

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Instrumentación de una planta paquete de tipo tubular para el tratamiento de aguas residuales.**

**TESIS**

Que para obtener el título de

**Ingeniero Mecatrónico**

**P R E S E N T A**

Ricardo Said Martínez Santiago

**DIRECTOR DE TESIS**

M. en A. Luis Yair Bautista Blanco

****

**Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2020**

# Índice

[Índice 2](#_Toc55298736)

[Introducción 4](#_Toc55298737)

[Antecedentes 5](#_Toc55298738)

[1. Planteamiento del problema 6](#_Toc55298739)

[1.1 Justificación 6](#_Toc55298740)

[1.2 Objetivo general 6](#_Toc55298741)

[1.3 Objetivos específicos 6](#_Toc55298742)

[2. Identificación de Necesidades y Especificaciones 6](#_Toc55298743)

[2.1 Necesidades por subsistema 6](#_Toc55298744)

[2.2 Especificaciones por subsistema 6](#_Toc55298745)

[2.3 Restricciones por subsistema 6](#_Toc55298746)

[3. Diseño conceptual 6](#_Toc55298747)

[3.1 Sistematización 6](#_Toc55298748)

[3.2 Generaciones de conceptos 6](#_Toc55298749)

[3.3 Selección y evaluación de conceptos 6](#_Toc55298750)

[4. Diseño de configuración 7](#_Toc55298751)

[4.1 Análisis por subsistema 7](#_Toc55298752)

[4.2 Configuración por subsistema 7](#_Toc55298753)

[4.3 Configuración general 7](#_Toc55298754)

[5. Diseño de detalle 7](#_Toc55298755)

[5.1 Subsistema de Interfaz 7](#_Toc55298756)

[5.2 Subsistema de Instrumentación 7](#_Toc55298757)

[5.3 Subsistema de Bombas y Energía 7](#_Toc55298758)

[5.4 Subsistema de ensamble 7](#_Toc55298759)

[5.5 Sistema general 7](#_Toc55298760)

[6. Creación de un modelo virtual 7](#_Toc55298761)

[6.1 Subsistema de Interfaz 7](#_Toc55298762)

[6.2 Subsistema de Instrumentación 7](#_Toc55298763)

[6.3 Subsistema de Bombas y Energía 7](#_Toc55298764)

[6.4 Subsistema de ensamble 8](#_Toc55298765)

[6.5 Sistema general 8](#_Toc55298766)

[7. Pruebas y Resultados 8](#_Toc55298767)

[8. Conclusiones 8](#_Toc55298768)

[9. Trabajo a futuro 8](#_Toc55298769)

[10. Referencias 8](#_Toc55298770)

[Apéndices 8](#_Toc55298771)

# 

# Introducción

En el presente documento se explica la instrumentación y automatización de una planta paquete de tipo tubular para el tratamiento de aguas residuales con la finalidad de operarlo de manera manual y remota en colaboración con la Facultad de Química.

En el documento se explica el desarrollo, forma de trabajo y partes involucradas dentro del proyecto con el objetivo de crear un modelo virtual que cumpla con las necesidades planteadas por los responsables del proyecto.

En el capítulo 1 se explica el planteamiento del problema en un proyecto iniciado por la Facultad de Química y que es llevado a la materia de Diseño Mecatrónico del semestre 2020-2 para agregar características que simplifiquen las operaciones de uso.

En el capítulo 2 se explican las necesidades y especificaciones del proyecto, así como su obtención por medio de recopilación de información.

En el capítulo 3 se presenta el diseño conceptual con base en la sistematización utilizando modelos de caja negra, esto con la finalidad de observar las interrelaciones que se tienen entre subsistemas. Se finaliza con la generación, evaluación y selección de conceptos.

En el capítulo 4 se realiza el diseño de configuración en cada uno de los subsistemas para formar la configuración general del proyecto.

En el capítulo 5 se realiza el diseño de detalle de cada uno de los subsistemas y se desarrollan modelos virtuales que permitan entender el funcionamiento conjunto del proyecto.

En el capítulo 6 se realiza la creación del entorno virtual que permite desplegar cada uno de los modelos virtuales generados y la presentación de estos en una exposición organizada por la Facultad de Ingeniería.

