



**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., 2021**

# Tabla de contenidos

	Página
<i>Tabla de contenidos</i>	<i>1</i>
<i>Introducción</i>	<i>3</i>
<i>Antecedentes</i>	<i>4</i>
<b>1. Planteamiento del problema</b>	<b>5</b>
<b>1.1 Justificación</b>	<b>7</b>
<b>1.2 Objetivo general</b>	<b>11</b>
<b>1.3 Objetivos específicos</b>	<b>11</b>
<b>2. Identificación de Necesidades y Especificaciones</b>	<b>11</b>
<b>2.1 Necesidades por subsistema</b>	<b>13</b>
<b>2.2 Especificaciones por subsistema</b>	<b>15</b>
<b>2.3 Restricciones por subsistema</b>	<b>19</b>
<b>3. Diseño conceptual</b>	<b>22</b>
<b>3.1 Sistematización</b>	<b>23</b>
<b>3.2 Generaciones de conceptos</b>	<b>28</b>
<b>3.3 Selección y evaluación de conceptos</b>	<b>42</b>
<b>4. Diseño de configuración</b>	<b>48</b>
<b>4.1 Análisis por subsistema</b>	<b>49</b>
<b>4.2 Configuración por subsistema</b>	<b>57</b>
<b>4.3 Configuración general</b>	<b>65</b>
<b>5. Diseño de detalle</b>	<b>68</b>
<b>5.1 Subsistema de Instrumentación</b>	<b>68</b>
<b>5.2 Subsistema de Interfaz</b>	<b>73</b>
<b>5.3 Subsistema de Bombas y Energía</b>	<b>75</b>
<b>5.4 Subsistema de ensamble</b>	<b>77</b>
<b>5.5 Sistema general</b>	<b>81</b>
<b>6. Creación de un modelo virtual</b>	<b>88</b>

<b>6.1 Subsistema de Interfaz</b>	<b>91</b>
<b>6.2 Subsistema de Instrumentación</b>	<b>94</b>
<b>6.3 Subsistema de Bombas y Energía</b>	<b>97</b>
<b>6.4 Subsistema de Ensamble</b>	<b>100</b>
<b>6.5 Sistema general</b>	<b>101</b>
<b>7. <i>Resultados</i></b>	<b>104</b>
<b>8. <i>Conclusiones</i></b>	<b>106</b>
<b>9. <i>Trabajo a futuro</i></b>	<b>107</b>
<b><i>Referencias</i></b>	<b>109</b>
<b><i>Apéndices</i></b>	<b>112</b>
<b>Apéndice I</b>	<b>112</b>
<b>Apéndice II</b>	<b>113</b>
<b>Apéndice III</b>	<b>113</b>

## Introducción

En el presente documento se explica la instrumentación y automatización de una planta paquete de tipo tubular para el tratamiento de aguas residuales en colaboración con la Facultad de Química, que en un inicio se pensó operarlo de forma manual y remota, pero debido a las condiciones sanitarias, se converge en un modelo virtual.

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 optimicen las operaciones de uso.

En el capítulo 2 se explica la forma de trabajo, 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, así como la generación de conceptos para seleccionar y evaluar las diversas soluciones.

En el capítulo 4 se realiza el diseño de configuración donde se organiza el sistema general en módulos para finalizar con una selección preliminar de materiales y procesos de manufactura.

En el capítulo 5 se realiza el diseño de detalle de cada uno de los subsistemas donde se seleccionan los componentes potenciales del Reactor Biológico Tubular (RBT) y su ubicación en modelos tridimensionales.

En el capítulo 6 se realiza la creación de los modelos y entorno virtual que permite desplegar cada uno de los subsistemas generados y la verificación de ensamble entre ellos.

## 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 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 Universidad Nacional Autónoma de México. La finalidad del reactor era degradar biológicamente los contaminantes disueltos en el agua residual por medio de un material basado en biopartículas que desarrollaron los responsables del proyecto. Para su colocación, los responsables diseñaron un circuito tubular de ocho vías por donde se colocaría el material de filtración. 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.

