>

**Figura 65:** Fusible para riel DIN

## Fuente de alimentación

En electrónica, la fuente de alimentación o fuente de potencia es el dispositivo que convierte la corriente alterna (CA), en una o varias corrientes continuas (CC), que alimentan distintos instrumentos que los requieran. Se utilizó una fuente de 24V para alimentar el PLC V570, el módulo V200-18-E3XB de I/O digitales y análogas, el transmisor de pH. Se usó una fuente de 2.1 A, lo cual es suficiente para alimentar todos los elementos que incluyen el proceso, incluso los actuadores de 24V, que en este caso sólo es la paleta rotativa. Foto referencial en la Figura 66.

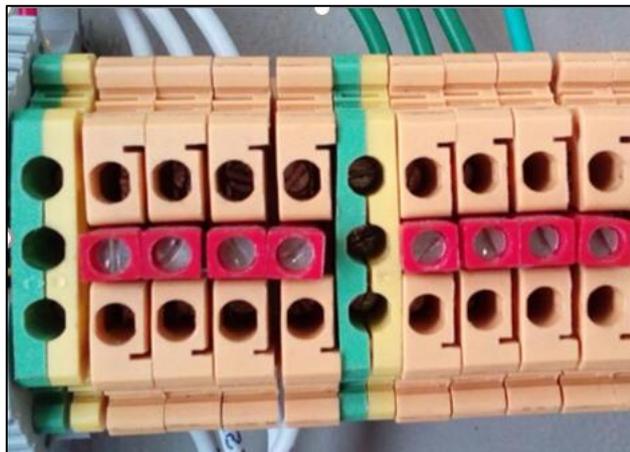


**Fuente:** <https://www.digikey.com/product-detail/es/puls-lp/ML50.100>

**Figura 66:** Fuente de 24V para riel DIN

## Borneras

Las borneras se eligen de acuerdo a el tipo de cable que se va utilizar, en este caso se usó borneras de 2.5mm en la cual se puede usar un cable de 12 a 24 AWG y soporta un máximo de 24A. Además, se usaron borneras con puentes tal y como se muestra en la **Figura 67**, para de esta forma alimentar varios elementos de un solo punto.

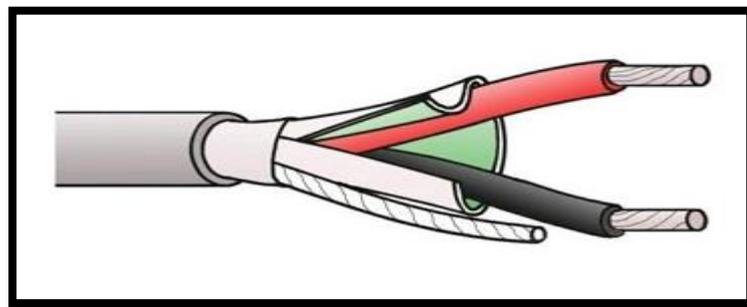


**Fuente:** Elaboración Propia

**Figura 67.** Borneras con Puentes para riel DIN.

## Tipos de cable

Se usaron 2 tipos de cable siguiendo la norma IEC 60228, AWG 16 y AWG 18, el cable 18 se usó apantallado para las señales de 24V y de las entradas del PLC el cual aguanta un máximo de 7A de corriente, el cable 16 se usó para las señales de 220V el cual aguanta un máximo de 10A de corriente. Foto referencial en la **Figura 68**. Además, en la **Figura 69** se muestra una foto referencial del cable de puesta a tierra que se ha utilizado, el cual fue AWG 16.



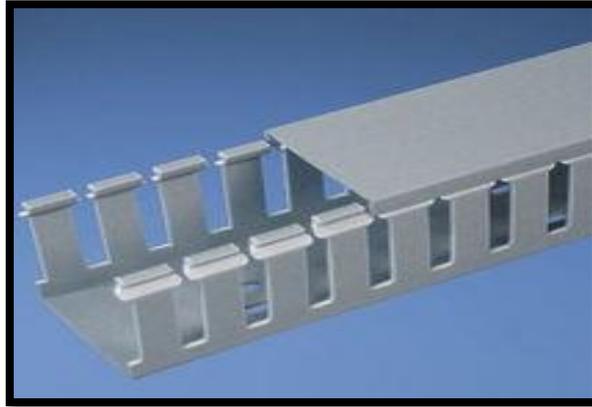
**Fuente:** <http://www.nexus.com.pe:8081/productos>  
**Figura 68:** Cable apantallado calibre 16



**Fuente:** <http://www.nexus.com.pe:8081/productos>  
**Figura 69:** Cable de puesta a tierra.

## Canaleta

Se utilizó canaleta de 25X40 para el paso de los cables, se usó esa medida ya que se dimensionó la cantidad de cables que se iba a utilizar, y éste cumplía con el tamaño adecuado para que no se encuentre apretado ni tampoco genere mucho calor por el paso en exceso de cableado. Foto referencial en la **Figura 70**.



**Fuente:** <http://electroindustri.com/products>

**Figura 70:** Canaleta 25x40

## Tubo Corrugado

Se usó tubo corrugado para el paso de los cables desde los sensores y actuadores hasta el ingreso del tablero eléctrico, es decir los cables que salen del proceso, la medida de dicho tubo es de ½ pulgada. Foto referencial en la **Figura 71**.



**Fuente:** <http://www.sodimac.com.pe/sodimac-pe/product/2010747/Tubo-corrugado-flexible-12%22-5-mt>

**Figura 71:** Tubo corrugado.

### **Fundas helicoidales**

Se usó fundas helicoidales para el paso de los cables dentro del tablero, cuando no están dentro de las canaletas, para que no se encuentren colgadas ni expuestas, además de mantener un orden. El uso de la misma se encuentra en le **Figura 72**.



**Fuente:** Elaboración propia  
**Figura 72:** Fundas helicoidales

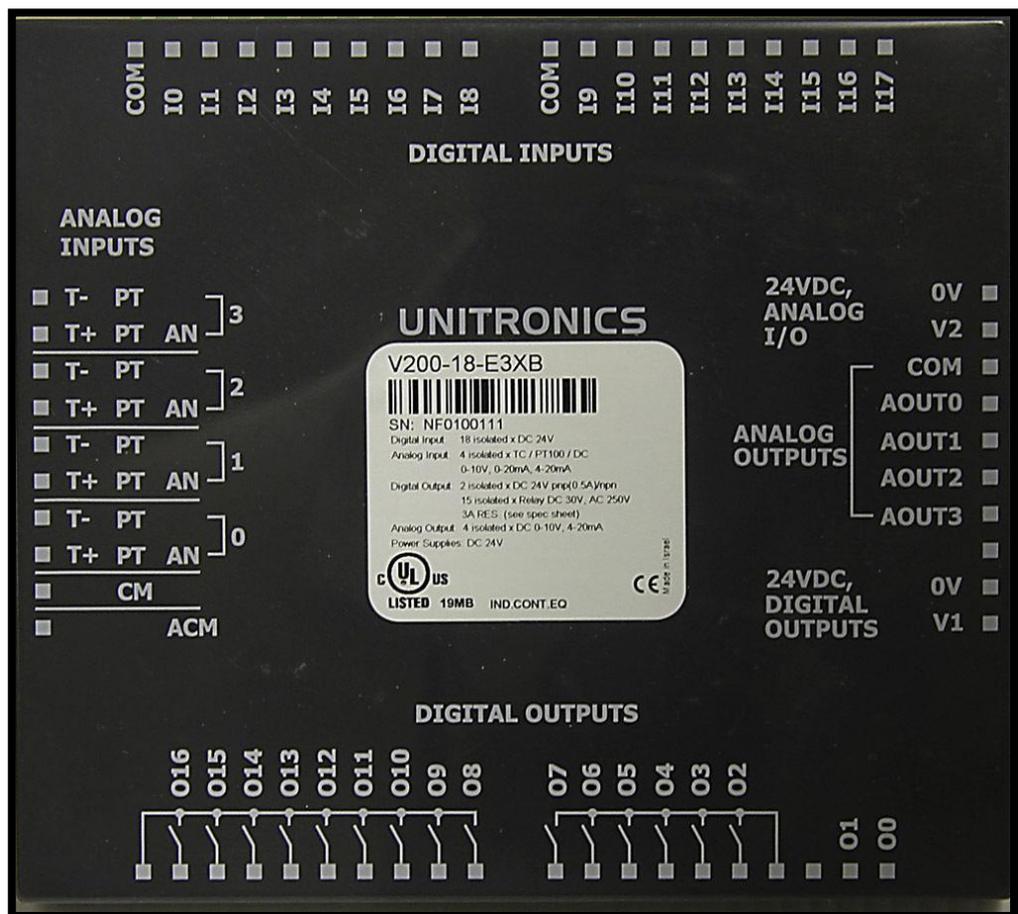
### **3.1.6.3 Comentarios y Conclusiones**

Para realizar el tablero eléctrico se tuvo que dimensionar en primer lugar, los elementos usados que dentro del mismo deben tener un espacio entre ellos, para evitar que haya una sobre carga de calor.

