 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01- 27

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL AUTOMÁTICO PARA UNA
PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES, APLICADO A UNA
INDUSTRIA DE TEMPLADO Y LAMINADO DE VIDRIO**

Diego Mauricio Arbeláez Hoyos

Jose Gonzalo Yepes

Ingeniería Mecatrónica / Electromecánica

Director del trabajo de grado:

MSc. Carlos Mario Londoño Parra

INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO

2019

RESUMEN

El proceso de templado de vidrio usa el agua de ciudad para la refrigeración de sus equipos, una vez el agua es usada, pasa a ser agua residual industrial por estar contaminada con materiales extraños provenientes del proceso.

Por normatividad colombiana, esta agua no puede ser vertida al alcantarillado público sin pasar antes por un proceso de tratamiento que busca eliminar los contaminantes y ajustar ciertos parámetros que se deben cumplir antes del vertimiento.

Como parte del proceso de automatización, se revisaron las condiciones de operación del proceso para establecer los parámetros iniciales del diseño. En base a esta información se realizó el diseño en 3D de la planta de tratamiento de agua y en paralelo se calcularon los equipos de bombeo. De acuerdo con el proceso de tratamiento se realizó el sistema de control automático para la ejecución del proceso de tratamiento con el objetivo de no tener que realizar vertimiento del agua tratada, si no, reusar el 100% del agua nuevamente en el proceso.

Se realizó la simulación del proceso logrando observar el comportamiento de los equipos y variables del sistema en función de las decisiones que debe tomar el autómatas para lograr un proceso estable y confiable para la planta.

Se desarrollan diferentes protocolos de calibración para los equipos instalados, un calendario de mantenimiento tentativo y sus respectivas listas de tareas para el desarrollo de la actividad.

Palabras clave: PLC, aguas residuales, sistema de bombeo, sistema hidráulico, automatización, Solid Edge, Wincc, Step 7.

RECONOCIMIENTOS

Agradecemos a nuestras familias que constantemente fueron la principal motivación y fortaleza para la ejecución del proyecto durante cada una de sus etapas y por la paciencia que demostraron por la alta inversión de tiempo que se requirió para el logro de los resultados.

A los softwares de programación Step 7 y wincc flexible por ayudar en el diseño y simulación del proyecto en todo el sistema de control permitiendo establecer las condiciones óptimas para el proceso de tratamiento de agua.

Al software CAD Solid Edge Estudiantil que facilitó de manera simple y ágil el modelamiento de la planta en 3D, lo que ayudó significativamente en los ajustes requeridos en elementos mecánicos que conforman la planta de tratamiento de agua residual industrial.

ACRÓNIMOS

CAD: Computer Aide Design, diseño asistido por computadora

PTAR: Planta Tratamiento Aguas Residuales

PLC: Controlador lógico programable

HMI: Interfaz hombre maquina

STEP 7: Software de programación de PLC Siemens

KOP: Esquema de contactos

WINCC: Control de supervisión y adquisición de datos (Scada)

VAC: Voltaje Corriente Alterna

W: Watts de potencia eléctrica

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	6
1.1. Definición del problema.....	6
1.2. Formulación del problema.....	7
1.3. Objetivo general.....	7
1.4. Objetivos específicos	8
1.5. Estructura.....	8
2. MARCO TEÓRICO	10
2.1. Automatización de procesos.....	10
2.2. PLC.....	10
2.3. Diseño asistido por computador CAD.....	11
2.4. Lenguajes de programación.....	11
2.5. HMI.....	12
2.6. Sistema de bombeo	12
2.7. Sistema de arrancadores	14
3. METODOLOGÍA	19
3.1. Análisis de las condiciones de operación del proceso de corte y templado de vidrio 19	
3.2. Cálculos sistema hidráulico.....	19
3.3. Modelo 3D de la planta de tratamiento de agua residual industrial	30
3.4. Diseño arquitectura de control PTAR	41
3.5. Diseño sistema de potencia eléctrica	51
3.6. Diagrama de tuberías e instrumentación (P&ID).....	59
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	60
5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO.....	61
REFERENCIAS.....	63
APÉNDICE	65

1. INTRODUCCIÓN

Las necesidades de hoy en día en el sector industrial van cada vez más en pro de los procesos automáticos donde la mano de obra humana cada vez es menos requerida. Esto ha ido emergiendo a la implementación de sistemas de control por medio de PLC que ayudan y facilitan la ejecución de tareas para un determinado proceso.

Adicionalmente en Colombia, el sector ambiental ha retado a las industrias para que sus aguas residuales industriales producto de los procesos productivos sean tratadas previamente a la descarga al alcantarillado público con miras al cuidado del medio ambiente. Es por ello que se publicó la resolución 1609 de marzo de 2015, la cual establece los parámetros y valores máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado publico donde exigen al sector industrial cumplir con dicha norma dado a que el no cumplimiento de esta acarrea sanciones monetarias e incluso el paro productivo de las industrias.

Con base a esto, se desarrolló el diseño de la planta de tratamiento de agua residual industrial automática para dar cumplimiento a la normatividad y para lograr un proceso más eficiente con la ayuda de sistemas de control que ejecutan ciertas acciones de acuerdo con una programación que se ejecuta en el PLC.

1.1. Definición del problema

Contexto

En los procesos industriales de manufactura uno de los recursos naturales más utilizados es el recurso hídrico (agua). La industria del vidrio templado usa este recurso en su proceso para sus sistemas de refrigeración y corte de vidrio. Al usar el agua en este proceso, ésta

es contaminada por pequeñas partículas y residuos de material empleado en el proceso, provocando una transformación del agua potable en agua residual industrial.

Actualmente la legislación colombiana exige que todas las aguas residuales industriales deben ser descargadas al alcantarillado público, cumpliendo ciertos parámetros exigidos en la resolución 0631 de 2015 del ministerio del medio ambiente, o en su defecto puede ser reutilizada por la planta generadora en su totalidad en el proceso productivo, si así lo deciden, lo cual exoneraría a la empresa del cumplimiento de estos parámetros por no generar vertimientos de agua residual industrial al alcantarillado público.

1.2. Formulación del problema

Para dar cumplimiento a la normatividad y para tener una operación más eficiente del proceso de tratamiento, se planteará el diseño automático de la planta de tratamiento de aguas residuales. La planta de tratamiento automatizada procesará el agua proveniente de los procesos de refrigeración y corte de vidrio templado y una vez pase por todas las etapas de tratamiento, se almacenará en tanques para ser usada nuevamente en estos procesos. Con esto no se estarían generando vertimientos de aguas residuales al alcantarillado público de la ciudad, exonerando la empresa del cumplimiento a la resolución 0631 de 2015.

1.3. Objetivo general

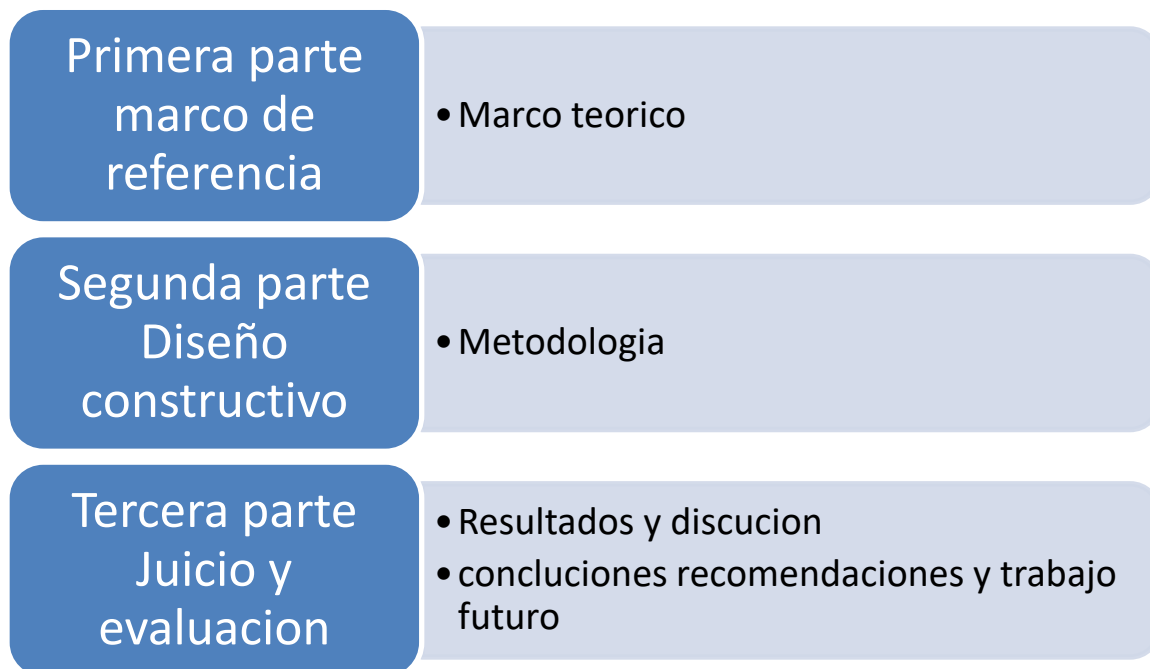
Diseñar un sistema de control para una planta de tratamiento de aguas residuales, que permita su operación automática y cumpla normas ambientales.

1.4. Objetivos específicos

- Identificar las condiciones de operación de la planta y caracterizar la instrumentación requerida, de acuerdo con las variables de proceso.
- Realizar esquemas eléctricos, mecánicos, diagrama de tuberías e instrumentos (P&ID) y plano isométrico de la planta, mediante programas CAD, y con fundamento en normas estandarizadas.
- Diseñar la arquitectura de control, interfaz gráfica y sistema eléctrico para el correcto funcionamiento de los equipos usando las herramientas de diseño de ingeniería
- Realizar un manual básico de operación y un plan de mantenimiento

1.5. Estructura

El documento se estructura en tres partes como se detalla a continuación:



Primera parte Marco de referencia: En la primera parte se presenta la base teórica y conceptual que permite desarrollar los objetivos propuestos y refiere a las condiciones y equipos requeridos para la posterior ejecución del proyecto.

Conformado por el marco teórico.

Segunda parte Diseño constructivo: Se expone los elementos de diseño y desarrollo de las herramientas requeridas que permiten plasmar una solución al problema propuesto, dando cobertura en su ejecución a los objetivos propuestos.

Conformado por:

- Análisis de las condiciones de operación del proceso de corte y templado de vidrio
- Cálculos sistema hidráulico
- Modelo 3D de la planta de tratamiento de agua residual industrial
- Diseño arquitectura de control PTAR
- Diseño sistema de potencia eléctrica
- Diagrama de tuberías e instrumentación (P&ID)

Tercera parte Juicio y evaluación: Se presentan los resultados y las conclusiones finales a las que se llegan luego de la ejecución del diseño, se indica el cumplimiento de los objetivos propuestos inicialmente y se dan algunas recomendaciones para futuros trabajos.

Conformado por:

- Resultados y discusión
- Conclusiones, recomendaciones y trabajo futuro.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Automatización de procesos

La automatización de los procesos es la sustitución de tareas tradicionalmente manuales por las mismas realizadas de manera automática por máquinas, robots o cualquier otro tipo de automatismo (Mallol, 2011).

Es por ello que actualmente muchas empresas tanto del sector privado como del sector público mejoran sus procesos de tal manera que estos se realicen de forma automática y la mano de obra humana sea lo más mínima posible.

Esto da una ventaja competitiva dado a que los procesos se vuelven más productivos y eficientes ya que las maquinas realizan tareas repetitivas mucho más rápido y con un porcentaje de error mínimo.

Esto también ha mejorado significativamente el costo del producto haciéndolo más económico dado a que no es requerida gran cantidad de mano de obra humana lo cual implica altos costos para la industria.

2.2. PLC

Es un controlador lógico programable el cual, mediante la programación de un código en diferentes lenguajes de programación, puede ejecutar instrucciones secuenciales con el fin de automatizar procesos.

Es posible conectar señales periféricas ya sean análogas o digitales con el objetivo de leer estas y de acuerdo con los parámetros requeridos, ejecutar una serie de instrucciones previamente definidas por el programador.

El PLC está conformado por las siguientes partes:

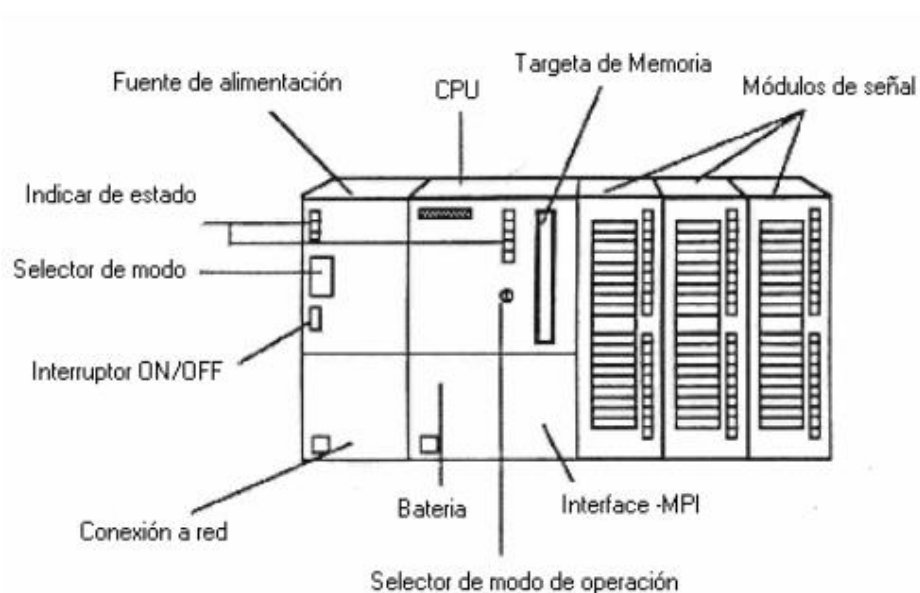


Imagen 1 - Partes del PLC (Siemens A&D FEA (Investigacion, 2001))

2.3. Diseño asistido por computador CAD

Es la aplicación de la informática al proceso de diseño (Torres, 2015), el cual permite agilizar los procesos de diseño al realizar un modelado en 3D, para lograr ver de una manera más didáctica y realista cómo será el producto final.

Esta herramienta ha permitido que los ingenieros puedan presentar sus ideas antes de iniciar la etapa de construcción lo que ayuda a detectar a tiempo posibles errores o fallas que, de ser detectadas en las etapas finales, el costo de correcciones sería muy elevado.

2.4. Lenguajes de programación

Es un lenguaje formal diseñado para expresar procesos que se puedan llevar a cabo por máquinas como por ejemplo un ordenador.

Estos se normatizaron mediante la IEC 61131-3 en donde fueron definidos 5 clases de lenguajes:

- Diagrama de funciones secuenciales (SFC)
- Diagrama de bloques de funciones (FBD)

- Diagramas de tipo escalera (LAD)
- Texto estructurado (ST)
- Lista de instrucciones (IL o STL)

Estos están divididos de manera básica en dos tipos, escritos y visuales.

Los visuales permiten al programador estructurar el código o programa por medio de símbolos gráficos. Los escritos son listados de sentencias que describen las funciones a ejecutar en el programa.

El tipo de lenguaje a utilizar esta determinado por el programador, quien, dependiendo de sus habilidades en cada una de estas clases, seleccionara el que usara para su proyecto.

2.5. HMI

Es una interfaz de usuario-máquina que permite la interacción de los operadores con los equipos a través de una pantalla previamente programada. En la HMI (Human Machine Interface) el usuario podrá realizar el monitoreo del proceso y los equipos que comprende el sistema, de manera que pueda tomar decisiones de acuerdo con los parámetros de operación establecidos.

