



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**CONTROL DE PLANTAS
PEQUEÑAS DE TIPO
DISCONTINUO PARA
TRATAMIENTO BIOLÓGICO**

TESIS

Para obtener el título de

Ingeniero Mecatrónico

P R E S E N T A

Iván Hernández Hernández

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Oscar González Barceló



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2021

Reconocimientos

Tesis realizada gracias al Programa de apoyo a proyectos de investigación e innovación tecnológica UNAM-PAPIIT- IT101320 - Biorrefinería para producción de ácidos grasos volátiles, biogás y digestato a partir de residuos sólidos orgánicos urbanos.

Contenido

Introducción.....	4
Objetivo general.....	5
Objetivos particulares	5
Alcances	5
Justificación.....	5
1. Antecedentes	6
1.1. Instrumentación eléctrica.....	6
1.1.1. Contactor.....	6
1.1.2. Motor de inducción	6
1.1.2.1. Motor de inducción de jaula de ardilla	7
1.1.3. Equipos de bombeo.....	8
1.1.3.1. Bombas Hidráulicas	8
1.1.3.2. Bomba sumergible.....	9
1.1.4. Sopladores de aire	9
1.2. Elementos de control	9
1.2.1. Microcontrolador	9
1.2.2. Válvulas de mariposa y electroválvulas	10
1.2.3. Interruptor de nivel	11
1.3. Sistemas de actuación neumática	12
2. Marco teórico.....	13
2.1. Planta de tratamiento de aguas residuales	13
2.2. Reactores de operación discontinua SBR	13
2.3. Potencial óxido-reducción en el control de duración de ciclos.....	14
2.4. Compilación actual en los controles de plantas con reactores SBR (Planta de tratamiento de aguas residuales de la Facultad de Ciencias Políticas y Sociales de la UNAM).....	15
2.4.1. Control de tiempo fijo	15
2.4.2. Controles basados en modelos matemáticos	15
2.4.3. Control en tiempo real y control inteligente	16
2.4.4. Planta de tratamiento de aguas residuales de la Facultad de Ciencias Políticas y Sociales de la UNAM	17
2.5. Interfaz grafica.....	20
2.5.1. Lenguaje de programación C#.....	20
2.5.2. Base de datos	20

3.	Metodología y requerimientos del usuario	21
3.1.	Descripción de entradas y salidas del sistema existente	21
3.2.	Identificación de las necesidades	21
3.3.	Cálculo de los tiempos (duraciones) de los horarios	23
3.4.	Especificaciones de diseño	25
4.	Propuesta del módulo de control	28
4.1.	Selección de componentes	29
4.1.1.	Reloj.....	29
4.1.2.	Tarjetas de desarrollo.....	31
4.1.3.	Sensores de ORP.....	32
4.2.	Diseño del dispositivo de control	33
4.2.1.	Conexiones a equipamiento	33
4.2.2.	Control de fase de aireación	37
4.2.3.	Control de fase de llenado con mezcla	39
4.2.4.	Control de bombas y electroválvulas.....	42
4.3.	Interfaz de usuario	48
5.	Guía de instalación	53
6.	Conclusiones	55
	Bibliografía	56

Introducción

La tecnología de reactores de operación discontinua (SBR) ha mostrado grandes resultados desde sus inicios en los años 70 y la implementación del PLC (computadora lógica programable) incrementó la confianza en estos sistemas, ya que se contaba con una manera de regular los tiempos de cada fase de manera más precisa. A pesar de que la tecnología detrás de la automatización de procesos ha evolucionado en los últimos años, los sistemas SBR no son tan comunes.

En México el tratamiento de aguas residuales municipales se lleva principalmente por proceso de lodos activados, incluso la UNAM cuenta con varias plantas de tratamiento, sin embargo, en ocasiones estas plantas ocupan esquemas de control de tiempo fijo, en los cuales el controlador no recibe retroalimentación y depende totalmente de conocimientos empíricos para establecer tiempos adecuados y buscar un resultado óptimo. La presente tesis abarca el problema que representa la programación recurrente de horarios en una planta de tratamiento SBR, se propone automatizar algunos subsistemas de la planta con el propósito de que la planta sea más autónoma.

En el primer capítulo se muestra el funcionamiento y bases teóricas del equipo que compone una planta de aguas residuales discontinua, debido a que es indispensable tener conocimientos de lo que se pretende controlar, se da una breve explicación de las partes fundamentales de la planta.

En el segundo capítulo se introducen las plantas de tratamiento de aguas residuales, se explica las fases de las que consta la tecnología SBR, haciendo énfasis en que la duración de cada etapa es la base principal del funcionamiento de la planta. También se adentra en los parámetros del sistema que se pueden medir para la automatización de este, presentado una breve recopilación de los esquemas de control empleados para plantas de tratamiento, terminando con las bases para la comunicación entre el sistema y el operador.

En el tercer capítulo se presentan las entradas y salidas del sistema, se reúnen las necesidades del usuario para obtener las especificaciones del módulo de control del sistema determinando el funcionamiento y en que consiste la operación del dispositivo, además, se establecen las estrategias de control empleadas en el módulo relacionadas al compartimiento de un parámetro indirecto que funciona como base para automatizar el proceso.

En el último capítulo se aborda la construcción del sistema, las conexiones que debe tener con respecto al resto del equipo de la planta, su estructura interna, así como los diagramas de flujo que explican cómo se automatiza el sistema; terminando con la exposición de la interfaz de usuario que servirá para comunicar al operador con el módulo de control.

Llegando a la conclusión que lo presentado en esta tesis puede automatizar al sistema en condiciones ideales, tomando en cuenta que el sistema presentara fallas en el equipo de medición se proponen esquemas de control de tiempo fijo que garantizarán el funcionamiento de la planta en todo momento, enfatizando que el equipo empleado en el módulo de control es de bajo costo haciendo más viable su implantación en pequeñas

comunidades, así como también dejando en claro que el módulo es muy flexible para modificaciones de acuerdo a los propósitos de la planta.

Objetivo general

Automatizar un reactor biológico de operación discontinua para tratamiento de aguas residuales en plantas pequeñas a través de un módulo de control.

Objetivos particulares

Programar el funcionamiento del control de la planta utilizando tarjetas de desarrollo.

Automatizar subsistemas de la planta que marquen el fin de las fases de mezclado y de aireación dando seguimiento al potencial óxido-reducción.

Alcances

Se desarrollará un sistema de monitoreo que sea intuitivo y de fácil uso e instalación, además de que muestre al usuario los datos de una manera amigable y de fácil entendimiento.

Se definirán ciclos de funcionamiento que se acoplen a las condiciones del lugar donde se encuentre la planta.

Justificación

La operación de arranques y paros de equipos en plantas pequeñas para tratamiento de aguas residuales municipales se enfrenta desde los años setenta a dos obstáculos que han resultado insuperables a la fecha para plantas pequeñas con menor equipamiento tecnológico:

- ❖ El complicado manejo que representa un controlador lógico programable (PLC por sus siglas en inglés) para técnicos operadores;
- ❖ El tiempo excesivo que requieren los temporizadores para reprogramar los paros y arranques de los equipos (resultado del producto número de equipos x número de paros x número de arranques x número de días).

Para resolver la problemática de cambiar estrategia de operación (cambios en fase) de reactores biológicos discontinuos (SBR, por sus siglas del inglés sequencing batch reactors), el presente trabajo propone un método de control maestro más intuitivo y sencillo, en función de un parámetro de fácil medición. Además, que sea accesible su implementación, garantizando el correcto y simplificado funcionamiento del sistema.

1. Antecedentes

1.1. Instrumentación eléctrica

1.1.1. Contactor

El contactor es un dispositivo que tiene la función de abrir o cerrar el flujo de corriente. Es un elemento clave para la automatización, con este es posible controlar motores de AC ya que es el dispositivo que deja pasar o no la corriente, ver figura 1.1.

El contactor está conformado por la carcasa, bobina, núcleo y armadura. En la carcasa es donde se conectan los conductores, la bobina es la encargada de transformar la corriente eléctrica una vez que está energizada la armadura y también de cerrar el circuito [1].



Figura 1.1. Contactor de potencia modelo 3RT2024-1AN20 [2]

1.1.2. Motor de inducción

El motor es una máquina eléctrica rotatoria capaz de convertir la energía eléctrica en energía mecánica, el principio de funcionamiento de un motor se basa en un conductor que se encuentra dentro de un campo magnético que experimenta una fuerza cuando una corriente circula por el mismo.

Actualmente un motor de inducción es una máquina en la que uno de sus miembros, generalmente el estator, se conecta a una fuente de energía y una jaula de ardilla secundaria se conecta en otro miembro, usualmente el rotor, que es el que lleva la corriente inducida.

Se han definido una serie de diseños estándar con diferentes curvas de par-velocidad (figura 1.2). A estos diseños estándar se les llama clases de diseño, en Estados Unidos la National Electrical Manufacturers Association (NEMA) y en Europa la International Electrotechnical Commission (IEC). [3]

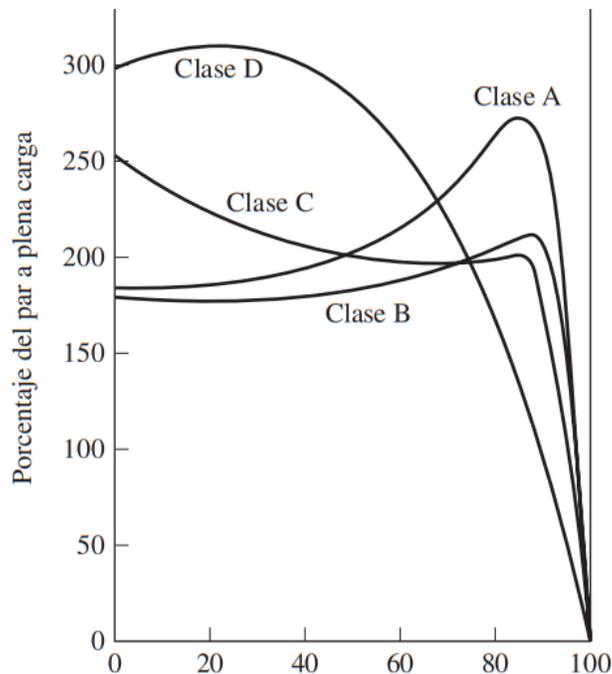


Figura 1.2. Curvas par-velocidad típicas para los diferentes diseños de rotores [4].

En el caso de estudios en cuestión nos interesan los motores NEMA diseño B, en estos el momento de torsión con el rotor bloqueado por unidad disminuye a medida que se incrementa el tamaño del motor. La corriente con el rotor bloqueado correspondiente no deberá exceder de 6.4 veces la corriente nominal a plena carga. Estos motores de uso general se utilizan para impulsar ventiladores, bombas centrífugas, etcétera [5].

Para el soplador de aire nos interesan los motores NEMA diseño C y D, los motores de diseño C tienen una corriente de arranque baja, un torque de arranque alto y un torque máximo normal, Los motores de diseño D también tienen una corriente de arranque baja, un torque de arranque mayor al del diseño C y un torque máximo alto [4].

1.1.2.1. Motor de inducción de jaula de ardilla

Los rotores de jaula de ardilla constan de una serie de barras conductoras dispuestas dentro de ranuras labradas en la cara del rotor y en cortocircuito en alguno de sus extremos mediante grandes anillos de cortocircuito. A este diseño se le llama rotor de jaula de ardilla porque los conductores, si se examinan por sí solos, parecen una de las ruedas de ejercicio donde corren las ardillas o hámsters como en la figura 1.3 [3].

Algunas de las ventajas de estos tipos de motores son que tienen un costo inicial bajo, son compactos y su instalación ocupa poco espacio además de que su rotor es de construcción simple sin olvidar que no producen chispas que pudieran provocar incendios y, por último, este tipo de motores lleva poco equipo de control, ya que no necesita control en el rotor [6].

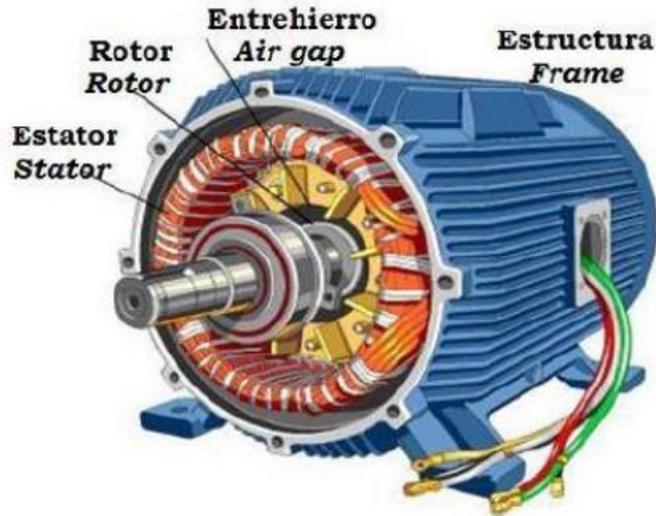


Figura 1.3. Motor AC trifásico de inducción [7].

1.1.3. Equipos de bombeo

1.1.3.1. Bombas Hidráulicas

El trabajo de una bomba hidráulica es convertir energía mecánica (par de giro, velocidad de rotación) en su equivalente, pero en forma de energía hidráulica (presión y caudal respectivamente). Las bombas más utilizadas en los sistemas hidráulicos para la industria en general son tres tipos fundamentales: 1) de engranes, con dentado exterior o dentado interior o sistema planetario, de caudal fijo; 2) de paletas, de caudal fijo o variable; 3) de pistones, radiales o axiales, de caudal fijo o variable (figura 1.4) [8].

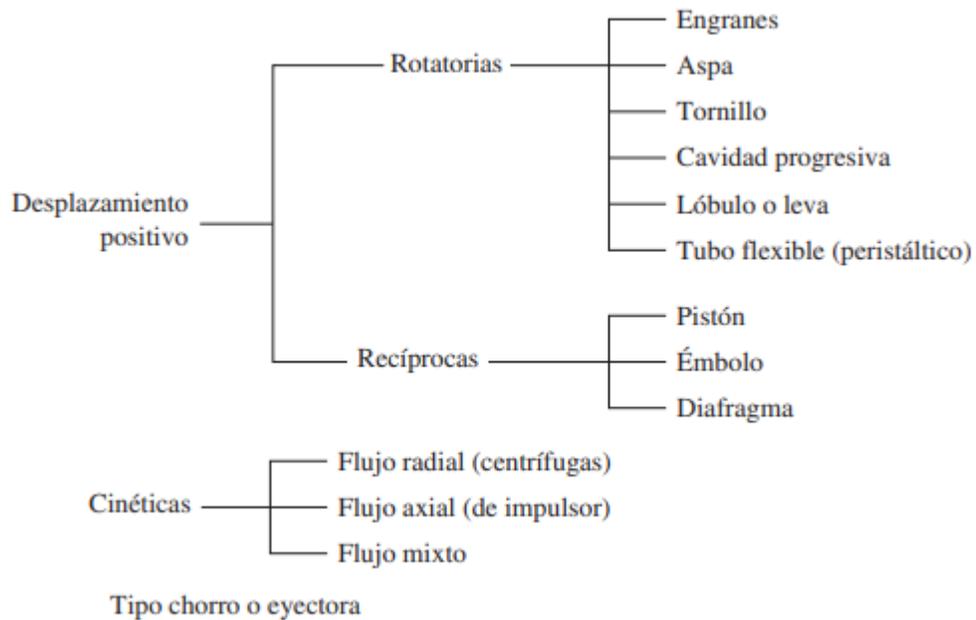


Figura 1.4. Clasificación de tipos de bombas [9].

1.1.3.2. Bomba sumergible

Las bombas sumergibles están diseñadas de tal modo que pueda sumergirse todo el conjunto de la bomba centrífuga, el motor impulsor y los aparatos de succión y descarga. La succión de la bomba está en el fondo, donde fluye el agua a través de un filtro y hacia el ojo del impulsor resistente a la abrasión. La descarga fluye hacia arriba a través de un pasaje anular entre el núcleo y la carcasa del motor. Arriba de la unidad, el flujo se reúne y fluye hacia un tubo o manguera de descarga que se localiza en el centro [9].

1.1.4. Sopladores de aire

Los ventiladores, sopladores y compresores se utilizan para aumentar la presión del aire, moviendo a este mismo u otros gases. Las diferencias entre ellos se encuentran en su forma y las presiones que pueden desarrollar gracias a este diseño. Las presiones de los sopladores van desde 1.41 metros de agua hasta aproximadamente 7.03 metros de agua. En los sopladores centrífugos el aire se dirige al centro del rotor, también llamado impulsor, y es lanzado hacia afuera por las aspas giratorias, por lo tanto, agregan energía cinética. El gas a alta velocidad se colecta por la voluta que rodea al rotor, donde la energía se convierte en una presión de gas aumentada para entregarse a través de un sistema de ductos para su descarga en el fondo del tanque de agua [10].

1.2. Elementos de control

1.2.1. Microcontrolador

Un microcontrolador es un circuito integrado programable que contiene todos los componentes necesarios para controlar el funcionamiento de una tarea determinada. Un sistema con microcontrolador debe disponer de una memoria donde se almacena el programa que gobierna el funcionamiento del mismo, que una vez programado y configurado servirá exclusivamente para realizar la tarea asignada [11].

El microcontrolador utilizado en la placa de hardware de Arduino es el Atmega (los más utilizados son Atmega 168, Atmega 328, Atmega 1280 y Atmega 8). El microcontrolador (figura 1.5) recibe información de las entradas (read), las procesa y escribe un 1 o un 0 (5 o 0 V) en las salidas (write), actuando sobre el dispositivo que se tiene conectado [12].

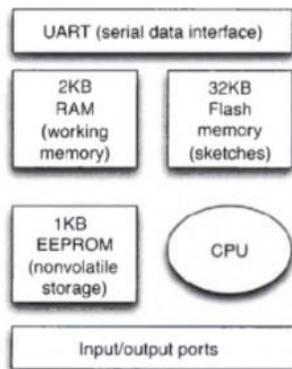


Figura 1.5. Diagrama de bloques simplificado del controlador de la placa Arduino uno (ATmega 328p) [12].

1.2.2. Válvulas de mariposa y electroválvulas

La válvula de control realiza la función de ajustar el caudal del fluido de control, el cuerpo de esta contiene en su interior el obturador y los asientos (figura 1.6). El obturador realiza la función de control de paso del fluido y puede actuar en la dirección de su propio eje o bien tener un movimiento rotativo. Dentro de las válvulas de obturador con movimiento rotativo se encuentra la válvula de mariposa, su cuerpo está formado por un anillo cilíndrico dentro del cual gira transversalmente un disco circular. La válvula puede cerrar herméticamente mediante un anillo de goma ajustado al cuerpo. Un servomotor exterior, en nuestro caso el actuador mecánico, acciona el eje de giro del disco y ejerce su par máximo cuando la válvula está casi cerrada, siempre que la presión diferencial permanezca constante; se necesita una fuerza grande del actuador para accionar la válvula en caso de una caída de presión elevada. Las válvulas de mariposa se emplean para el control de grandes caudales de fluidos a baja presión [13].