## 4 CAPÍTULO 4: DESARROLLO DE SOLUCIÓN PROPUESTA

### 4.1 Configuración de PLC Unitronics V570

El PLC de marca Unitronic V570, trabaja con un módulo de entradas y salidas tanto digitales como analógicas, es cuál es el V200-18-E3XB, el cual se puede visualizar en la **Figura 73**, y solo se adhiere al PLC, para de esta forma poder trabajar y realizar la lógica con las entradas y salidas con las que este dispone.



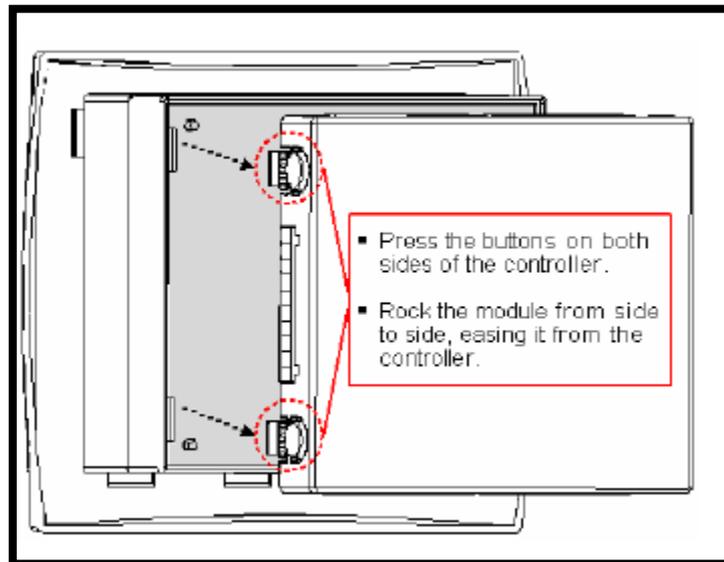
Fuente: <http://www.side-automatizacion.com>  
Figura 73. Módulo V200-18-E3XB (Foto Referencial)

Dentro de las características principales de este módulo es que las entradas y las salidas digitales se encuentran divididas en 2 partes, esto sirve para establecer 2 conexiones comunes diferentes, según se requiera. Además, en las salidas se tiene la salida digital, la salida de PWM, la salida tipo transistor y también aguanta una salida de tipo 220 voltios para habilitar actuadores que requieran esta alimentación. Adicionalmente, en las entradas analógicas, cuenta con entradas de voltaje, corriente y además para temperatura (termocuplas y PT100), y en las salidas analógicas cuenta con las de voltaje y de corriente. Sin embargo, al momento de trabajar y requerir algún tipo de estas salidas o entradas analógicas mencionadas se debe seguir un procedimiento de hardware que se va a explicar de manera breve a continuación. Además, cabe resaltar que dicha configuración del hardware es aparte de la de tipo software que es la que siempre se debe realizar para habilitar las entradas y salidas tanto digitales como analógicas desde la computadora.

### **Configuración del hardware para habilitar las entradas y salidas analógicas.**

#### **Paso 1**

Se debe retirar el módulo de entradas y salidas del complemento como se muestra en la **Figura 74**.

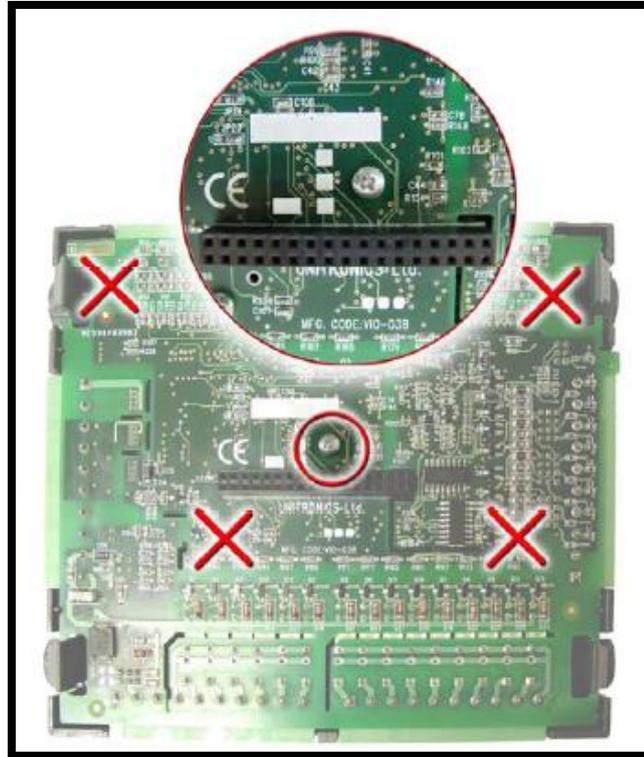


**Fuente:** <http://www.i4automation.co.uk/unitronicspdf/V200-18-E3XB.pdf>

**Figura 74.** Indicaciones para retirar módulo de entradas y salidas

## Paso 2

Luego en el módulo que se ha retirado, se tiene que ubicar el tornillo central tal y como se muestra en la **Figura 75.**, no se deben tocar los demás tornillos.

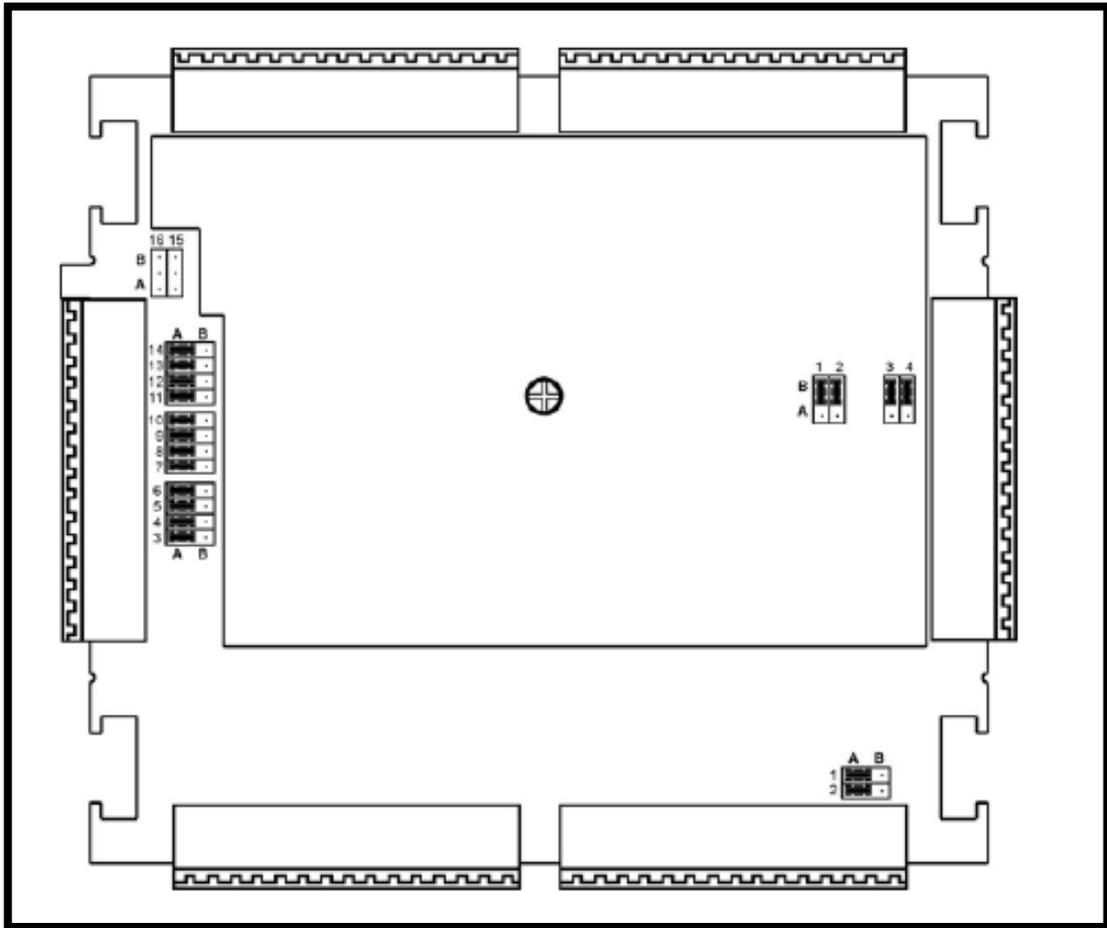


**Fuente:** <http://www.i4automation.co.uk/unitronicspdf/V200-18-E3XB.pdf>

**Figura 75.** Indicaciones para retirar módulo de entradas y salidas

## Paso 3

Al momento de retirar el tornillo se van a visualizar varios Jumpers, que tienen cierta ubicación llamadas “A” y “B”, tal y como se muestra en la Figura 76, los del lado izquierdo corresponden a las entradas analógicas, los del lado derecho a las salidas analógicas y los de la parte inferior a las salidas rápidas tipo transistor para habilitar que sean PNP o NPN. Las combinaciones que se deben seguir para habilitar las entradas y salidas analógicas, además de las digitales, se muestran en las Figuras 77, 78 y 79.