2.6. Sistema de bombeo

Un sistema de bombeo consiste en un conjunto de elementos que permiten el transporte y almacenamiento temporal de un fluido a través de un sistema de tuberías para alcanzar las especificaciones de caudales y presiones requeridas por un proceso específico.

El dimensionamiento del sistema debe realizarse en conjunto, teniendo en cuenta las bombas, diámetros de tuberías, tanques de almacenamiento y presurización para garantizar el óptimo funcionamiento al costo adecuado.

2.6.1. Bomba

Es la encargada de transformar la energía eléctrica aplicada en energía hidráulica dentro de un fluido, transportando este desde un punto a otro. Esto sucede al incrementar las presiones, velocidades o su altura. Todas están relacionadas con los principios enunciados por Bernoulli.

2.6.2. Clasificación de los sistemas de bombeo

Las clasificaciones de los sistemas de bombeo tienen como base una gran variedad de criterios que pasan por su configuración mecánica, su aplicación material de construcción, algunas bombas funcionan con movimientos rotativos, alternativos, aunque su sistema de movimiento no permite clasificación su modo de accionamiento si permite la clasificación

Un criterio que incluye la clasificación general es el que se basa en el principio por el cual se adiciona energía a fluido según esto lo podemos dividir en dos grandes grupos:

- Bombas de desplazamiento positivo
- Bombas rotodinámicas

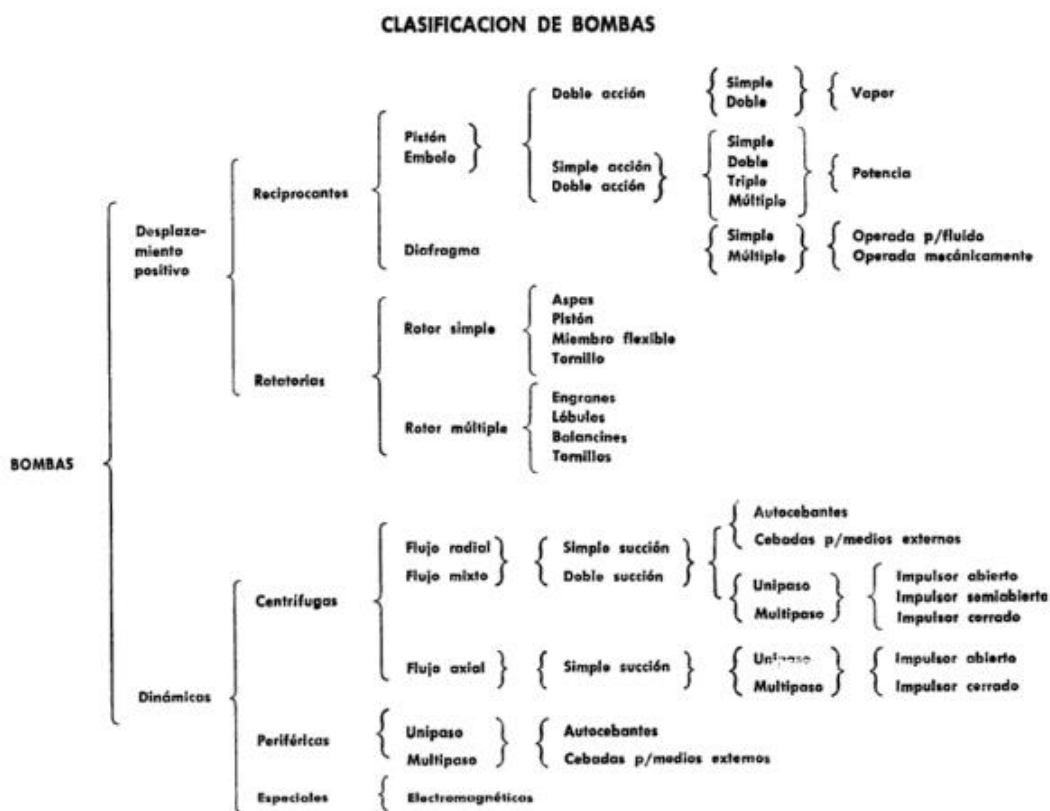


Imagen 2 Clasificación Bombas (Manuel Viejo Zubicaría)

2.6.3. Bomba centrífuga

Su funcionamiento se basa en el aprovechamiento de la fuerza del impulsor que gira a una velocidad determinada dentro de una carcasa y que su movimiento impulsa el fluido en contacto con él, hacia la periferia de este con cierta velocidad.

La energía de la velocidad se convierte en presión por medio de una voluta interna o mediante un juego de alabes estacionarios llamados difusores que rodean la periferia del impulsor.

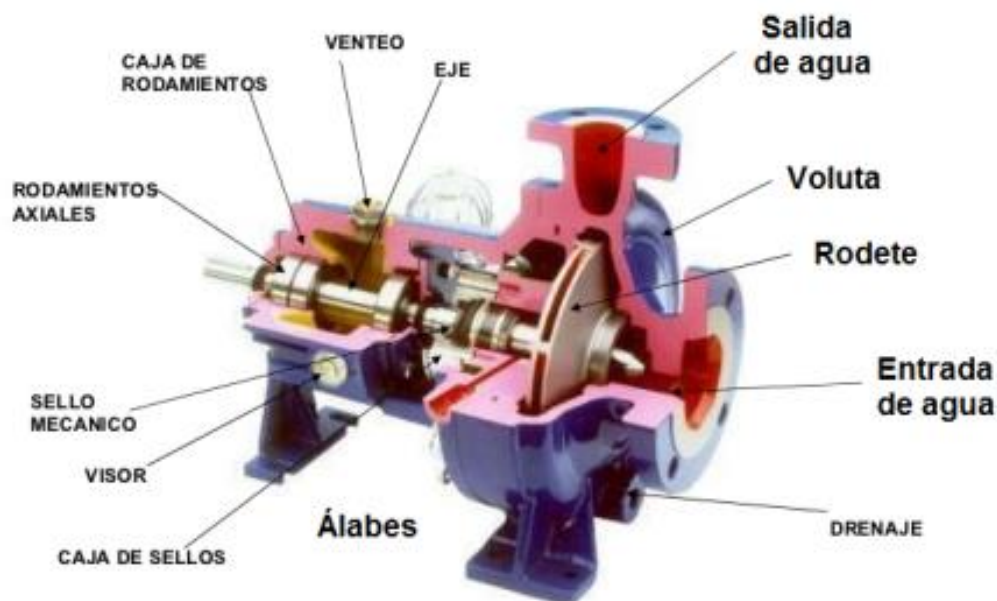


Imagen 3 Partes Bomba Centrífuga (Bombero13, 2015)

2.7. Sistema de arrancadores

Los sistemas de arrancadores reúnen los elementos necesarios para controlar y proteger los motores eléctricos.

Los arrancadores deben garantizar las siguientes funciones:

- Seccionamiento
- Protección contra corto circuito y sobrecarga
- Conmutación

2.7.1. Seccionamiento

Los equipos eléctricos solo deben ser manipulados cuando están desconectados, el seccionamiento consiste en aislar eléctricamente una instalación de su red de alimentación.

Su diseño se basa en un mecanismo mecánico que adopta dos posiciones permitiendo la conducción en o del fluido eléctrico estos se pueden encontrar como:

Seccionadores:

- Interruptores seccionadores
- Embebido en disyuntores



Imagen 4 Seccionador (ABB, 2013)

2.7.2. Protección contra corto circuito

Un corto circuito es el contacto directo de dos puntos con potencial eléctrico diferente.

En corriente alterna contacto entre fase y fase, entre fase y neutro, entre fase y masa conductora.

En corriente continua, contacto entre los dos polos o entre la masa y el polo aislado

El corto circuito desencadena un aumento intempestivo de la corriente que en milésimas de segundo puede alcanzar un valor cien veces superior al valor de la corriente de empleo. Esto puede generar severos daños a los equipos, por lo tanto, se precisan de dispositivos que interrumpan el circuito rápidamente.

Dichos dispositivos pueden ser:

- Fusibles, que interrumpen el circuito al fundirse, por lo que deben ser sustituidos.
- Disyuntores, que interrumpen el circuito abriendo los polos y que con un simple rearme se pueden colocar nuevamente en servicio.



Imagen 5 Elementos Protección Contra Cortocircuito (Electric, 2018)

2.7.3. Protección contra sobre carga

Los fallos más habituales en las maquinas, son las sobrecargas, que se manifiestan a través de un aumento de la corriente absorbida por el motor y de ciertos efectos térmicos. Cada vez que se sobrepasa la temperatura límite de funcionamiento los aislantes se desgastan prematuramente acortando su vida útil. Es de acotar que estos efectos no son inmediatos siempre y cuando su tiempo de duración no sea muy prolongado o repetitivo.

Los relés térmicos bimetálicos se usan para brindar protección a estas sobrecargas, los cuales basan su principio de fabricación en un conjunto de láminas fabricadas en metales de coeficiente de dilatación diferentes, rodeadas de una bobina de calentamiento. Cada bobina está conectada en serie a una fase del motor. La corriente absorbida por el motor calienta la bobina haciendo que las bilaminas se deformen en mayor o menor grado según la intensidad de dicha corriente. Las deformaciones de las bilaminas generan a su vez un movimiento giratorio de una leva o de un árbol unido al dispositivo de disparo.

Si la corriente absorbida por el receptor supera el valor de reglaje del relé, las láminas se deformaron lo suficiente como para que la pieza a la que están unidas las partes móviles de los contactos se libere del tope de sujeción.

Este movimiento ocasiona la apertura del relé y este no podrá ser rearmado hasta que la temperatura baje nuevamente.



Imagen 6 Protección Contra Sobre Carga (WEG, 2018)

2.7.4. Conmutación

La función de conmutación establece e interrumpe la alimentación a los receptores. esta es la función de los contactores electromagnéticos.

El contactor electromagnético es un dispositivo de accionamiento mecánico de conexión controlado por un electroimán de funcionamiento todo o nada, cuando la bobina del electroimán está bajo tensión, el contactor se cierra, estableciendo a través de los polos un circuito entre la red de alimentación y el receptor.



Imagen 7 Contactor (Chint, 2018)

3. METODOLOGÍA

El proyecto se dividió en varias etapas para la implementación de este:

3.1. Análisis de las condiciones de operación del proceso de corte y templado de vidrio

3.1.1. Generación de agua residual industrial

En la etapa inicial se realizó la verificación del caudal de agua industrial a la salida final de los equipos de corte y templado el cual arrojo como resultado **2685 l/h**.

Dado a que como en todos los procesos de producción es posible el aumento de la demanda, se utilizó un caudal de diseño para la planta de tratamiento de $1 \frac{L}{s}$ considerando un 25% de factor de seguridad por una posible expansión de la planta de producción.

3.1.2. Consumo de agua para proceso de templado y corte de vidrio

Se verificó el consumo total de agua para los 6 equipos con los que actualmente cuenta la planta para su proceso productivo y fue de $60 \frac{L}{m}$ ($3,6 \frac{m^3}{h}$).

Contemplando un factor de seguridad del 80% por una posible expansión se trabajó con un caudal de diseño para consumo de $6.5 \frac{m^3}{h}$.

3.2. Cálculos sistema hidráulico

A continuación, se explica los cálculos para el sistema de bombeo, para ello se realiza la demostración en 1 equipo y con base a este se calculan los demás sistemas de bombeo.

3.2.1. Sistema de bombeo agua tratada a proceso de producción

Diagrama

Número de salidas requeridas	6
Consumo requerido por salida	$10 \frac{L}{m}$
Consumo total	$60 \frac{L}{m} (3,6 \frac{m^3}{h})$

Para el cálculo se partirá con un caudal requerido de $3,6 \frac{m^3}{h}$ donde se aplicará un factor de seguridad del 80% para una futura expansión del proceso de producción

$$Q_{futuro} = Q_{Actual} * 1.8$$

$$Q_{futuro} = 3,6 \frac{m^3}{h} * 1.8$$

$$Q_{futuro} = 6.48 \frac{m^3}{h}$$

Para el diseño se tomará $6.5 \frac{m^3}{h}$ como valor de caudal requerido

3.2.2. Cálculo diámetro de la tubería de descarga

Partiendo de la ecuación de caudal: $Q = V.A$

Donde:

Q = Caudal

V = Velocidad

A = Área

Para este diseño, se conoce el caudal requerido y se asumirá una velocidad sugerida de $1.5 \frac{m}{s}$ que es la velocidad recomendada en líneas de alimentación de agua la cual tiene como rango $0.5 \frac{m}{s}$ a $2 \frac{m}{s}$ esto en pro de obtener un diámetro económico, a velocidades muy bajas se requieren diámetros muy grandes y velocidades muy altas se produce vibración excesiva en la tubería.

Conocido el caudal y la velocidad, se procede a calcular el área.

El área de la circunferencia está enmarcada en la ecuación: $A = \frac{\pi}{4} \cdot D^2$

Reemplazando los valores en la ecuación:

$$Q = V \frac{\pi}{4} D^2$$

Despejando el diámetro D de la ecuación, da como resultado:

$$D = \sqrt{\frac{Q}{V \cdot \frac{\pi}{4}}}$$

Reemplazamos los datos ya conocidos

$$Q = 6.5 \frac{m^3}{h}$$

$$V = 1.5 \frac{m}{s}$$

Da como resultado **D=39.14mm**

Con el dato obtenido se realiza la búsqueda en las tablas comerciales para seleccionar una tubería de línea.

		Tuberías Presión PAVCO							
Diámetro Nominal		Referencia	Peso	Diámetro Exterior Promedio		Espesor de Pared Mínimo		Diámetro Interior Promedio	
mm	pulg.		g/m	mm	pulg.	mm	pulg.	mm	
RDE 9 PVC Presión de Trabajo a 23°C: 500 PSI									
21	1/2	2900266	218	21.34	0.84	2.37	0.09	16.60	
RDE 11 PVC Presión de Trabajo a 23°C: 400 PSI									
26	3/4	2900210	304	26.67	1.05	2.43	0.09	21.81	
RDE 13.5 PVC Presión de Trabajo a 23°C: 315 PSI									
21	1/2	2902449	157	21.34	0.84	1.58	0.06	18.18	
33	1	2900213	364	33.40	1.31	2.46	0.09	28.48	
RDE 21 PVC Presión de Trabajo a 23°C: 200 PSI									
26	3/4	2900237	189	26.7	1.05	1.52	0.06	23.63	
33	1	2900220	252	33.4	1.31	1.60	0.06	30.20	
42	1.1/4	2900225	395	42.2	1.66	2.01	0.09	38.14	
48	1.1/2	2902450	514	48.3	1.90	2.29	0.09	43.68	
60	2	2902453	811	60.3	2.37	2.87	0.11	54.58	
73	2.1/2	2900230	1185	73.0	2.87	3.48	0.14	66.07	
88	3	2900233	1761	88.9	3.50	4.24	0.17	80.42	
114	4	2900240	2904	114.3	4.50	5.44	0.21	103.42	
168	6	2904616	5835	168.3	6.62	8.03	0.32	152.22	

Tabla 1 Tuberías de Presión PAVCO (PAVCO, 2018)

Se selecciona el diámetro de 1 ½ “ya que es un diámetro comercial equivalente a **43.68 mm**.

Con este diámetro seleccionado se debe recalcular las velocidades a las que estará sometida la tubería usando la ecuación de caudal despejando la velocidad.

$$Q = V \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D^2$$

La velocidad corregida da como resultado $V = 1,2 \text{ m/s}$

Cálculo diámetro tubería de succión

$$Q = V \cdot A$$

Para tuberías de succión las velocidades recomendadas se encuentran entre el rango de $0,5 \text{ m/s}$ a 1 m/s

Para el diseño se asumirá la velocidad media de $0,75 \text{ m/s}$, el caudal actual de trabajo es de $6,5 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$ remplazando los valores conocidos en la ecuación de caudal y despejando el área.

$$A = \frac{Q}{V}$$

Dando como resultado $2407,407 \text{ mm}^2$ con el dato del área se puede hallar el diámetro requerido de la ecuación

$$A = \frac{\pi}{4} \cdot D^2$$

Obteniendo como resultado un diámetro de **55,35 mm**.