Figura 1.6. Esquema válvula de mariposa [14].

Características del cuerpo de la válvula de mariposa:

- Los cuerpos requieren un espacio mínimo para su instalación.
- Ofrecen baja pérdida de presión a través de las válvulas.
- Los cuerpos se acoplan con bridas de superficie elevada ASME y DN.
- Los cuerpos de válvula de mariposa son económicos, especialmente en tamaños y capacidad de caudal grandes [14].

En el caso de la electroválvula (SOV, por sus siglas del inglés solenoid-operated valve), como su nombre lo indica es una válvula electromagnética que se acciona con la fuerza electromagnética de un solenoide, la apertura y el cierre son controlados por una señal discreta enviada por un sistema de control. Las SOV son instaladas para permitir un rápido cierre de la válvula de control independiente de algún controlador de la válvula digital, pero tanto la válvula como el controlador pueden poner un estado de cierre de seguridad, este tipo de configuración es denominado "1-out-of-2", figura 1.7 , la cual indica que uno de los dispositivos, sin importar cual puede poner la válvula de control en estado de seguridad [14].

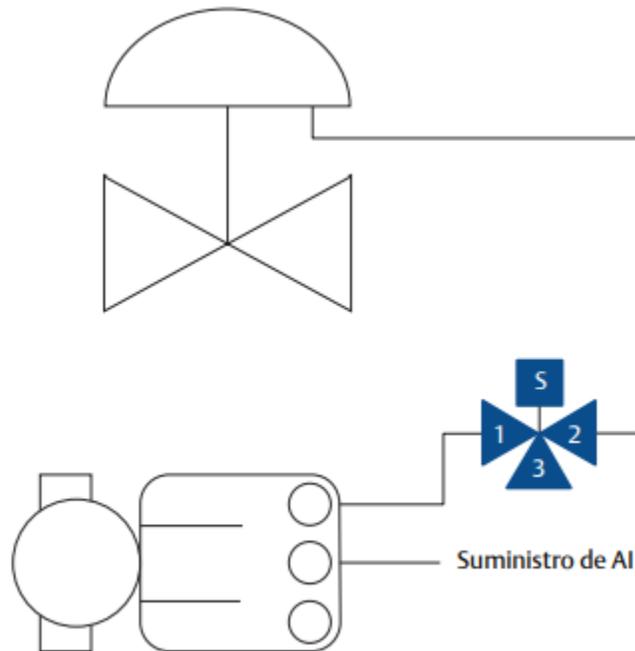


Figura 1.7. Electroválvula y controlador de válvula digital en una configuración 1-out-of-2 [14]

1.2.3. Interruptor de nivel

Los sensores de nivel son dispositivos electrónicos o mecánicos cuyo propósito es detectar el nivel de un líquido dentro de un tanque. Las técnicas de detección de nivel se pueden dividir en dos, los discretos que solo detectan niveles preestablecidos como alto o bajo, entre los más comunes se encuentran los interruptores de nivel, otro tipo de sensores de nivel son los continuos, transductores de nivel continuo, se conoce el nivel en todo momento [15].

Los más ocupados en los sistemas SBR son los interruptores de nivel flotador, figura 1.8, está conformado por dos placas metálicas que funcionan como interruptor y una pequeña esfera metálica que cierra el circuito, los componentes se encuentran dentro de un flotador de plástico, cuya orientación es arriba o abajo, dependiendo del nivel del agua, cerrará o abrirá el circuito [15].

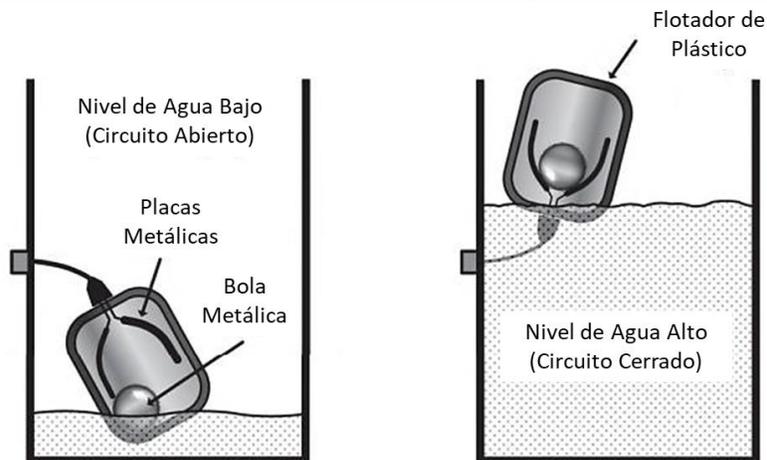


Figura 1.8.- Interruptor de nivel flotador [15].

1.3. Sistemas de actuación neumática

Un actuador es un dispositivo con la capacidad de generar una fuerza que ejerce un cambio de posición, velocidad o estado de algún tipo sobre un elemento mecánico, a partir de la transformación de energía [16].

Los sistemas de actuación son los elementos de los sistemas que transforman la salida de un microprocesador o un controlador en una acción de control para una máquina o dispositivo. Con frecuencia las señales neumáticas se utilizan para manejar elementos finales de control. Esto se debe a que con esas señales es posible accionar válvulas grandes y otros dispositivos de control que requieren mucha potencia para mover cargas considerables [17].

Los actuadores neumáticos convierten la energía del aire comprimido en trabajo mecánico generando un movimiento lineal o bien un movimiento giratorio [18].

Los cilindros son componentes neumáticos que mediante el uso del aire comprimido generan un movimiento rectilíneo de avance y retroceso de un mecanismo, generalmente se dividen en cilindros de simple efecto y cilindros de doble efecto. Los de simple efecto reciben aire a presión por una de sus cámaras, que suele ser la que produce el trabajo, desplazando el vástago. El retroceso se produce de forma mecánica, bien por la acción de un resorte, o bien por la acción de gravedad sobre masas solidarias al vástago [19].

El término doble acción se utiliza cuando se aplica presión de control a los dos lados de un pistón (figura 1.9). La diferencia de presión entre ambos produce el movimiento del pistón, el cual se puede mover en cualquier dirección por el cilindro como resultado de las señales de alta presión [17].

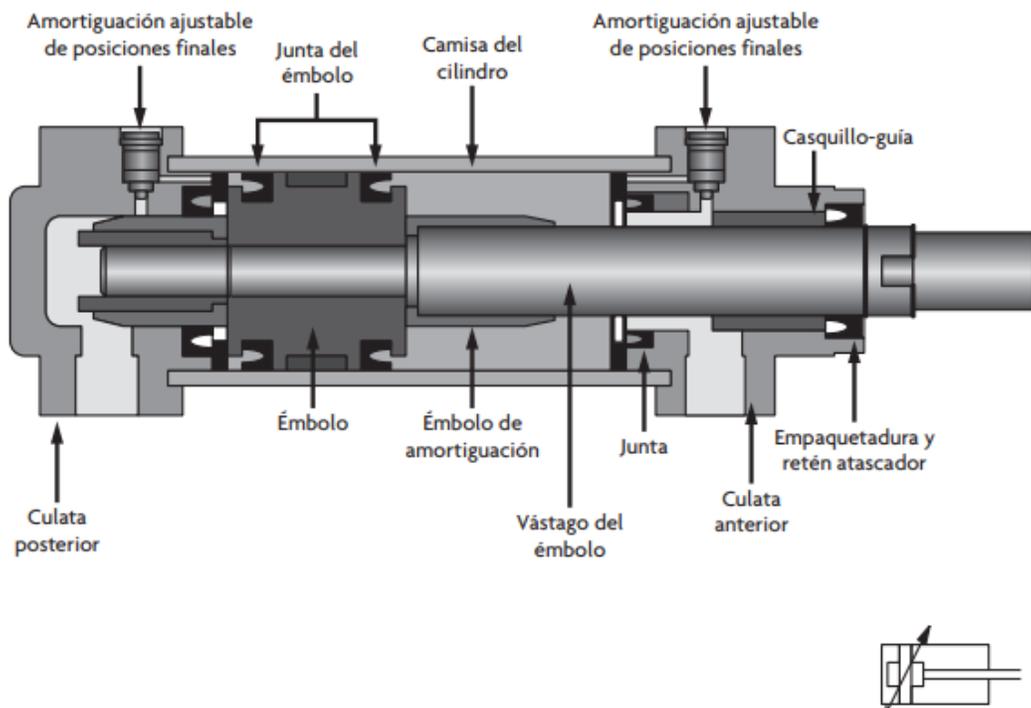


Figura 1.9. Cilindro neumático de doble efecto [16].

2. Marco teórico

2.1. Planta de tratamiento de aguas residuales

Una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) es un conjunto de obras, instalaciones y procesos físicos, químicos y biológicos, cuyo fin es obtener un producto con la calidad suficiente para cumplir con las normas de descarga o de reúso (M.I. Juan Hilario García Gil, PTAR-CU-UNAM)

2.2. Reactores de operación discontinua SBR

Los reactores secuenciales por lotes (SBR) son reactores para tratamiento biológico de aguas residuales. Que funcionan con volumen variable, estado no estacionario y crecimiento en suspensión. Su proceso de tratamiento se caracteriza por un ciclo de tratamiento repetido que consiste en una serie de fases de proceso secuenciales; llenado, reacción para remoción de contaminantes, reposo, decantación e inactividad. La fase de llenado es donde el reactor se llena con aguas residuales (delimitado por niveles de agua bajo y alto), puede ocurrir en condiciones estáticas, sin mezcla; solo mezclado; o con aireación. La fase de reacción consiste en la aireación (mezcla implícita) si solo se busca remover material orgánico o; incorporar antes la mezcla sin aireación en primera etapa de reacción cuando también se busca remover nitrógeno. La fase de reposo es cuando se apaga toda la mezcla y la aireación para que sedimenten los sólidos, permitiendo que se forme un sobrenadante claro en la parte superior del SBR (Figura 2.1). La fase de decantado se produce después de que se ha formado una altura sustancial de sobrenadante clarificado sobre el manto de sólidos suspendidos. Las válvulas automáticas se abren y el sobrenadante se decanta de la parte superior del tanque. La fase de inactividad es opcional dependiendo del diseño del SBR. Se puede eliminar cuando se dispone de un depósito de equilibrio de influentes o algún método para manejar el exceso de caudal, también se puede eliminar cuando se utilizan dos o más reactores [20].

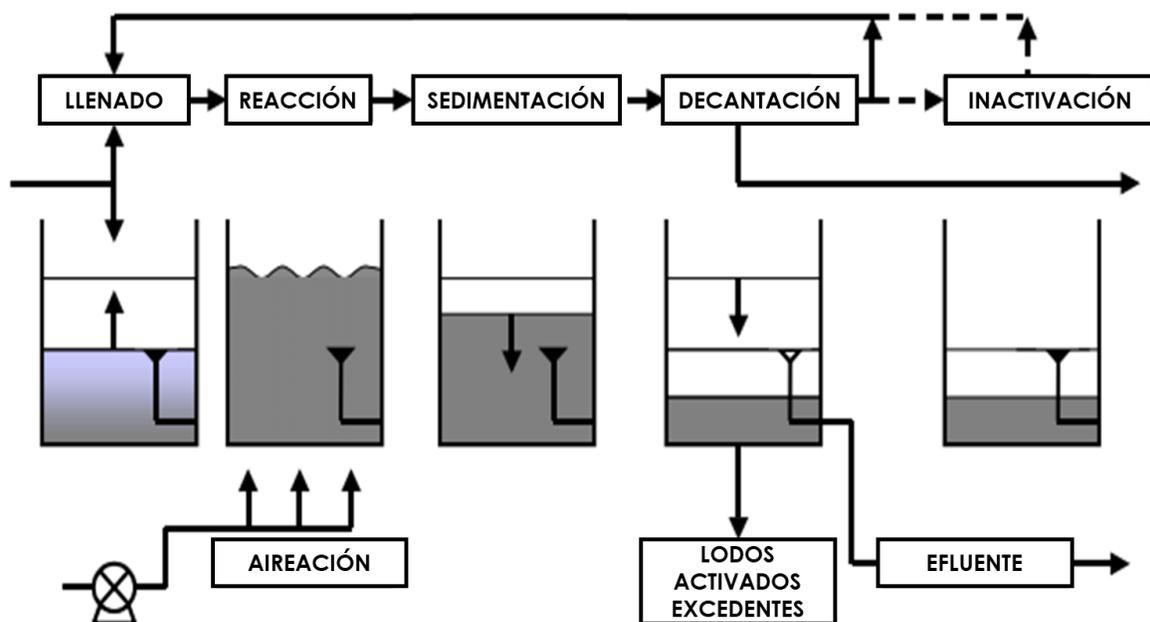


Figura 2.1. Ciclo típico de un reactor SBR [20].

El diagrama de la figura 2.1 se pasó a un diagrama de flujo (Figura 2.2), que muestra el orden de las tareas a realizar, donde se pregunta frecuentemente si se detuvo el proceso si no es así el programa funcionará de manera convencional y repetitiva hasta que el sistema sea interrumpido.

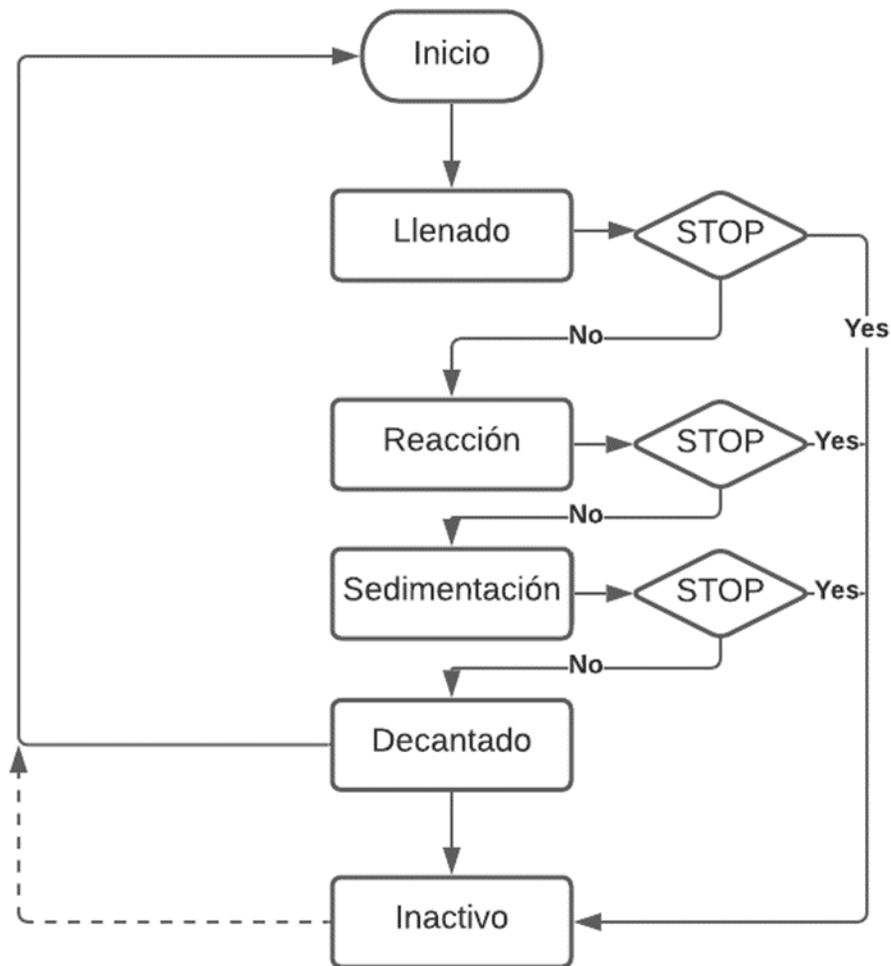


Figura 2.2. Diagrama de flujo del proceso

2.3. Potencial óxido-reducción en el control de duración de ciclos

El sistema tiene varios parámetros directos que en teoría nos permitirían controlar los tiempos de cada fase de manera óptima como lo son: DQO y DBO para materia orgánica, TSS para sólidos suspendidos, y formas de nitrato y fosfato, pero con la tecnología actual es complicado estimar estos parámetros con precisión ni con un tiempo de respuesta adecuado para un control en tiempo real. El monitoreo de parámetros indirectos, como el oxígeno disuelto (OD), potencial oxido-reducción (ORP) y el pH pueden indicar de manera adecuada los procesos de reacción del

sistema, además son parámetros mucho más económicos de estimar y tienen un tiempo de respuesta adecuado [21].

De acuerdo a figura 2.3, durante la aireación el ORP va en aumento: a) desde valores negativos mientras las bacterias correspondientes consumen el material orgánico; b) una vez que las bacterias consumen el material orgánico y no demandan oxígeno el ORP se torna positivo y sigue en aumento; y c) cuando se agota el material orgánico, entran en actividad bacterias afines por el amonio y lo oxidan a nitratos, en este lapso el ORP continúa en aumento y tiende a estabilizarse cuando se oxida el amonio; es momento de apagar la aireación. Cuando ésta se interrumpe ya no habrá oxígeno disuelto y solo se tendrá aquel contenido en los nitratos. En esta condición conocida como anóxica el ORP descenderá de valores positivos a los mínimos negativos del ciclo anterior [18] [22].

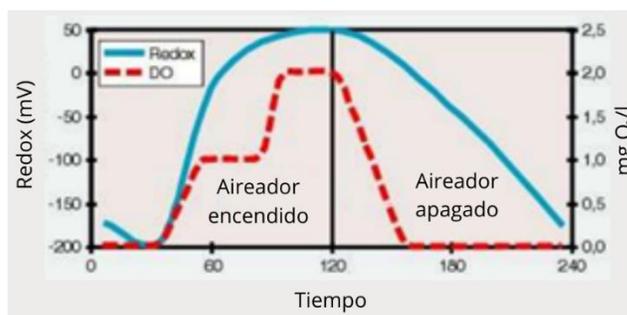


Figura 2.2. Perfiles de concentración de oxígeno y potencial oxido-reducción.

El apagado del aireador se puede justificar bajo los perfiles típicos del ORP indicados anteriormente, el ORP también está relacionado con la etapa anóxica, tiene una pendiente negativa y es continuo con respecto al tiempo [23], cuando se produce un perfil pronunciado quiere decir que la nitrificación acabó y por lo que es seguro pasar a la siguiente etapa [21].