Fuente: <http://www.i4automation.co.uk/unitronicspdf/V200-18-E3XB.pdf>

Figura 76: Vista interna de los Jumpers

Analog Output Jumpers				
Top PCB board		Jumper #	Current	Voltage*
	Analog Output 0	1	A	B
	Analog Output 1	2	A	B
	Analog Output 2	3	A	B
	Analog Output 3	4	A	B

Fuente: <http://www.i4automation.co.uk/unitronicspdf/V200-18-E3XB.pdf>

Figura 77: Ubicación de los jumpers para cada salida analógica

<b>Analog Input Jumpers</b>					
	<b>Jumper #</b>	<b>Voltage*</b>	<b>Current</b>	<b>T/C or mV</b>	<b>PT100</b>
<b>Analog input 3</b>	14	A	B	B	A
	13	A	B	B	A
	12	A	A	B	B
<b>Analog input 2</b>	11	A	B	B	A
	10	A	B	B	A
	9	A	A	B	B
<b>Analog input 1</b>	8	A	B	B	A
	7	A	B	B	A
	6	A	A	B	B
<b>Analog input 0</b>	5	A	B	B	A
	4	A	B	B	A
	3	A	A	B	B

Fuente: <http://www.i4automation.co.uk/unitronicspdf/V200-18-E3XB.pdf>

**Figura 78:** Ubicación de los jumpers para cada Entrada analógica

<b>Digital Output Jumpers</b>			
	<b>Jumper #</b>	<b>PNP*</b>	<b>NPN</b>
<b>Digital Output 0</b>	1	A	B
<b>Digital Output 1</b>	2	A	B

Fuente: <http://www.i4automation.co.uk/unitronicspdf/V200-18-E3XB.pdf>

**Figura 79:** Ubicación de los jumpers para salidas digitales tipo transistor.

### 4.1.1 Comentarios y Conclusiones

Las configuraciones de las entradas y salidas analógicas del módulo, del tipo hardware, fueron necesarias para que el proceso se pueda realizar, sobre todo para que el controlador pueda recibir la información del transmisor de pH, y de esa forma saber qué valor está sensando. Ya que el método de comunicación del transmisor de pH es mediante un lazo por corriente por lo que se tuvo que poner los jumpers en la combinación del tipo “current” para que el PLC lo pueda detectar.

## 4.2 HMI

### 4.2.1 Descripción de Pantallas

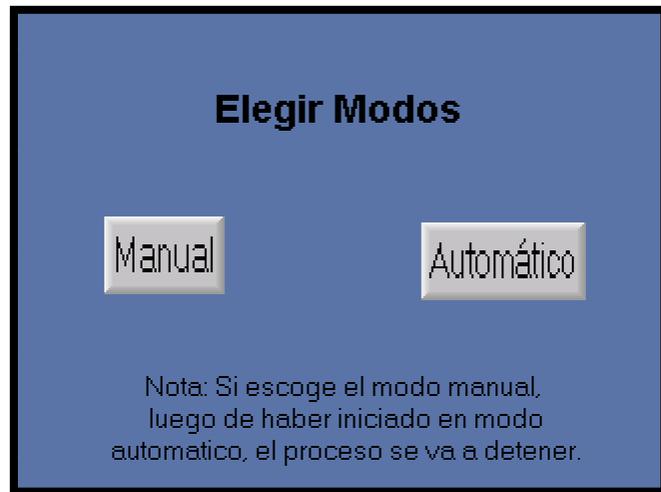
En la **Figura 80** se puede apreciar la pantalla principal que va a aparecer una vez que se encienda o se energice el sistema. Desde esta pantalla no se va a poder iniciar el programa, se tiene que presionar el botón de “Next” para pasar a la segunda pantalla que se visualiza en la **Figura 81**.



**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 80:** Pantalla Inicial.

En la **Figura 86**, se muestra la pantalla siguiente del programa, la cual tal cuenta con 2 botones touch, las mismas que sirven como se visualiza para elegir el modo manual o automático.



**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 81:** Pantalla para seleccionar modos.

En la **Figura 87** se muestra la pantalla que va a aparecer en caso se elija el modo manual, este modo básicamente sirve para manipular los actuadores mediante diferentes botones. Cuando se active un actuador se va a mostrar la lámpara de al lado y se pondrá a verde, si está apagado se pondrá a rojo. En la **Figura 82** si se presiona el botón de “Next” va a pasar a la **Figura 83** que es la segunda parte de los actuadores tal y como se muestra.



**Fuente:** Elaboración propia

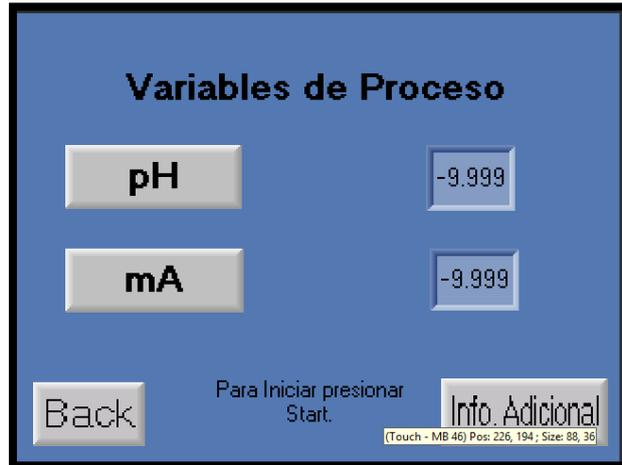
**Figura 82:** Pantalla 1 de actuadores manuales.



**Fuente:** Elaboración propia  
**Figura 83:** Pantalla 2 de actuadores manuales.

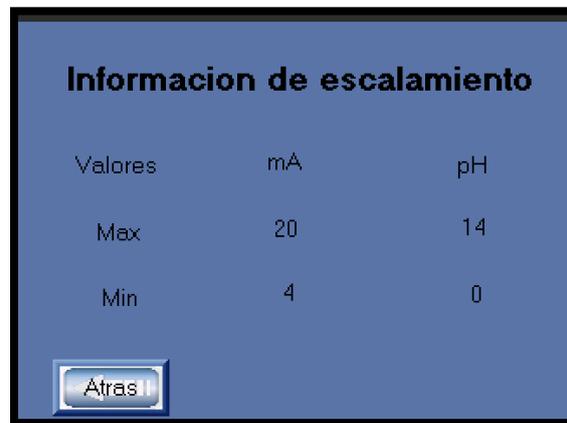
Si se escoge el modo automático se va a visualizar la **Figura 84**. Pero el proceso no se va a iniciar hasta que se presione el botón Físico de “Start”, así como se indica en una pequeña nota de texto, si se quiere ver en qué parte se encuentra el proceso, se puede presionar el botón touch “Info Adicional” Tal y como se muestra en la **Figura 84**.

Si se desea presionar el de “pH” se puede cambiar el set point requerido de esta variable tal y como se muestra en la **Figura 85**. Si se presionar el botón de “mA” se va a visualizar información acerca del escalamiento tal y como se muestra en la **Figura 86**. Si se desea regresar al botón de seleccionar modos presionar el botón touch “BACK”.