# Antecedentes

Dentro de la asignatura de Diseño Mecatrónico del semestre 2020-2, en el que el autor del presente trabajo estuvo inscrito, impartida por el M. en A. Luis Yair Bautista Blanco, se estudiaron los fundamentos y metodologías del proceso de diseño con el objetivo de aplicar un método de diseño e implementarlo en un sistema funcional. El profesor tomó como base el proyecto “Reactor Biológico Tubular” (RBT) para implementar la aplicación del proceso de diseño, este proyecto se comenzó a trabajar en conjunto con el Dr. Alfonso Durán Moreno y el Dr. Sergio Adrián García González de la Facultad de Química de la UNAM. La finalidad del reactor era degradar biológicamente los contaminantes disueltos en el agua residual por medio de un material basado en bioparticulas que desarrollaron los responsables del proyecto. Para su colocación, los responsables del proyecto diseñaron un circuito tubular de ocho vías por donde se colocaría el material de purificación. Se buscaba instalar el RBT en el lago de Xochimilco por lo que su uso debía de controlarse de manera remota y para ello se buscaba integrar componentes periféricos mediante técnicas de instrumentación y automatización para monitorear y operar el sistema a distancia y en campo.

# Planteamiento del problema

Una de las primeras actividades dentro del desarrollo del proyecto fue una visita guiada por el Dr. Sergio Adrián García González y uno de sus ayudantes a la Facultad de Química con la finalidad de mostrar la propuesta de diseño del sistema tubular de 8 vías, el material basado en bioparticulas y recabar los requerimientos del sistema general. El diseño del sistema tubular estaba conformado por 8 tubos de PVC de 4 [in] sujetados con abrazaderas de doble perno y acoplados por medio de bujes de reducción 4 x 2 [in] tal como se puede observar en la Figura 1.



*Figura 1.* Sistema tubular de 8 vías con sus respectivos accesorios.

Dicho sistema se encontraba en fase inicial de manufactura y se tenían los materiales para la continuación de ensamble. El material basado en bioparticulas se colocaría en la parte interior de los tubos de 4 [in] por medio de un bastidor como estructura de soporte interno y por donde circularía el agua residual en los laterales, finalmente el agua tratada llegaría a un sistema de almacenamiento para su reutilización. A fin de verificar la calidad del agua, se utilizaba el sensado, tanto antes como después, de las variables pH, oxígeno disuelto y turbidez por medio de sensores en pruebas de laboratorio y a escala. Es preciso señalar que al utilizar un sistema tubular en donde existe un fluido en movimiento, es necesario considerar la variable de turbulencia para ampliar el enfoque del RBT. La instalación del RBT se llevaría a cabo en la Zona Lacustre de Xochimilco (ZLX) en el sureste de la Ciudad de México para lo cual se necesitaba controlar el reactor a distancia con la finalidad de mejorar la administración la cantidad de datos analizados sin involucrar un desplazamiento de los operarios.

## Justificación

Xochimilco es una zona lacustre ubicada en el sureste de la Ciudad de México (Figura 2), cuya superficie es de 12,517 hectáreas que representan el 8.40% del área total de la Ciudad de México [1]. En la Alcaldía Xochimilco habitan cerca de medio millón de personas [2] lo que la convierte en la novena Alcaldía más poblada de la Ciudad de México.

*Figura 2.* Mapa de la localización de la Alcaldía Xochimilco

*Figura 3.* Lago de Xochimilco, zona lacustre de la Ciudad de México

El lago de Xochimilco es uno de los cinco lagos que forman la cuenca lacustre del Valle de México en el centro de la República Mexicana (Figura 3). Aunque en la actualidad se encuentra reducido a unos pocos canales que riegan la mitad norte de la delegación Xochimilco y el poniente de Tláhuac, su superficie abarcaba una parte importante de lo que hoy es Iztapalapa y Coyoacán [3].