2.4. Compilación actual en los controles de plantas con reactores SBR (Planta de tratamiento de aguas residuales de la Facultad de Ciencias Políticas y Sociales de la UNAM)

2.4.1. Control de tiempo fijo

La estrategia de control FTC (fixed-time control, control de tiempo fijo) es similar a un temporizador, se le asigna un tiempo determinado a cada parámetro del sistema con base en la experiencia y se suele asignar un valor entero al número de ciclos, pero puede variar de acuerdo con el número de tanques. El tiempo de llenado suele modificarse de acuerdo con el flujo del agua y de su calidad, el objetivo de tratamiento determina el tiempo de reacción, el tiempo de sedimentación es asignado de acuerdo con el rendimiento de sedimentación del lodo activo, el tiempo de decantación suele ser fijo y depende de la velocidad de decantación del decantador [21].

2.4.2. Controles basados en modelos matemáticos

Los modelos matemáticos muestran un alto grado de no linealidad, además el modelo matemático de procesos SBR toma en cuenta varios supuestos ideales, por lo que el control por esta estrategia presente grandes desventajas una de ellas es que no se puede simular el sistema SBR debido a la

complejidad del modelo, además se tiene una capacidad limitada para estimar los valores futuros del sistema y en muchas ocasiones los valores predichos muestran una gran desviación de los valores reales del proceso. Los controles basados en otras estrategias como el control difuso, redes neuronales y estrategias de control experto muestran un tiempo de respuesta adecuado y su gasto computacional se adapta a la tecnología actual [21] [24].

2.4.3. Control en tiempo real y control inteligente

La tecnología ha avanzado de manera muy rápida lo que ha mejorado en gran medida el desempeño de sensores y medidores de nivel esto ha permitido el desarrollo para estrategias en tiempo real para procesos SBR, esta estrategia se basa en valores empíricos y puntos característicos en las curvas de los parámetros indirectos del sistema, OD, pH y ORP. Puede tomarse uno ó más parámetros para estimar la duración óptima de cada etapa del sistema. En la Figura 2.3 podemos observar el funcionamiento básico de la estrategia de control en la cual se lee el valor del parámetro y se compara con los valores característicos de cada fase, también se compara el tiempo transcurrido con los tiempos mínimos y máximos de reacción obtenidos de manera empírica que ayudarán a optimizar el funcionamiento del sistema [21].

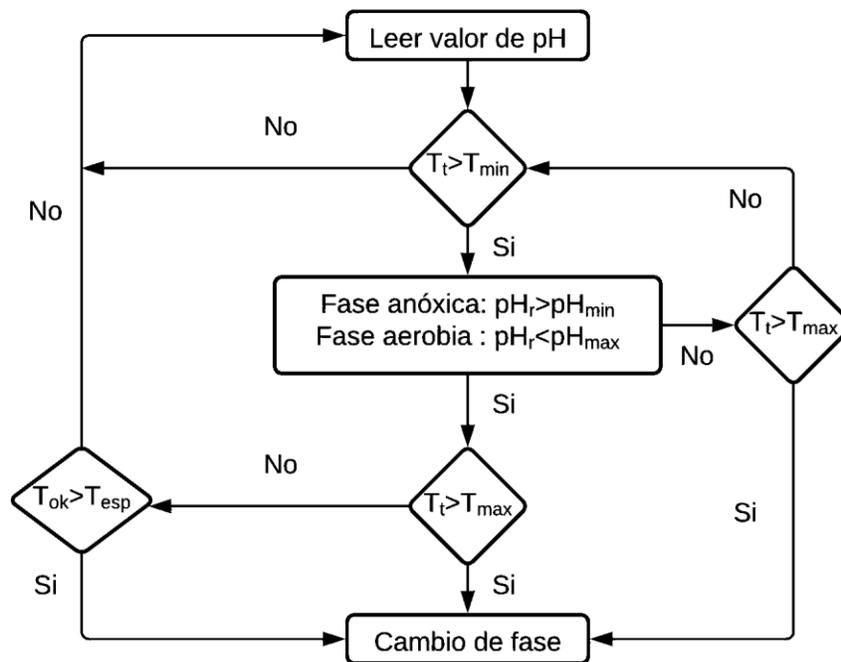


Figura 2.4.-Ejemplo de control en tiempo real con el parámetro de pH, donde T_t : tiempo transcurrido, T_{min} : tiempo mínimo de reacción, T_{max} : tiempo máximo de reacción, T_{ok} : Tiempo para que la señal ajuste el algoritmo y T_{esp} : tiempo de espera para la estabilización de los sensores [21].

En las estrategias basadas en control inteligente podemos encontrar el control difuso, el sistema de experto, redes neuronales entre otros más. La lógica difusa es un método que tiene su base en simular el razonamiento humano a partir de reglas de causa y efecto lo cual da como resultado una decisión final, la esencia de la lógica difusa se encuentra en dos conceptos, las funciones de membresía y las variables lingüísticas. Las variables lingüísticas en vez de asociarles un valor numérico se les asocian

palabras, que son descritas en valores numéricos por medio de las funciones de membresía. Las reglas de inferencia tienen la estructura “Si-Entonces” que son formuladas a partir de la experiencia que se tenga con el sistema, esta estrategia de control es recomendada para sistemas altamente no lineales como es el sistema SBR [25]. Usualmente los parámetros del sistema suelen describirse en una variable lingüística que describan que sucede en cada fase por ejemplo si una concentración es baja o alta o si la concentración disminuye, aumenta o se mantiene con los cuales podemos armar nuestras reglas de inferencia y saber el estado del sistema. Una variable puede pertenecer parcialmente a un conjunto difuso y su grado de pertenencia es representado con valores de 0 a 1.

2.4.4. Planta de tratamiento de aguas residuales de la Facultad de Ciencias Políticas y Sociales de la UNAM

La planta de tratamiento de Aguas residuales de la zona de la facultad de Ciencias Políticas y Sociales surge en 1996 con el propósito de mitigar el impacto ambiental. Provocado por aguas residuales que generaban los edificios de la zona, las cuales eran vertidas en las grietas de la capa rocosa [26].

Equipo electromecánico, ver Figura 2.5:

- f. Soplador para reactor biológico 1, soplador para reactor biológico 2, soplador extra y soplador para tanque de igualación, ubicados en el cuarto de máquinas.
- g. Bombas sumergibles ubicadas en el tanque de igualación para trasvase a reactores biológicos 1 y 2.
- h. Bomba de transferencia de lodos digeridos hacia acondicionamiento.
- i. Compresor de aire para filtro prensa, ubicado en el cuarto de máquinas.
- j. Bomba para purga de lodos sedimentados hacia digestión.
- k. Bomba de abastecimiento de agua clarificada al filtro de grava y arena.
- l. Bomba de cárcamo y bomba de cárcamo extra.
- m. Bomba de cárcamo de salida y bomba de cárcamo de salida extra sin instalación eléctrica.

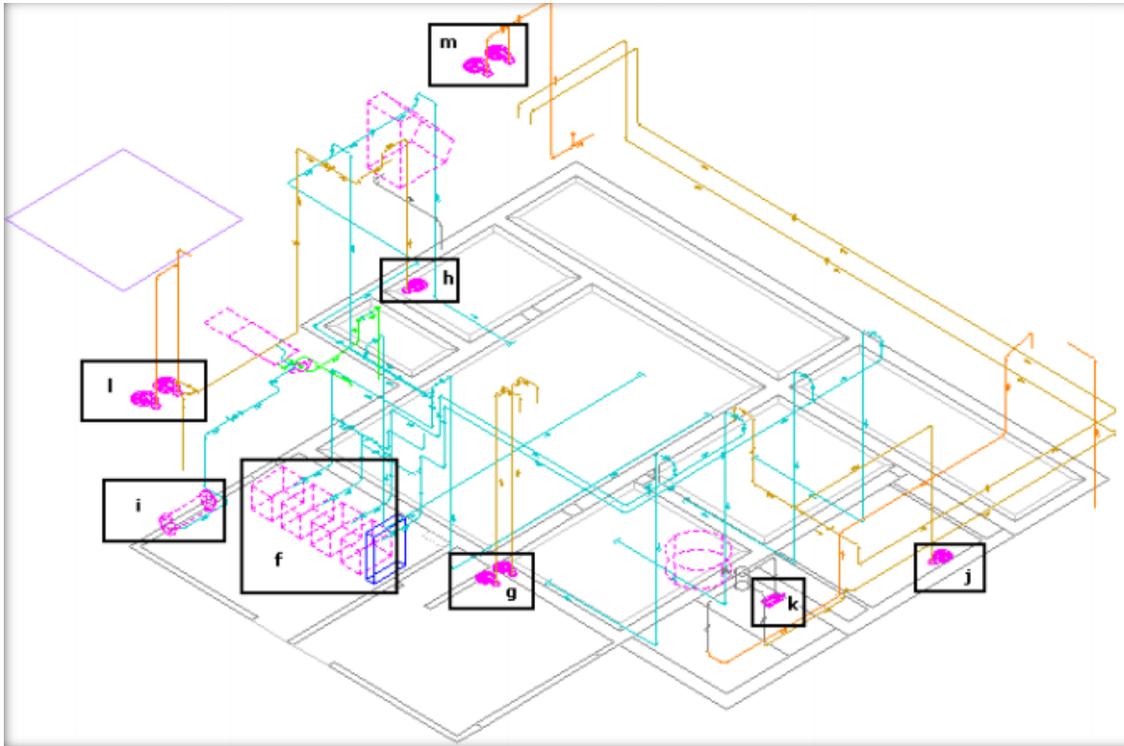


Figura 2.5. isométrico de la PTAR de la FCPyS con equipos electromecánicos [26].

La planta recibió un acondicionamiento: el tanque de igualación se redujo a la mitad del volumen y en la mitad restante se acondicionó un reactor anaerobio con lecho de lodos y flujo ascendente (UASB, por sus siglas en inglés upflow anaerobic sludge blanket); el par de reactores aerobios de lecho fijo se acondicionaron como reactores de operación discontinua de lodos activados (SBR, por sus siglas en inglés sequencing batch reactor); el clarificador secundario se acondicionó como tanque de post-regulación de caudales; y se mantuvo el tanque de cloración y almacenamiento (Figura 2.6). Agregando válvulas con actuadores a la salida de reactores anaerobio y SBR.

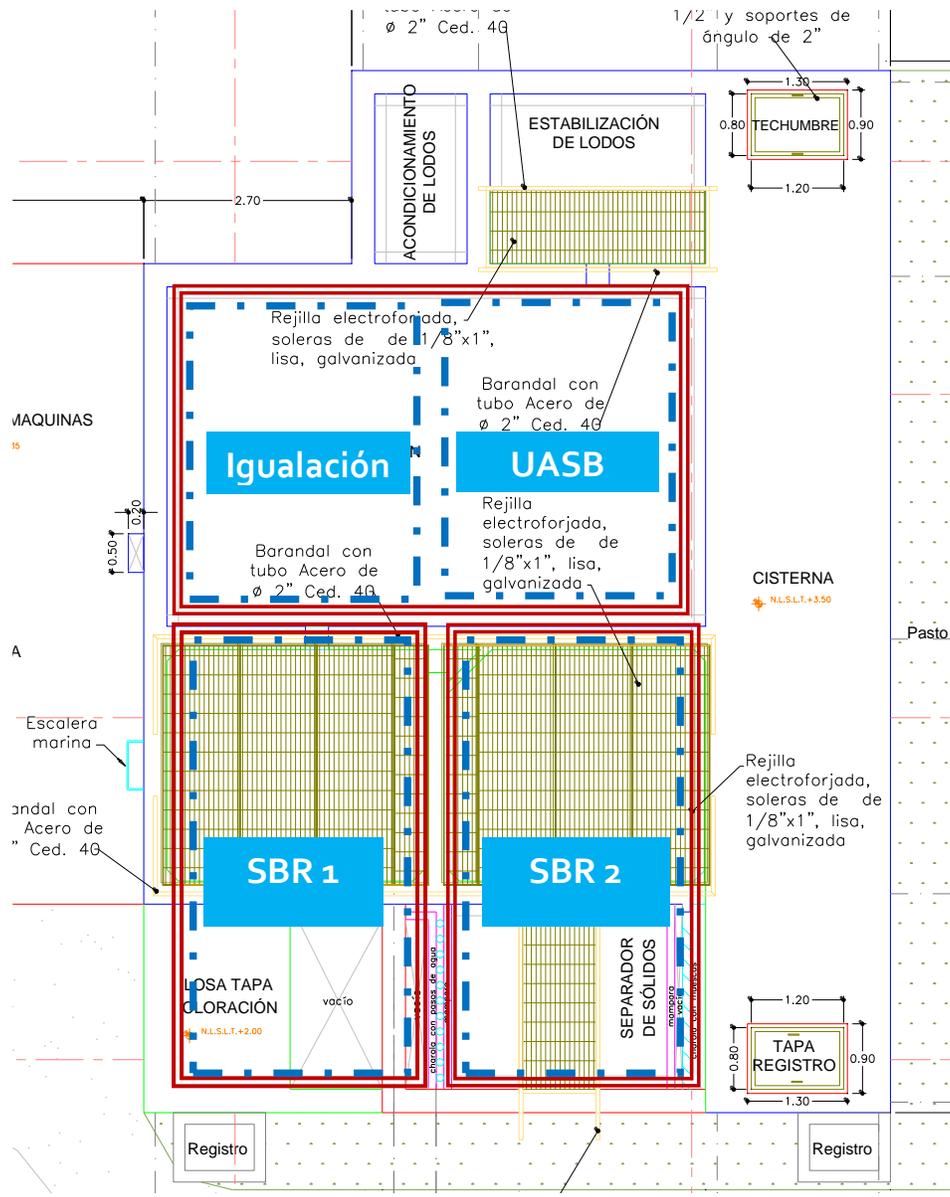


Figura 2.6. Acondicionamiento de dos reactores aerobios SBR [26]

La planta opera con los siguientes componentes: 1) bomba en cárcamo de recepción de agua residual, que enciende cuando hay nivel de agua para conducirla a la criba, desde donde se llena el tanque igualador; 2) bomba en tanque igualador, encendida las 24 horas y abastece de forma continua el reactor UASB; 3) dos válvulas mariposa de salida de agua de UASB para dividir efluente entre los dos reactores SBR que se alternan la mitad de la duración de ciclos (figura 2.7), por ejemplo, la válvula UASB-SBR1 abre por 160 minutos y a la vez se cierra UASB-SBR2; 4) dos válvulas de abastecimiento de aire a la salida de soplores, que se activan y abren en las etapas correspondientes a la aireación de SBR1 y SBR2; 5) dos válvulas para salida de agua de SBR1 y SBR2 que se activan cuando corresponde al vaciado de cada reactor.

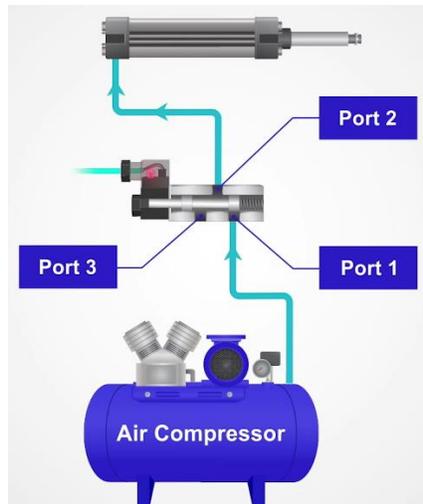


Figura 2.7. Principio de funcionamiento de la válvula UASB (similar para válvulas de SBR) [27]

2.5. Interfaz grafica

2.5.1. Lenguaje de programación C#

Microsoft .NET Framework o abreviadamente .NET. Se trata de un entorno de desarrollo multilenguaje diseñado por Microsoft para simplificar la construcción, distribución y ejecución de aplicaciones para Internet. C # es uno de los lenguajes de programación de alto nivel que pertenecen al paquete .NET (otros lenguajes son Visual Basic, C / C ++, etc.). C # es una evolución de C / C ++. Con él se pueden escribir tanto programas convencionales como para Internet. El paquete .NET incluye un compilador (programa traductor) de C # que produce un código escrito en un lenguaje intermedio, común para todos los lenguajes de dicha plataforma [28].

2.5.2. Base de datos

Una base de datos es un sistema computarizado para llevar registros o también podríamos verlo como un contenedor de archivos de datos en la que los usuarios del sistema pueden realizar una serie de operaciones con estos archivos tales como agregar nuevos archivos, modificarlos o eliminarlos y dentro de estos archivos se puede hacer las mismas operaciones con los datos que estos contienen permitiéndole al usuario recuperar y actualizar información de la base de datos [29].

El objetivo principal de una base de datos es proporcionar a los usuarios finales una visión abstracta de los datos, esto se logra escondiendo ciertos detalles de cómo se almacenan y mantienen los datos [30].

3. Metodología y requerimientos del usuario

3.1. Descripción de entradas y salidas del sistema existente

En la figura 3.1 podemos ver un diagrama de las entradas y salidas de los elementos que componen el sistema, las señales de entrada son enviadas por medio de una interfaz al microcontrolador, que es el centro del dispositivo de control, este recibe señales de los sensores y envía señales a los elementos de control, que podrían ser electroválvulas, además de enviar señales a un sistema de potencia que va a encender y apagar los motores de corriente alterna. Las salidas generales del sistema son el efluente, los lodos activos excedentes además de una retroalimentación para el usuario.