**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 84:** Pantalla principal del modo automático.



**Fuente:** Elaboración propia

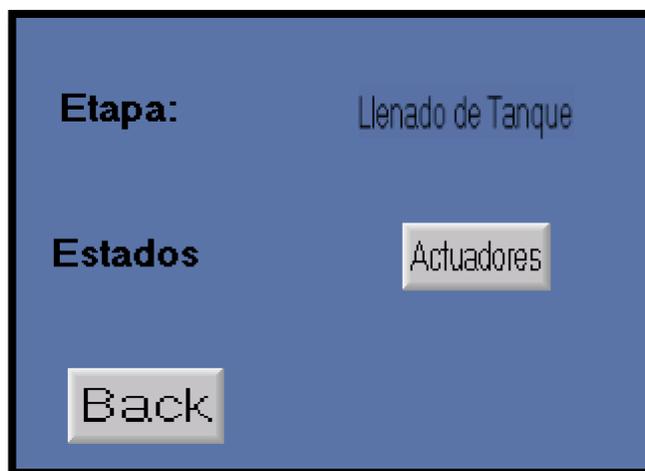
**Figura 85:** Pantalla para cambiar el set point del pH.



**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 86:** Pantalla escalar el pH.

En la **Figura 87**, se puede visualizar que se va a mostrar la etapa en la que se encuentra el proceso, además si se presiona el botón touch “Actuadores” se podrá visualizar el estado de los actuadores del proceso, como se aprecia en las Figuras **88** y **89**.



**Fuente:** Elaboración propia  
**Figura 87:** Pantalla de Info. Adicional.



**Fuente:** Elaboración propia  
**Figura 88:** Pantalla del estado de los actuadores en modo automático.

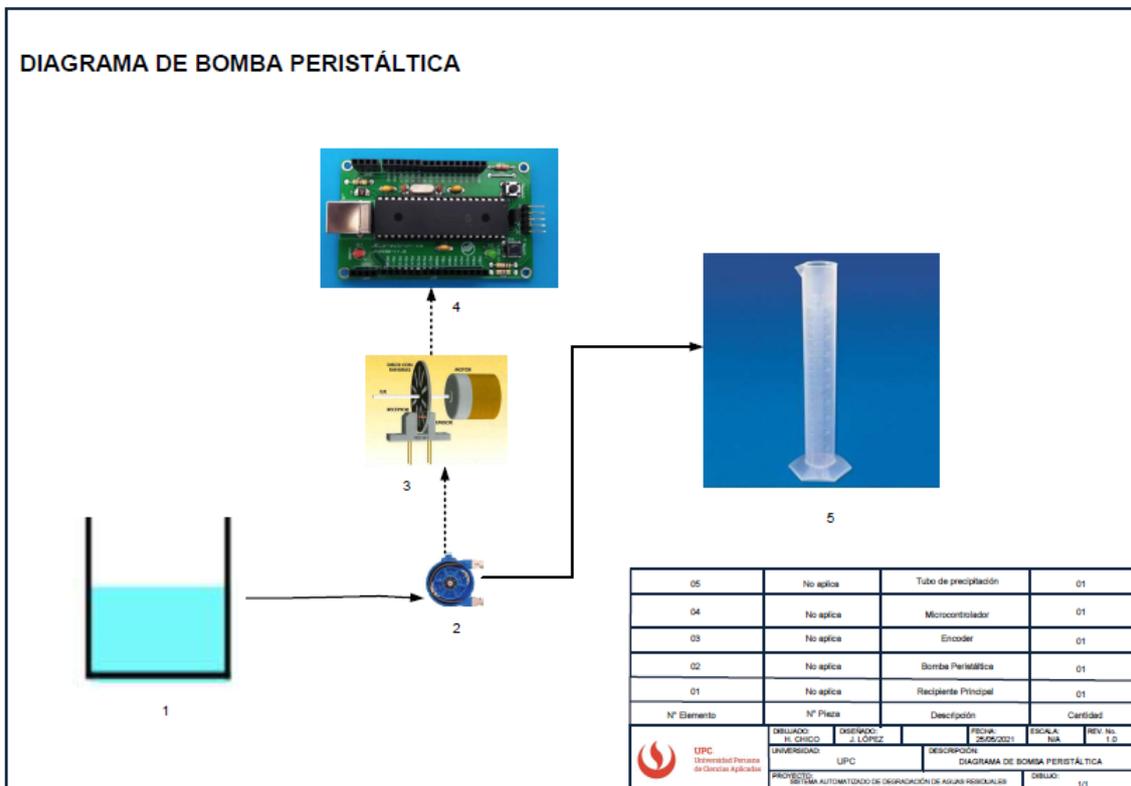


**Fuente:** Elaboración propia  
**Figura 89:** Pantalla 2 del estado de los actuadores en modo automático.

### 4.3 Bomba Peristáltica

El uso de las bombas peristálticas en este proyecto es muy importante, ya que debido al paso del líquido regulado que este tiene, se puede manejar y controlar que cantidad exactamente está pasando a través de ellos en un determinado tiempo.

Para poder saber la cantidad de líquido que pasa a través de las mangueras de las bombas se tuvo que realizar pruebas de 2 tipos, controlar el tiempo que éstas se demoraban en pasar cierta cantidad de líquido; y además mediante un encoder para controlar la cantidad de revoluciones o de pulsos que dicha bomba realiza para pasar una misma cantidad de líquido. Cabe resaltar que las pruebas mencionadas se realizaron con las bombas peristálticas trabajando a su voltaje máximo, en este caso 12 voltios. Así mismo, para realizar dicho procedimiento se construyó un pequeño circuito para poder controlar la cantidad de pulso y qué tiempo transcurre por cada cantidad de líquido que se transporta. En la **Figura 90**, se puede apreciar el diagrama del circuito que se implementó para este poder hallar el tiempo que necesita la bomba peristáltica por cada mL Para una mejor visualización ver anexos.



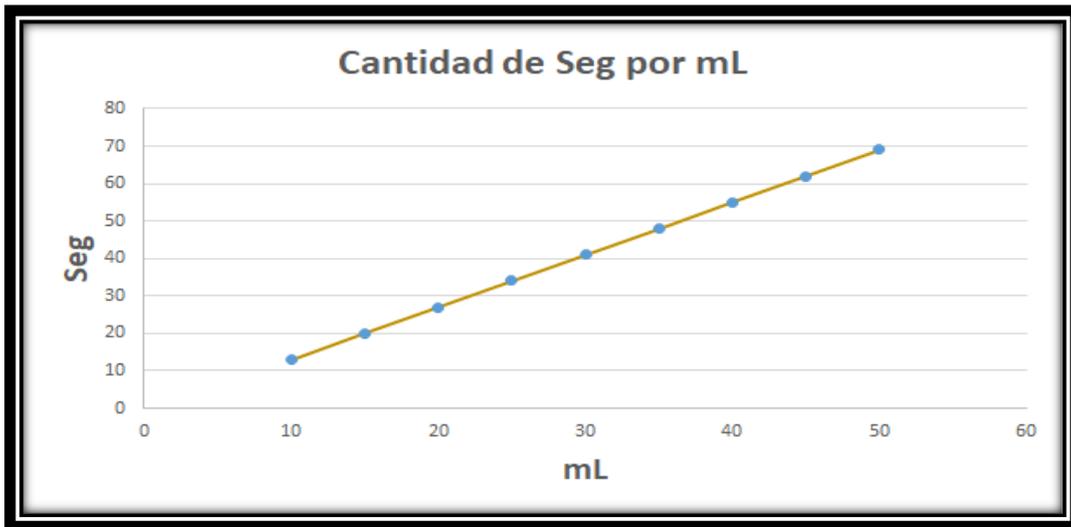
**Fuente:** Elaboración propia.