Sus característicos canales son producto del sistema agrícola de chinampas y actualmente conforman una red de 176 km de canales de los cuales 14 son utilizados para recorridos turísticos [4]. Xochimilco fue declarado por la UNESCO en 1987 como Patrimonio Cultural de la Humanidad por su cultura lacustre, su sistema agrícola que permite la subsistencia de la unidad productiva-económica y por su ecosistema que contribuye a la viabilidad ecológica de la Ciudad de México, pero a este reconocimiento hay que agregar que, de la zona de Xochimilco, Chalco y Tulyehualco se extrae la cuarta parte del agua que abastece la zona metropolitana de la Ciudad de México [4].

Las chinampas son reconocidas como un enlace con el México prehispánico, actualmente es protagonista de las actividades económicas de los pobladores en la zona; asimismo, ejemplifica la constante evolución en procedimientos agrícolas, ya que, además del aprovechamiento para canales de riego naturales, su suelo fértil y los residuos orgánicos para la producción, las chinampas se han integrado de manera tan natural al ecosistema que su presencia ayuda a limitar las inundaciones en el área de la Ciudad de México [5]

A pesar de que en el año 2016 se tenían registradas 271 plantas de tratamiento de aguas residuales (PTARs) en la Ciudad de México [6], de las cuales 10 pertenecen a la Alcaldía Xochimilco (Figura 4), en 116 kilómetros de canales de la zona lacustre, divididos en 253 tramos, se detectó que en sus márgenes hay un total de mil 374 descargas irregulares, de las cuales 603 son de aguas negras y 771 de grises [7].



*Figura 5.* Mapa de distribución de PTARs en la Ciudad de México.

*Figura 4.* Número de plantas de tratamiento de aguas residuales por Alcaldía.

Las PTARs del sureste de la Cuenca de México, los escurrimientos de terrenos urbanizados o con actividades agrícolas o pecuarias, son las principales fuentes, unas puntuales y otras difusas de contaminantes, a las zonas lacustres y urbana de Xochimilco [8].

El principal aporte a la ZLX de contaminantes químicos al agua de canales y lagunas y, en consecuencia, al suelo agrícola y a los organismos que dependen del agua, son los vertidos de las plantas de tratamiento que desembocan en el lago, como son la del Cerro de la Estrella, la de San Lorenzo en Tláhuac y la de San Luis Tlaxialtemalco, así como las de viviendas aledañas a los canales que no están conectadas a la red de alcantarillado (Figura 6).

*Figura 6.* Plantas de tratamiento de aguas negras del Cerro de la Estrella (PTCE), de San Luis Tlaxialtemalco (PTSLTL) y algunas descargas de aguas tratadas en la ZLX: Parque Ecológico de Xochimilco (PEX), Parque Cuemanco (PC), Embarcadero Fernando Celada (EFC), Embarcadero Nativitas (EN), Embarcadero San Diego (ESD).

En la evaluación cualitativa/semi-cuantitativa de contaminantes orgánicos en agua del área natural protegida de Xochimilco [9] se detectaron 89 sustancias orgánicas presentes en agua, las cuales se dividieron en 5 grupos principales en función de su uso: Doméstico (productos de cuidado personal, cosméticos, alimenticios, fármacos y de la salud), Agroquímicos (plaguicidas herbicidas, fungicidas), Industrial (petroquímica, química y farmacéutica), de Degradación (biológica, química) y otros (Figura 7).



*Figura 7.* Contribución de contaminantes orgánicos en función de su uso.

Lo que demuestra que la mayor contribución de contaminantes proviene de diversas ramas de la industria química como la de plásticos, farmacéutica, petroquímica y de síntesis con un valor aproximado del 43% de las sustancias identificadas [9], seguido de las sustancias domésticas con un valor alrededor del 20% y la menor contribución se debe a las sustancias agroquímicas con un valor cercano al 7%

El agua puede ser utilizada varias veces, por ejemplo, para consumo humano, riego, generación de energía eléctrica, remoción de desechos, y al mismo tiempo es fundamental para la viabilidad ecológica de los ecosistemas naturales. En este sentido, el presente trabajo busca ofrecer una calidad de agua utilizable domésticamente para los pobladores de la Alcaldía Xochimilco sin exponerlos a los riesgos de salud que los contaminantes presentes en el agua puedan ocasionarles y auxiliar la deficiencia de las PTARs existentes que desembocan en la ZLX y que generan un costo social y la pérdida de bienestar general.