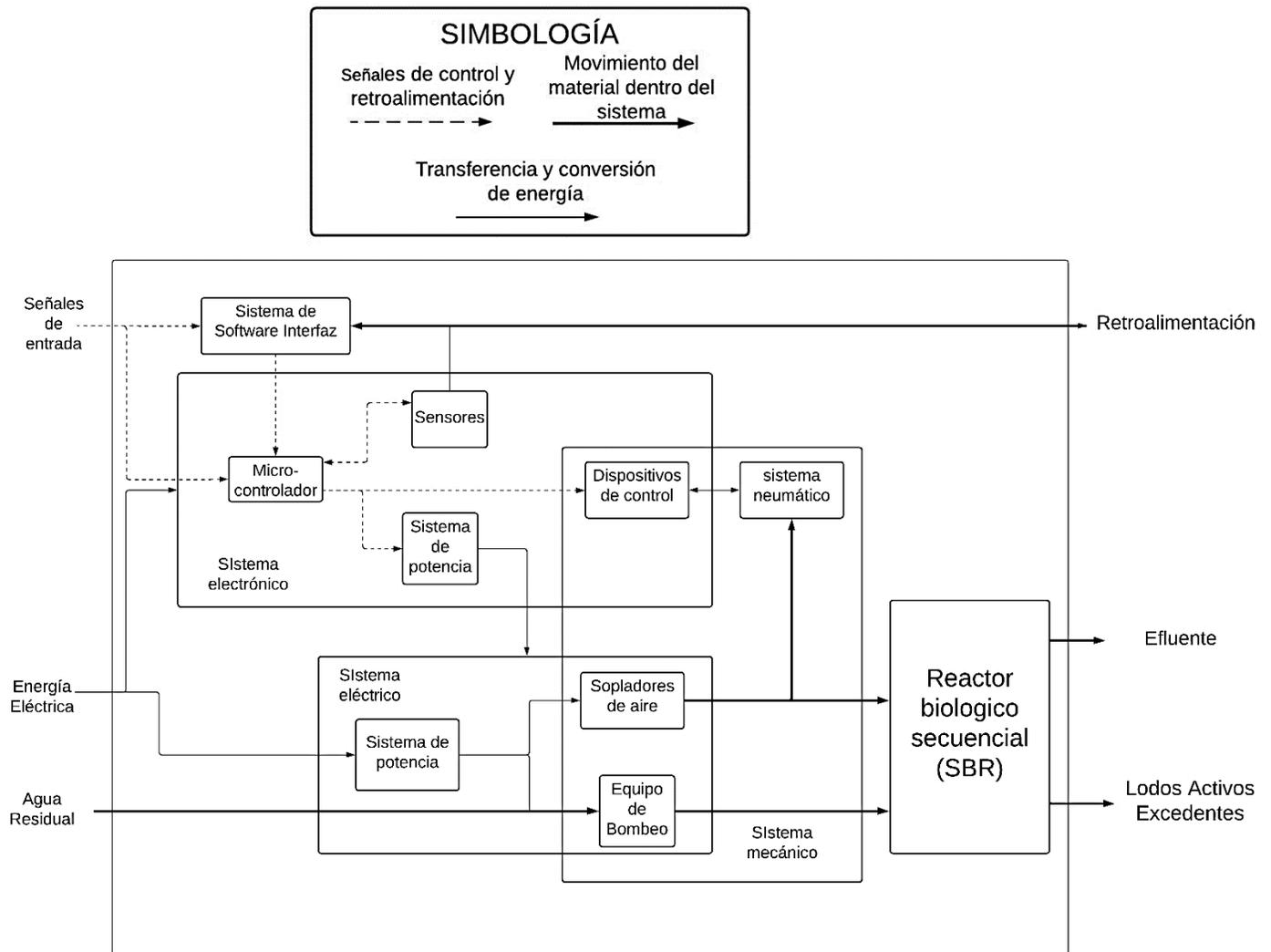


Figura 3.1. Diagrama de entradas y salidas de los diferentes elementos del sistema SBR

3.2. Identificación de las necesidades

Las especificaciones del módulo de control tienen que satisfacer principalmente las necesidades del operador de la planta, las necesidades se obtuvieron a partir de problemáticas presentadas en la operación de la planta de Ciencias Políticas y Sociales de la UNAM, la cual posee un controlador

lógico programable, pero por su complejidad operativa (necesidad de asistencia del programador en caso de requerir cambios), en realidad se trabaja como un control de tiempo fijo, por lo que ha mostrado las problemáticas mencionadas anteriormente.

También se tomaron en cuenta necesidades que se consideraron pertinentes para mejorar el funcionamiento de la planta, en la tabla 3.1 se enlistan los enunciados dados por el usuario, a partir de la planta de Ciencias Políticas y Sociales de la UNAM, se interpretaron los enunciados del usuario en soluciones a necesidades.

Tabla 3.1.- Enunciado del cliente interpretado en una necesidad más tangible

No.	Enunciado del usuario	Solución a necesidad
1	Que sea de fácil entendimiento	Simplicidad en la operación
2	Que el aireador se apague en cuando ya no se consuma oxígeno.	Ahorro de energía en la fase aireación. Control en tiempo real.
3	Que no se descomponga en ambientes húmedos.	Grado de protección para ambientes húmedos
4	Que sea barato.	Bajo costo de manufactura
5	Que tenga opción de manejar tiempos fijos en ciertas fases (llenado, y vaciado).	Control de tiempo fijo
6	Que detecte pH	Medición de parámetros indirectos
7	Que se conecte a la nube	Conexión a internet
8	Que sea pequeño	Dimensiones compactas
9	Que detecte oxígeno disuelto	Medición de parámetros indirectos.
10	Que detecte el potencial oxido reducción	Medición de parámetros indirectos.
11	Que establezca modos de operación prediseñados	Flexibilidad de horarios
12	Que muestre un historial de modos	Guardar datos
13	Que sea de fácil instalación	Baja complejidad de armado
14	Que tenga paro de emergencia	Paro de emergencia
15	Que sea ligero	Los materiales tienen baja densidad
16	Que sea intuitivo	Baja complejidad de operación
17	Que sea de uso rudo	Materiales resistentes
18	Que responda rápido	Tiempos de respuesta cortos

Se eliminaron los elementos que respondían a una misma necesidad. Las necesidades interpretadas se ordenaron de acuerdo con su importancia en tabla 3.2, donde cinco es indispensables y cero se interpreta como que no es necesario para el sistema. La prioridad del sistema está en su adecuado funcionamiento y la facilidad que tenga el operador de utilizarlo.

Tabla 3.2.-Tabla de jerarquización de las necesidades

Importancia	Necesidad
5	Baja complejidad de operación
5	Paro de emergencia
4	Grado de protección para ambientes húmedos
4	Control de tiempo fijo
4	Control en tiempo real
4	Ahorro de energía en la fase aireación
3	Medición de parámetros indirectos
3	Dimensiones compactas
3	Baja complejidad de armado
3	Guardar datos
3	Materiales resistentes
2	Materiales de baja densidad
2	Conexión a internet

3.3. Cálculo de los tiempos (duraciones) de los horarios

La estrategia de control FTC actualmente es ocupado en muchas plantas con sistema SBR debido a su fácil operación, el tiempo total del ciclo es calculado a partir de la suma de los tiempos de cada fase.

$$T_C = t_f + t_A + t_s + t_D + t_I \dots (1)$$

Donde T_C tiempo total del ciclo, y las duraciones de las etapas que componen al ciclo son: t_f tiempo de llenado, t_A tiempo de aireación, t_s tiempo de sedimentación, t_I tiempo de inactividad. Considerando dos tanques SBR (caso PTAR-Ciencias Políticas y Sociales) en que mientras un tanque se está llenando el otro realiza las demás tareas, se tiene que la duración de los ciclos es dos veces el tiempo de llenado por reactor.

$$T_C = 2 * t_f \dots (2)$$

Por lo tanto, el tiempo de llenado debe ser igual a la suma de los otros procesos.

$$t_f = t_A + t_s + t_D + t_{Inactivo} \dots (3)$$

El número de ciclos diarios por reactor se obtiene de dividir 24 horas del día entre la duración de los ciclos (en horas),

$$Ciclos = \frac{24}{\left(\frac{T_C}{60}\right)}; \left[\frac{Ciclos}{dia * tanque} \right] \dots (4)$$

El total de ciclos diarios en los tanques SBR se obtienen de multiplicar el número de ciclos diarios de cada tanque por el número de tanques con los que cuenta la planta, el que este número sea entero será la condición necesaria para que se pueda aceptar un ciclo a la base de datos [26].

$$Ciclos_{Totales} = Ciclos * No. Tanques \dots (5)$$

Primero se calcularán los tiempos del esquema de control en tiempo fijo para después ser ocupados como tiempos límites dentro de la estrategia de control en tiempo real, esto permitirá el correcto funcionamiento de la planta en caso de que el sensor de ORP se encuentre descalibrado o averiado.

El tiempo de llenado t_f según la presente tesis se dividirá en dos partes, en orden cronológico: a) tiempo de llenado con sólo mezcla encendida y sin aireación (t_{f-M}), tiempo en que un grupo de bacterias heterótrofas utilizan el oxígeno de nitratos, que quedaron en volumen remanente del ciclo anterior, para consumir parte de la materia orgánica que recién llega en el ciclo que inicia (se da la remoción de nitratos); y b) tiempo de llenado con aireación encendida (t_{f-A}) para que todas las bacterias heterótrofas aprovechen el oxígeno para consumir por completo la materia orgánica (DBO) restante.

La estimación de las duraciones de las fases como una referencia de tiempos fijos se describe a continuación:

$$\frac{\text{Número de ciclos}}{\text{reactor}} = 4.5$$

Donde, el valor de 4.5 es tomado de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales tipo SBR con un buen funcionamiento. De las descripciones y fórmulas previas se obtienen la duración de los ciclos y el tiempo de llenado.

$$T_{\text{ciclo}} = \frac{24 \text{ h}}{4.5 \text{ ciclos}} = 320 \text{ minutos}$$

$$T_f = \text{tiempo de llenado por reactor} = \frac{320 \text{ min}}{2} = 160 \text{ min}$$

Para hacer más eficientes los ciclos, perdiendo el menor tiempo posible en etapas de sedimentación y vaciado, se proponen:

t_s = tiempo para sedimentación de sólidos de 30 min (para estresar poblaciones de bacterias a formar flóculos con mejor sedimentación);

t_D = tiempo para decantación (vaciado) = 45 min (considerando floculos con mejor sedimentación);

De donde el tiempo faltante para completar el ciclo corresponde al tiempo de aireación.

$$t_A = \text{Tiempo de aireación} = 320 - 160 - 30 - 45 = 85 \text{ min}$$

División del tiempo de llenado o con mezcla o con aireación (recordar que primero es el mezclado):

T_{f-M} = tiempo de mezcla con solo mezclado-sin aireación= 60 min (tiempo límite para la máxima remoción de nitratos que se logrará en fase de llenado)

T_{f-A} = tiempo de llenado con aireación encendida= 100 min. Tiempo previo al t_A para que bacterias heterótrofas avancen con la remoción aerobia de materia orgánica, que finalizará en el transcurso del t_A . De esta forma, las bacterias heterótrofas consumen la materia orgánica en una fase inicial

de t_A y habrá tiempo para que bacterias autótrofas nitrificantes oxiden el amonio a nitratos en la parte final de la aireación t_A .

3.4. Especificaciones de diseño

El módulo de control tiene como propósito facilitar la programación de horarios de un reactor discontinuo, pero no cambiar la estrategia de control de la planta tomada como base para el desarrollo del módulo, por lo que uno de los requerimientos de diseño es que se haga uso de la estrategia de control de tiempo fijo.

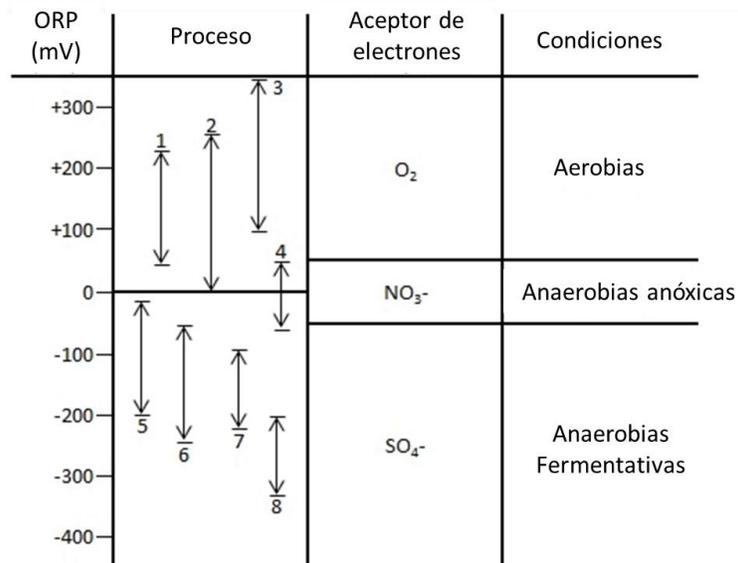
Para el mejoramiento del sistema se propone combinar el control de tiempo fijo con otra estrategia de control, cuyo propósito es optimizar la fase de aireación que representaría un ahorro de energía.

Se propone ocupar una estrategia de control en tiempo real, la cual implementará un sensor de ORP.

1. Basándonos en que el agua contaminada ofrece materia orgánica que las bacterias heterótrofas consumirán y que por lo tanto demandarán oxígeno mientras exista contaminante orgánico, en el proceso aerobio habrá una oxidación y por lo tanto el potencial redox tenderá a aumentar, en figura 3.2, inciso 1 correspondiente a degradación de materia orgánica bajo condiciones aerobias, se ilustra el intervalo de posible incremento de ORP desde +50 mV hasta +225 mV. En este intervalo, ver figura 4.1 entre puntos A y B, el cambio de una pendiente más fuerte (ascenso más rápido del ORP) a una más débil (ascenso más lento del ORP) indica el final del consumo de materia orgánica y marca el final de la etapa en que se oxida (remueve) el material orgánico, e inicia la etapa en que el amonio se oxida nitrato (nitrificación).
2. Así, cuando la concentración de materia orgánica ha disminuido entonces otro grupo de bacterias que consumen bióxido de carbono (llamadas autótrofas) inician su participación con reacciones de nitrificación (oxidación de amonio a nitratos), esta presencia de nitratos bajo condiciones aerobias aumenta el ORP desde +100 mV, valores que aumentan a medida que aumenta la concentración de nitrato producido hasta alcanzar un máximo de +350 mV cuando se alcanza nitrificación completa del amonio (figura 3.2, inciso 3). Esta etapa de nitrificación concluye por remoción del amonio y se determina cuando la pendiente de crecimiento del ORP cambia de más débil a una más fuerte (punto B en figura 4.1). En este momento es cuando se puede detener la aireación y empezar con la fase de sedimentación (reposo). De no detenerse la aireación lo que ocurriría es que el oxígeno continuaría aumentando hacia valor de saturación y en respuesta el ORP aumentaría también hasta llegar a una asíntota, lo cual podría ahorrar energía de sopladores si se detiene antes la aireación (punto B).
3. En el momento que se apaga la aireación para la fase de reposo (sedimentación), el descenso en la concentración de oxígeno disuelto provoca que el ORP empiece a disminuir desde que inicia la sedimentación y al final de etapa de vaciado llegue a valores cercanos a cero mV (Kishida et al., 2003).
4. Al reiniciar el ciclo, el valor de ORP será positivo y tendiente a cero, con la entrada de nueva agua residual y el inicio del mezclado, iniciará la desnitrificación por un grupo de bacterias heterótrofas y el ORP continuará su descenso. El ORP, que alcanzó al final del

ciclo previo cerca de 0 mV, continuará descendiendo tendiendo a -60 mV (figura 3.2) al completar remoción de nitratos (alcanzaría punto E de figura 4.1). En este momento inicia una caída abrupta en una pendiente de descenso (conocida como rodilla de nitratos) que indica, para el control a desarrollar, el final de la desnitrificación y la señal para detener mezcla. Este final del tiempo de llenado con mezclado lo marcará entonces el control a diseñar en esta tesis.

5. Al apagar el sistema de mezclado durante llenado, en ese momento se enciende aireación en fase de llenado e inicia de nuevo el ascenso del ORP al oxidar materia orgánica (degradar) en tiempo límite fijo de llenado con aireación. El tiempo de llenado con aireación, al igual que los tiempos para sedimentación y vaciado, serán tiempos fijos.
6. Al cumplirse el tiempo de llenado con aireación. Finaliza el llenado y solo continua la fase de reacción con aireación que se detendrá en punto B (figura 4.1), como se menciona arriba con ORP tendiendo a +350 mV en que se termina la nitrificación, el control propuesto definirá si el tiempo de aireación termina antes del tiempo fijado como límite. No se esperará a alcanzar el punto C porque la post-desnitrificación, que explican en curva de figura 4.1, en esta tesis se propone que sea pre-desnitrificación de nitratos remanentes de ciclo anterior, que ofrece buenos resultados en plantas para tratamiento de aguas residuales SBR.
7. Finalizada la aireación, inicia la sedimentación (reposo) y es seguida del vaciado, ambos en tiempos fijados. El ciclo se repetirá.



Key:

- | | |
|------------------------------|----------------------------|
| 1) Organic carbon oxidation | 5) Polyphosphate breakdown |
| 2) Polyphosphate development | 6) Sulfice formation |
| 3) Nitrification | 7) Acid formation |
| 4) Denitrification | 8) Methane formation |

Figura 3.2.-Valores típicos del ORP [31]

También se considera que el módulo será ocupado en ambientes húmedos por lo que debe de tener un grado de resistencia IP adecuado para estas condiciones. Otro aspecto que se busca es la manufactura económica del dispositivo, ocupando componentes electrónicos de fácil remplazo.

El propósito inicial del dispositivo es que este sea de fácil instalación, lo que se entiende como una instalación que solo requerirá de un manual de usuario y no de alguien experto en el tema, mientras que el mantenimiento que se le tiene que dar al dispositivo solo será el cambiar los componentes ya sea porque tienen una vida temporal o porque dejen de funcionar.

La programación de los horarios será sencilla y lo podrá realizar cualquier persona al igual que en la instalación solo con un pequeño manual de instrucciones, además se podrá alternar entre modos de manera que se conserve el esquema de control actual en la planta.

Tiene que ser de fácil fabricación, debe de ser fabricado con materiales livianos, el tamaño del dispositivo le permitirá su instalación en cualquier panel eléctrico que cumplan con las normas de seguridad, proponiendo un tamaño no mayor a los 30 centímetros cúbicos y que no sobrepase un peso mayor a un kilogramo.

4. Propuesta del módulo de control

En la figura 4.1 podemos ver una gráfica que describe gráficamente las características, previamente definidas, del comportamiento del ORP durante un ciclo [32]. Y es la base para la propuesta de control de esta tesis:

1. Para la pre-desnitrificación en nuestra tesis, la propuesta es iniciar el ciclo en el equivalente al punto **D** (cuando se agota el oxígeno disuelto al detener la aireación y en el medio líquido del reactor solo hay oxígeno disponible en los nitratos). A diferencia de [32] esta tesis considera terminar la fase de reacción t_R al transcurrir los tiempos correspondientes a consumo de la materia orgánica y nitrificación del amonio (punto **B**), cortando lo más rápido posible el suministro de energía a los sopladores para evitar consumo de energía por saturación con oxígeno que llevaría al punto C. Inmediatamente al paro de aireación seguirán las fases de reposo y de vaciado (ambas de tiempo fijo).
2. Así, el nuevo ciclo iniciará con los remanentes de nitrato del ciclo anterior con el ORP de punto C, cercano a +350 mV, disminuyendo el ORP con tendencia a cero por el descenso en oxígeno disuelto durante sedimentación y vaciado. El ciclo iniciará activando simultáneamente el llenado y la mezcla, que provocará la caída del ORP desde +50 mV hasta disminuir a -60 mV (figura 3.2, inciso 4) en que alcanza el punto **E** de figura 4.1, definido como la rodilla de nitratos, en que termina la desnitrificación al agotarse los nitratos, señal de paro del mezclado en el control. Se resalta que el inicio será con mezclado y no con aireación como [28].
3. Se dará señal de arranque de aireación durante el llenado, que durará el tiempo límite fijado. El ORP variará entre +50 mV y +225 mV (figura 3.2, inciso 1) correspondiente a degradación de materia orgánica bajo condiciones aerobias (entre puntos A y B de figura 4.1).
4. Al iniciar la aireación los valores de ORP incrementarán (+50 mV a +225 mV) alcanzando primero un punto de inflexión a pendiente más débil, entre puntos A y B de Figura 4.1. Y habrá que esperar el cambio de esta última pendiente a una más pronunciada (punto B en figura 3.2). Señal de nuestro control para detener la aireación.
5. Se dará el tiempo para reposo (sedimentación), establecido como tiempo fijo.
6. Se dará el tiempo para el vaciado del tanque, establecido también como tiempo fijo. Abriendo la válvula de vaciado del reactor SBR que finaliza ciclo.
7. Iniciará nuevo ciclo, abriendo la válvula de llenado al siguiente reactor SBR.