Con el dato obtenido se realiza la búsqueda en las tablas comerciales para seleccionar una tubería de línea

Diámetro Nominal		Referencia	Peso	Diámetro Exterior Promedio		Espesor de Pared Mínimo		Diámetro Interior Promedio
				mm	pulg.	mm	pulg.	
21	1/2	2900266	218	21.34	0.84	2.37	0.09	16.60
RDE 9 PVC Presión de Trabajo a 23°C: 500 PSI								
26	3/4	2900210	304	26.67	1.05	2.43	0.09	21.81
RDE 11 PVC Presión de Trabajo a 23°C: 400 PSI								
21	1/2	2902449	157	21.34	0.84	1.58	0.06	18.18
33	1	2900213	364	33.40	1.31	2.46	0.09	28.48
RDE 13.5 PVC Presión de Trabajo a 23°C: 315 PSI								
26	3/4	2900237	189	26.7	1.05	1.52	0.06	23.63
33	1	2900220	252	33.4	1.31	1.60	0.06	30.20
42	1.1/4	2900225	395	42.2	1.66	2.01	0.08	38.14
48	1.1/2	2902450	514	48.3	1.90	2.29	0.09	43.68
60	2	2902453	811	60.3	2.37	2.87	0.11	54.58
73	2.1/2	2900230	1185	73.0	2.87	3.48	0.14	68.09
88	3	2900233	1761	88.9	3.50	4.24	0.17	80.42
114	4	2900240	2904	114.3	4.50	5.44	0.21	103.42
168	6	2904616	5835	168.3	6.62	8.03	0.32	152.22
RDE 21 PVC Presión de Trabajo a 23°C: 200 PSI								

Tabla 2 Tuberías Presión PAVCO (PAVCO, 2018)

Se selecciona el diámetro de **2 pulgadas** equivalente a 54.58mm

Con este diámetro seleccionado se debe recalcular las velocidades a las que estará sometida la tubería de la ecuación de caudal despejando la velocidad.

$$Q = V \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D^2$$

La velocidad corregida da como resultado $V = 0,77$ m/s

3.2.3. Cálculo TDH bomba (altura dinámica total)

El TDH es la suma de las alturas estáticas o geométricas a vencer y las pérdidas de carga de la instalación, para este caso se utilizará la ecuación de fluidos incompresibles de Bernoulli:

$$\Delta H = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 - \frac{P_1}{\gamma} - \frac{V_1^2}{2g} - Z_1 + \text{perdidas}$$

Realizando la simplificación de la formula queda la siguiente ecuación considerando P1 y P2 a presión atmosférica:

$$\Delta H = +Z_2 - \frac{V_2^2}{2g} - Z_1 + \text{perdidas } (h_f)$$

Las Perdidas $h_f = h_{\text{primarias}} + h_{\text{secundarias}}$

Para las perdidas primarias se utiliza la ecuación de Henry Darcy

$$h_f = f \frac{l v^2}{d 2g}$$

Donde:

h_f = Energía por unidad de peso perdida por fricción

f = Factor de fricción de Darcy

l = Longitud del tramo de tubería en el cual se pierde h_f

d = Diámetro de la tubería

v = Velocidad media

g = Gravedad

Perdidas secundarias (accesorios)

$$h_f = \sum K \left(\frac{v^2}{2g} \right)$$

K = Coeficientes para perdidas en accesorios

v = Velocidad media

g = Gravedad

Para iniciar a dar desarrollo a la ecuación de perdidas primarias se debe calcular el factor de fricción (f) para lo cual se utiliza el diagrama de Moody la siguiente ecuación:

$$f = f\left(Re \frac{\varepsilon}{d}\right)$$

Para poder utilizar la ecuación debemos conocer el número Reynolds (Re) y la rugosidad relativa del material.

$$Re = \rho \frac{v D}{\mu}$$

$\rho = 992 \text{ Kg}/\text{m}^3$	Densidad del agua a 20°C
$v = 1,2 \text{ m}/\text{s}$	Velocidad del fluido
$D = 43,68\text{mm}$	Diámetro hidráulico de la tubería
$\mu = 1008 \times 10^{-6} \text{ kg}/\text{m}\cdot\text{s}$	Viscosidad cinemática a 20°C
$\varepsilon = 0,0015$	Coefficiente rugosidad absoluta PVC

Reemplazando los datos obtenemos como resultado 51584 flujo turbulento $Re > 10000$.

Se calcula la rugosidad relativa reemplazando los datos conocidos en la ecuación $\frac{\varepsilon}{D}$ obteniendo como resultado $3,434 \times 10^{-5}$.

Con los datos hallados se revisa al diagrama de Moody y se halla el intercepto, donde arroja un valor aproximado de 0.0207, siendo este el factor de fricción (f).

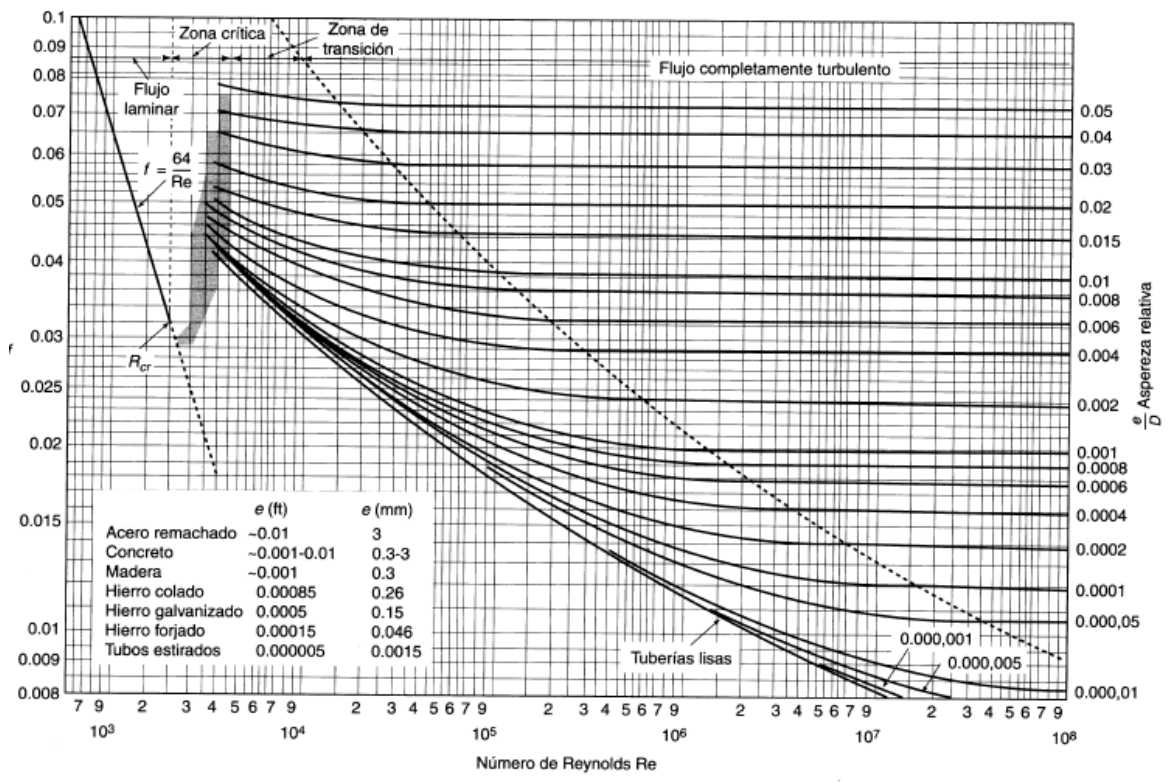


Diagrama de Moody. (De L.F. Moody, *Trans. ASME*, vol. 66, 1944.)

Imagen 8 Diagrama de Moody (Mott, 2006)

Dato de longitud basado en el esquema inicial de distribución se tomará como referencia el punto más alejado obteniendo una longitud total de la tubería de 50m

Remplazando los datos recopilados en la ecuación:

$$h_f = f \frac{l v^2}{d 2g}$$

Da como resultado para las perdidas primarias el siguiente valor: $h_f = 2,71 m$

Continuando con el cálculo de las perdidas secundarias utilizando la ecuación

$$h_f = \sum K \left(\frac{v^2}{2g} \right)$$

Se debe realizar el listado consolidado de los accesorios incluidos en la línea a analizar

TABLA ACCESORIOS INSTALADOS TUBERÍA DISTRIBUCIÓN A PLANTA			
ACCESORIOS	CANTIDAD	K	K total
Codos	3	0,8	2,4
Tee	1	0,3	0,3
Válvulas	2	0,2	0,4
Válvula cheque	1	2,5	2,5
		TOTAL	5,6

Tabla 3 Accesorios Instalados Tubería Distribución Planta (Propia, 2018)

Reemplazando los datos recopilados en la ecuación las pérdidas secundarias obtenidas son

$$h_f = 0,64m$$

Con los datos calculados de las pérdidas tenemos los elementos suficientes para calcular nuestro TDH reemplazamos en la ecuación

$$\Delta H = +Z_2 + \frac{V_2^2}{2g} - Z_1 + \text{pérdidas } (h_f)$$

Dando como resultado:

$$\Delta H = 13,22m$$

Se procede a calcular la potencia requerida de la bomba (P):

$$P = \frac{\rho g Q \Delta H}{\eta}$$

Al ser un equipo nuevo se considera la eficiencia en un valor de 85%

$\rho = 992 \text{ Kg}/\text{m}^3$	Densidad del agua a 20°C
$v = 1,2 \text{ m}/\text{s}$	Velocidad del fluido
$\Delta H = 13,22m$	Altura dinámica total
$Q = 6,5 \text{ m}^3/\text{h}$	Caudal
$g = 9,81 \text{ m}/\text{s}^2$	Gravedad
$\eta = 85\%$	Eficiencia

P=285w	
--------	--

3.2.4. Potencia del motor eléctrico

$$P_m = \frac{P_B}{\eta}$$

Para este cálculo asumiremos una eficiencia conservadora del 80%

$P_B = 285w$ Potencia hidráulica de la bomba

$\eta = 80\%$ Eficiencia transmisión mecánica

$$P_m = 356w$$

3.2.5. Cálculo NPSH (Net Positive Suction Head) carga neta de succión positiva

$$NPSH_D = \frac{0.7(P_s - P_v)}{GE} - Z - H$$

$P_s = 14.7 \text{ psi}$ Presión atmosférica

$P_v = 0.2563 \text{ psi}$ Presión del vapor de agua

$GE = 1$ Gravedad específica del agua

$Z = 2$ Altura a punto de succión

$H = H_F + H_f$ Perdidas primarias y secundarias

$$NPSH_D = 7.66$$

$$NPSH_D = \frac{0.7(P_s - P_v)}{GE} - Z - H$$

El dato del $NPSH_D$ hallado debe ser mayor al dato de fábrica de la bomba $NPSH_R$

Con estos datos ya calculados se realiza la selección de la bomba con el fabricante

Para esta aplicación se trabajó con la bomba Wilo MHIL 902. Esta bomba cubre los requerimientos en caudal, altura y potencia requeridos.

Ficha técnica: Economy MHIL 902 (3~400 V)

Materiales

Carcasa de la bomba	5.1301, EN-GJL-250
Rodete	PPE+PS-GF30
Cierre mecánico	Q1BE3GG

Datos del motor

Alimentación eléctrica	3~400 V, 50 Hz
Tipo de arranque	Directo (D)
Intensidad nominal	1.95 A
Rendimiento del motor η_m 50 %	79.5
Rendimiento del motor η_m 75 %	80.7
Rendimiento del motor η_m 100 %	80.7
Factor de potencia	0.82
Tipo de protección	IP54
Tipo de protección	IP54

Información de pedidos

Peso neto aproximado	15 kg
Descripción	4210665
Marca	Wilo

Datos de funcionamiento

Temperatura mínima del fluido	-15 Celsius
Temperatura máxima del fluido	90 Celsius
Presión máxima de trabajo	10 bar
Boca de impulsión	Rp 1½
Temperatura ambiente máxima	40 Celsius

Dimensiones de instalación

Conexión de tubería del lado de aspiración	Rp 1¼
Pipe connection at pressure side DN	Rp 1½

Imagen 9 Ficha Técnica Bomba Wilo (Wilo, 2018)

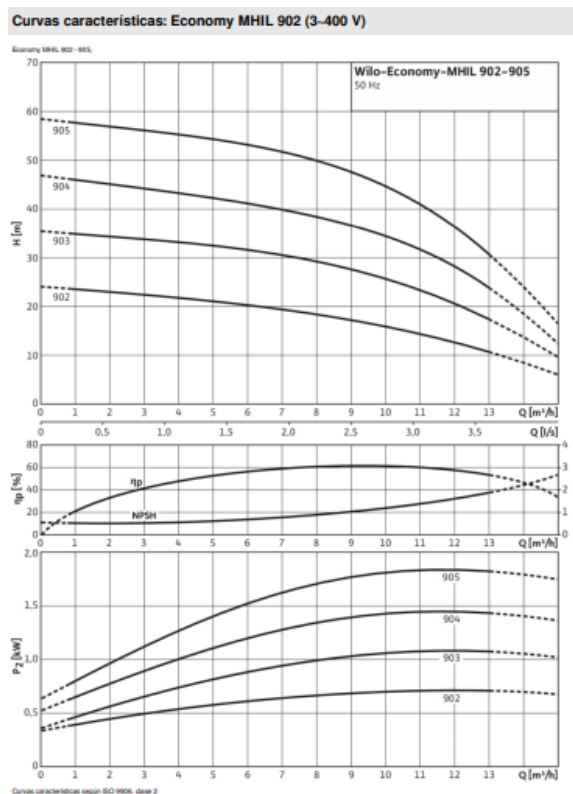


Imagen 10 Curvas Características de la Bomba Wilo (Wilo, 2018)

Con la bomba ya seleccionada y conociendo los datos eléctricos del motor se procede con los cálculos de potencia requerida en nuestra instalación elaboramos nuestro cuadro de cargas:

TAG	DESCRIPCION	Potencia real (w)
P-01	BOMBA # 1 CENTRIFUGA DE FOSO (TK-07) A TK-01	550
P-02	BOMBA # 2 CENTRIFUGA DE FOSO (TK-07) A TK-01	550
P-03	BOMBA # 1 CENTRIFUGA DE TK-01 A TK-02	370
P-04	BOMBA # 2 CENTRIFUGA DE TK-01 A TK-02	370
P-05	BOMBA # 1 CENTRIFUGA DE TK-02 A TK-03	370
P-06	BOMBA # 1 CENTRIFUGA DE TK-03 A TK-04	370
P-07	BOMBA # 2 CENTRIFUGA DE TK-03 A TK-04	370
P-08	BOMBA # 1 CENTRIFUGA DE TK-04 Y TK-05 A PROCESO	550
P-09	BOMBA # 2 CENTRIFUGA DE TK-04 Y TK-05 A PROCESO	550

Tabla 4 Potencias Bombas de Transferencia (Propia, 2018)

3.3. Modelo 3D de la planta de tratamiento de agua residual industrial

Se realiza el modelado de la planta en 3D con la ayuda del software CAD Solid Edge donde se realizó el ensamble de cada uno de los equipos de la planta de tratamiento y el cual se describe por sistemas como se explica a continuación.