**Figura 90** Diagrama de Circuito para la validación de las bombas peristálticas.

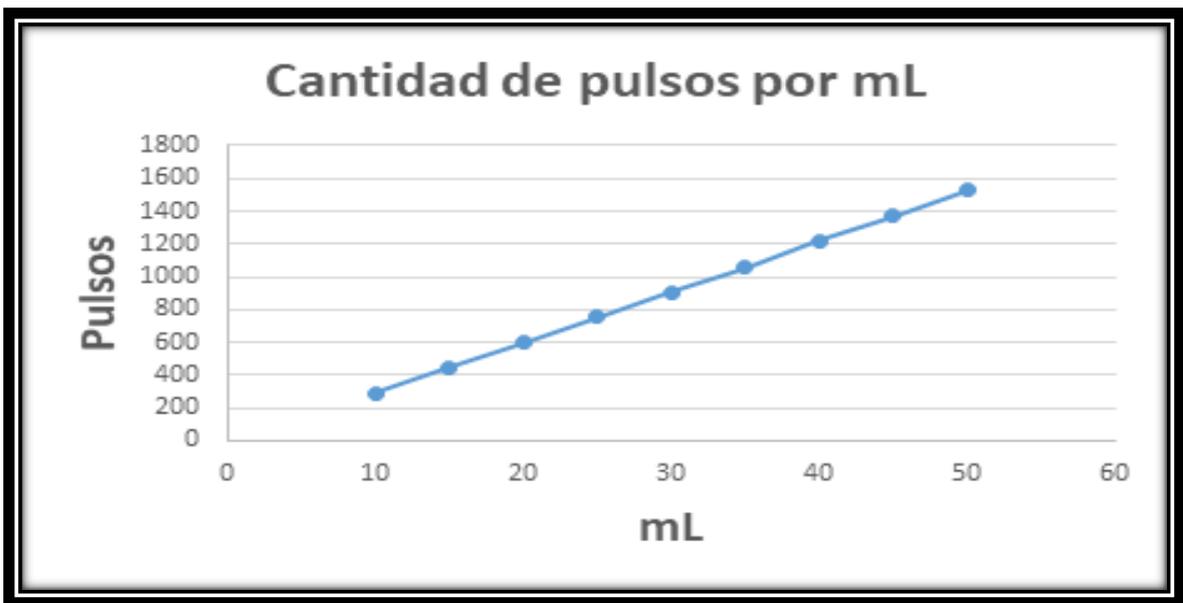
Los resultados obtenidos de las pruebas realizadas se pueden visualizar en la Tabla 10 los cuales demuestran que se necesitan 7 segundos o que necesita dar  $150 \pm 2$  pulsos para que la bomba peristáltica transporte 5mL de líquido. Además, se puede verificar que el comportamiento de las bombas peristálticas es lineal en todo momento, y eso se puede visualizar mejor en las gráficas mostradas en las Figuras 91 y 92. Las cuales fueron obtenidas de los valores obtenidos de la tabla ya mencionada.

<b>Tabla 10:</b> Pulsos y seg necesarios para una determinada cantidad de mL.		
<b>mL</b>	<b>Pulsos</b>	<b>Seg</b>
10	299	13
15	448	20
20	601	27
25	752	34
30	901	41
35	1052	48
40	1201	55
45	1349	62
50	1501	69

**Fuente:** Elaboración Propia



**Fuente:** Elaboración propia.  
**Figura 91** Gráfica mL vs Seg



**Fuente:** Elaboración propia.  
**Figura 92** Gráfica mL vs Pulsos

### 4.3.1 Comentarios y Conclusiones

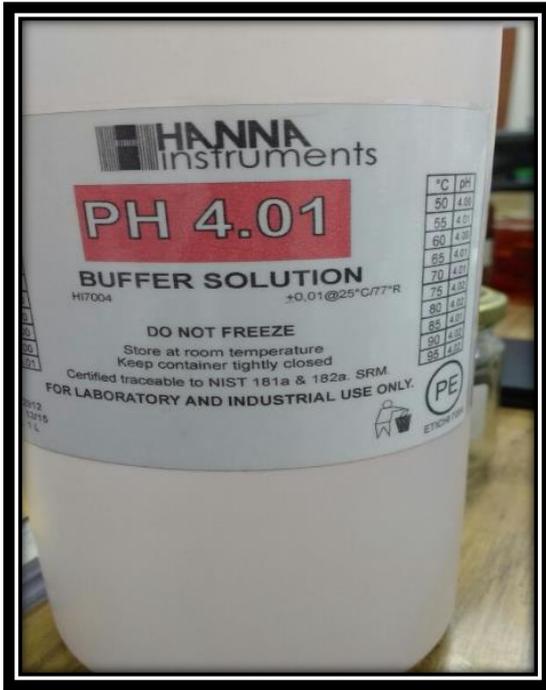
El avance de la adquisición de la bomba peristáltica corresponde a la parte de asegurar que el ingreso de la solución química sea de una forma que se pueda controlar. Además, se pudo comprobar que las bombas se comportan de manera lineal en todo momento. Por último, esta validación va a servir solo para el ingreso de las soluciones químicas de Peróxido de Hidrógeno y Fierro 2, ya que el ingreso de la cantidad del ácido clorhídrico va a realizarse hasta que el transmisor de pH indique que ya se llegó al valor deseado, el cual es de un pH igual a 3.

## 4.4 Transmisor de pH

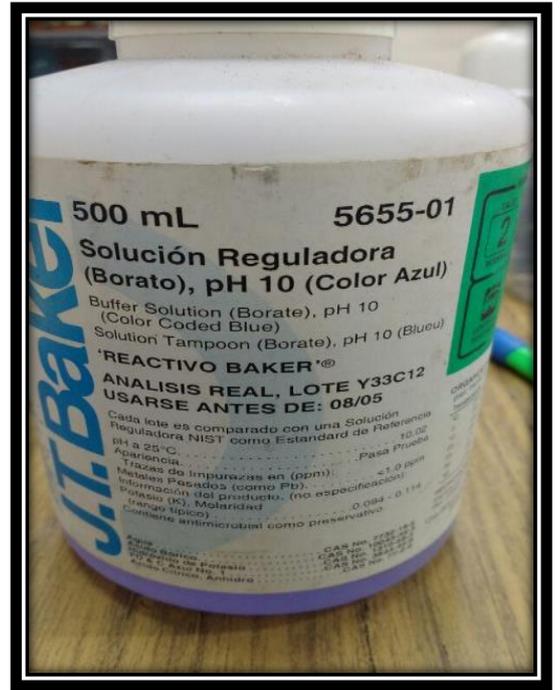
### Calibración

Para realizar la calibración del transmisor de pH, la empresa Textiles Ate S.A.C., específicamente el área de los laboratorios, fueron los encargados de proporcionar los químicos para realizar este proceso.

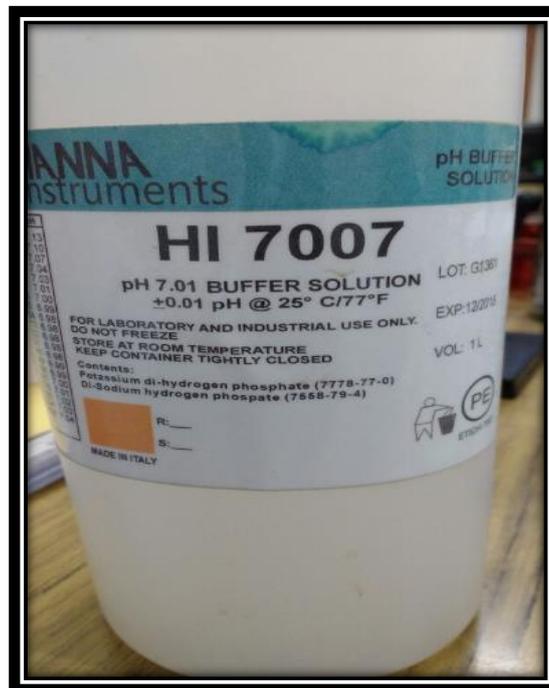
Los químicos con los que siempre se trabaja en la industria, que además son los más comerciales son de pH 4, 7 y 10. En las **Figuras 93, 94 y 95**, se pueden visualizar los recipientes con los químicos indicados. Se puede resaltar que según el manual del transmisor TB82, sólo se necesitan 2 valores de pH para calibrarse, los cuales son de pH 4 y pH 10, así mismo esta calibración se debe realizar tantas veces como sea necesaria, es decir, hasta que no haya ninguna variación cuando se le coloquen las sustancias de pH 4 y pH 10. Estas indicaciones son propias del manual. Por último, la sustancia de pH 7 se usó como un extra después de la calibración para cerciorar que el transmisor está funcionando y sensando de forma correcta.



**Fuente:** Elaboración Propia  
**Figura 93** Solución Buffer pH 4



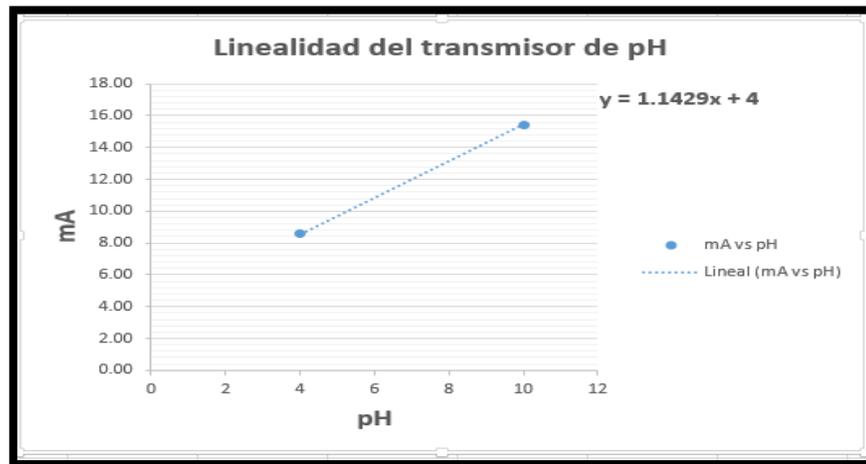
**Fuente:** Elaboración Propia  
**Figura 94** Solución Buffer pH 10



**Fuente:** Elaboración Propia  
**Figura 95** Solución Buffer pH 7

## Linealización

Posterior a la calibración, se puede hallar la linealidad que esta debe seguir, para dicha tarea se usó la solución de pH 7 proporcionada por la empresa, ya que el valor que marca el transmisor de pH en mA, debe coincidir con la recta que se halló con los 2 puntos que ya estaban calibrados. En la **Figura 96**, se puede ver la ecuación se ha hallado a partir de los 2 puntos ya mencionados.