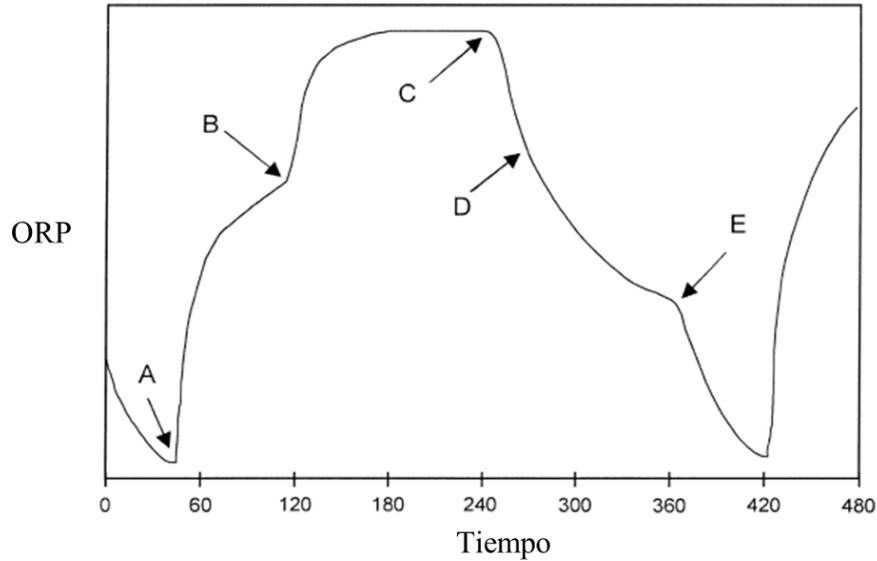


Figura 4.1.- Curva característica de ORP durante un ciclo [32].

4.1. Selección de componentes

4.1.1. Reloj

El reloj en tiempo real es muy importante para el correcto funcionamiento del sistema, este reloj debe tener varias características, entre las que destacan que el funcionamiento no dependa de factores externos como el internet o la corriente eléctrica de la planta.

Una opción es ocupar el reloj en tiempo real de un microcontrolador como vemos en la Figura 4.2 en el diagrama de bloques del ESP32 podemos observar que cuenta con un reloj en tiempo real (bloque RTC). La ventaja que nos ofrece ocupar este reloj interno es no tener que instalar un módulo externo para contar con la hora mientras que la desventaja que implica es requerir más procesos para obtener la hora y en caso de fallas eléctricas el dispositivo puede reiniciar el reloj.

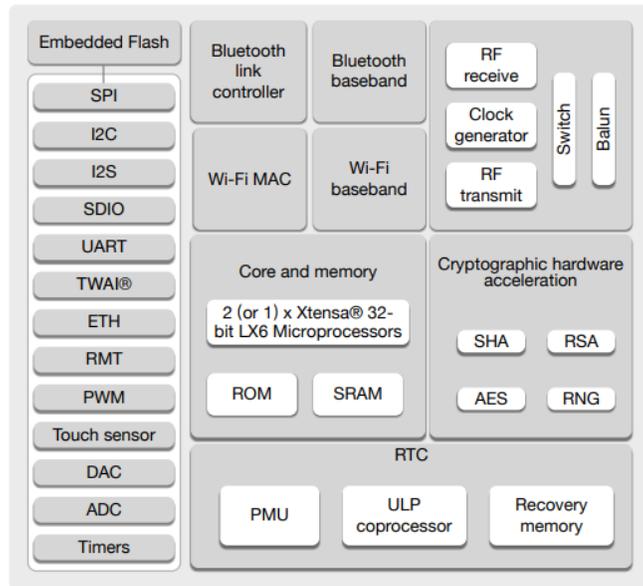


Figura 4.2.-Diagrama de bloques del chip ESP32 [33]

Existen módulos externos que pueden establecer conexión con la placa por medio de protocolos de comunicación, la ventaja de estos módulos es que tienen una fuente de energía externa y requieren menos procesamiento, el costo de estos módulos suele ser bajo y se puede justificar con las ventajas que ofrecen, además de tener la opción de conectarlos a placas más sencillas en las que no se puede ocupar el reloj interno.

Se ejemplifica lo anterior con el módulo DS1307, Figura 4.3, con protocolo de comunicación I2C, es un módulo de reloj en tiempo real el cual consiste en un circuito integrado que puede registrar continuamente fecha, hora y el día de la semana. El módulo tiene integrado un cristal de cuarzo de 32.768 Hz además de eso el dispositivo es alimentado por una batería con lo que el módulo puede funcionar como cualquier reloj digital convencional.

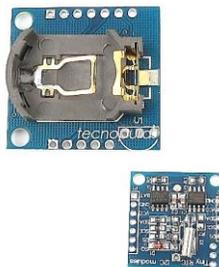


Figura 4.3.- Modulo DS1307 [34]

Se decidió ocupar un reloj externo para el desarrollo del módulo de control, por la ventaja que se ajusta a las características deseadas para el sistema desarrollado.

4.1.2. Tarjetas de desarrollo

Un sistema embebido es una plataforma electrónica cuya base es un microcontrolador, al cual se le establece una serie de instrucciones por medio de un lenguaje de programación que en conjunto con puertos periféricos e instrumentación electrónica nos permite el acondicionamiento de señales y comandos de sensores y actuadores.

El Arduino UNO Figura 4.4, es una placa de hardware libre y la primera que salió al mercado, se basaba en el microcontrolador ATmega328p de 8 bits a 16Mhz que funciona a 5V, aunque las salidas pueden funcionar con tensiones de 6-20 V, las tensiones recomendadas son de 7-12 V [12].

La placa cuenta con las siguientes características:

- 32 KB de memoria flash
- 2 KB de SRAM
- 1 KB de EEPROM
- Tiene 14 pines digitales (6 de estos puertos se pueden ocupar como salidas PWM).
- Dispone de 6 pines analógicos, que pueden trabajar con una intensidad de corriente de hasta 40 mA



Figura 4.4.- Placa Arduino UNO

Por otra parte, tenemos el SoC ESP32 fabricada por Espressif Systems, el cual ofrece conexión por WiFi con una frecuencia de 2.4 GHz, Bluetooth, memoria ROM de 448 KB y una SRAM de 520 KB, cuenta con soporte para distintos protocolos de comunicación como lo son SPI, I2C, I2S, entre otros más. El fabricante indica que se pueden explotar las capacidades que ofrece el chip con una placa de circuito impreso y 20 componentes más, que son las normales en el mercado como lo podemos ver en la Figura 4.5 [35].



Figura 4.5.-Módulo ESP32 WROOM 32

En la Tabla 4.1.-Matriz de decisión de la placa de desarrollo. se compararon las dos placas de desarrollo evaluando la memoria, el tamaño, cantidad de puertos, protocolos de comunicación y formas de simulación, en la que se observa que la ESP32 obtiene un mayor puntaje que el Arduino, cada punto se vio evaluado en una escala de 0 a 1 y se sumó el total obtenido, la placa de Arduino entre sus muchas ventajas está el hecho de que se puede simular a diferencia de la ESP32, se escogió esta última por las características de hardware con las que cuenta, además de la facilidad de ser programada con el mismo IDE de Arduino.

Tabla 4.1.-Matriz de decisión de la placa de desarrollo.

Placa	Memoria	Tamaño	No. de Puertos	Protocolos de comunicación	Simulación	Total
Arduino UNO	0.15	0.75	0.5	0.75	1	3.15
ESP32	0.8	0.75	0.8	1	0	3.35

4.1.3. Sensores de ORP

Un sensor de ORP consta de dos electrodos, Figura 4.6, uno de ellos es el electrodo de referencia, tiene contacto con una solución con un ORP conocido, el segundo electrodo consiste en un material inerte como el oro o el platino, metales con baja resistencia. El electrodo que tiene contacto con el agua está constantemente cediendo y recibiendo electrones, provocando una diferencia de potencial, si el sensor arroja valores positivos indica que el agua funge como agente oxidante y si son negativos es un reductor. Frecuentemente se vuelve complicado obtener el valor preciso del parámetro debido a que el sensor tiende a descalibrarse por factores externos como la temperatura y el flujo del agua, en especial cuando son ocupados por largos periodos de tiempo. Comúnmente se ocupa un electrodo de referencia de plata – cloruro de plata para estimar el ORP [36].

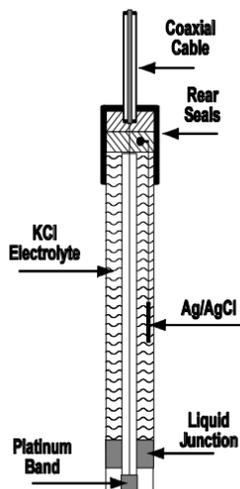


Figura 4.6.-Sensor de ORP

4.2. Diseño del dispositivo de control

Una vez instalado el dispositivo, la comunicación entre el operador y el dispositivo se realizará por medio de una interfaz gráfica para computadora, Figura 4.7, del mismo modo la interfaz dará retroalimentación al usuario. El dispositivo de control recibe información de los sensores, con esta información el sistema indicará que salidas a relevador activar.

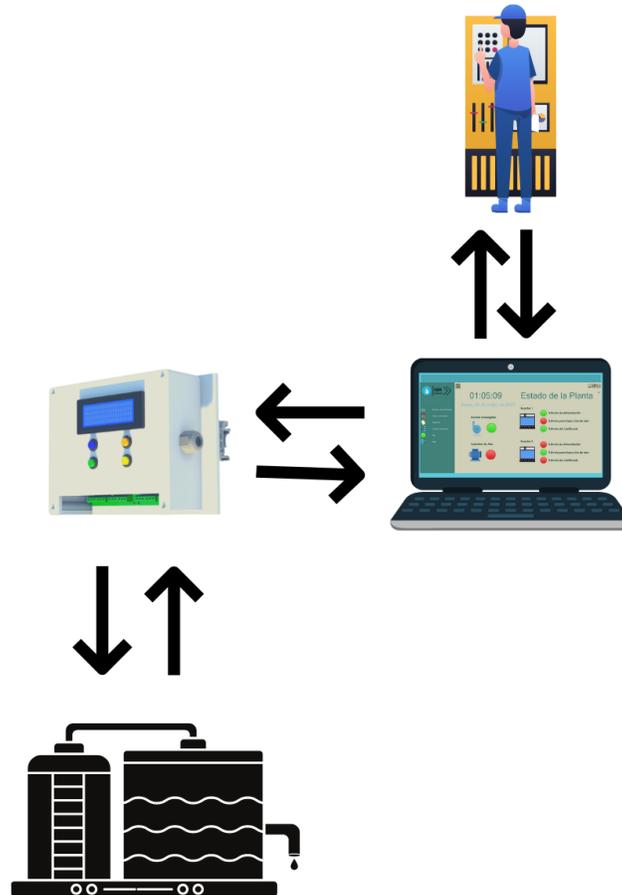


Figura 4.7.- Comunicación entre las distintas partes del sistema.

4.2.1. Conexiones a equipamiento

Como se había comentado anteriormente una electroválvula es accionada con la fuerza electromagnética de un solenoide, si la válvula no permite el flujo del líquido mientras se encuentre sin corriente se denomina “normalmente cerrada”, al contrario, se le denomina “normalmente abierto”, en la Figura 4.8 podemos observar que la conexión de la válvula es por medio de un relevador, debido a que funciona a un voltaje diferente al de la tarjeta de desarrollo. El relevador y la válvula tienen el mismo funcionamiento por lo tanto cuando se energiza un solenoide en seguida se energizará el siguiente, cada uno con un voltaje distinto, todo depende de las señales discretas que se manden del módulo de control.

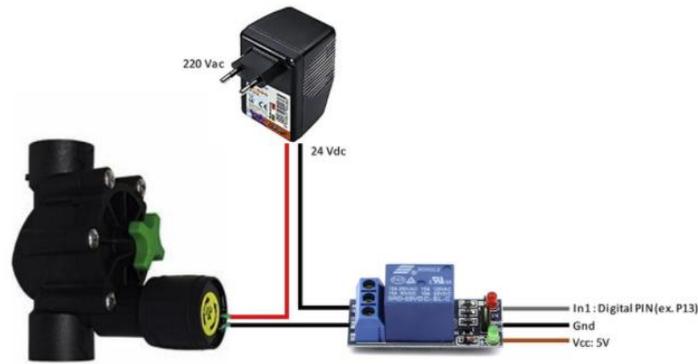


Figura 4.8.- Diagrama de conexión de la electroválvula.

El sensor de ORP puede verse como una fuente de energía con una resistencia muy alta por lo que es necesario hacer un acondicionamiento de la señal, en la Figura 4.9 podemos observar del circuito de acondicionamiento, lo primero que se implementa es un seguidor de voltaje, el propósito es acoplar las impedancias del sensor y el circuito consecuente, de esta manera se evitan errores en las lecturas del sensor. Algunos microcontroladores requieren que el rango del sensor sea menor a 3.3V, por lo que se implementaría un amplificador inversor después del seguidor, encargado de reducir el voltaje a un valor relativamente pequeño, seguido de un diferencial para compensar el voltaje a los valores que se requieran [37].

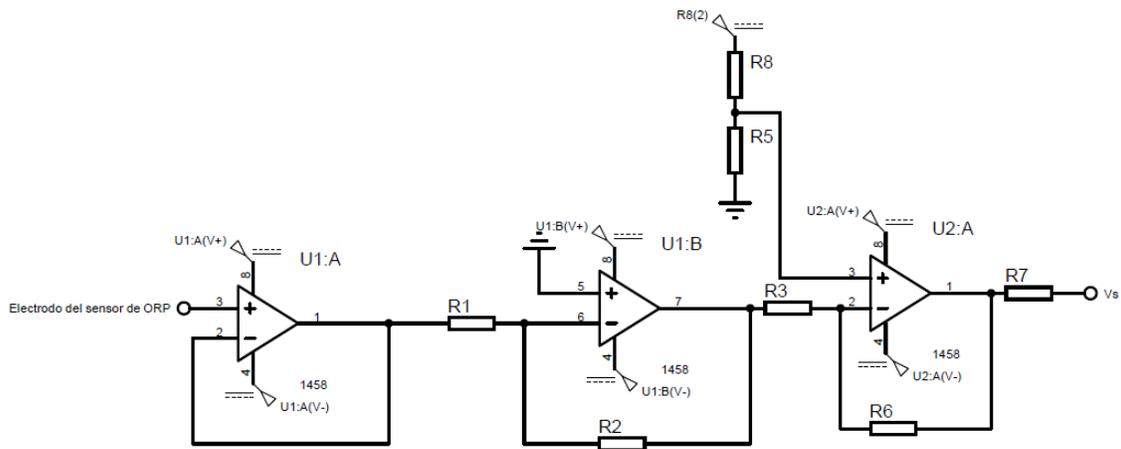


Figura 4.9.- Circuito del acoplamiento de la señal del sensor de ORP

Los sensores trabajan típicamente en rangos de -2000 mV a 2000 mV, las placas de desarrollo por otra parte necesitan un voltaje de 3.2 V por lo que se establece que la ganancia de la configuración inversora debe de ser de 0.8 [37], por lo tanto, las resistencias R1 y R2 tendrán que conservar la siguiente relación:

$$G = \frac{3.2V}{4V} = 0.8$$

$$G = 0.8 = \frac{R1}{R2}$$

$$\frac{R1}{R2} = 0.8$$

De acuerdo con los valores comerciales de las resistencias de montaje superficial se establecieron los valores de las resistencias, la resistencia uno igual a 1.2 [KΩ] y resistencia dos igual a 1.5 [KΩ], valores que cumplen con la relación establecida.

La conexión entre la bomba y el módulo de control al igual que la conexión de las electroválvulas se hará por medio de relevadores mecánicos, ya que no se requiere de un tiempo de respuesta inmediato. En la Figura 4.10 se observa que la parte que activa el solenoide se conecta una de las salidas digitales de la placa de desarrollo, mientras que el otro lado se conecta a una fuente de energía de corriente alterna que controla el encendido y apagado del motor por medio de un switch térmico. Se empleó el protocolo de comunicación I2C para la comunicación entre la tarjeta de desarrollo con la pantalla y el reloj en tiempo real, la pantalla LCD se conecta a la misma fuente de alimentación que la ESP32 mientras que el reloj se conecta con una batería.

En la Figura 4.11, se observa que el mezclador consiste en un motor conectado a un aspa de acero, el voltaje del mezclador dependerá de las necesidades de tratamiento de la planta, por lo que la conexión de este componente será del mismo modo al de la Figura 4.10.