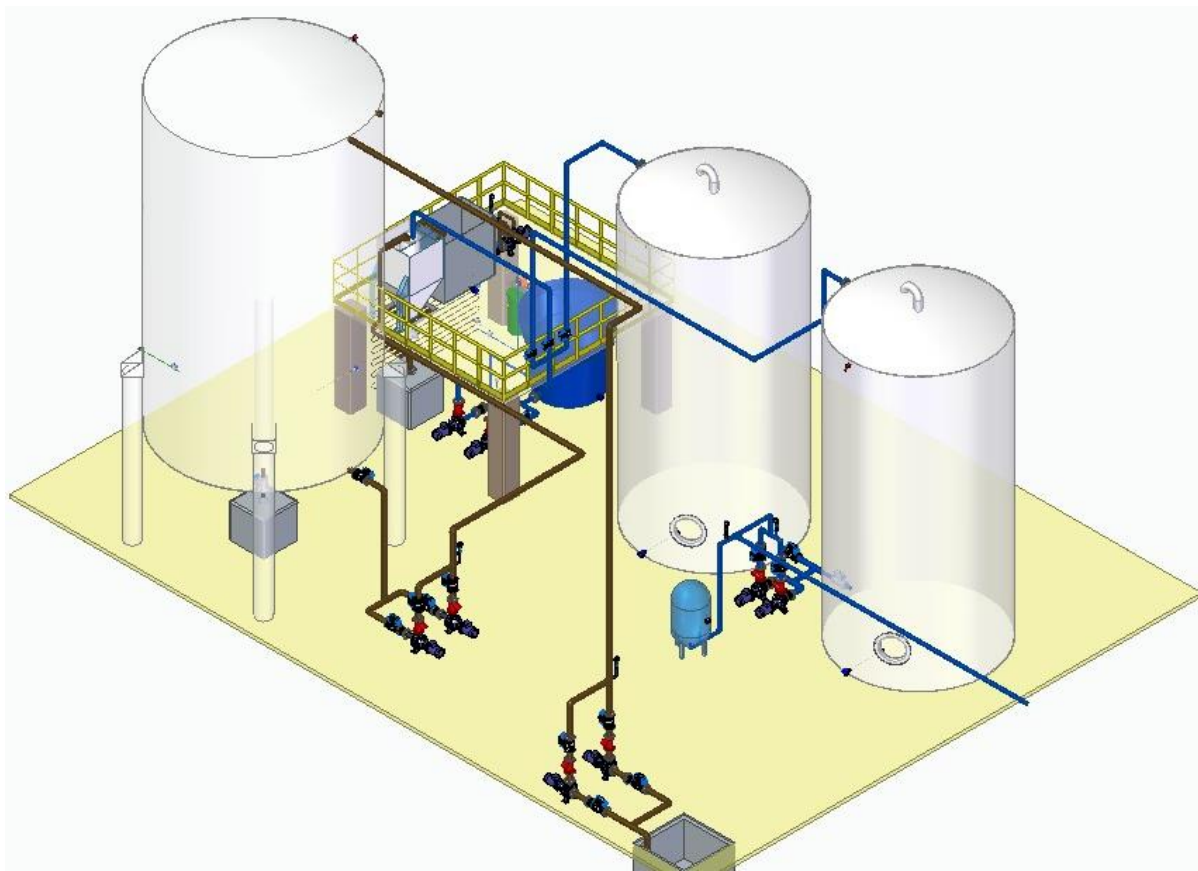


Imagen 11 - 3D Planta de Tratamiento de Agua Industrial (Propia, 2018)

3.3.1. Sistema de bombeo de foso de acumulación de agua industrial (TK-07) a tanque de agua industrial (TK-01).

El sistema se diseñó con una caja de acumulación de agua residual industrial y dos bombas instaladas en paralelo con el objetivo de tener un sistema alternativo de bombeo en caso de falla de una de las bombas y así no generar un paro del proceso.

Adicionalmente este sistema realiza la sedimentación primaria.

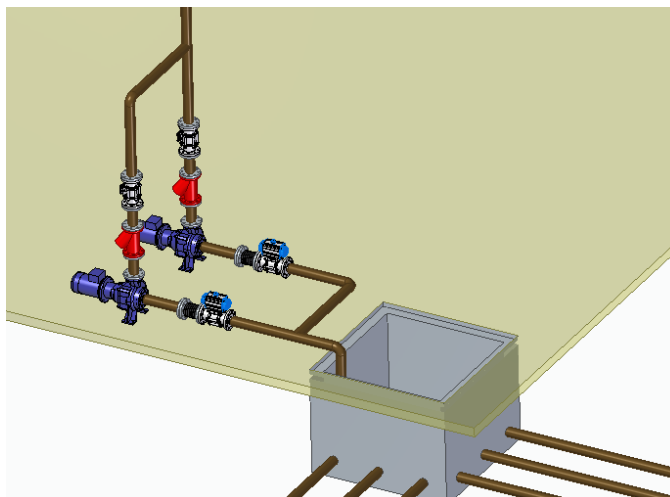


Imagen 12 - Sistema de Bombeo de Foso a Tanque de Agua Industrial (Propia, 2018)

El sistema está compuesto por los siguientes equipos:

Cantidad	Descripción	TAG Number
1	Foso de acumulación de agua industrial	TK-07
1	Switch de nivel foso de almacenamiento de agua industrial	LS-01
2	Válvulas mariposa con actuador neumático de entrada a bomba P-01 y P-02 con sensor de posición de 1 ½ pulgada de diámetro	FV-01 FV-02
2	Acople flexible de entrada a bombas P-01 y P-02	EJ-01 EJ-02
2	Bombas centrifugas de trasiego a tanque TK-01	P-01 P-02
2	Cheque antirretorno bomba P-01 y P-02	CV-01 CV-02
2	Válvula mariposa P-01 y P-02 con sensor de posición de 1 ½ pulgada de diámetro	FV-03 FV-04

Este sistema se encarga de realizar el trasiego de agua industrial recolectado del proceso en el foso (TK-07) hacia el tanque de agua industrial (TK-01) para almacenamiento.

3.3.2. Sistema de bombeo de TK-01 a TK-02

Este sistema se encarga de trasegar el agua residual industrial que se encuentra almacenada en el TK-01 hacia el TK-02.

Está compuesto por dos bombas centrífugas en paralelo para selección de bombeo y como plan de contingencia ante una posible avería del sistema.



Imagen 13 - Sistema de Bombeo TK-02 (Propia, 2018)

El sistema está compuesto por los siguientes equipos:

Cantidad	Descripción	TAG Number
1	Tanque de almacenamiento de agua industrial	TK-01
1	Válvula mariposa con actuador neumático de entrada a TK-01 con sensor de posición de 1 ½ pulgada de diámetro	FV-05
1	Switch de flujo alto-alto de ½ pulgada de diámetro	LSHH-01
1	Válvula mariposa con actuador neumático de entrada de agua municipal con sensor de posición de 1 ½ pulgada de diámetro	FV-06
1	Transmisor indicador de nivel de ½ pulgada de diámetro	LIT-01
1	Válvula mariposa con actuador neumático de salida de sedimentos de TK-01 con sensor de posición de 1 ½ pulgada de diámetro	FV-07
1	Válvula mariposa con actuador neumático de salida de agua de TK-01 con sensor de posición de 1 ½ pulgada de diámetro	FV-08
1	Válvula manual de bola de ½ pulgada de diámetro	HV-01
1	Manómetro indicador de presión	PI-01
2	Válvula mariposa con actuador neumático de entrada a P-03 y P-04 con sensor de posición de 1 ½ pulgada de diámetro	FV-09 FV-10
2	Acople flexible de entrada a P-03 y P-05	EJ-03 EJ-04
2	Bomba centrífuga de trasiego de TK-01 a TK-02	P-03 P-04
2	Cheque antirretorno bomba P-03 y P-04	CV-03 CV-04
2	Válvula mariposa con actuador neumático de salida P-03 y P-04 con sensor de posición de 1 ½ pulgada de diámetro	FV-11 FV-12

3.3.3. Sistema de filtrado

En este sistema realiza el proceso de filtrado del agua residual industrial. Está compuesto por dos tanques conectados por rebose.

El primer tanque realiza la sedimentación primaria de los sólidos que por gravedad caen al fondo del tanque.

El agua que pasa al siguiente tanque, pasa por otro proceso de filtración que contiene varias capas de arena y gravilla.

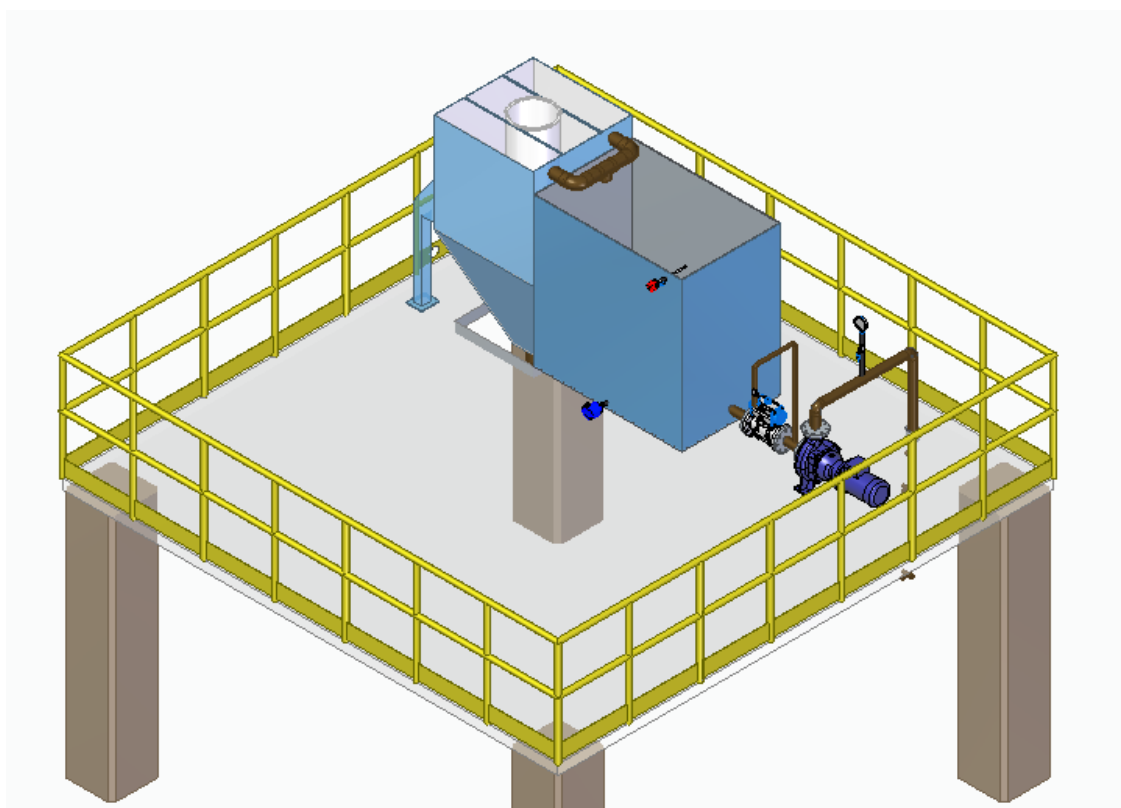


Imagen 14 - Sistema de Filtrado (Propia, 2018)

El sistema está compuesto por los siguientes equipos.

Cantidad	Descripción	TAG Number
1	Tanque precipitador de sedimentos	TK-02
1	Válvula mariposa con actuador neumático de entrada de agua de ciudad con sensor de posición de 1 ½ pulgada de diámetro	FV-34
1	Válvula mariposa con actuador neumático de salida de sedimentos de TK-02 con sensor de posición de 1 ½ pulgada de diámetro	FV-13
1	Switch de flujo alto-alto de ½ pulgada de diámetro	LSHH-02
1	Transmisor indicador de nivel de ½ pulgada de diámetro	LIT-02
1	Válvula mariposa con actuador neumático de salida de TK-02 con sensor de posición de 1 ½ pulgada de diámetro	FV-14
1	Bomba centrífuga de trasiego de TK-02 a sistema de inyección de químicos	P-05
1	Válvula manual de bola de ½ pulgada de diámetro	HV-04
1	Manómetro indicador de presión	PI-02
1	Válvula manual de bola de ½ pulgada de diámetro	HV-02

3.3.4. Sistema de dosificación de químicos

En esta etapa del proceso se realiza la dosificación de 3 químicos que terminan el proceso de tratamiento.

La dosificación de estos químicos se realiza en un mezclador estático compuesto por un juego de tubería de ½ pulgadas de diámetro el cual permite que estos se mezclen con el agua y logren la reacción para terminar de tratar el agua.

Al final de esta etapa el agua se almacena en un tanque el cual cumple la función de terminar de homogenizar el agua.

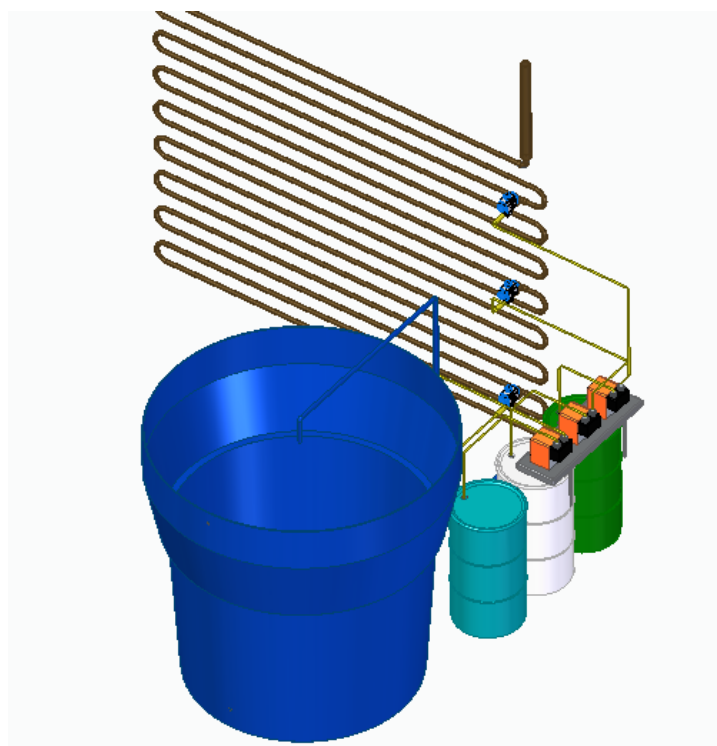


Imagen 15 - Sistema de Adición de Químicos

Este sistema está compuesto por los siguientes equipos

Cantidad	Descripción	TAG Number
1	Switche de flujo Flowphant T DTT31 de entrada sistema de adición de químicos	FC-01
3	Válvulas mariposa con actuador neumático de entrada químicos con sensor de posición de ½ pulgada de diámetro	FV-15 FV-16 FV-17
3	Bombas dosificadoras electrónicas de adición de químicos	P-10 P-11 P-12
3	Switches de nivel para canecas de químicos	LS-02 LS-03 LS-04
1	Válvula mariposa con actuador neumático de entrada agua a TK-03 con sensor de posición de ½ pulgada de diámetro	FV-18

3.3.5. Sistema de bombeo de tanque homogeneizador a tanques de almacenamiento de agua tratada.

En esta etapa se realiza el trasiego del tanque homogeneizador a los tanques de almacenamiento de agua tratada de los cuales el proceso se abastecerá.