## 1. Planteamiento del problema

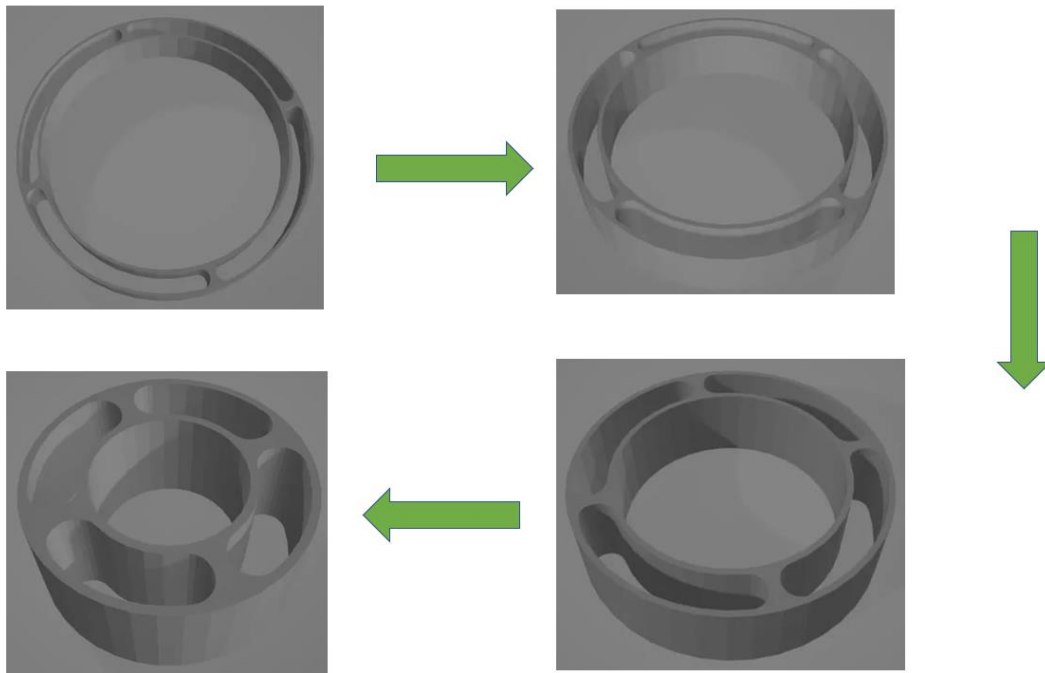
Una de las primeras actividades dentro del desarrollo del proyecto fue una visita guiada por el Dr. Sergio Adrián García González y uno de sus ayudantes a la Facultad de Química, esto con la finalidad de mostrar la propuesta de diseño del sistema tubular de ocho vías, el material basado en biopartículas y recabar los requerimientos del sistema general. El diseño del sistema tubular estaba conformado por ocho tubos de PVC de 4 [in] sujetos 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 ocho 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 biopartículas se colocaría en la parte interior de los tubos de 4 [in] por medio de un bastidor (figura 2) como estructura de soporte interno y por donde circularía el agua residual en los laterales y en la parte media, 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

flujo 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 de los datos analizados sin involucrar un desplazamiento de los operarios.



*Figura 2. Piezas que soportarían al bastidor dentro de la tubería del RBT.*

## 1.1 Justificación

Xochimilco es una zona lacustre ubicada en el sureste de la Ciudad de México (figura 3), 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.

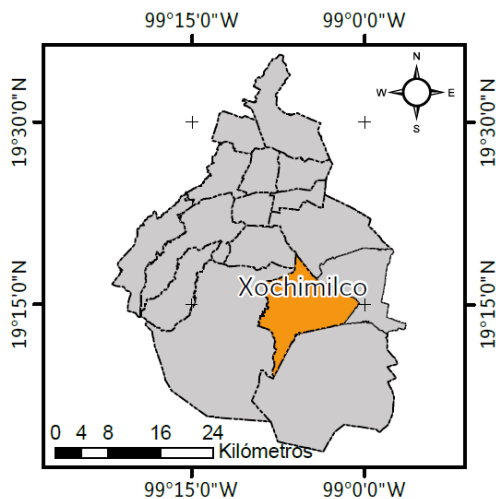


Figura 3. Mapa de la localización de la Alcaldía Xochimilco.



Figura 4. 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 4). Aunque en la actualidad se encuentra reducido a unos pocos canales que riegan la mitad norte de la Alcaldía 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 aguas residuales se dividen en dos grupos según su procedencia, por un lado, las aguas residuales municipales que proceden de comercios, escuelas y hogares urbanos y rurales, y las aguas residuales industriales generadas en los procesos industriales.

El método más utilizado para realizar el tratamiento de las aguas residuales son las PTAR (Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales). En estas plantas, los métodos de tratamiento más comunes son los tratamientos primarios, secundarios y terciarios. [25]

Los tratamientos primarios son tratamientos físicos que remueven sólidos de gran tamaño, los secundarios son procesos biológicos en los que actúan microorganismos encargados de la degradación de la materia orgánica presente en las aguas residuales [25] y el terciario utiliza procesos especializados como la nitrificación-desnitrificación y la remoción biológica de fósforo.

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 5), como se observa en la figura 6, la mayor parte de las PTARs se encuentran al norte de la ciudad debido a la actividad industrial y económica de cada entidad.

En 116 [km] de canales de la zona lacustre, divididos en 253 tramos, se detectó que en sus márgenes hay un total de 1374 descargas irregulares, de las cuales 603 son de aguas negras y 771 de grises. [7]

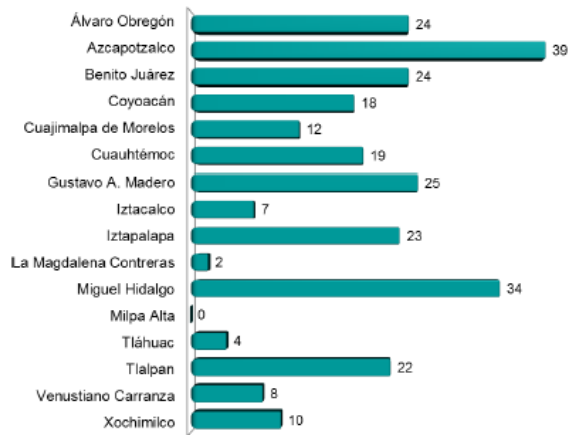


Figura 5. Número de PARTs por Alcaldía.