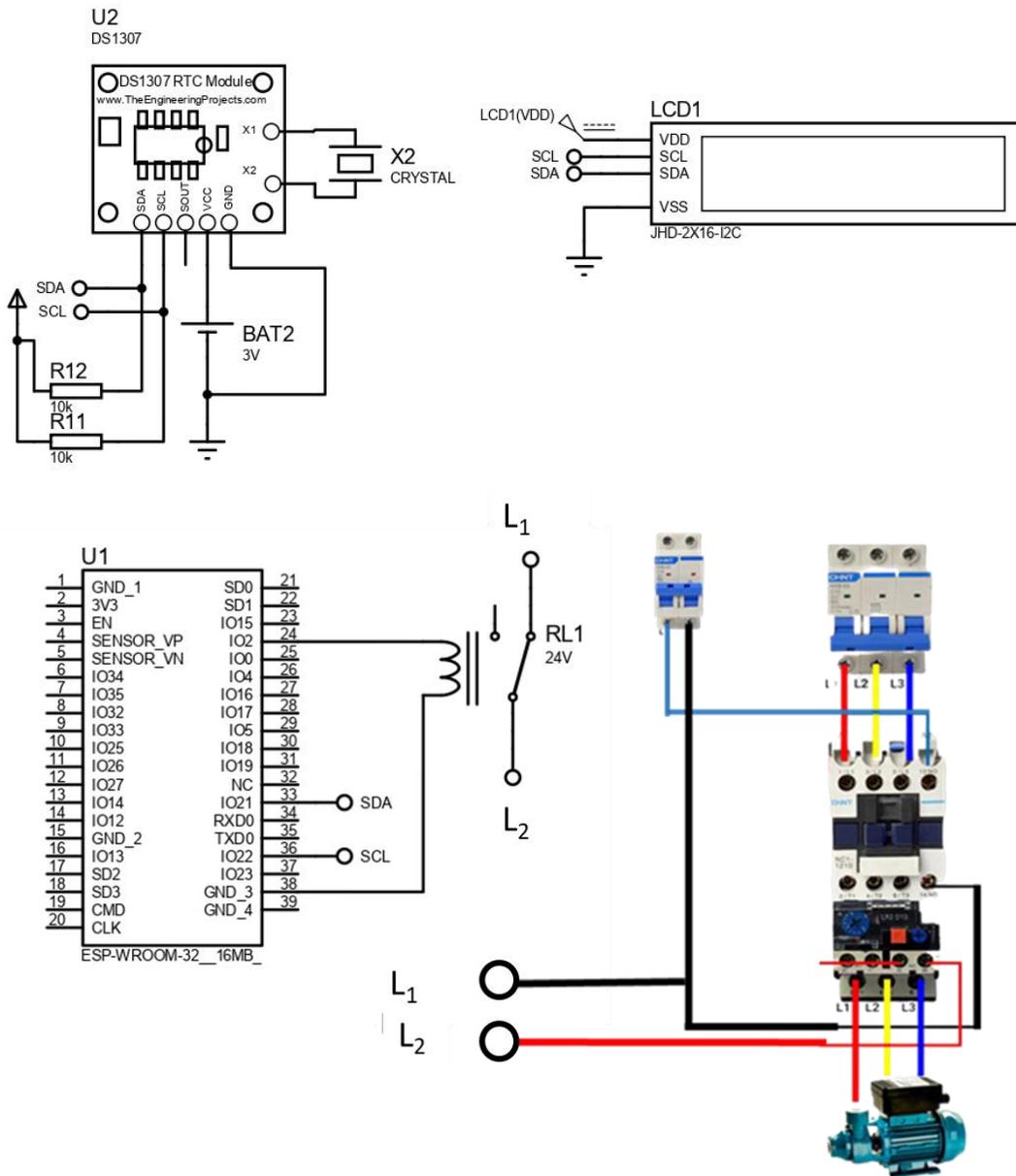


Figura 4.10.- Diagrama de conexión entre la tarjeta de desarrollo y un motor trifásico



Figura 4.11.-Montaje del mezclador

4.2.2. Control de fase de aireación

En la Figura 4.12 se muestra el diagrama de flujo que describe el control del aireador, como se mencionó al inicio de la sección 4, se identificará un aumento drástico en la pendiente del ORP en el punto “B”, Figura 4.1, para ello se calcula la derivada de la curva en dos momentos dados, los cuales serán comparados con un valor umbral, determinado a partir de la Figura 3.2. El punto de inflexión se encuentra cuando la derivada del punto uno es menor al valor umbral y la derivada del punto dos es mayor que el valor umbral.

El valor umbral se toma de la Figura 4.13 , como se describe en [32], el tiempo de muestreo tiene que ser entre 6 a 12 minutos para que la diferencia entre los valores sea adecuada para ser evaluada, para el propósito de programación de esta tesis los cálculos se realizan cada 6 minutos, el valor de la pendiente del punto A al punto B se acerca a los 3 mV, mientras que del punto B (equivalente a punto B en figura 4.1) al punto C se encuentra cerca de los 13 mV, por lo que el valor umbral se estableció en un punto intermedio de 8 mV.

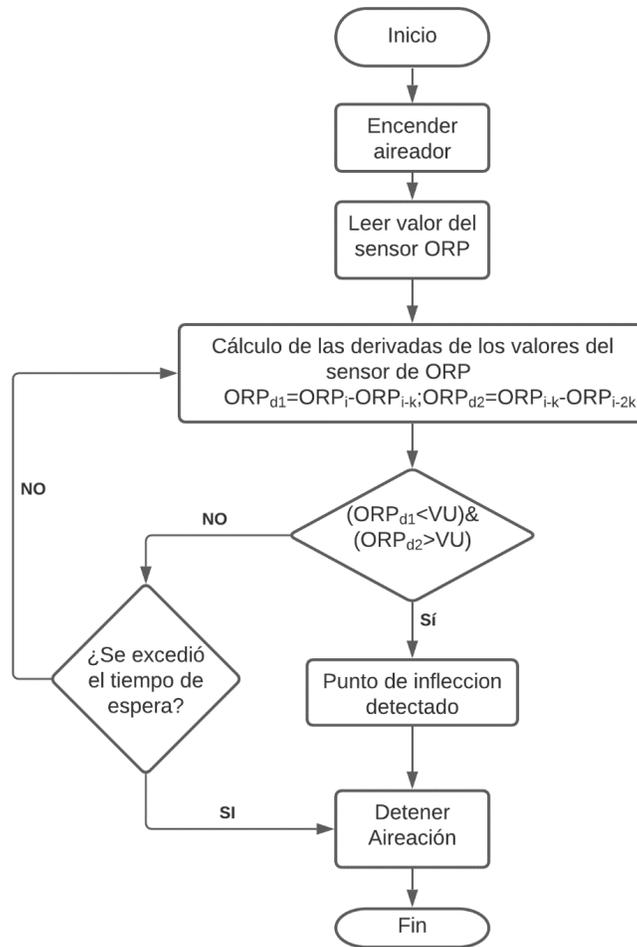


Figura 4.12.- Diagrama de flujo que se ocupa para la programación de la aireación.

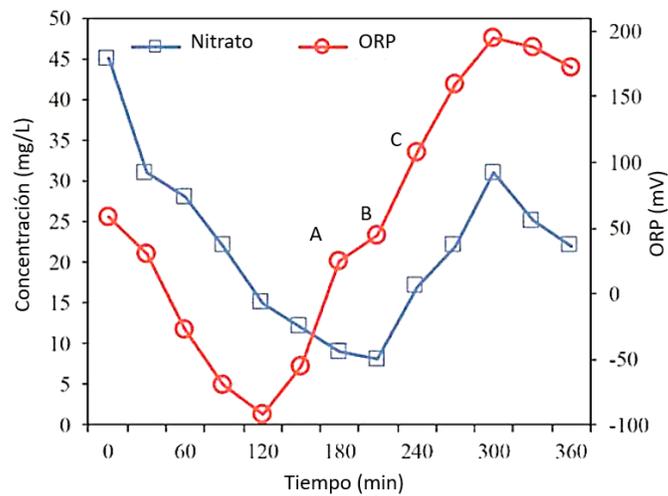


Figura 4.13.-Valores experimentales de reactor de pruebas de [38]

4.2.3. Control de fase de llenado con mezcla

Para el apagado del mezclador dentro de la fase de llenado, Figura 4.15, el programa seguirá el diagrama de flujo basado en [32] (figura 4.15). En este se busca la denominada “rodilla de nitrato” representada a las 2.5 horas en Figura 4.14.A, como predesnitrificación, y a los 400 minutos en Figura 4.14.B, como post-desnitrificación. Por medio de resultados, en planta se podría afinar el punto de inflexión en el que acaba la nitrificación. Debe obtenerse un valor umbral para ser comparado con dos valores consecutivos de una derivada y cuando aparezca un cambio radical entre estos dos se considera encontrada la rodilla, el algoritmo es muy similar al anterior, el cambio radica en los signos de la condición, ya que en este punto la pendiente es negativa. En la *Figura 4.14*, observamos que los valores de las pendientes son muy diferentes entre sí, tomando como referencia un tiempo de muestreo de 5 minutos y el valor de promedio de las *Figura 4.14.A* y *Figura 4.14.B*, la pendiente justo antes de la rodilla de nitrato, tiende a ser muy baja, llegando apenas a un valor de 1.277 mV, mientras que la pendiente después del punto de inflexión se vuelve más pronunciada dándonos valores cercanos a los 16.346 mV, por lo que se propone un valor umbral más cercano a cero, para propósitos de esta tesis se dejará el valor umbral de este campo en 6 mV.

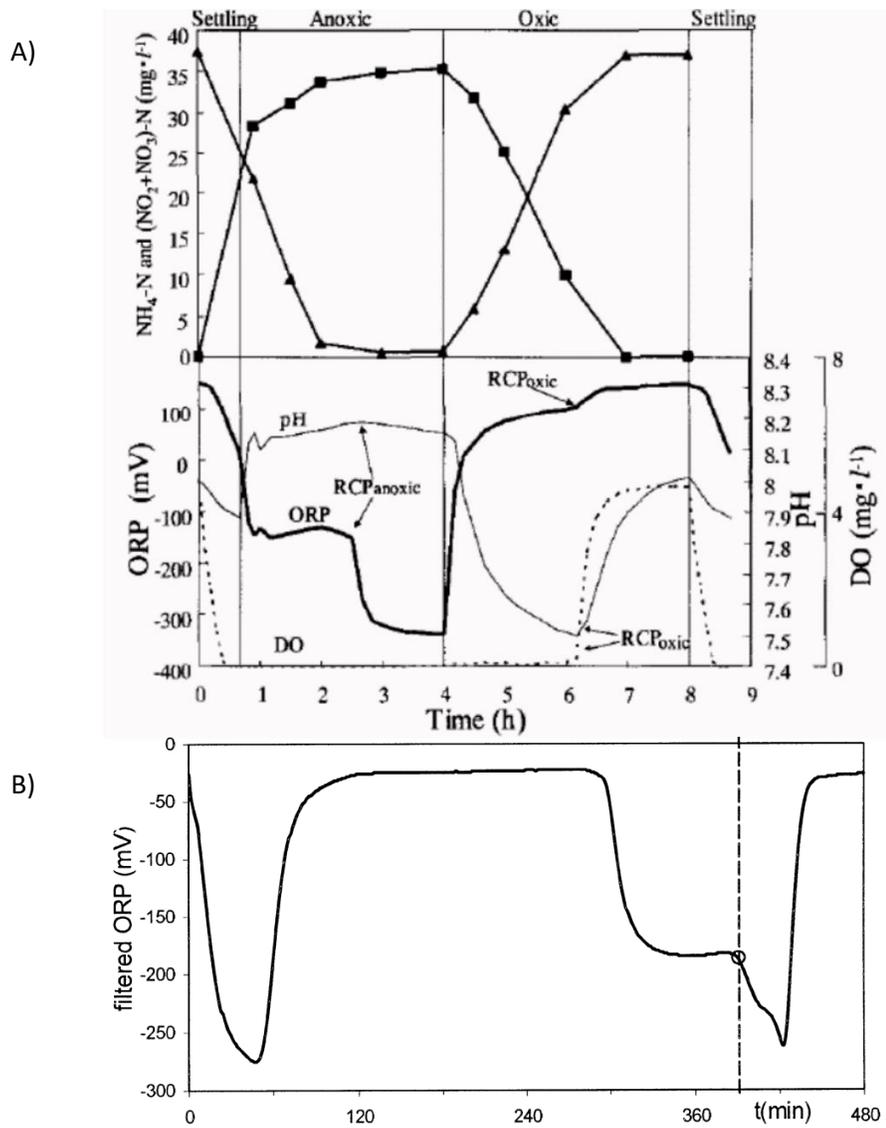


Figura 4.14.- A) Gráfica de valores de pruebas de ORP en *Kishida et al., 2003* con pre-desnitrificación, B) Gráfica de valores de pruebas de ORP en *Pavgelj et al., 2001*

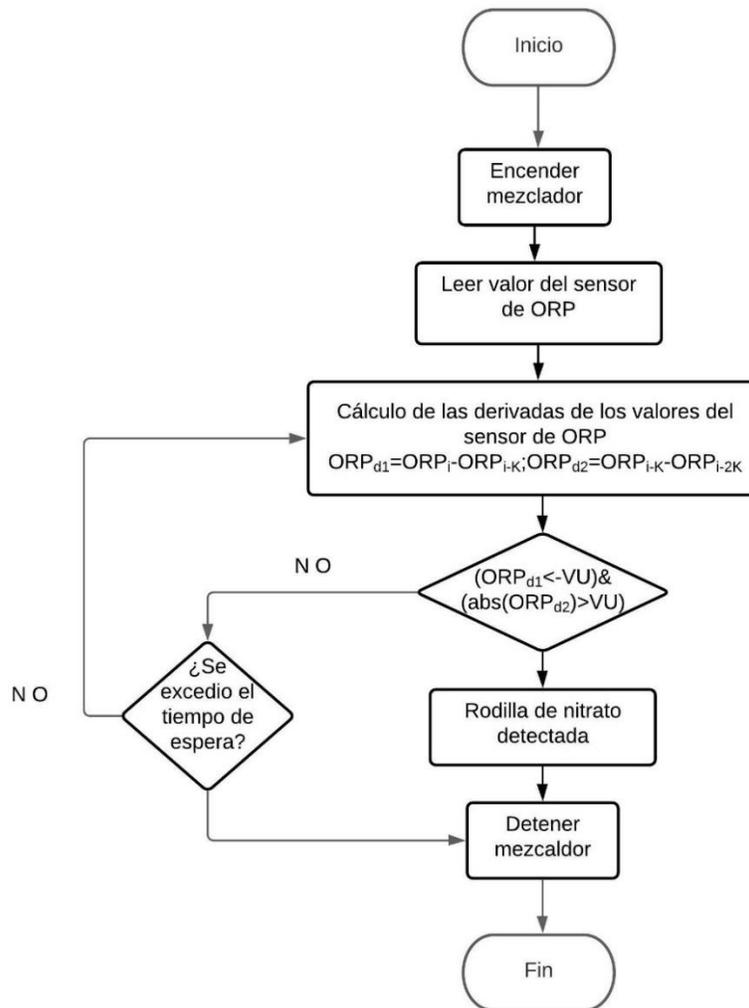


Figura 4.15.- Diagrama de flujo para identificar la rodilla de nitrato

Se propuso usar el software PROTEUS design suite v8.10, dado que el software cuenta con la facilidad de agregar las bibliotecas de las tarjetas de desarrollo Arduino así como de los módulos y sensores que se le pueden conectar a la placa, también se propuso el software de código abierto de Arduino, Arduino IDE 1.8.13, entorno de programación en el que escribimos la instrucciones de las tareas que queremos realizar con la placa, dado que el software es de código abierto resulta muy sencillo también agregar las bibliotecas de los módulos que deseamos conectar.

Una vez escrito y compilado el programa se exportan los archivos binarios que son los que se cargan en la tarjeta Arduino simulada, solo para la simulación.

La estructura de la simulación se muestra en la Figura 4.16.

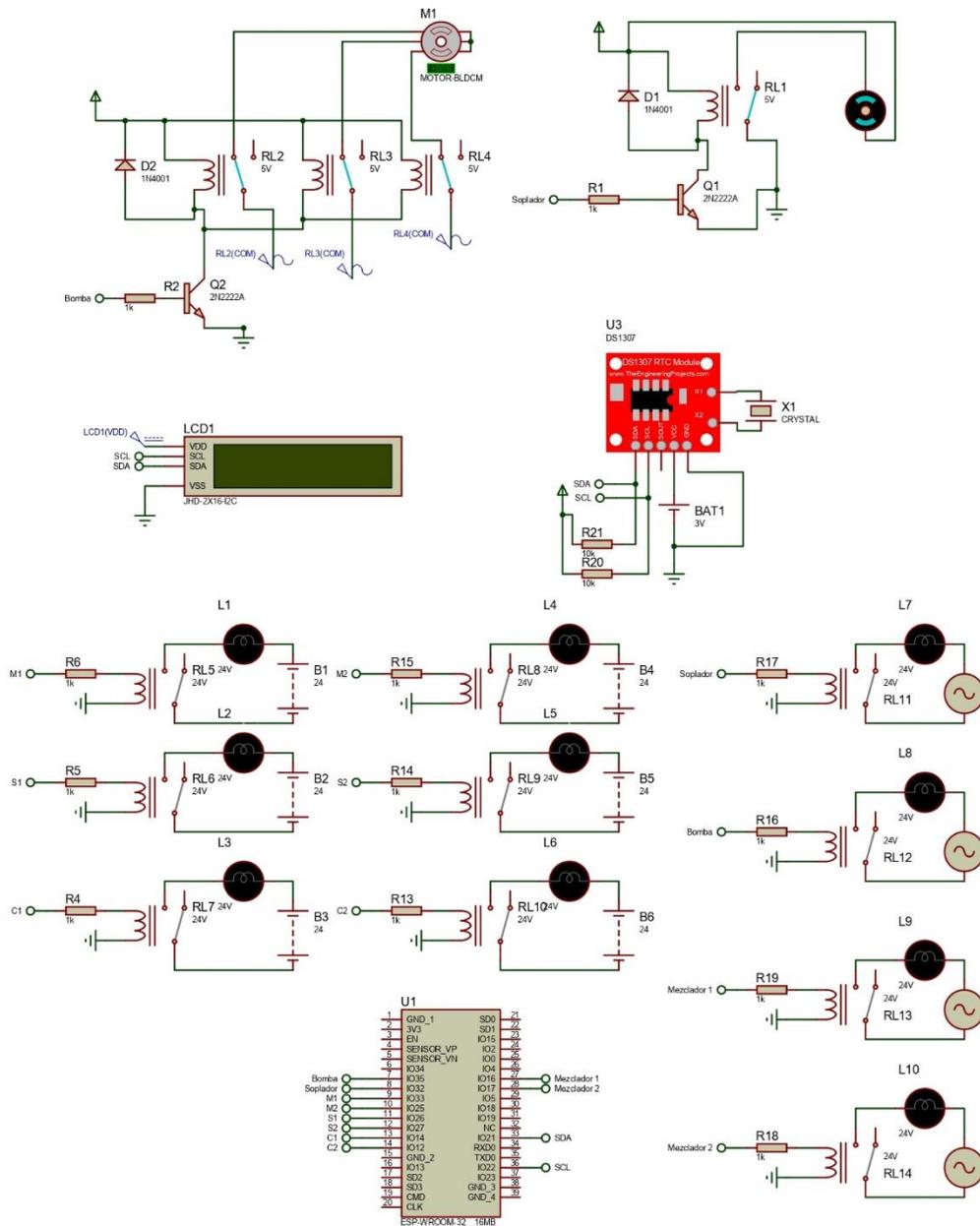


Figura 4.16- Esquema completo de la simulación

4.2.4. Control de bombas y electroválvulas

Para la simulación de la bomba sumergible, Figura 4.17, se ocupó el modelo de un motor brushless en la simulación para representar a un motor trifásico, se integran las tres líneas de la corriente alterna las cuales están conectados a tres relevadores de 5V, trabajan a esta tensión por que es la tensión de la señal que manda el Arduino en sus salidas digitales.