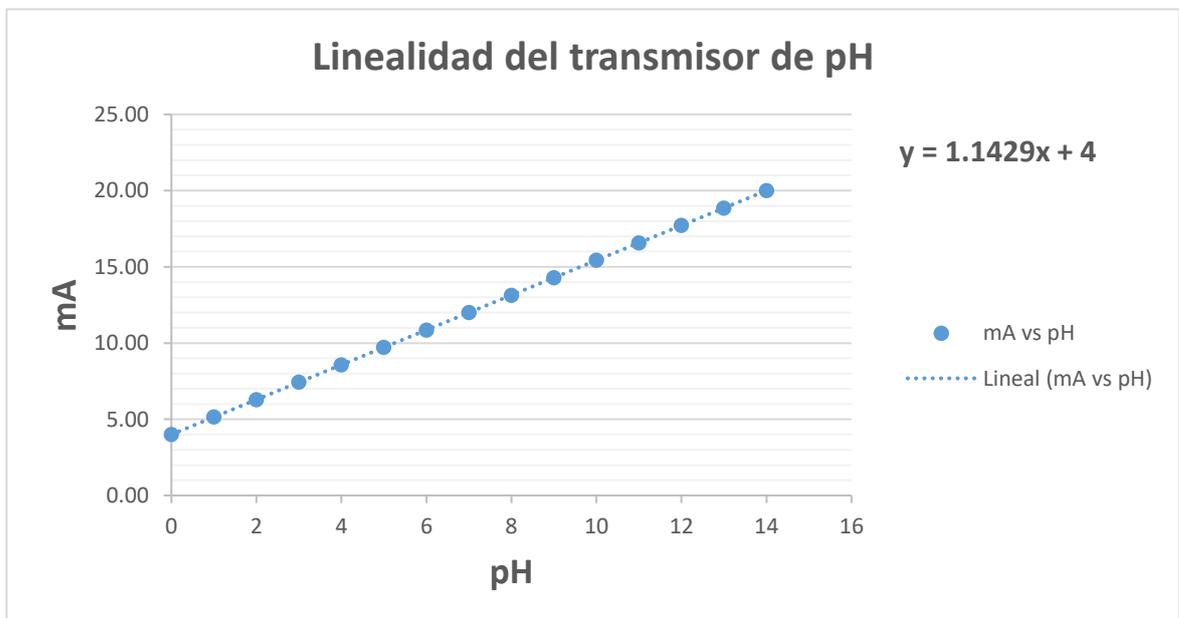


**Fuente:** Elaboración Propia

**Figura 96** Recta y ecuación que debe seguir el transmisor de pH

Posteriormente con dicha ecuación se pudo hallar que valor de amperaje les corresponde a los valores de pH, con lo que se pudo obtener los amperajes que se debía obtener al momento que el transmisor fuera sumergido a la sustancia con el valor de pH 7. Con el resultado hallado gracias a la ecuación obtenida, se concluye que el valor que le corresponde al valor de pH 7 es un valor de 12mA tal y como se muestra en la Tabla 6. En la **Figura 97**, ya se puede visualizar con más claridad la recta completa que se le asigna por cada valor de pH pasados a mA.

<b>Tabla 11</b> Relación entre el amperaje (mA) y valor de pH	
<b>pH</b>	<b>mA</b>
0	4.00
1	5.14
2	6.29
3	7.43
4	8.57
5	9.71
6	10.86
7	12.00
8	13.14
9	14.29
10	15.43
11	16.57
12	17.71
13	18.86
14	20.00

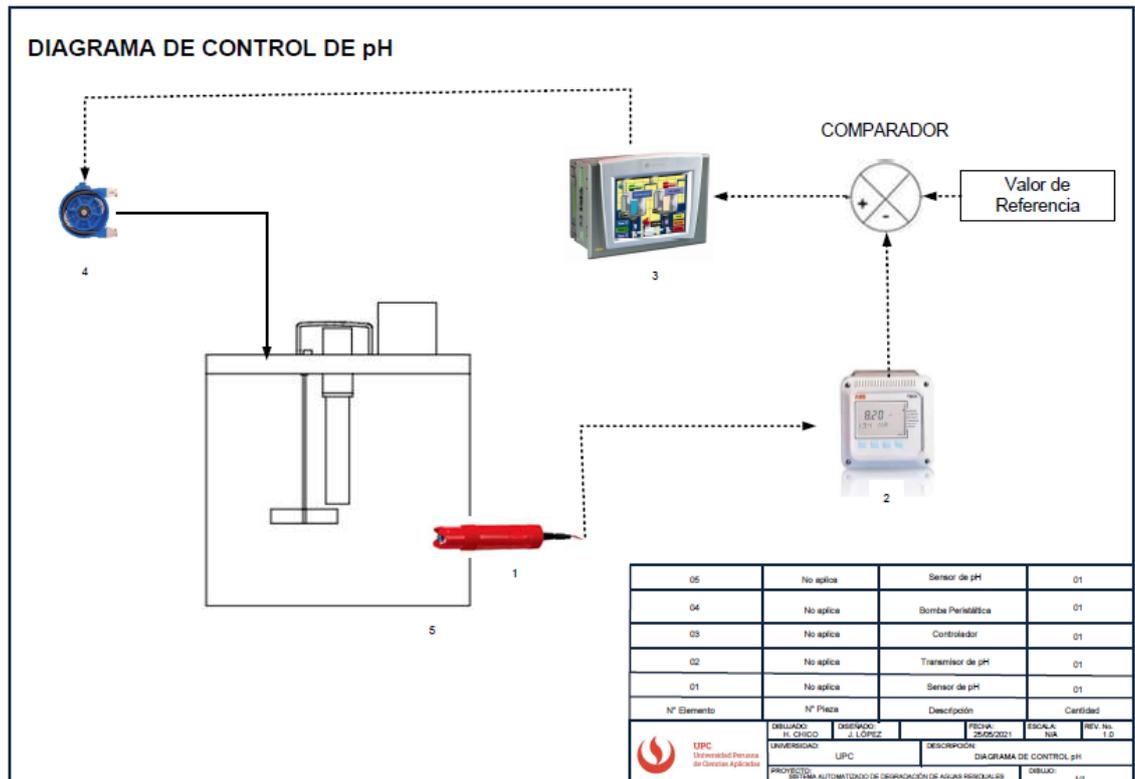


**Fuente:** Elaboración Propia

**Figura 97** Gráfica final con todos los puntos ubicados del transmisor de pH.

## Lazo de control de pH

Luego de realizar la linealización del transmisor de pH, se podrá elaborar el lazo de control, ya que este instrumento servirá como retroalimentación del lazo cerrado que se utilizará para controlar esta variable. A continuación, en la **Figura 98**, se muestra el diagrama de este Lazo, para una mejor visualización ver Anexos.



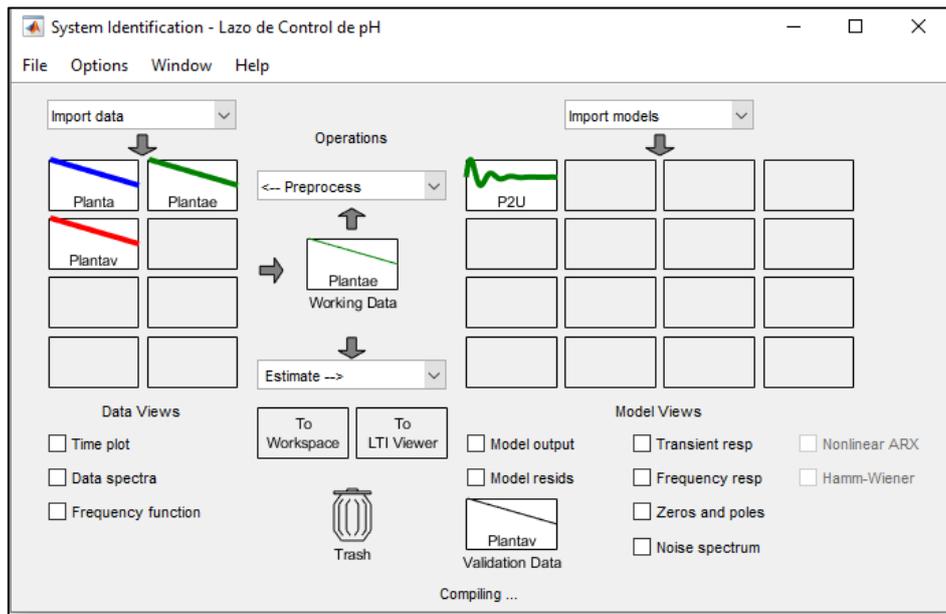
**Fuente:** Elaboración Propia  
**Figura 98** Diagrama de lazo de control de pH.