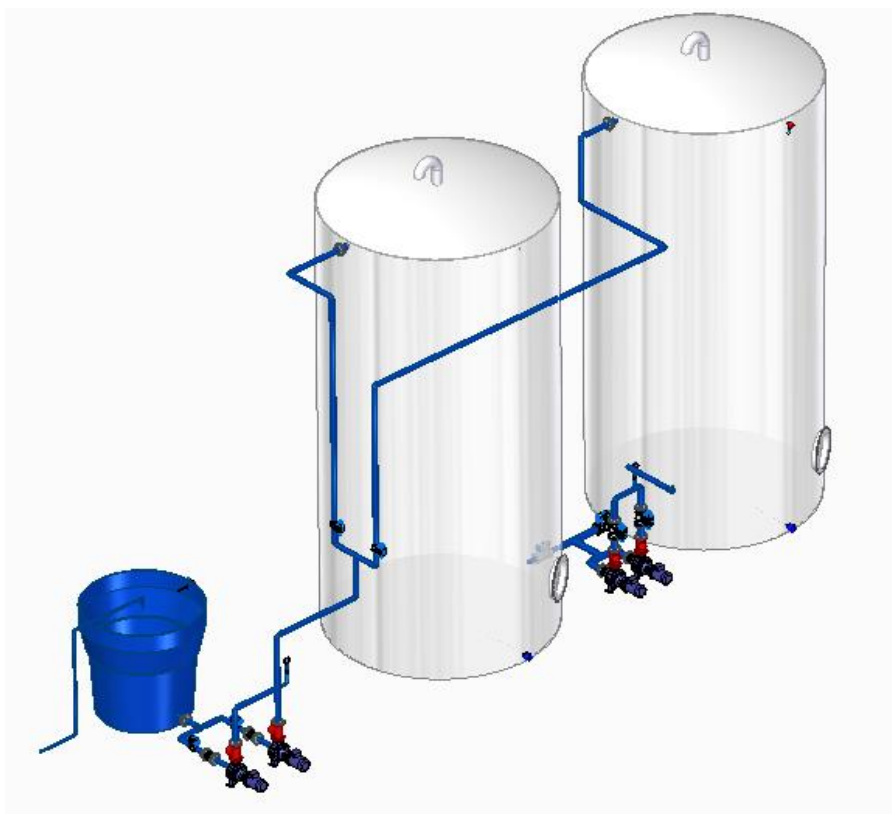


Imagen 16- Sistema de Bombeo de Tanque Homogeneizador a Tanques de Almacenamiento de Agua Tratada

El sistema está compuesto por los siguientes equipos.

Cantidad	Descripción	TAG Number
1	Tanque igualador de agua tratada	TK-03
1	Switch de flujo alto-alto de ½ pulgada de diámetro	LSHH-03
1	Transmisor indicador de nivel de ½ pulgada de diámetro	LIT-03
1	Válvula mariposa con actuador neumático de salida agua tratada a TK-04 y TK-05 con sensor de posición de ½ pulgada de diámetro	FV-19

Cantidad	Descripción	TAG Number
2	Válvula mariposa con actuador neumático de entrada a bomba P-06 y P-07 con sensor de posición de 1 ½ pulgada de diámetro	FV-20 FV-21
2	Acople flexible de entrada a bombas P-06 y P-07	EJ-05 EJ-06
2	Bombas centrifugas de trasiego a tanques TK-04 y TK-05	P-06 P-07
2	Cheque antirretorno bomba P-06 y P-07	CV-05 CV-06
2	Válvula mariposa de salida de P-06 y P-07 con sensor de posición de 1 ½ pulgada de diámetro	FV-22 FV-23
2	Válvula manual de bola de ½ pulgada de diámetro	HV-03 HV-05
1	Manómetro indicador de presión	PI-03
1	Válvula mariposa con actuador neumático de retorno a TK-02 con sensor de posición de 1 ½ pulgada de diámetro	FV-24

3.3.6. Sistema de bombeo de tanques de almacenamiento de agua trata a proceso

Esta es la última etapa del proceso, donde el agua tratada que se encuentra almacenada en los dos tanques es trasegada al proceso para ser reusada nuevamente en los equipos de corte y templado.

En este sistema se usa un hydroflow, el cual sostiene la presión de línea estable, como requerimiento en la alimentación de agua de los equipos.

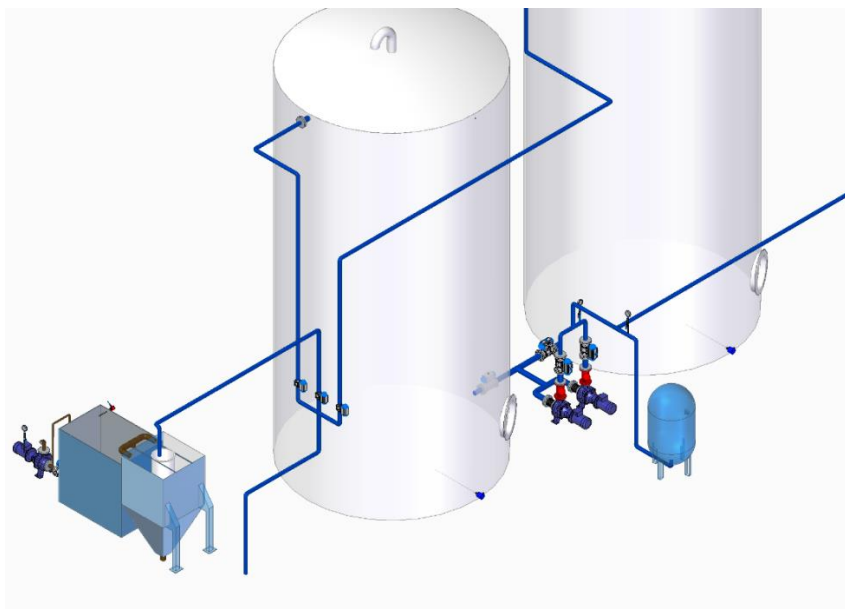


Imagen 17 - Sistema de Bombeo de Agua Tratada a Proceso de Producción (Propia, 2018)

Este sistema está compuesto por los siguientes equipos:

Cantidad	Descripción	TAG Number
2	Tanques de almacenamiento de agua tratada	TK-04 TK-05
2	Válvula mariposa con actuador neumático de entrada a TK-04 y TK-5 con sensor de posición de 1 ½ pulgada de diámetro	FV-25 FV-26
1	Switch de flujo alto-alto de ½ pulgada de diámetro TK-04 y TK-05	LSHH-04 LSHH-05
	Transmisor indicador de nivel de ½ pulgada de diámetro de TK-04 y TK-05	LIT-04 LIT-05
2	Válvula mariposa con actuador neumático de salida TK-04 y TK-05 a proceso con sensor de posición de 1 ½ pulgada de diámetro	FV-27 FV-28
2	Válvula mariposa con actuador neumático de entrada a bomba P-08 y P-09 con sensor de posición de 1 ½ pulgada de diámetro	FV-29 FV-30
2	Acople flexible de entrada a bombas P-08 y P-09	EJ-07 EJ-08
2	Bombas centrífugas de trasiego a proceso	P-08 P-09

Cantidad	Descripción	TAG Number
2	Cheque antirretorno bomba P-08 y P-09	CV-07 CV-08
2	Válvula mariposa de salida de P-08 y P-09 con sensor de posición de 1 ½ pulgada de diámetro	FV-31 FV-32
2	Válvulas manuales de bola de ½ pulgada de diámetro	HV-06 HV-07
2	Manómetro indicador de presión	PI-04 PI-05
1	Válvula mariposa con actuador neumático de entrada y salida a hydroflow con sensor de posición de 1 ½ pulgada de diámetro	FV-33

3.4. Diseño arquitectura de control PTAR

El control de la planta se programó en el software Step 7 de Siemens en lenguaje Ladder y por medio de bloques de función el cual permite realizar la programación más ordenada y estructurada.

En las siguientes imágenes se pueden ilustrar algunos segmentos de programa del PLC:

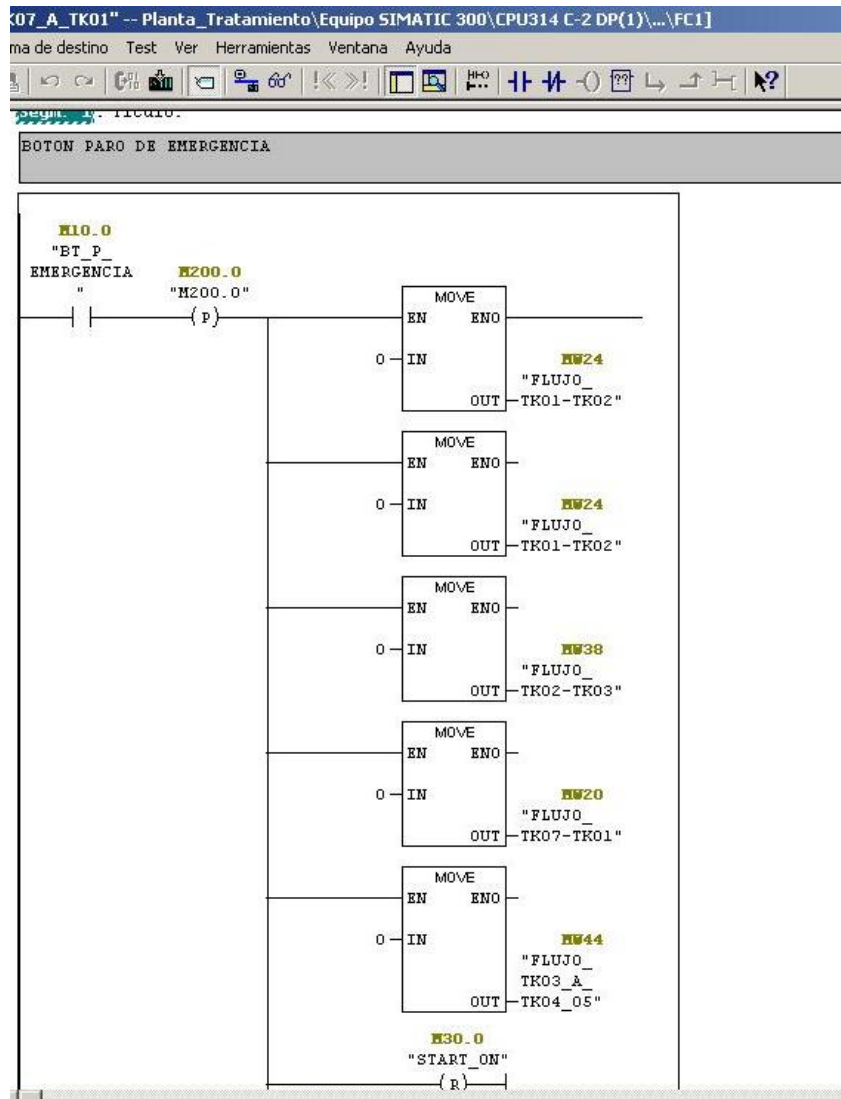


Imagen 18 - Algoritmo Lenguaje Ladder (Propia, 2018)

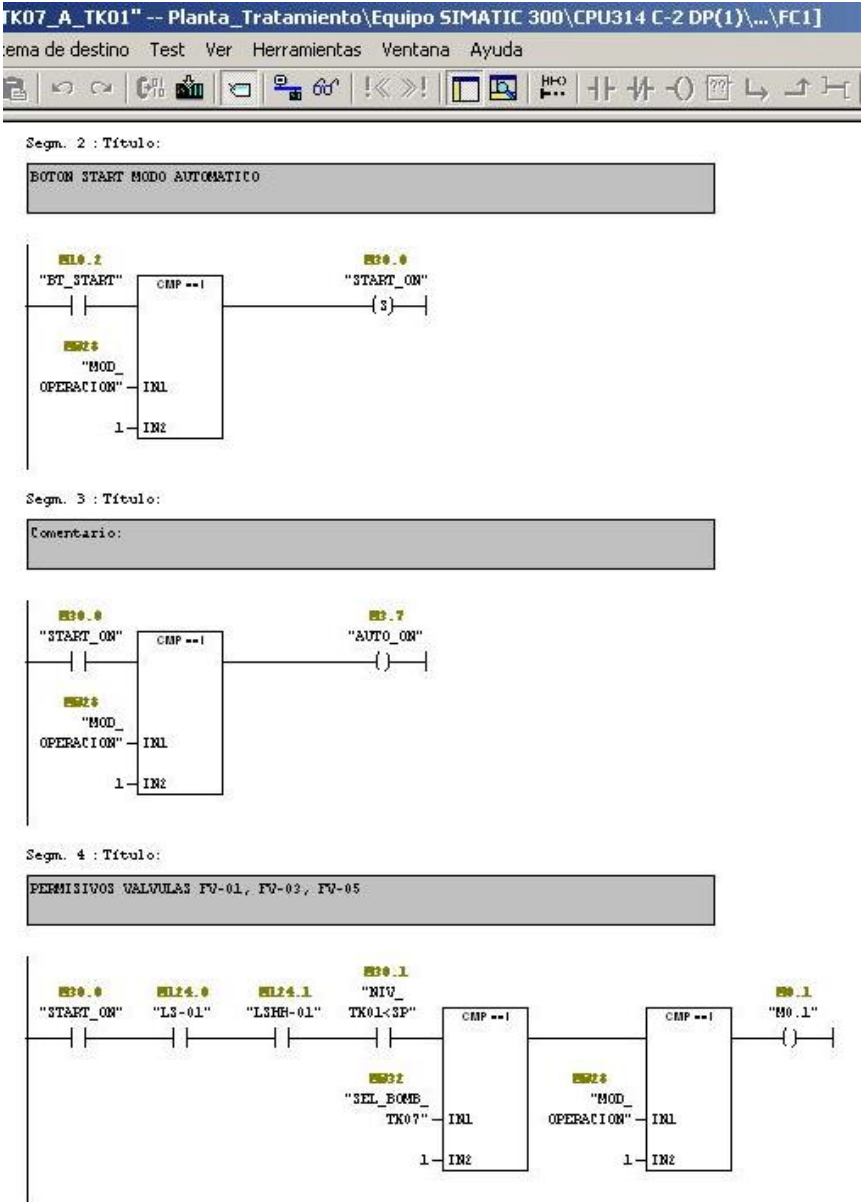
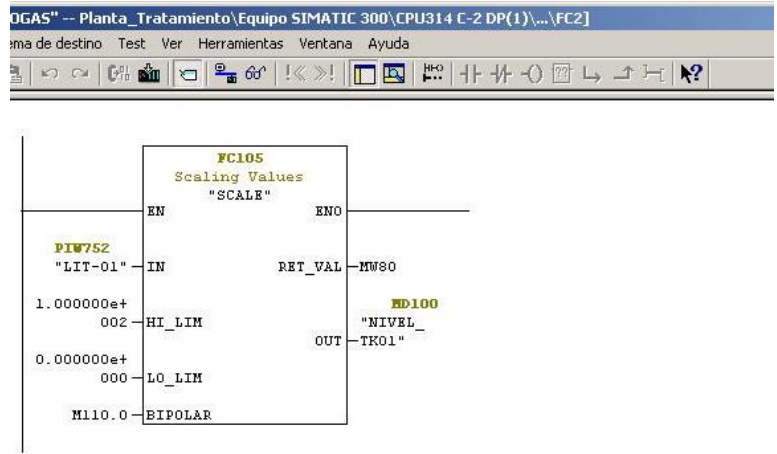


Imagen 19 - Algoritmo Lenguaje Ladder (Propia, 2018)