## Objetivo general

Instrumentar y automatizar una planta tubular para el tratamiento de aguas residuales y desplegar la información de las variables de estudio en una interfaz para el usuario con el fin de controlar el sistema física y remotamente.

## Objetivos específicos

1. Desglosar el proceso de diseño para un proyecto funcional
2. Identificar los subsistemas que componen al RBT
3. Describir las funciones que desempeñan los subsistemas del RBT
4. Identificar los requerimientos y especificaciones a tomar en cuenta en la construcción del RBT
5. Seleccionar los materiales y piezas potenciales que idealmente integrarán al RBT
6. Desarrollar los algoritmos para la comunicación y despliegue de la información en el RBT
7. Hacer una prueba en sitio del RBT

# Identificación de Necesidades y Especificaciones

Dentro del grupo de clase se propusieron dos formas de trabajo para el RBT, por un lado, el desarrollo del mismo proyecto en diferentes equipos y, por otro lado, la del desarrollo de un solo proyecto conformado por subsistemas. Con base en el tiempo de desarrollo y la optimización del proceso de diseño, se acordó el desarrollo de un solo proyecto conformado por subsistemas. Los subsistemas seleccionados por los alumnos y maestro se muestran en la tabla 1.

|  |  |
| --- | --- |
| Subsistema | Función general |
| Instrumentación | Encargado de capturar, analizar y enviar información de las variables de estudio. |
| Interfaz | Encargado de desplegar la información de las variables de estudio de forma local y en forma remota. |
| Bomba y energía | Encargado de proveer la energía necesaria a los subsistemas y la activación o desactivación de la bomba y el soplador. |
| Ensamble | Encargado de dar soporte y protección a los elementos que conforman el RBT |

*Tabla 1.* Subsistemas del RBT con su respectiva función general.

Después de analizar los resultados obtenidos en la visita guiada a la Facultad de Química, los alumnos identificaron las necesidades y especificaciones del RBT, las cuales se muestran en las tablas 2.

|  |  |
| --- | --- |
| Necesidad | Requerimiento |
| Incorporar un panel de control que permita el arranque y paro de los elementos del RBT | El RBT debe funcionar en un ciclo continuo y parar cuando el usuario lo considere adecuado. |
| Cuantificar las variables de pH, oxígeno disuelto, turbulencia y turbidez a la entrada y a la salida del RBT | El RBT obtendrá información antes y después del tratamiento para determinar la calidad del proceso. |
| Integrar un sistema de interfaz que despliegue la información de las variables de estudio | El RBT mostrará la información de las variables sensadas en una interfaz para el operario y así poder coordinar y controlar los procesos. |
| Recircular el agua residual cuando no cumpla con los factores de calidad | Al no cumplir los estándares de calidad en el tratamiento, el RBT deberá recircular el agua para mejorar las características del líquido. |
| Incorporar un sistema de purga autónoma en el RBT | El RBT deberá purgar la bomba y el soplador de manera autónoma cuando exista un fluido que interfiera con el proceso. |
| Almacenar el agua tratada | El RBT contará con un sistema de almacenamiento para el agua y disponerla cuando los usuarios la necesiten. |
| Integrar tecnología de adquisición de datos vía remota al RBT | El RBT operará a distancia por lo que enviará datos vía remota al centro de control. |
|  |  |

*Tabla 2.* Necesidades y requerimientos del RBT

## 2.1 Necesidades por subsistema

El subsistema de instrumentación se encargará de proporcionar al sistema de interfaz los datos sobre el estado de las variables de pH, oxígeno disuelto, turbulencia y turbidez. De igual forma, transmitirá el estado ON/OFF de la bomba y del soplador en forma de campo y remota. Las necesidades de este subsistema se muestran a continuación:

* Proporcionar el estado ON/OFF del subsistema al RBT.
* Cuantificar los valores de pH, oxígeno disuelto, turbulencia y turbidez del agua en el RBT.
* Comunicar local y remotamente el RBT con el operario.
* Permitir un control local y remoto de la circulación y retroalimentación del agua.
* Monitorear local y remoto las variables de estudio
* Controlar la activación y paro de la bomba y soplador, así como del suministro de energía de forma local y remota.