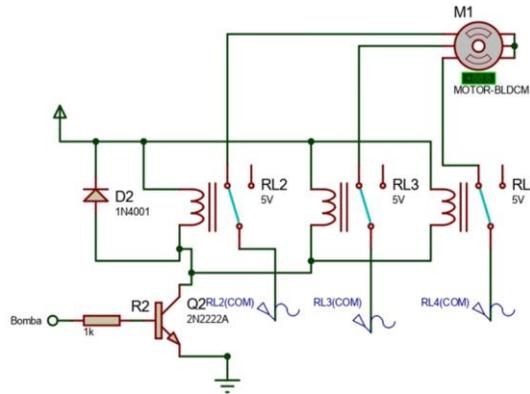


Figura 4.17.-Simulación de un motor trifásico

El motor sencillo por el momento representa al soplador de aire, el motor monofásico está planeado para representar las electroválvulas (Figura 4.18).

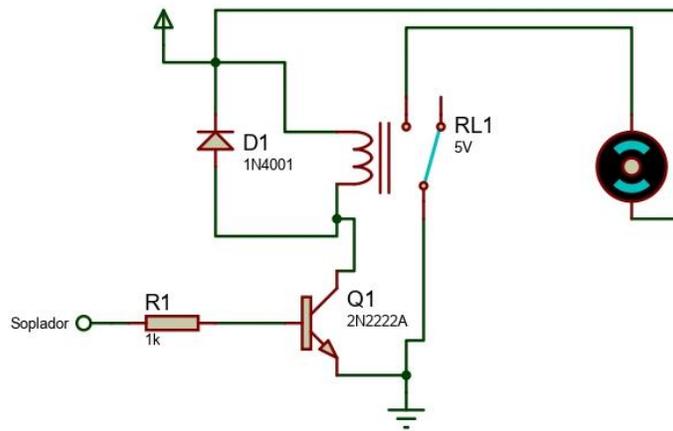


Figura 4.18. - simulación de motor sencillo

Al módulo de reloj en tiempo real se le agregaron el cristal de cuarzo de 32.768 Hz, mismo que tiene integrado el módulo, además de la pila de 3 V que representa a la alimentación del dispositivo (Figura 4.19).

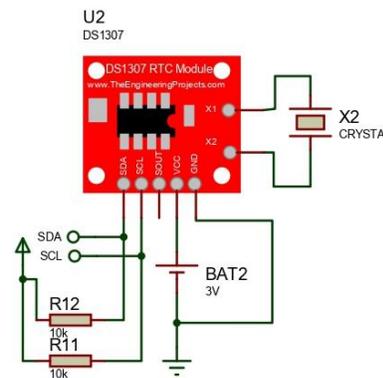


Figura 4.19.- Simulación del módulo RTC

En la Figura 4.20 podemos ver las seis salidas digitales que tiene la ESP32 hacia los relevadores, cada relevador tendrá su circuito consecuente, que pueden ser en corriente alterna o continua, en este caso el circuito consecuente se sustituyó con un foco que indica si pasa o no la corriente.

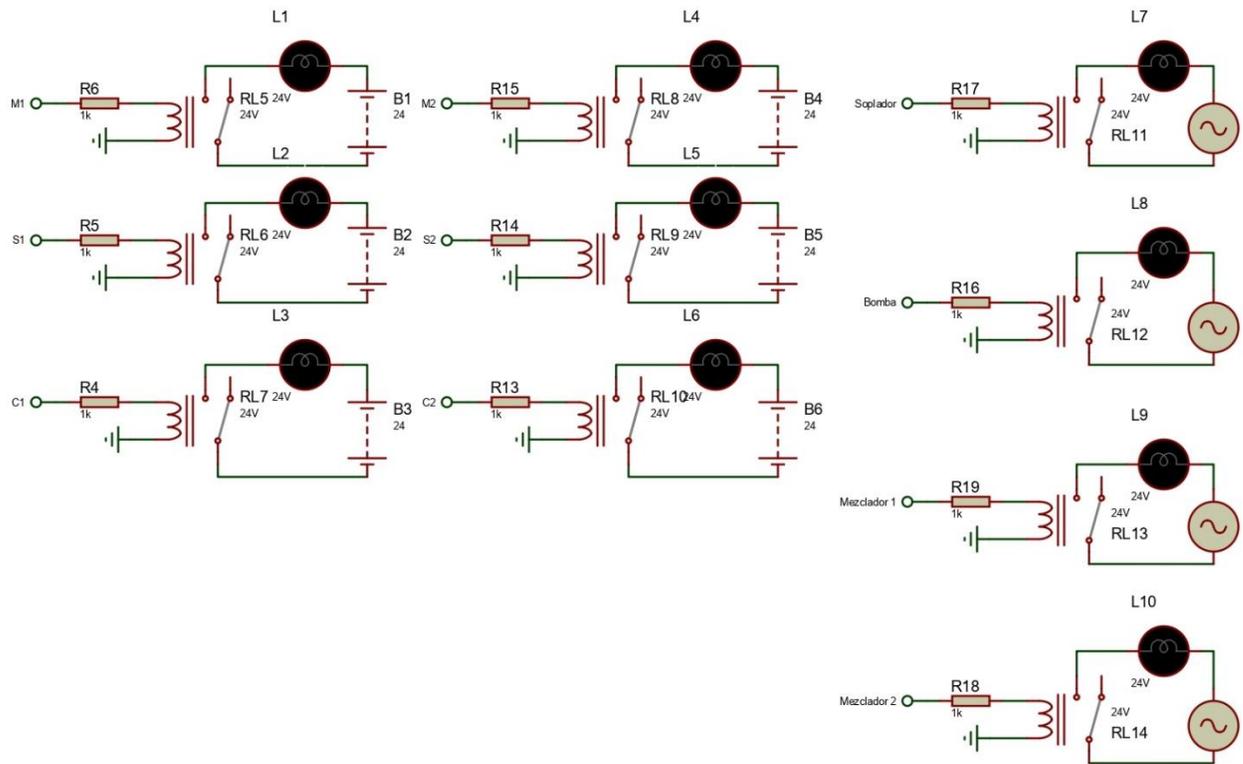


Figura 4.20.- Relevadores de referencia de cada dispositivo del sistema.

4.2.5. Modelo 3D

La propuesta de esta tesis es que el módulo de control se pueda incluir dentro del tablero eléctrico como se ejemplifica en la Figura 4.21, considerando las medidas de seguridad que debe de tener una instalación eléctrica en México, el módulo cuenta con soportes con lo que es posible colocarlo en el DIN riel del panel, como si tratara de cualquier componente más, el modelo cuenta con cuatro botones que nos brindarán información acerca del estado actual del sistema, se propone una fabricación por medio de manufactura aditiva, ocupando ABS como material de fabricación de la caja. El equipo es fácil de desmontar.



Figura 4.21.-Modulo de control y posición en el gabinete eléctrico

Dentro del módulo de control, Figura 4.22, encontramos los módulos de los relevadores, la ESP32, el circuito impreso para los sensores, la interacción al usuario se da por medio de la pequeña pantalla LCD y los botones del módulo de control. Externamente se colocaron los ganchos para sujetarse al gabinete eléctrico y la bornera para sacar los cables de los sensores.

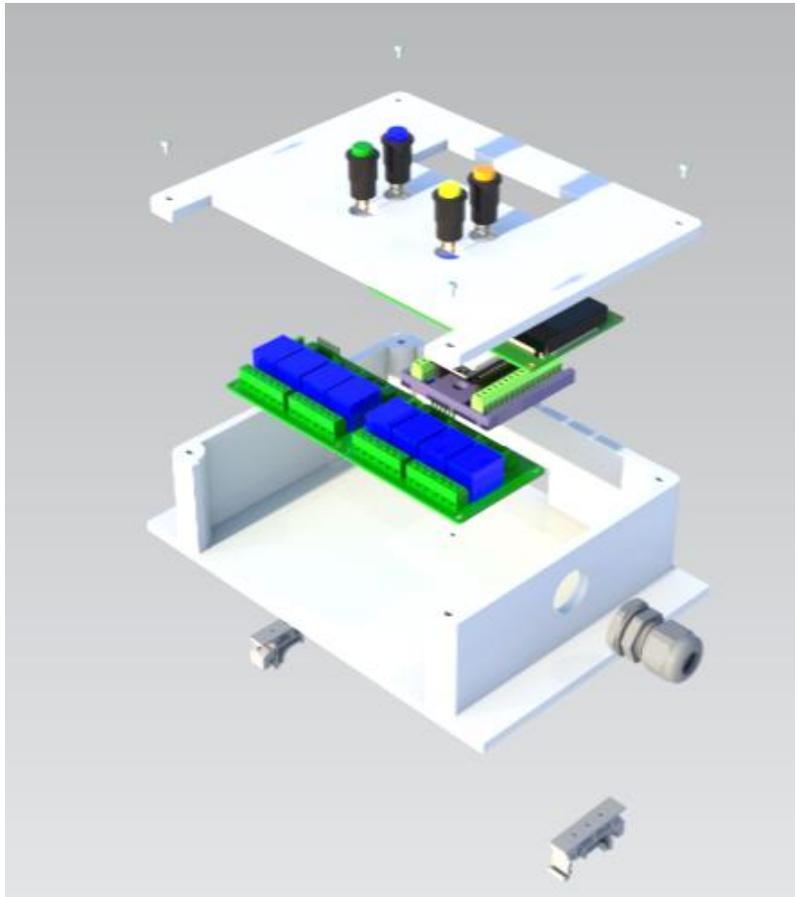


Figura 4.22.-Explosivo del módulo de control

En la Figura 4.23 se observa la distribución de los elementos, las salidas a relevador se conectan a 6 electroválvulas que controlan el flujo de agua y aire del sistema, mientras que las salidas restantes a relevador se conectan a cuatro motores, dos destinados a el llenado, uno al mezclado y uno a la aireación del sistema. En la vista preliminar también podemos observar dos válvulas neumáticas, válvulas en color naranja, estas son encargadas de controlar el llenado de los tanques.

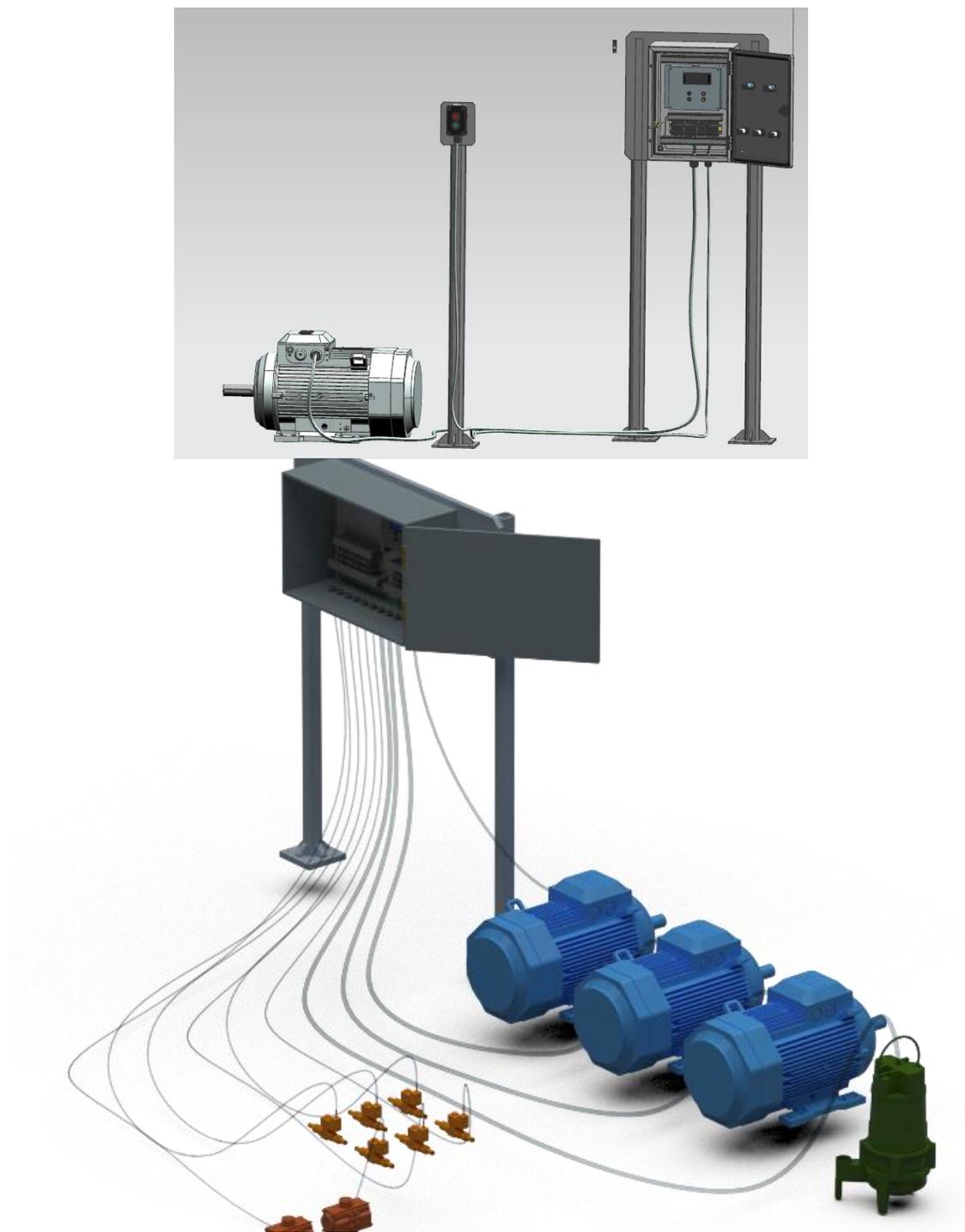


Figura 4.23.- Instalación con el sistema de motores.

4.3. Interfaz de usuario

La interfaz gráfica está diseñada con el propósito de facilitar al usuario el control de la planta y hacerlo más intuitivo, así como también establecer conexión con los dispositivos conectados y demás tareas.

La pestaña de estado de la planta nos muestra la hora y fecha en la esquina superior derecha, debajo nos encontramos con imágenes, leyendas y círculos con el estado de los interruptores de cada elemento del sistema, color verde indica que está abierto y rojo indica cerrado (Figura 4.24).



Figura 4.24.- Panel de estado de la planta

El panel de “conexión” agregó botones específicos para cada acción, Figura 4.25, en esta sección botón de buscar verificará si algún dispositivo se encuentra conectado a un puerto serial y lo mostrará en el menú desplegable, seleccionando uno de los puertos se podrá comenzar con la comunicación presionando el boton de iniciar, si la comunicación es exitosa nos mostrará una leyenda indicando que la comunicación está abierta. El botón de, cerrar, pausa la comunicación entre los dispositivos mandando ceros al Arduino, mientras que el botón cerrar conexión detiene la comunicación entre el programa y el Arduino, vacía el buffer serial del Arduino y cierra comunicación, por último nos muestra una leyenda que indica que la operación fue exitosa.

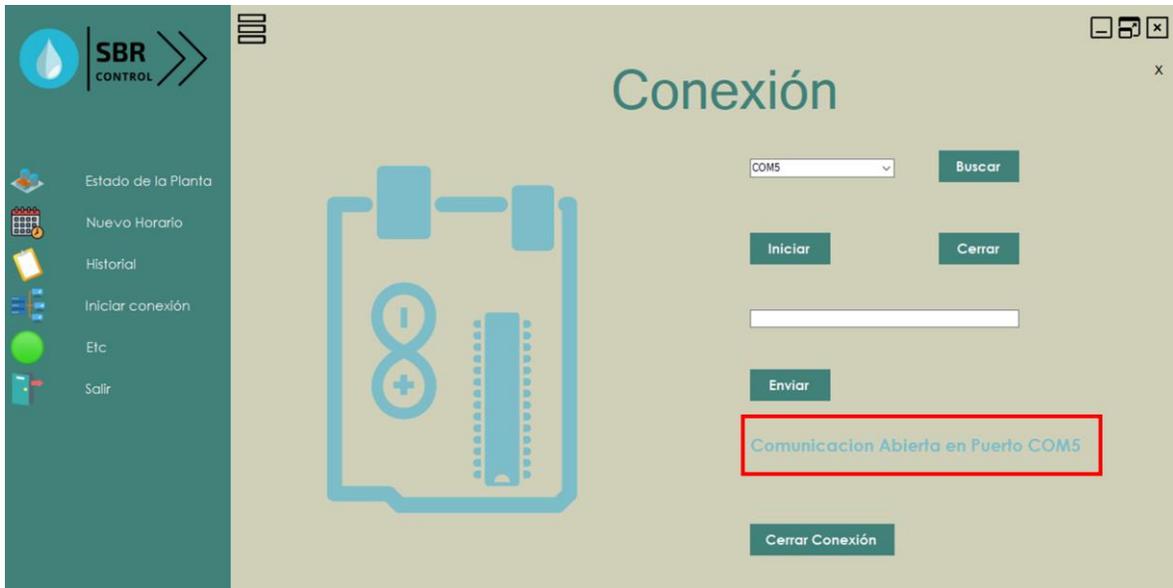


Figura 4.25.- Interfaz de conexión con la placa Arduino por medio de cable

Para mandar información basta con escribir los datos en la caja de texto y presionar el botón de enviar, se lee en forma de cadena la cual es recibida carácter por carácter en el arduino (Figura 4.26). Una vez que encuentra un salto de línea el programa el estado de la bandera cambia indicando que la operación se completó, después es almacenada en una cadena auxiliar para su uso en otras partes del código.

```
void serialEvent() {
  while (Serial.available()) {
    // obtiene un nuevo dato
    char inChar = (char)Serial.read();
    // se lee la cadena carácter por carácter a una cadena
    inputString += inChar;
    // el carácter leído se agrega a una cadena temporal
    // se agrega carácter a carácter que después puede ser casteado
    if (inChar == '\n') {
      stringComplete = true;
      //bandera que indica que se terminó de leer la cadena
    }
  }
}
```

Figura 4.26.- Función de lectura del Arduino.

Cada botón de la interfaz manda una palabra reservada al Arduino que funciona como comando para realizar la operación indicada, las palabras reservadas son "STAR", "STOP" y "TEXT" (Figura 4.27). Cada vez que termina de enviar datos se vuelve a bajar la bandera para que esté en espera de una nueva instrucción.

```

if(stringComplete)
{
  stringComplete = false;
  getCommand();

  if(commandString.equals("STAR"))
  {
    lcd.clear();
  }
  if(commandString.equals("STOP"))
  {
    lcd.clear();
    lcd.print("Ready to connect");
  }
  else if(commandString.equals("TEXT"))
  {
    String text = getTextToPrint();
    printText(text);
  }

  inputString = "";
}

```

Figura 4.27.- Condicionales y palabras reservadas del programa de Arduino.

Para la configuración de los tiempos limites se estableció la siguiente interfaz (Figura 4.28) en la cual el usuario determinará un horario preestablecido que contiene un tiempo fijo para cada fase, respetando las reglas del cálculo de la sección 3.3, se pueden mandar distintos modos en una operación, pero no es recomendable ya que si no se respetan los tiempos de operación este se podría desfasar. Cuando presionamos el botón de enviar los datos son enviados a la base de datos y al Arduino que recibirá los deltas de tiempo establecidos en cada horario.