Segn. 2 : Título:
NIVEL TK01 < SET POINT

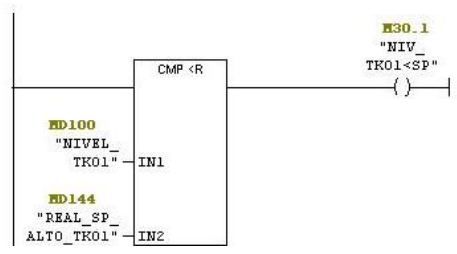
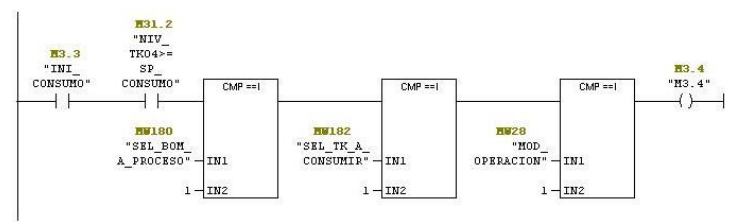
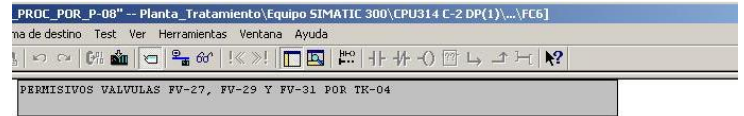


Imagen 20 - Algoritmo Lenguaje Ladder (Propia, 2018)



Segn. 4 : Título:
PERMISIVOS VALVULAS FV-28, FV-29 Y FV-31 POR TK-05

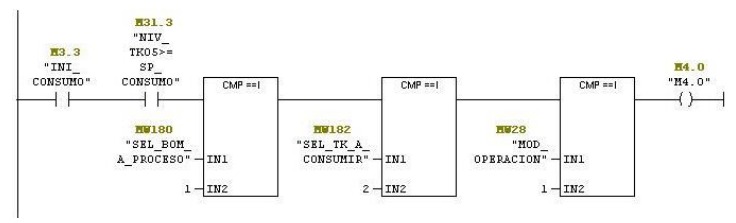


Imagen 21 - Algoritmo Lenguaje KOP (Propia, 2018)

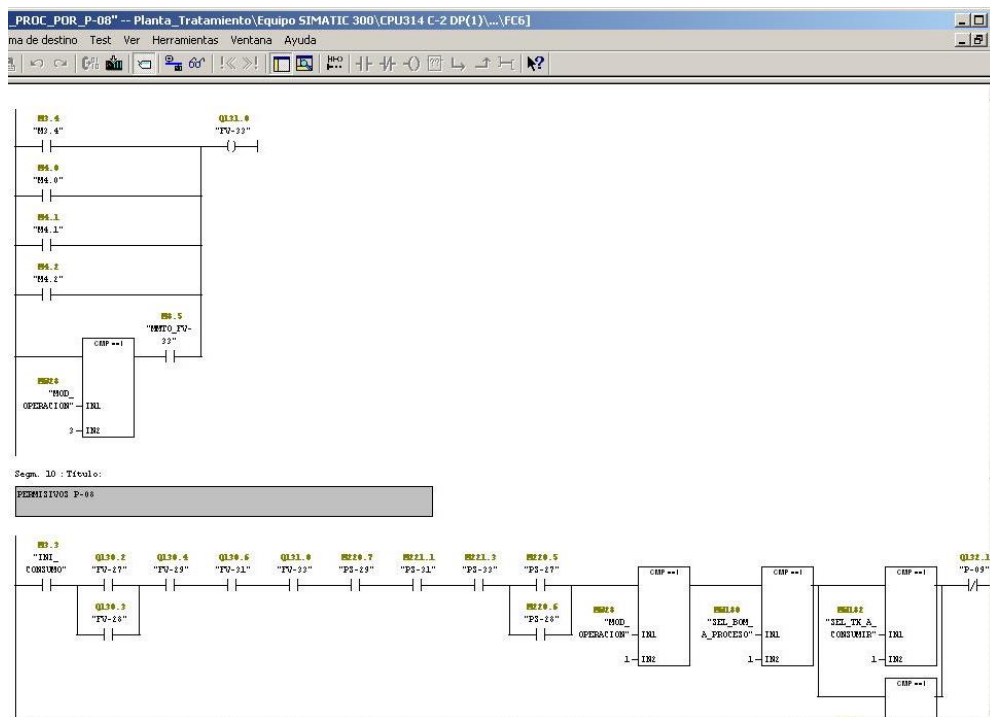


Imagen 22 - Algoritmo Lenguaje KOP (Propia, 2018)

El sistema de tratamiento se dividió en varias etapas que se describirán a continuación y se ilustrarán con las pantallas que se realizaron con la ayuda de Wincc para programación en el HMI.

3.4.1. Proceso de bombeo agua industrial

Toda el agua residual industrial es direccionada por medio de tuberías hacia el foso de recepción donde llegara toda el agua que se usó en los procesos de templado y corte.

En esta caja se realizará la sedimentación inicial y por medio de una bomba centrífuga se bombea el agua al tanque TK-01 para almacenamiento.

En este tanque se almacenará toda el agua industrial generada y por medio de bombas centrífugas se iniciará el trasiego de agua para dar inicio al tratamiento.

Cuando el nivel del tanque alcance el set-point de inicio de tratamiento la bomba de trasiego se energizará y el agua será enviada al tanque precipitador, el cual tiene la función de realizar la precipitación de todos los sólidos remanentes que se encuentran en el agua. El agua pasara al segundo compartimiento del TK-02 por rebose y una vez se alcance el set point de inicio de esta etapa, la bomba iniciara el bombeo hacia el sistema de inyección de químicos.

Este sistema cuenta con un switch de flujo el cual se programó como permisivo para el encendido de las bombas de inyección de químicos, las cuales iniciaran la inyección una vez el switch detecte flujo de agua.

Las bombas de inyección de químicos son bombas electrónicas las cuales permiten programar el flujo de inyección de químico dependiendo de la necesidad.

Los químicos serán adquiridos en canecas de 155 galones, a las cuales se les insertará un pie de succión y un sensor de nivel que no permitirá el encendido de las bombas si detecta bajo nivel en las canecas de químicos.

Durante la inyección de químicos el agua pasara por un mezclador estático el cual realizara la mezcla de los químicos con el agua con el aumento de la velocidad del agua por la reducción del diámetro de la tubería y por los cambios de direcciones en cada una de las curvas que por diseño se definieron.

Finalizado el proceso de inyección de químico por el mezclador estático el agua llega a un tanque de igualación el cual se encarga de almacenar el agua para luego ser trasegada a los tanques de almacenamiento de agua tratada.

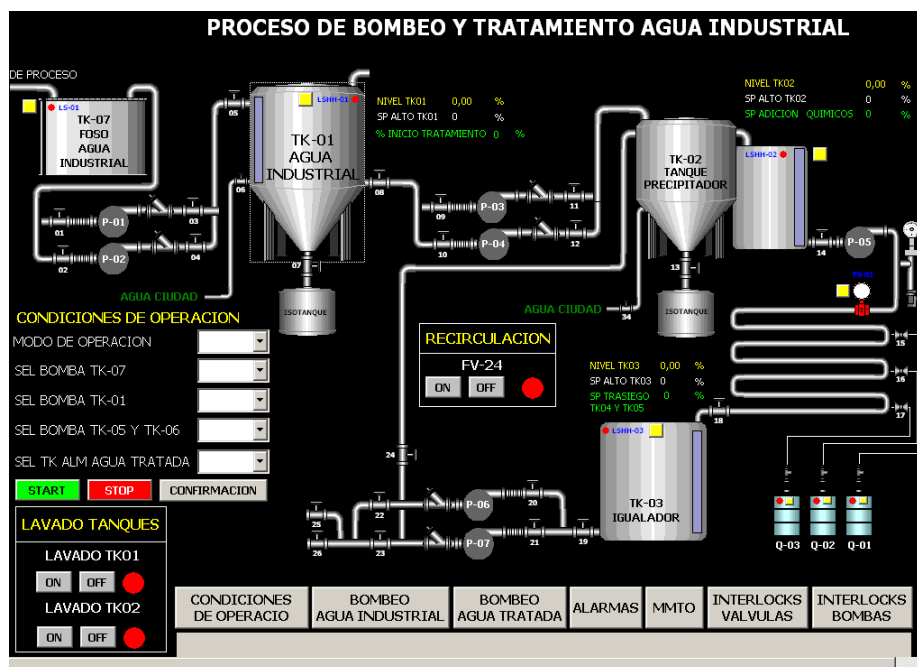


Imagen 23 - Proceso Bombeo y Tratamiento Agua Industrial (Propia, 2018)

3.4.2. Proceso de bombeo agua tratada

En esta etapa, el agua ya se encuentra tratada en cada uno de los tanques de almacenamiento los cuales están instalados con sensores de nivel alto-alto para evitar derrames de agua y transmisores indicadores de nivel que permiten controlar el nivel de cada uno de los tanques.

Para el proceso de bombeo se deberá seleccionar el tanque del cual se va a consumir el agua tratada y la bomba, y una vez el nivel del tanque llegue al set-point, se iniciará el bombeo de agua hacia el proceso para el consumo en cada una de las maquinas.

El sistema tiene instalado un hydroflow el cual garantizara la presión constante en el suministro de agua a cada una de las líneas de producción.

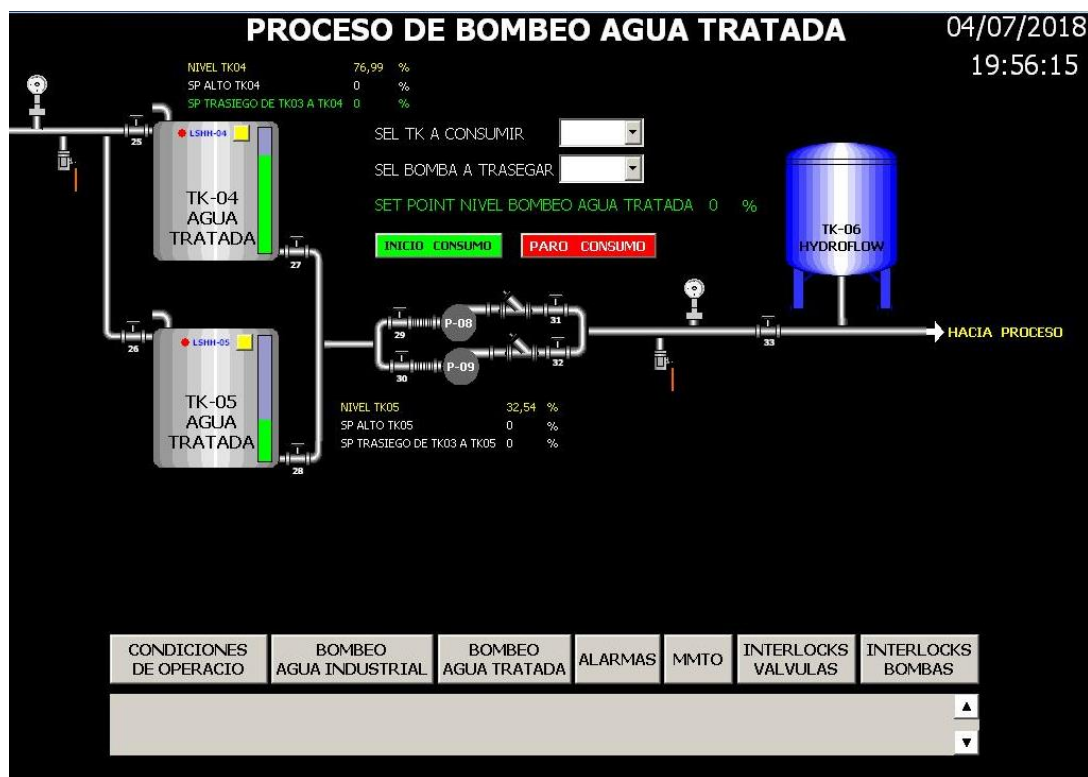


Imagen 24 - Sistema de Bombeo Agua Tratada a Proceso (Propia, 2018)

3.4.3. Alarmas del proceso

El sistema de control cuenta con una pantalla de alarmas la cual permite al usuario visualizar las alarmas que se van generando en cada uno de los equipos, lo cual permite al usuario identificar fácilmente los dispositivos que presentan fallas durante la operación.

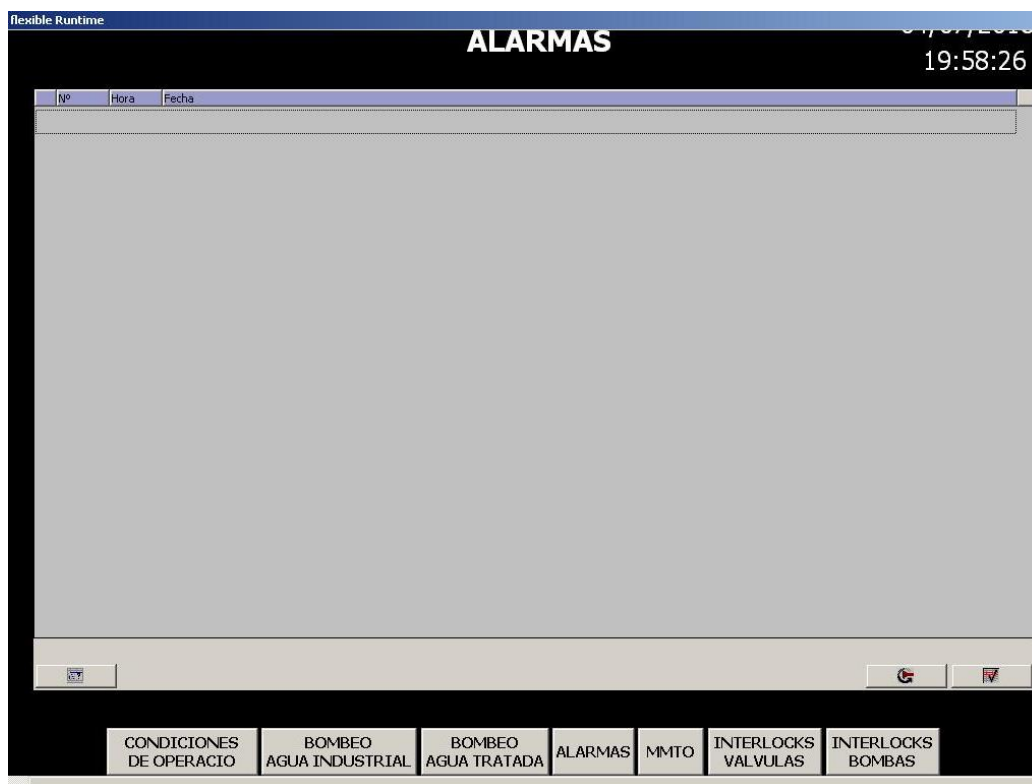


Imagen 25 Pantalla de Alarmas (Propia, 2018)

3.4.4. Pantalla de mantenimiento a equipos

En esta pantalla el usuario podrá seleccionar el modo de operación manual para prender o apagar cualquier equipo del proceso de tal forma que le permite realizar actividades de inspección, limpieza y mantenimiento de tal manera que los interlocks y permisos del sistema de control no interfieran con el energizado de los equipos.