Durante las pruebas realizadas con el agua residual se sintonizó el lazo de control, de lo cual se obtuvo la gráfica del comportamiento de la variable de pH en el tiempo. Ver **Figura 99**.



**Fuente:** Elaboración Propia  
**Figura 99** Lazo de control de pH

Para poder obtener la función de transferencia de la planta, se aprovechó que ya se tenían los datos de proceso y se utilizó el método de identificación de sistemas, el cual fue desarrollado en Simulink. Ver Figura 100.

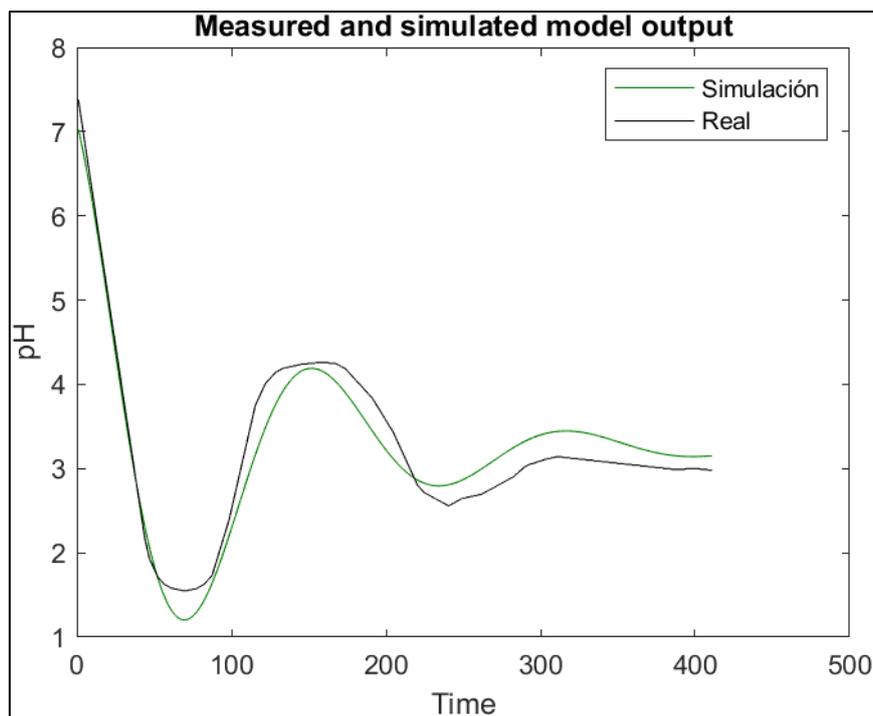


**Fuente:** Elaboración Propia  
**Figura 100** Ventana de Identificación de sistemas - Simulink

En la Figura 101, se puede visualizar la función de transferencia que se obtuvo, junto con los valores de cada variable. Según los resultados obtenidos esta función de transferencia tiene un porcentaje de asertividad del 85%, ver comparativo en Figura 102.

Model name:	P2U
Color:	[0,0.5,0]
Process model with transfer function: $G(s) = \frac{Kp}{1+2*Zeta*Tw*s+(Tw*s)^2}$ Kp = 1.0797 Tw = 25.468 Zeta = 0.23538  Name: P2U	

**Fuente:** Elaboración Propia  
**Figura 101** Función de Transferencia - Simulink



**Fuente:** Elaboración Propia  
**Figura 102** Comparativo de Sintonización real vs lo obtenido con la identificación de sistemas - Simulink

#### 4.4.1 Comentarios y conclusiones

El avance sobre la elección del sensor de pH corresponde al sistema de control en lazo cerrado que se necesitará para la implementación del producto final. Esto

se hace con la finalidad de mantener la solución en un valor de pH menor o igual a 3, cabe resaltar que es necesario mantener el pH en estos valores durante el proceso Foto-Fenton para que este tenga el efecto esperado.

Las pruebas realizadas posteriores a la calibración del transmisor fueron concluidas de manera satisfactoria, ya que se pudo verificar que dicho instrumento funciona de manera lineal, que es lo que se busca en este proceso y se pudieron obtener los valores para el lazo de control del sistema manteniendo el pH en línea como retroalimentación del proceso.

#### **4.5 Validaciones finales del proceso**

Las validaciones se realizaron con todos los productos brindados por la empresa, tal como la muestra del agua residual y los químicos a utilizar. Asimismo, como se menciona en capítulos anteriores, los instrumentos que permiten la aceptación del proyecto se encuentran calibrados y certificados por medio de la empresa. Se realizaron 2 corridas que fueron comparadas dentro del intervalo de tiempo propuesto (70 minutos), las medidas de unidad de turbidez en ambos casos llegaron a los límites máximos permitidos de NTU (<100 NTU). Ver comportamiento de la variable de Turbidez en la **Figura 103 y 104**.

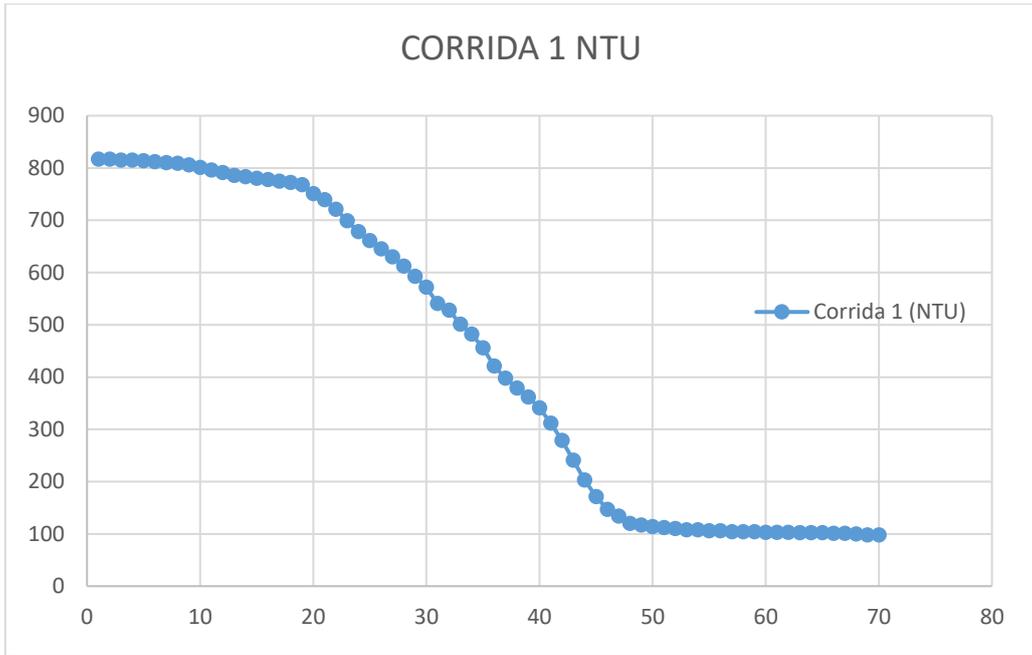
En las **Figuras 105 y 106**, se puede apreciar el cambio visual que tiene el agua residual a lo largo del tiempo.