Figura 4.28.- Interfaz para establecer los tiempos limites en el sistema.

Para la consulta del historial (Figura 4.29) se accede a una base de datos y la interfaz solo nos muestra la tabla de historial de la base de datos, en esta interfaz solo contamos con los botones de consulta y eliminar, solo se puede eliminar un elemento a la vez, el historial nos muestra los tiempos acumulados de cada fase del SBR.

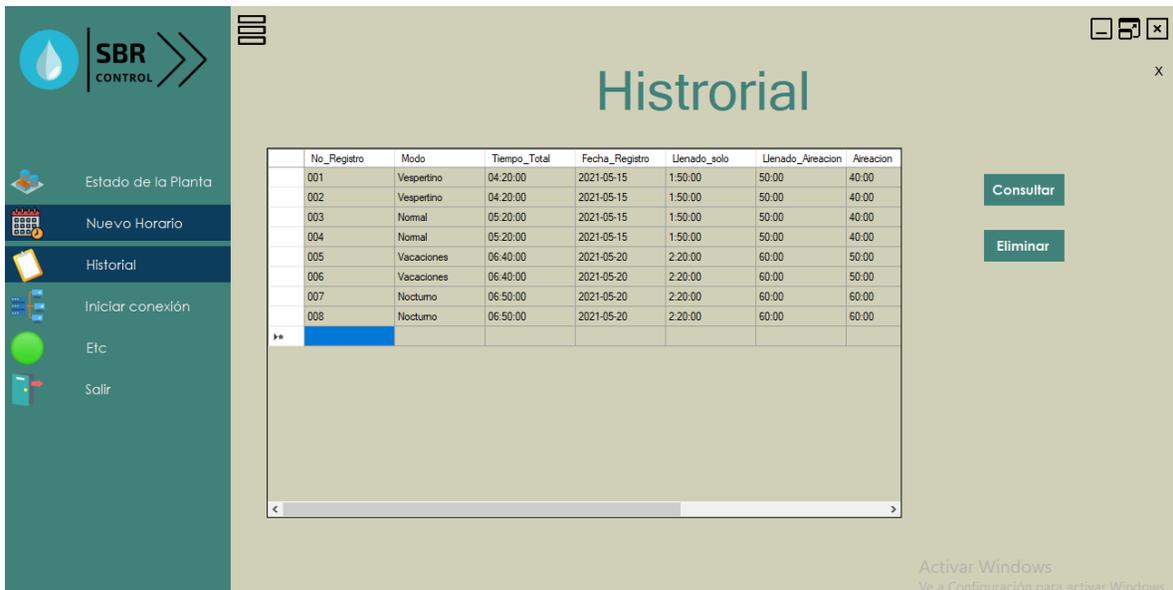


Figura 4.29.- Interfaz de historial

La última pestaña tiene como objetivo monitorizar los valores del sensor de ORP, para ello se establece conexión con la tarjeta, dado que la tarjeta no tiene memoria donde almacenar los datos solo mostrarán valores a partir de que la conexión sea exitosa, la interfaz cuenta con una leyenda que nos muestra el valor del ORP en milivolts, ver Figura 4.30.

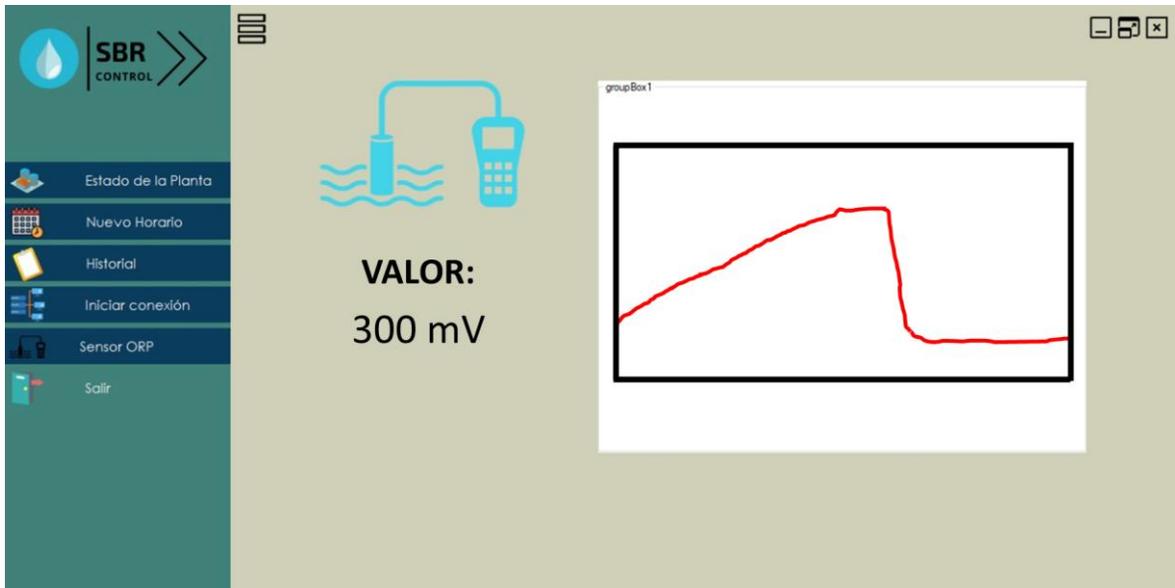


Figura 4.30.- Interfaz del sensor de ORP.

5. Guía de instalación

El módulo cuenta con una salida a micro USB en la parte superior, figura 5.1, con la que se conectará la ESP32 a una computadora para poder establecer los horarios límites por medio de la interfaz de usuario mostrada en el capítulo anterior. La instalación de los sensores se hará retirando la tapa del módulo de control y conectarlos en su respectiva posición en la placa del circuito impreso, los cables tienen salida por medio de la bornera que se encuentra la parte lateral.

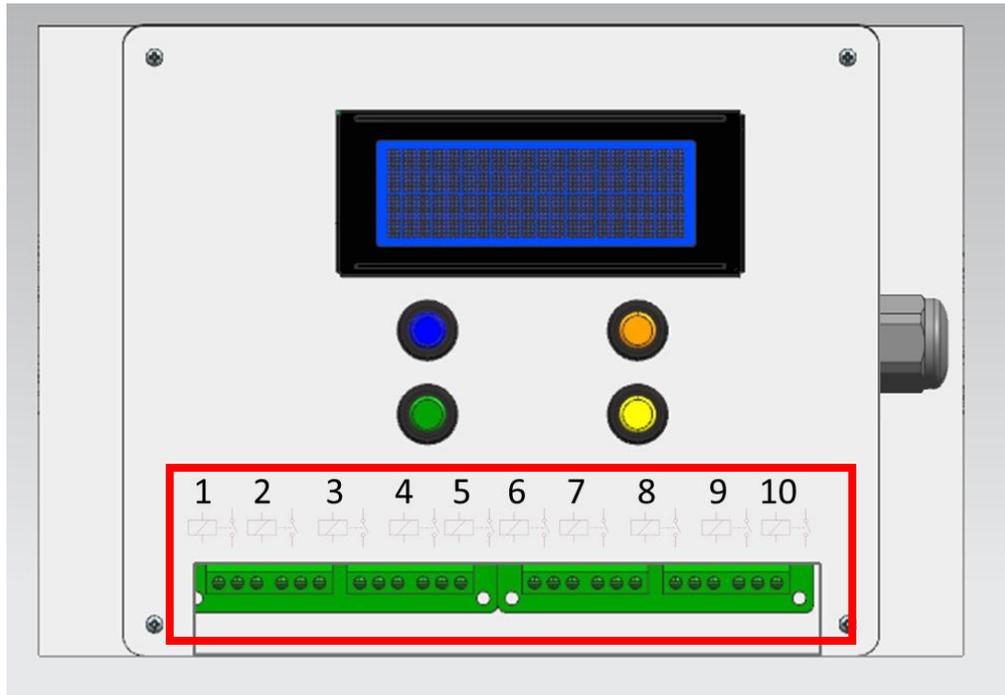


Figura 5.1.-Diagrama de conexiones para los relevadores.

El módulo de control se colocará en el DIN riel del tablero eléctrico, en la parte inferior encontramos las salidas a relevador, Figura 5.1, en la cara lateral encontramos las entradas para el interruptor de nivel y el sensor de ORP. Cada salida a relevador se encuentra numerada, por lo que es importante respetar el orden que se establece en la tabla 5.1, donde se indica el orden en el que se conectará las fuentes de energía que accionan cada equipo eléctrico.

Tabla 5.1.- Disposición del equipo eléctrico dentro de los relevadores del módulo de control.

No. de Relevador	Equipo eléctrico
1	Bomba
2	Soplador
3	Mezclador 1
4	Mezclador 2
5	M1-Válvula de mariposa con actuador eléctrico para alimentación a Reactor 1
6	S1-Válvula solenoide eléctrica 2 vías para inyección de aire a Reactor 1
7	C1-Válvula con actuador eléctrico para apertura de salida del clarificado Reactor 1
8	M2-Válvula de mariposa con actuador eléctrico para alimentación a Reactor 2
9	S2-Válvula solenoide eléctrica 2 vías para inyección de aire a Reactor 2
10	C2-Válvula con actuador eléctrico para apertura de salida del clarificado Reactor 2

Una vez terminadas las conexiones internas del módulo de control se puede subir el programa a la ESP32, se recomienda hacerlo al inicio del día o al término para que los horarios no se desfasen.

6. Conclusiones

Al implementar el módulo de control el sistema se vuelve automático, de este modo no es requerida la programación continua del sistema de acuerdo con la época del año en la que se opere.

El sistema se vuelve más independiente, en condiciones ideales el sistema no requeriría de supervisión, pero como se comenta en este documento la constante descalibración del sensor de ORP requiere que el sistema tenga un modo de funcionamiento de respaldo, el cual por medio de la interfaz gráfica se vuelve más sencillo de programar.

El objetivo de automatizar la planta se cumple al recibir información de sensores y dar una respuesta de acuerdo con la información recibida.

La implementación de un control en tiempo real propone una mejora sustancial en cómo opera la planta de aguas residuales, el módulo de control además cumple con otros objetivos como optimizar el proceso y se esperaría que en futuras implementaciones se pueda ahorrar energía.

Contemplando que la tecnología empleada de bajo costo abre las opciones de ser implementado en sistemas de menor tamaño, ahorrando recursos en el área de control de una planta, haciendo viable implementar la tecnología SBR en comunidades rurales.

Como trabajo a futuro se propone implementar una mayor cantidad de sensores, esto daría más parámetros para saber con más precisión en qué etapa se encuentra el sistema, lo que lo haría casi totalmente automático, dependiendo muy poco de un operador. El sistema también es muy flexible, dado que la programación de la tarjeta es de código abierto, da opciones de actualización del sistema haciendo mínimas modificaciones de acuerdo con el avance de la tecnología en los siguientes años, implementado nuevas funciones al sistema de control.

Otra área de oportunidad en el sistema es la recolección de datos en tiempo real, en un futuro conectado no se requerirán conexiones locales para que el sistema pueda enviar información, la recolección de datos nos permitiría predecir el comportamiento de la planta.

Bibliografía

- [1] AUTYCOM, «AUTYCOM,» 01 Agosto 2019. [En línea]. Available: <https://www.autycom.com/para-que-sirve-un-contactor-siemens/#>.
- [2] Siemens, «Industry Mall,» Siemens, 2021. [En línea]. Available: <https://mall.industry.siemens.com/mall/es/es/Catalog/Product/3RT20241AN20>. [Último acceso: 10 01 2022].
- [3] S. Chapman, MÁQUINAS ELÉCTRICAS, CDMX: McGRAW-HILL/INTERAMERICANA, 2012.
- [4] L. Beltrán, Fundamentos Básicos de Motores Eléctricos, México: SKF, 2007.
- [5] T. WILDI, Máquinas eléctricas y sistemas de potencia., México: PEARSON EDUCACIÓN, 2007.
- [6] G. Enríquez, Curso de transformadores y motores de inducción, México: Limusa, 2005.
- [7] SIEMENS, «Electrical Training Courses - Power Distribution, Motors and Control: Basic of AC,» SIEMENS, 25 02 2010. [En línea]. Available: <http://www3.sea.siemens.com/step/flash/acmotors/index.htm..>
- [8] Á. Martínez, Potencia hidráulica controlada por PLC, México: Alfaomega, 2008.
- [9] R. L. MOTT, MECÁNICA DE FLUIDOS, México: PEARSON EDUCACIÓN, 2006.
- [10] R. L. Mott, Mecánica de fluidos aplicada, Edo. de México: Prentice Hall Hispanoamericana, S.A., 1996.
- [11] E. Palacios, F. Remiro y L. Lopéz, MICROCONTROLADOR PIC16F84. DESAROLLO DE PROYECTOS, Madrid: RA-MA, 2014.
- [12] E. Lopéz, Arduino. Guía práctica de fundamentos y simulación., Madrid: Ra-Ma, 2016.
- [13] A. Creus Solé, Instrumentación industrial, México: Alfaomega, 2010.
- [14] Emerson Automation Solutions, GUÍA DE VÁLVULAS DE CONTROL, Marshalltown: Fisher Controls International, 2019.
- [15] S. Manesis y G. Nikolakopoulos, Introduction to Industrial Automation, New York: CRC Press, 2018.
- [16] L. Corona, G. Abarca y J. Mares, Sensores y actuadores. Aplicaciones con Arduino®, México: GRUPO EDITORIAL PATRIA, 2014.
- [17] W. Bolton, Mecatrónica, Sistemas de control electrónico en la ingeniería mecánica y eléctrica, México: ALFAOMEGA, 2006.

- [18] A. Creus Solé, NEUMÁTICA E HIDRÁULICA, España: MARCOMBO, 2007.
- [19] A. Serrano, Neumática Práctica, España: Paraninfo, 2009.
- [20] S. Bungay, M. Humphries y T. Stephenson, «OPERATING STRATEGIES FOR VARIABLE FLOW SEQUENCING BATCH REACTORS,» *Water and Environment Journal*, pp. 1-8, 2007.
- [21] Q. Yang, S. Gu, Y. Peng, S. Wang y X. Liu, «Progress in the Development of Control Strategies for the SBR Process,» *CLEAN – Soil, Air, Water*, vol. 38, nº 8, pp. 732-749, 2010.
- [22] A. Dutta y S. Sarkar, «Sequencing Batch Reactor for Wastewater Treatment: Recent Advances,» *Current Pollution Reports*, vol. 1, nº 3, pp. 177-190, 2015.
- [23] G. Demoulin, A. Rüdiger y M. Goronszy, «Cyclic activated sludge technology--recent operating experience with a 90,000 p.e. plant in Germany.,» *Water Sci Technol.*, vol. 43, nº 3, pp. 331-337, 2001.
- [24] H. J. Tao y H. Xu, «Dynamical Modeling and Intelligent Control of Aeration Process for Pollutants Degradation in Technics of SBR,» *Materials for Modern Technologies II*, vol. 859, pp. 127-133, 2016.
- [25] W. Shen, E. Tao, L. Ning y T. Liu, «Study of composite fuzzy control of dissolved oxygen in a sequencing batch reactor pilot process of synthetic papermaking wastewater,» *2012 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, pp. 1262-1267, 2012.
- [26] G. González, PROPUESTA TÉCNICA PARA RECUPERACIÓN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA FACULTAD DE CIENCIAS POLÍTICAS Y SOCIALES DE LA UNAM, CDMX: UNAM, 2013.
- [27] RealPars, «What is a Spool Valve?,» RealPars, 2020. [En línea]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=Jfdmrm4A99s&t=301s>. [Último acceso: 01 12 2021].
- [28] J. Ceballos, Microsoft C#. Lenguaje y Aplicaciones. 2ª Edición., España: Ra-Ma, 2007.
- [29] C. DATE, INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS DE BASES DE DATOS, México: PEARSON EDUCACIÓN, 2001.
- [30] Microsoft, Manual SQL server, Microsoft, 2014.
- [31] Wisconsin Department of Natural Resources Wastewater Operator Certification, Nutrient Removal - Total Phosphorus - Subclass P, Wisconsin: Wisconsin Department of Natural Resources, 2015.
- [32] N. Pavgelj, N. Hvala, J. Kocijan, M. Ros, M. Subelj, G. Music y S. Strmcnik, «Experimental design of an optimal phase duration control strategy used in batch biological wastewater treatment,» *ISA Trans*, vol. 1, nº 40, pp. 41-56, 2001.

- [33] Espressif Systems. , «esp32 datasheet,» Espressif Systems. , 11 04 2017. [En línea]. Available: https://espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf. [Último acceso: 01 12 2021].
- [34] TECNOPURA, «Módulo RTC DS1307 / Reloj en tiempo real interface I2C,» TECNOPURA, [En línea]. Available: <https://www.tecnopura.com/producto/modulo-rtc-ds1307-reloj-en-tiempo-real-interface-i2c/>. [Último acceso: 01 12 2021].
- [35] P. Bertoleti, *Proyectos con ESP32 y LoRa*, Sao Paulo: Instituto NCB, 2019.
- [36] D. Li y S. Liu, *Water Quality Monitoring and Management: Basis, Technology and Case Studies*, Londres: Academic Press, 2018.
- [37] N. A. Cloete, R. Malekian y L. Nair, «Design of Smart Sensors for Real-Time Water Quality Monitoring,» *IEEE Access*, vol. 4, pp. 3975-3990, 2016.
- [38] A. Alattabi, C. Harris, R. Alkhaddar, A. Alzeyadi y M. Abdulredha, «Online Monitoring of a sequencing batch reactor treating domestic wastewater.,» *Procedia engineering,,* vol. 196, pp. 800-807, 2017.
- [39] N. Nise, *Sistemas de control para la ingeniería*, México: GRUPO PATRIA CULTURAL, 2002.
- [40] K. Ogata, *Ingeniería de control moderna*, Madrid: PEARSON EDUCACIÓN , 2003.
- [41] A. Rodríguez, *Sistemas SCADA*, Barcelona: Marcombo, S.A., 2007.
- [42] S. Cristina, *IMPLEMENTACIÓN DE ANALIZADORES DE PROTOCOLOS DE COMUNICACIONES SPI, I2C* [Tesis de grado, Universidad Carlos III de Madrid], Madrid: Archivo Abierto Institucional de la Universidad Carlos III de Madrid, 2014.
- [43] F. MARTINEZ, *Instalaciones eléctricas de alumbrado e industriales*, MADRID: Paraninfo, 2003.
- [44] R. Garcia, «¿Que son los sistemas de control distribuido y control digital?,» 07 Mayo 2020. [En línea]. Available: <https://www.tecnatom.es/blog/sistemas-de-control-distribuido-y-control-digital/>.
- [45] A. Alheraish, W. Alomar y M. Abu-Al-Ela, «Programmable Logic Controller System for Controlling and Monitoring Home Application Using Mobile Network,» *006 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings*, pp. 469-472, 2006.