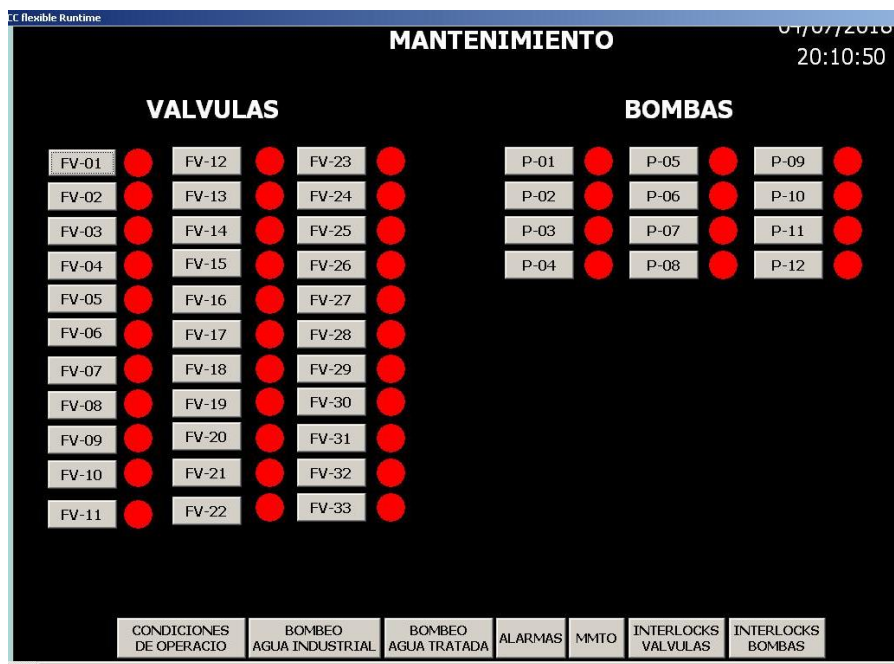


Imagen 26 Pantalla de Mantenimiento a Equipos (Propia, 2018)

3.4.5. Pantalla de interlocks bombas

En esta pantalla el usuario puede observar los interlocks que tiene cada bomba de tal forma que pueda verificar de cuales equipos depende cada bomba para poder arrancarla

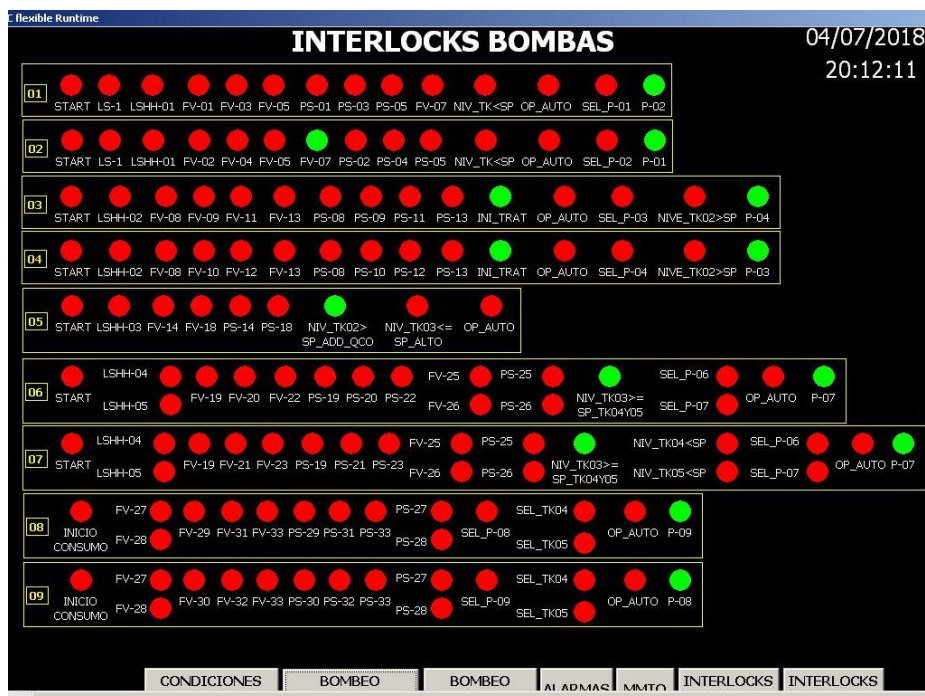


Imagen 27 - Pantalla Interlocks Bombas (Propia, 2018)

3.4.6. Pantalla de interlocks válvulas

En esta pantalla el usuario puede observar los interlocks que tiene cada válvula del proceso lo que le permite verificar de cuales equipos depende cada válvula para poder abrir o cerrar dependiendo de la lógica de control.

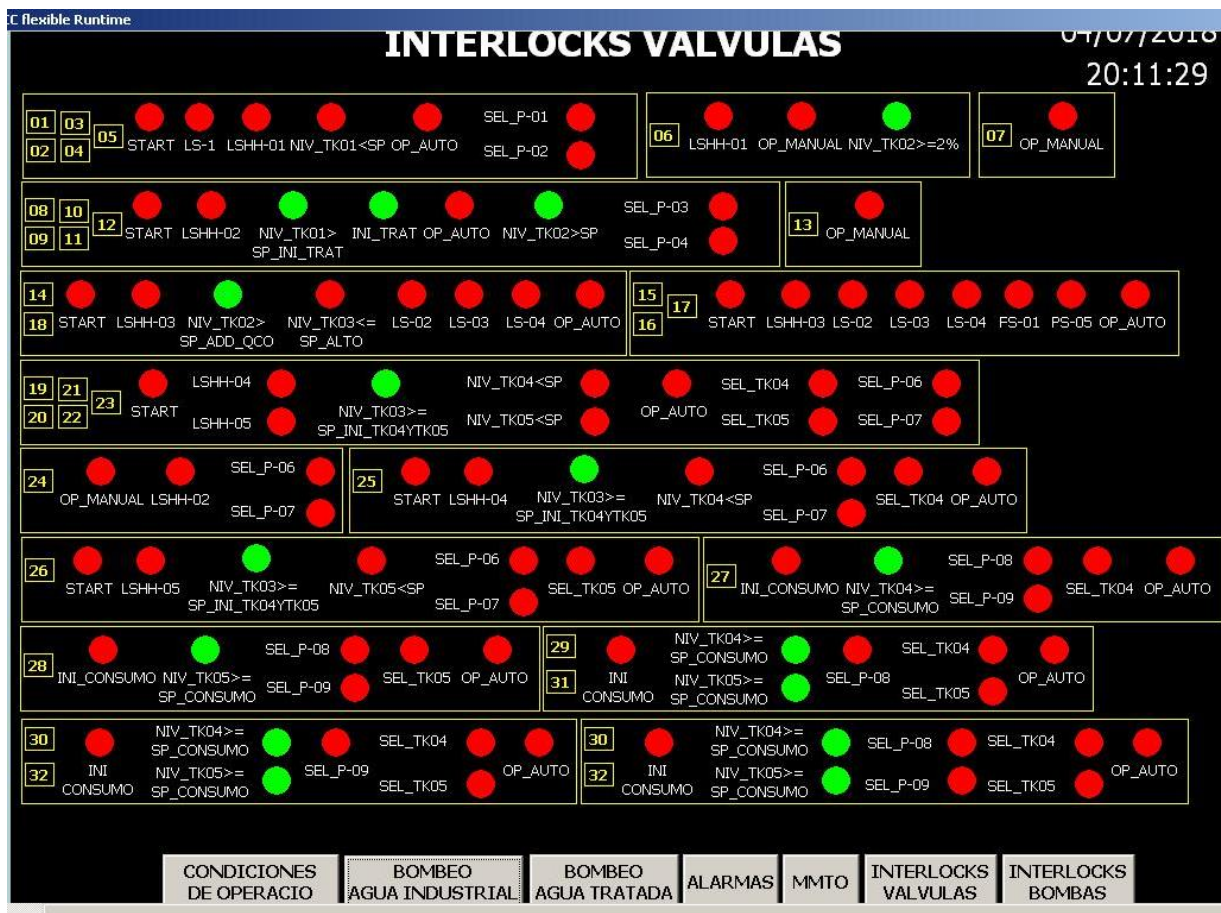


Imagen 28 - Pantalla Interlocks Válvulas (Propia, 2018)

3.5. Diseño sistema de potencia eléctrica

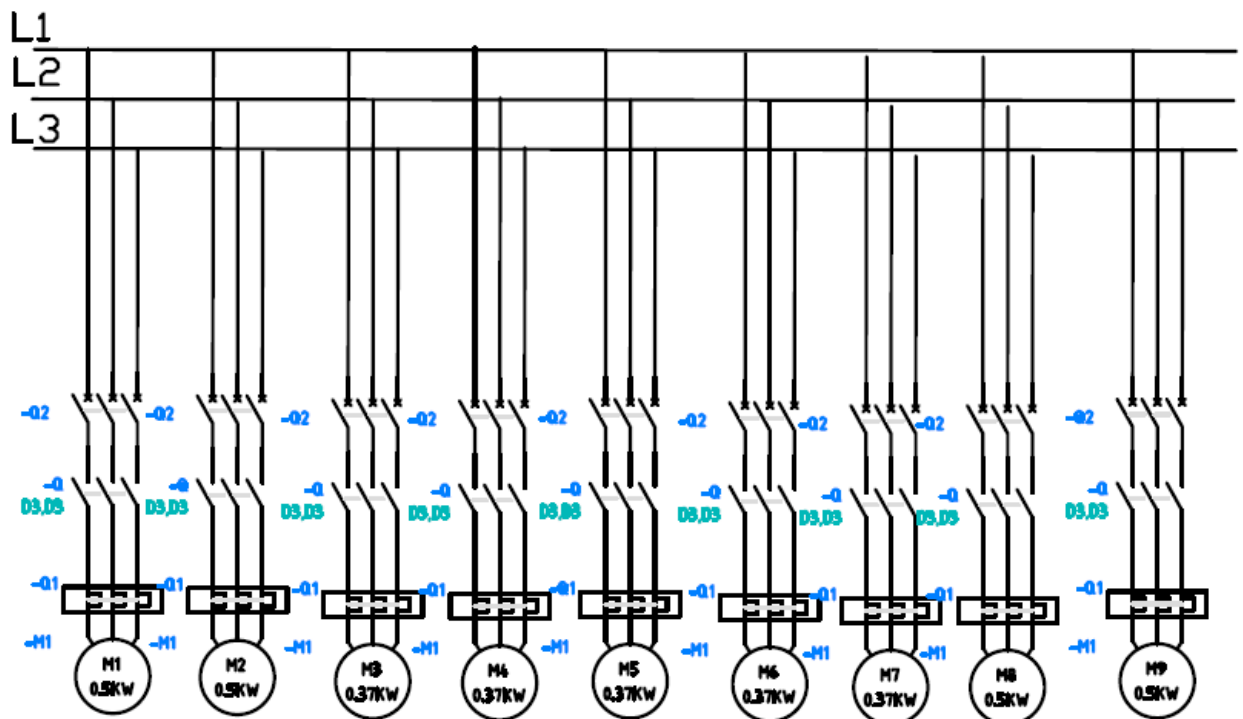


Imagen 29 Diagrama de Potencia (Propia, 2018)

3.5.1. Cálculo de motores (1 ,2) y (8,9) que son de igual potencia

Se calcula la intensidad del circuito. Al ser un circuito trifásico se utilizará la siguiente formula:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} * U * \text{Cos}\varphi}$$

Donde;

P= 550W

U= 440VAC

$\text{Cos}\varphi = 0.85$

$$I = \frac{550w}{\sqrt{3} * 440v * 0.85}$$

I=1.01 A

Estos datos de corriente a plena carga ya se encuentran tabulados, por lo que se utilizará para los siguientes cálculos los valores de tablas de la NTC 2050 Tabla 430-150, corriente a plena carga de motores trifásicos de corriente alterna.

		Motores de inducción de jaula de ardilla y rotor devanado. (A)							Motores sincrónicos con factor de potencia unitario*. (A)			
KW	HP	115 V	200 V	208 V	230V	460 V	575 V	2300 V	230 V	460 V	575 V	2300 V
0,373	1/2	4,4	2,5	2,4	2,2	1,1	0,9					
0,560	3/4	6,4	3,7	3,5	3,2	1,6	1,3					
0,746	1	8,4	4,8	4,6	4,2	2,1	1,7					
1,119	1-1/2	12,0	6,9	6,6	6,0	3,0	2,4					
1,492	2	13,6	7,8	7,5	6,8	3,4	2,7					
2,238	3		11,0	10,6	9,6	4,8	3,9					
3,730	5		17,5	16,7	15,2	7,6	6,1					
5,595	7-1/2		25,3	24,2	22	11	9					
7,460	10		32,2	30,8	28	14	11					
11,19	15		48,3	56,2	42	21	17					
14,92	20		62,1	59,4	54	27	22		53	26	21	
18,65	25		78,2	74,8	68	34	27					
22,38	30		92	88	80	40	32		63	32	26	
29,84	40		120	114	104	52	41		83	41	33	
37,30	50		150	143	130	65	52		104	52	42	
44,76	60		177	169	154	77	62	16	123	61	49	12
55,95	75		221	211	192	96	77	20	155	78	62	15
74,60	100		285	273	248	124	99	26	202	101	81	20
93,25	125		359	343	312	156	125	31	253	126	101	25
111,90	150		414	396	360	180	144	37	302	151	121	30
149,20	200		552	528	480	240	192	49	400	201	161	40
186,50	250					302	242	60				
223,80	300					361	289	72				
261,10	350					414	336	83				
298,40	400					477	382	95				
335,70	450					515	412	103				
373,00	500					590	472	118				

Imagen 30 Tabla Amperajes a Plena Carga para Motores Trifásicos (Icontec, 1998)

- Corriente a plena carga: 1.6 A para motor de 0.560Kw (según tabla NTC 2050)
- Voltaje: 440VAC

Según el artículo 430-22 NTC 2050, los conductores de conexión que alimentan a un solo motor deben estar dimensionados para una intensidad del 125 % de la intensidad a plena carga del motor.

Por lo tanto, la intensidad obtenida se multiplica por el respectivo factor quedando:

$$I = 1.6A * 1.25$$

$$I = 2 A$$

Con esta intensidad se selecciona el conductor de fase

Según artículo 430-22 NTC 2050, los conductores de los circuitos ramales que alimenten un solo motor deben tener una capacidad de corriente no menor al 125 % de la corriente nominal del motor a plena carga.

Para este caso se aplicaría la excepción según art.430-22 apartado b.

Se permite que los conductores entre un motor estacionario de 746 W (1 HP) nominales o menos y el encerramiento de terminales separado que permite el Artículo 430-145.b), sean de sección transversal menor a 2,08 mm² (14 AWG) pero no menor a 0,82 (18 AWG).

Se selecciona el cable calibre 16 con capacidad de 18 A para el diseño.

Calibre	Área nominal de la sección transversal	Número de hilos	Espesor nominal del aislamiento	Espesor nominal de nylon	Diámetro exterior aproximado	Peso total aproximado	Capacidad de conducción de corriente*
AWG	mm ²		mm	mm	mm	kg/km	Amperes
18	0,82	16	0,38	0,10	2,35	10,3	14
16	1,31	26	0,38	0,10	2,69	15,6	18

* Basada en la tabla 310.16 del NEC (NFPA 70) para una temperatura ambiente de 30°C.

Tabla 5 Tabla de Calibres Cables (Icontec, 1998)

Comprobación de caída de tensión

Se realiza el cálculo de caída de tensión que tendrá la línea garantizado que esta sea inferior al 5%.