El subsistema de interfaz se encargará de desplegar el estado del sistema, los datos sobre las variables de estudio, la etapa de circulación o retroalimentación del agua y las opciones de purga manual y automática, tomando en cuenta un enfoque centrado en el usuario. Las necesidades de este subsistema se muestran a continuación:

* Transmitir la información proveniente de los sensores de manera óptima.
* Desplegar la información proveniente de los sensores de manera clara y sencilla para el operario.
* Administrar los datos provenientes de los sensores de manera local y remota.
* Mostrar los estados de energía, circulación y retroalimentación del agua y purga del RBT de forma clara y sencilla para el operario.
* Ubicar cada opción dentro de la interfaz tomando como base la experiencia del usuario y la usabilidad del subsistema.
* Generar un sistema informático cuyo mantenimiento sea óptimo.

El subsistema de Bombas y Energía se encargará de suministrar la energía necesaria para el correcto funcionamiento de los subsistemas. Del mismo modo, deberá de ofrecer una interfaz física en donde se tenga control manual del encendido y apagado del RBT, purga de la bomba y recirculación del agua residual. Las necesidades de este subsistema se muestran a continuación:

* Regular la energía eléctrica proveniente de la alimentación para el correcto funcionamiento de la bomba, soplador y la recirculación del agua residual.
* Distribuir la energía eléctrica regulada a cada subsistema.
* Controlar de manera manual el encendido y apagado del RBT, la purga de la bomba y la recirculación del agua residual.
* Indicar al operario el estado de cada subsistema.

El subsistema de Ensamble se encargará de proporcionar el soporte de los subsistemas, el diseño de componentes para su correcto montaje y dar protección a cada uno de los componentes que conforman al RBT. Las necesidades de este subsistema se muestran a continuación:

* Diseñar una estructura estable, ergonómica y adaptable al diseño predeterminado.
* Diseñar una estructura cuyo ensamble y desensamble sea óptimo.
* Diseñar una estructura cuyo mantenimiento sea accesible.
* Proporcionar los espacios suficientes para cada uno de los componentes de los subsistemas.
* Proteger a cada uno de los componentes que se encuentren en contacto con factores externos.
* Proteger al usuario de cualquier falla proveniente de los subsistemas o de algún componente de estos.

## 2.2 Especificaciones por subsistema

Las especificaciones explican, con detalles precisos y medibles, lo que el producto tiene que hacer. Las especificaciones del producto no indican al grupo cómo manejar las necesidades del cliente, pero representan una base sobre lo que el grupo deberá hacer para satisfacer las necesidades del cliente [10].

Las especificaciones del subsistema de instrumentación se presentan en la tabla 3.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Necesidad | Especificación | Unidad de medida | Justificación |
| 1 | Estado del subsistema | bit | Se consideró trabajar con señales digitales, en donde encendido corresponde al estado lógico 1 y apagado al estado lógico 0. |
| 6 | Suministro de energía al subsistema | Volt [V] | Se tiene en consideración un rango de 5-24 [V] para el correcto funcionamiento de componentes electrónicos digitales y analógico. |
| 6 | Estado de la bomba y soplador | bit | Se consideró trabajar con señales digitales, en donde encendido corresponde al estado lógico 1 y apagado al estado lógico 0. |
| 2,5 | pH del agua | Números | El rango del pH para agua reutilizable para uso doméstico se encuentra entre los valores 0-14 |
| 2,5 | Oxígeno disuelto |  | El oxígeno disuelto es la cantidad de oxígeno gaseoso que está disuelto en el agua, si tenemos una concentración de 5 a 6 hay oxígeno suficiente para la vida acuática. |
| 2,5 | Turbidez | NTU | La turbidez del agua es un indicador de la calidad del líquido, por lo tanto, en un rango de 0-3000 [NTU] se tiene una calidad del agua adecuada para fines domésticos. |
| 2,5 | Flujo del agua |  |  |
| 3 | Distancia de comunicación | cm | Se propone un espacio de trabajo de 10 a 200 cm para la comunicación entre subsistemas. |
| 4 | Circulación y recirculación del agua | bit | Se consideró trabajar con señales digitales, en donde encendido corresponde al estado lógico 1 y apagado al estado lógico 0. |