**Tabla 12: Corrida 1**

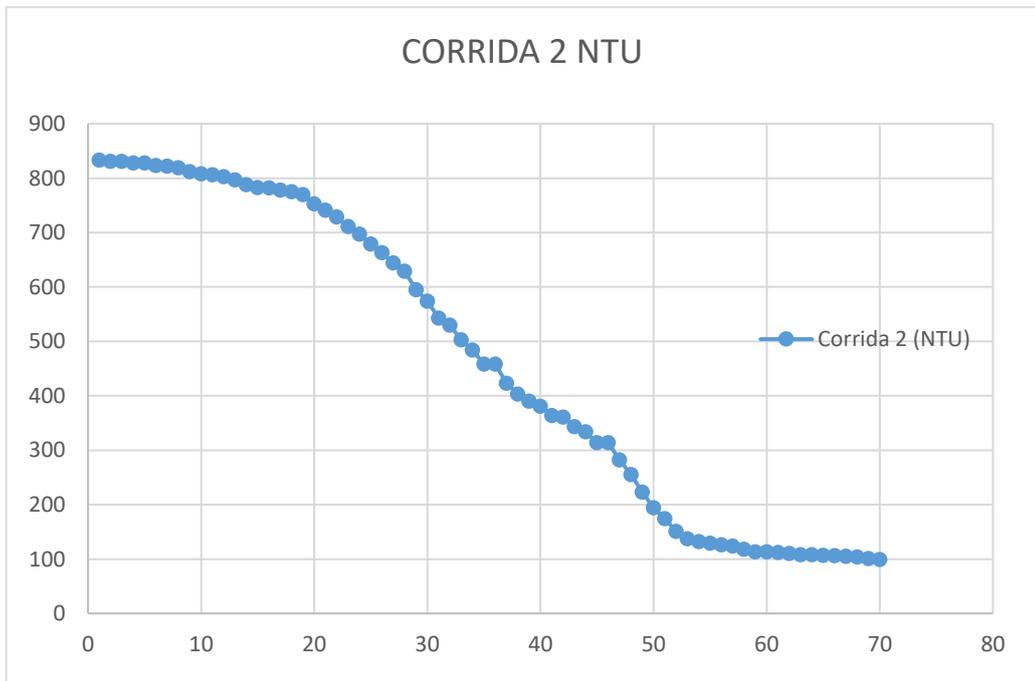
Minutos	NTU	Minutos	NTU
1	817	36	421
2	817	37	398
3	815	38	379
4	815	39	362
5	814	40	341
6	812	41	312
7	810	42	279
8	809	43	241
9	806	44	203
10	801	45	171
11	796	46	147
12	791	47	134
13	786	48	120
14	783	49	117
15	780	50	114
16	778	51	112
17	775	52	110
18	772	53	108
19	768	54	108
20	751	55	106
21	739	56	106
22	721	57	104
23	699	58	104
24	678	59	104
25	661	60	103
26	645	61	103
27	630	62	103
28	612	63	102
29	593	64	102
30	572	65	102
31	541	66	101
32	528	67	101
33	501	68	100
34	482	69	98
35	456	70	98

**Tabla 13: Corrida 2**

Minutos	NTU	Minutos	NTU
1	833	36	458
2	831	37	423
3	831	38	403
4	828	39	390
5	828	40	381
6	823	41	364
7	822	42	361
8	819	43	343
9	812	44	334
10	808	45	314
11	806	46	314
12	803	47	282
13	797	48	255
14	788	49	223
15	783	50	194
16	782	51	174
17	778	52	151
18	775	53	137
19	770	54	132
20	753	55	129
21	741	56	126
22	729	57	124
23	711	58	118
24	697	59	113
25	679	60	113
26	663	61	112
27	644	62	110
28	629	63	108
29	595	64	108
30	574	65	107
31	543	66	106
32	530	67	105
33	503	68	104
34	484	69	101
35	458	70	99



**Fuente:** Elaboración propia  
**Figura 103:** Gráfica NTU vs. Tiempo (Corrida 1)



**Fuente:** Elaboración propia  
**Figura 104:** Gráfica NTU vs. Tiempo (Corrida 2)



**Fuente:** Elaboración propia  
**Figura 105:** Muestras (Corrida 1)



**Fuente:** Elaboración propia  
**Figura 106:** Muestras (Corrida 2)

## **5 CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES**

### **5.1 Conclusiones de resultados de proyecto**

- Se logró implementar una máquina prototipo que realice el tratamiento de aguas residuales para los pantalones de vaquero de la industria textil de manera autónoma.
- Se desarrolló un proceso automatizado de tratamiento de aguas residuales que cumpla con los parámetros establecidos “Llevar al agua residual hasta los estándares ambientales de NTU, menor o igual a 100NTU; así mismo el pH, en un intervalo de 7 a 9.” No obstante, cabe recalcar que se realizó un lazo de control cerrado para controlar la variable de pH y un lazo de control abierto para control la variable de turbidez.
- Se logró diseñar un sistema de monitoreo en tiempo real para el pH, el cual es importante monitorear, ya que es limitante para el funcionamiento del proceso Foto-Fenton.
- Se diseñó un sistema automatizado mediante el método de tratamiento de aguas residuales Foto-Fenton usando radiación UV, el cual no excede los 70 minutos de proceso.

## 6 Referencias Bibliográficas

- [1]. ISA. (13 de July de 1992). Instrumentation Symbols and Identification. ANSI/ISA-S5.1-1984.
- [2]. Jack, H. (14 de Abril de 2005). *Automating manufacturing systems with PLCs*. Obtenido de [http://www.nfiautomation.org/FREE\\_Download/Technical%20Documents/PLC/Automating%20Manufacturing%20System%20with%20PLC.pdf](http://www.nfiautomation.org/FREE_Download/Technical%20Documents/PLC/Automating%20Manufacturing%20System%20with%20PLC.pdf)
- [3]. Jakoubek, P. (2012). Experimental Identification of Stable Nonoscillatory Systems from Step-Responses by Selected Methods.
- [4]. Johnson, C. D. (1984). *Microprocessor-based process control*. Nueva Jersey: Prentice-Hall.
- [5]. Enviolet. (2015). Chemistry of UV oxidation. 09 de mayo del 2017, de Enviolet 5,40-57.
- [6]. S. Salas Arriarán (2017). El módulo de entrada de captura y el generador PWM del microcontrolador PIC18F4550. Escuela de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC), Lima, Perú.
- [7]. Altmann, W. (2005). *Practical Process Control for Engineers and Technicians*. Oxford: Newnes.
- [8]. Antony, A. a. (2016). Comparison of performance indices of PID controller with different tuning methods. International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies (ICCPCT). (págs. 1-6). IEEE.
- [9]. Bolton, W. (2004). *Instrumentation and control systems*. Oxford: Newnes.
- [10]. Smith, C. &. (1997). *Principles and Practice of Automatic Process Control*. Nueva York: John Wiley & Sons.
- [11]. OEFA. (2019). Fiscalización Ambiental en aguas residuales. [https://www.oefa.gob.pe/?wpfb\\_dl=7827#:~:text=El%20Per%C3%BA%20genera%20aproximadamente%202,alcantarillado%20de%20las%20EPS%20Saneamiento](https://www.oefa.gob.pe/?wpfb_dl=7827#:~:text=El%20Per%C3%BA%20genera%20aproximadamente%202,alcantarillado%20de%20las%20EPS%20Saneamiento).
- [12]. Cortazar. (2010). Contaminación generada por colorantes de industria textil. <https://www.uaeh.edu.mx/scige/boletin/prepa4/n3/e1.html>
- [13]. Bermeo. (2016). Treatment of mining sewage Using the Stirling Machine. <http://acreditacion.uni.edu.pe/wp-content/uploads/2017/06/Treatment-of-Mining-Sewage-Using-the-Stirling-Machine.pdf>

- [14]. Pérez. (1985). Aguas residuales. Composición. [https://cidta.usal.es/cursos/edar/modulos/edar/unidades/LIBROS/logo/pdf/Aguas\\_Residuales\\_composicion.pdf](https://cidta.usal.es/cursos/edar/modulos/edar/unidades/LIBROS/logo/pdf/Aguas_Residuales_composicion.pdf)
- [15]. Jaciw. (2020). Manual técnico sobre procesos de oxidación avanzada aplicadas al tratamiento de aguas residuales industriales. [http://www.cyted.org/sites/default/files/manual\\_sobre\\_oxidaciones\\_avanzadas\\_0.pdf](http://www.cyted.org/sites/default/files/manual_sobre_oxidaciones_avanzadas_0.pdf)
- [16]. Kumar.(2020). Clasificación de las reacciones orgánicas. [http://www.saber.ula.ve/bitstream/handle/123456789/16749/reacciones\\_organicas.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://www.saber.ula.ve/bitstream/handle/123456789/16749/reacciones_organicas.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [17]. Fernandes. (2018). Aplicación del proceso Fenton en el tratamiento de aguas residuales de origen petroquímico. <http://www.scielo.org.co/pdf/inco/v16n2/v16n2a19.pdf>
- [18]. Hyl, R. &. (2016). Design and implementation of cascade control structure for superheated steam temperature control. International Carpathian Control Conference (ICCC) (págs. 253-258). IEEE.