Aplicando la siguiente formula:

$$\delta = \frac{P}{U} * \rho * \frac{L}{S}$$

$$P=550W$$

$$U=440V$$

$$\rho = 1/48 \Omega \frac{mm^2}{m} \text{ conductividad del cobre a } 70^\circ c$$

$$L = 15 m$$

$S = 1.31mm^2$ sección transversal

El 5 % de la tensión nominal de 440 V sería igual a 22V

Reemplazando en la formula:

$$\delta = \frac{550w}{440v} * \frac{1}{48} * \frac{15m}{1,31mm^2}$$

$$\delta = 0,4v$$

Cálculo protección de sobrecarga

Según artículo 430-32 norma NTC 2050 apartado C indica que de 746 W (1 HP) o menos con arranque automático. Un motor de 746 W (1 HP) nominales o menos con arranque automático, se debe proteger contra sobrecargas por uno de los siguientes medios:

- Por un dispositivo independiente de protección contra sobrecarga sensible a la corriente del motor. Este dispositivo se debe ajustar para que se dispare o debe tener una capacidad nominal no mayor al siguiente porcentaje de la corriente nominal de la placa de características del motor a plena carga:
- Motores con un factor de servicio rotulado no menor a 1,15:125%
- Motores con un aumento de temperatura rotulado no mayor a 40 °C: 125%
- Todos los demás motores: 115 %

Para este caso:

$$I = 1.6A * 1.15$$

$$I = 1.84 A$$

Se selecciona un relé de sobrecarga térmica de rango 1.2 A - 1.8 A

Protección contra cortocircuito

El circuito ramal de un motor debe estar protegido contra cortocircuito por un dispositivo de capacidad no superior al 300% (tabla 430-152 NTC 2050)

Para este caso:

$$I = 1.6A * 3$$

$$I = 4.8 A$$

Se selecciona un breaker tripolar comercial de 4A

3.5.2. Cálculo motor (3, 4, 5, 6 y 7) que son de igual potencia

Corriente a plena carga

Los datos de corriente a plena carga ya se encuentran tabulados por lo que se utilizará para los siguientes cálculos los valores de tablas de la NTC 2050 Tabla 430-150, corriente a plena carga de motores trifásicos de corriente alterna:

- Corriente a plena carga: 1.1 A (según tabla NTC 2050)
- Voltaje: 440VAC

Según el artículo 430-22 NTC 2050, los conductores de conexión que alimentan a un solo motor deben estar dimensionados para una intensidad del 125 % de la intensidad a plena carga del motor.

Por lo tanto, la intensidad obtenida se multiplicará por el respectivo factor, quedando:

$$I = 1.1A * 1.25$$

$$I = 1.375 A$$

Con esta intensidad se seleccionan los conductores de fase.

Según artículo 430-22 Ntc 2050, los conductores de los circuitos ramales que alimenten un solo motor deben tener una capacidad de corriente no menor al 125 % de la corriente nominal del motor a plena carga.

Para este caso se aplicaría la excepción según art.430-22 apartado b.

Se permite que los conductores entre un motor estacionario de 746 W (1 HP) nominales o menos y el encerramiento de terminales separado que permite el Artículo 430-145.b), sean de sección transversal menor a 2,08 mm² (14 AWG) pero no menor a 0,82 (18 AWG).

Se selecciona el cable calibre 16 con capacidad de 18 A para el diseño.

Calibre	Área nominal de la sección transversal	Número de hilos	Espesor nominal del aislamiento	Espesor nominal de nylon	Diámetro exterior aproximado	Peso total aproximado	Capacidad de conducción de corriente
AWG	mm ²		mm	mm	mm	kg/km	Amperes
18	0,82	16	0,38	0,10	2,35	10,3	14
16	1,31	26	0,38	0,10	2,69	15,6	18

* Basada en la tabla 310.16 del NEC (NFPA 70) para una temperatura ambiente de 30°C.

Tabla 6 - Tabla de Calibres Cables (Icontec, 1998)

Comprobación de caída de tensión

Se realiza el cálculo de caída de tensión que tendrá la línea garantizado que esta sea inferior al 5%.

Aplicando la siguiente formula:

$$\delta = \frac{P}{U} * \rho * \frac{L}{S}$$

P=373W

U=440V

$\rho = 1/48 \Omega \frac{mm^2}{m}$ conductividad del cobre a 70°C

L =15 m

S= 1.31mm² sección transversal

El 5 % de la tensión nominal de 440 v sería igual a 22v

Reemplazando en la fórmula:

$$\delta = \frac{373w}{440v} * \frac{1}{48} * \frac{15m}{1,31mm^2}$$

$$\delta = 0,271v$$

Cálculo protección de sobrecarga

Según artículo 430-32 norma NTC 2050 apartado c

Para este caso quedaría:

$$I = 1.1A * 1.15$$

$$I = 1.265 A$$

Se selecciona un relé de sobrecarga térmica de rango 1.2 A - 1.8 A

Protección contra cortocircuito

El circuito ramal de un motor debe estar protegido contra cortocircuito por un dispositivo de capacidad no superior al 300% (tabla 430-152 NTC 2050)

Para este caso:

$$I = 1.1A * 3$$

$$I = 3.3 A$$

Se selecciona un breaker tripolar comercial de 3 A.

Cálculo de alimentador para tablero

Cálculo de corriente para dimensionado del conductor del alimentador.

Artículo 430—24 NTC 2050

La capacidad de corriente del alimentador debe ser:

$$I = 1.25\% (I \text{ nominal del motor de mayor potencia}) + \sum I \text{ de los demas motores}$$

$$I = 1.25\% (1.6) + 1.1 + 1.1 + 1.1 + 1.6$$

$$I = 6.9 \text{ A}$$

Para el conductor del alimentador principal se selecciona un calibre 14 de sección transversal $2,08\text{mm}^2$ el cual soporta una corriente nominal de 25 A (tabla 310-16 NTC 2050)

Protección contra corto circuito alimentador principal

Según artículo 430-62 NTC 2050, la capacidad máxima del dispositivo de protección del alimentador contra cortocircuito y falla a tierra se calcula sumando la del dispositivo de protección del circuito ramal que tenga mayor corriente (4 A) más la corriente a plena carga de todos los demás motores.

$$I = 4A + 1.1A + 1.1A + 1.1A + 1.6A$$

$$I = 8.9A$$

Se selecciona un breaker comercial tripolar de 6 A.

3.6. Diagrama de tuberías e instrumentación (P&ID)

De acuerdo con el sistema de control que se diseñó, se elaboró el P&ID del proceso en el cual está plasmado cada uno de los instrumentos con su respectivo TAG number (número de TAG) que lo identifica.

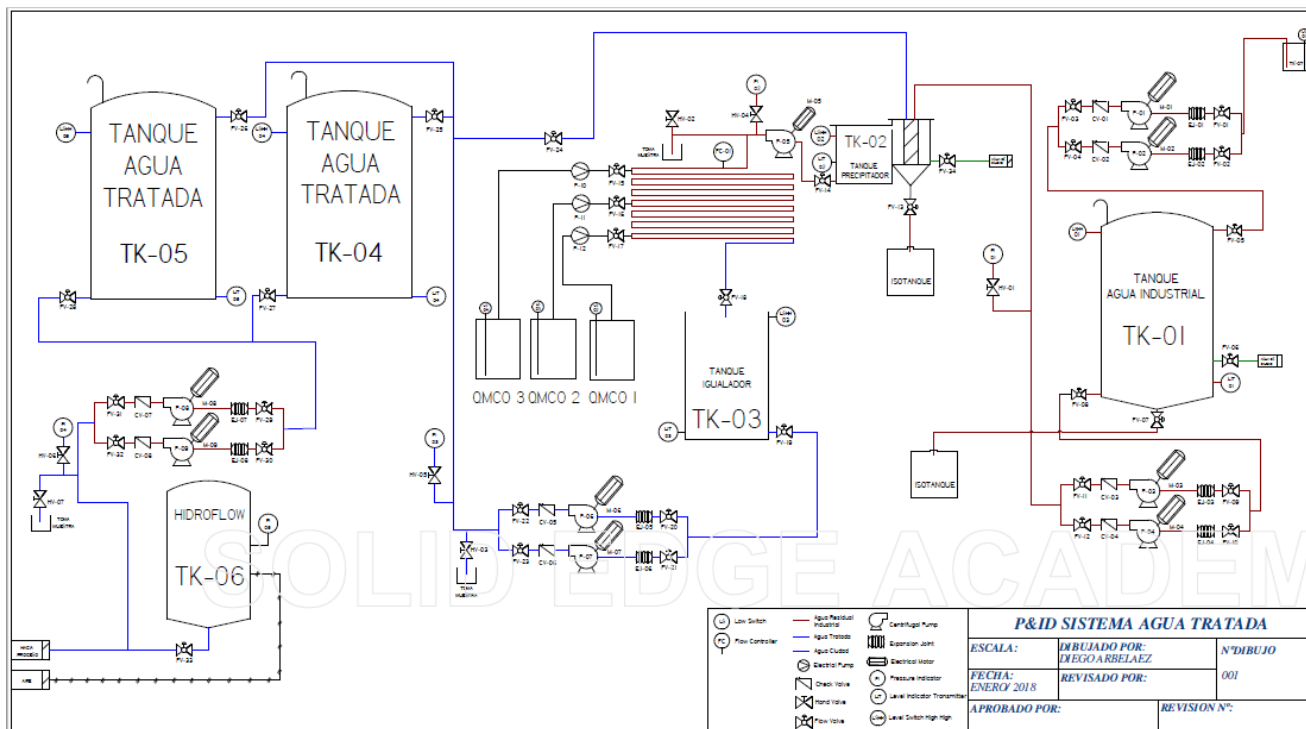


Imagen 31 - P&ID Planta Tratamiento de Agua Residual (Propia, 2018)

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El trabajo realizado se basó en el diseño del sistema de bombeo y automatización de una planta de tratamiento de aguas para la industria del vidrio templado. Se incluyeron los cálculos de caudal requeridos, la selección de bombas para el proceso, el diseño del sistema de control automático para gobernar el proceso. En la programación del sistema control, se deja la opción de la operación manual para realizar las paradas de mantenimiento programado y las intervenciones de equipos que se requieran sin tener que “engañar” el sistema puenteando señales o cambiando el programa.

Se diseñó una distribución típica con un área estimada aproximada que garantice la libre circulación y la delimitación de cada proceso. Optimizando el consumo y la reutilización de las aguas de proceso.

5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

- Se diseñó el sistema de control automático para el tratamiento de agua residual industrial proveniente del proceso de templado y corte de vidrio, con el propósito de tener un proceso sin constante intervención humana de los equipos, dado a que solo se centra en la operación desde una pantalla de control del proceso. El trabajo desarrollado está fundamentado en dar cumplimiento legal a la normatividad colombiana con miras a proteger el medio ambiente y especialmente los recursos hídricos del país.
- Se evidencia en campo las condiciones actuales del proceso lo que permite establecer las condiciones de diseño que se requieren para la planta de tratamiento y caracterizar de manera certera la instrumentación requerida para el proyecto, con el fin de lograr un control óptimo de todas las variables que están presentes en el proceso de tratamiento de agua residual industrial.
- El desarrollo de los planos en 3D, esquemas eléctricos y P&ID para el diseño de la planta representan una herramienta fundamental para todo ingeniero. Esto permite acondicionar todos los equipos que van a intervenir en la implementación de la planta ilustrando de forma gráfica y clara todos los componentes que serán instalados gráficamente. Esto también permite al diseñador evidenciar problemas a los cuales se enfrentará en el proceso de construcción de tal forma que se puedan tomar las decisiones a tiempo con el fin de minimizar los costos de reparación y/o ajuste de equipos durante la ejecución.
- Se cumple satisfactoriamente con el diseño del sistema de control e interfaz usuario-máquina lo que permite tener el proceso automático logrando disminuir tantos toques físicos que debe realizar un operador para manipular bombas y válvulas en el proceso de tratamiento. Esto

también permite la disminución de costos por mano de obra humana y un proceso más confiable dado a que el sistema monitorea continuamente las variables críticas del proceso y toma las acciones en tiempo real cuando se salen de control.

Recomendaciones

Es recomendable para cualquier ingeniero tener una visión abierta del espacio requerido para la instalación de la planta dado a que esto obliga a realizar cambios en una etapa más avanzada del diseño lo cual puede implicar pérdidas de tiempo por retrabajo al tener que modificar ciertas condiciones del diseño.

También es de suma importancia tener en cuenta las marcas de equipos que el cliente usar regularmente dado a que esto puede cambiar algunos criterios en el diseño. Para sistemas de bombeo, la marca de la bomba juega un papel fundamental para los datos de diseño requeridos para la aplicación.

Trabajo futuro

Para el presente proyecto, se tienen las bases de diseño para una implementación física de la planta de tratamiento por parte de la empresa de templado y corte de vidrio. Todo va a depender del presupuesto que requiera invertir en la planta para lograr optimizar su proceso y mejorar su confiabilidad.

Hoy en día las normas ambientales se han vuelto más estrictas, estas bases de diseño se acoplan fácilmente para otros procesos que requieran realizar tratamiento de aguas residuales, para lo cual, con solo realizar algunos cambios en ciertos equipos y configuración del sistema de control se puede lograr un tratamiento según las necesidades de la industria.

REFERENCIAS

- (20 de Agosto de 2015). Obtenido de Bombero13:
<https://elbomberonumero13.wordpress.com/2015/08/20/los-alabes-en-nuestras-bombas/>
- ABB. (2013). *ABB*. Obtenido de ABB:
[http://www04.abb.com/global/seitp/seitp202.nsf/0/e903cd26305cc4b585257a390074a1a4/\\$file/Seccionadores.pdf](http://www04.abb.com/global/seitp/seitp202.nsf/0/e903cd26305cc4b585257a390074a1a4/$file/Seccionadores.pdf)
- Chint. (2018). *Chint*. Obtenido de <http://www.chint.com.tr/images/content/files/nc1-URUN.pdf>
- Electric, S. (2018). *Schneider Electric*. Obtenido de Schneider Electric: <https://www.schneider-electric.es/es/product-range/711-tesys-gv7>
- Freddy Corcho, J. D. (2005). *Acueductos Teoría y Diseño*. En J. D. Freddy Corcho. Editorial Universidad de Medellín.
- Icontec. (1998). Norma Técnica Colombiana 2050. En Icontec, *NTC 2050*.
- ICONTEC. (s.f.). Código Eléctrico Colombiano. En ICONTEC.
- Mallol, S. I. (04 de 10 de 2011). *overblog*. Obtenido de https://es.overblog.com/Que_es_la_automatizacion_de_procesos-1228321767-art127041.html
- Manuel Viejo Zubicaría, J. A. (s.f.). *Bombas teorías diseños y aplicaciones*. En M. V. Zubicaría, *Bombas teorías diseños y aplicaciones* (pág. 14).
- Mott, R. L. (2006). *Mecánica de Fluidos*. En R. L. Mott, *Mecánica de Fluidos* (pág. 237).
- PAVCO. (2018). Manual Técnico Tubosistemas PRESION PVC. En PAVCO, *Manual Técnico Tubosistemas PRESION PVC*.
- Propia. (2018).
- Siemens A&D FEA (Investigación, d. y. (2001). Manual de formación para soluciones generales en automatización Totally Integrated Automation (TIA).
- Torres, J. (2015). *Diseño asistido por ordenador*. En J. Torres.

WEG, G. (2018). *Weg*. Obtenido de <http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-rw-reles-de-sobrecarga-termicos-50070232-catalogo-espanol.pdf>

Wilo. (2018). Ficha Técnica Bomba 902 Wilo. En Wilo.

APÉNDICE

Anexo 1. Datasheet Actuadores flowtek

Anexo 2. Datasheet Bomba Wilo

Anexo 3. Datasheet Floating swich FTS20

Anexo 4. Datasheet sensor de posición válvulas Bray

Anexo 5. Datasheet Siemens S7300

Anexo 6. Datasheet swich de flujo Flowphant serie T

Anexo7. Datasheet Transmisor presión Cerabar S



Anexo 8. Datasheet válvula mariposa Bray

Anexo 9. Manual de operación planta PTAR

Anexo 10. Protocolos de calibración de instrumentación

Anexo 11. Calendario de mantenimiento

Anexo 12. Lista de tareas de mantenimiento

FIRMA ESTUDIANTES	
FIRMA ASESOR	 <i>Segunda entrega del informe final, para su evaluación.</i> 20181212
FECHA ENTREGA: 12 de diciembre de 2018	

FIRMA COMITÉ TRABAJO DE GRADO DE LA FACULTAD _____		
RECHAZADO__	ACEPTADO_____	ACEPTADO CON MODIFICACIONES_____
		ACTA NO. _____
		FECHA ENTREGA: _____

FIRMA CONSEJO DE FACULTAD _____
ACTA NO. _____
FECHA ENTREGA: _____