Las especificaciones para el subsistema de interfaz se presentan en la tabla 4.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Necesidad | Especificación | Unidad de medida | Justificación |
| 1 | Velocidad de los datos |  |  |
| 2 | Información de las variables de estudio | Subjetivo |  |
| 3 | Administración de datos | Segundos [s] |  |
| 4 | Suministro de energía al sistema | Subjetivo |  |
| 4 | Circulación y recirculación del agua | Subjetivo |  |
| 4 | Purga | Subjetivo |  |
| 5 | Usabilidad | Segundos [s] |  |
| 6 | Mantenimiento | Segundos [s] |  |

Las especificaciones para el subsistema de Bombas y Energía se presentan en la tabla 5.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Necesidad | Especificación | Unidad de medida | Justificación |
| 1 | Regulación de energía eléctrica |  |  |
| 2 | Distribución de energía eléctrica |  |  |
| 3 | Estado del RBT |  |  |
| 3 | Purga |  |  |
| 3 | Recirculación del agua |  |  |
| 4 | Estado de los subsistemas | Subjetivo |  |

Las especificaciones para el subsistema de Ensamble se presentan en la tabla 6.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Necesidad | Especificación | Unidad de medida | Justificación |
| 1 | Estructura |  |  |
| 2 | Ensamble y desensamble |  |  |
| 3 | Mantenimiento |  |  |
| 4 | Distribución de espacios |  |  |
| 5 | Protección a componentes |  |  |
| 6 | Protección a usuario |  |  |

## 2.3 Restricciones por subsistema

Hola aqui

# Diseño conceptual

## 3.1 Sistematización

## 3.2 Generaciones de conceptos

## 3.3 Selección y evaluación de conceptos

# Diseño de configuración

## 4.1 Análisis por subsistema

## 4.2 Configuración por subsistema

## 4.3 Configuración general

# Diseño de detalle

## 5.1 Subsistema de Interfaz

## 5.2 Subsistema de Instrumentación

## 5.3 Subsistema de Bombas y Energía

## 5.4 Subsistema de ensamble

## 5.5 Sistema general

# Creación de un modelo virtual

## 6.1 Subsistema de Interfaz

## 6.2 Subsistema de Instrumentación

## 6.3 Subsistema de Bombas y Energía

## 6.4 Subsistema de ensamble

## 6.5 Sistema general

# Pruebas y Resultados

# Conclusiones

# Trabajo a futuro

# . Referencias

[1]Secretaría de Protección Civil, "Atlas de Peligros y Riesgos de la Ciudad de México", Ciudad de México, 2014.

[2]Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), "Encuesta INTERCENSAL 2015", México, 2015.

[3]C. Romero, "Lago de Xochimilco, Ciudad de México - Los Lagos más Importantes de México", *GoAppMX - Tu Guía Turística Interactiva*, 2017. [Online]. Disponible: https://www.goapp.mx/que-hacer-lago-de-xochimilco-ciudad-de-mexico-749. [Acceso: 10- Nov- 2020].

[4]J. Legorreta, *Región Líquida*. Ciudad de México: Instituto Mexicano de la Radio (IMER), 2005.

[5]

[6]Secretaría del Medio Ambiente (SEDEMA), "Reporte de Plantas de Tratamiento Operadas por las Fuentes Fijas (RPTAR)", Ciudad de México, 2016.

[7]El Sol de México, "Reciben canales de Xochimilco descargas de aguas negras", 2017.

[8]L. Bojórquez, *Contaminación Química y Biológica en la Zona Lacustre de Xochimilco*, 1st ed. Ciudad de México, 2017, pp. 23-64.

[9]R. Flores and G. Pérez, "El análisis de Riesgos para el Diseño de Políticas Públicas y Presupuestales. SRA-LA 2018", Ciudad de México, 2020.

[10]

# Apéndices