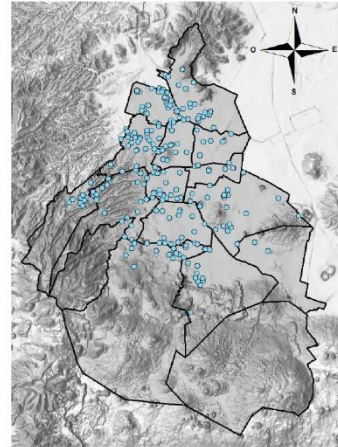


Figura 6. Mapa de distribución de PTARs en la Ciudad de México.

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 7).

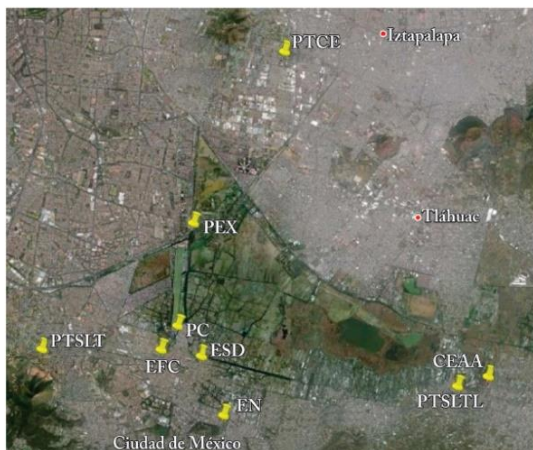


Figura 7. Plantas de tratamiento de aguas negras del Cerro de la Estrella (PTCE), de San Luis Tlaxialtemalco (PTSLTL) y algunas descargas de aguas tratadas en la ZLX: Parque Ecológico de Xochimilco (PEX), Parque Cuemanco (PC), Embarcadero Fernando Celada (EFC), Embarcadero Nativitas (EN), Embarcadero San Diego (ESD).

En la evaluación cualitativa/semi-cuantitativa de contaminantes orgánicos en agua del área natural protegida de Xochimilco [10] se detectaron 89 sustancias orgánicas presentes en agua, las cuales se dividieron en cinco 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 8).

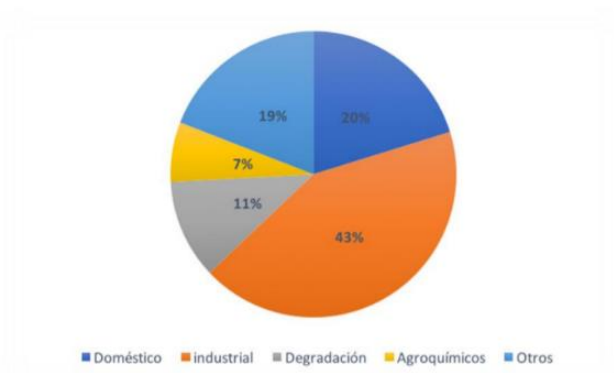


Figura 8. Contribución de contaminantes orgánicos en función de su uso.

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 [10], 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.

## 1.2 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 presencial y remotamente.

## 1.3 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

## 2. 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, 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 se muestran en la tabla 1.

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

Subsistema	Función general
<b>Instrumentación</b>	Encargado de capturar, analizar y enviar información de las variables de estudio.
<b>Interfaz</b>	Encargado de desplegar la información de las variables de estudio de forma local y en forma remota.
<b>Bombas y energía</b>	Encargado de proveer la energía necesaria a los subsistemas y la activación o desactivación de la bomba y el soplador de manera manual.
<b>Ensamble</b>	Encargado de dar soporte y protección a los elementos que conforman al RBT

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

Tabla 2. Necesidades y requerimientos del RBT.

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, flujo 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 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.

## 2.1 Necesidades por subsistema

El subsistema de Instrumentación se encargará de proporcionar al subsistema de Interfaz los datos sobre el estado de las variables de pH, oxígeno disuelto, flujo 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:

1. Proporcionar el estado ON/OFF del subsistema al RBT.
2. Cuantificar los valores de pH, oxígeno disuelto, flujo y turbidez del agua en el RBT.
3. Comunicar local y remotamente el RBT con el operario.
4. Permitir un control local y remoto de la circulación y retroalimentación del agua.
5. Monitorear local y remotamente las variables de estudio.
6. 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 y las opciones de purga automática, tomando en cuenta un enfoque centrado en el usuario. Las necesidades de este subsistema se muestran a continuación:

1. Desplegar la información proveniente de los sensores de manera clara y sencilla para el operario.
2. Administrar los datos provenientes de los sensores de manera local y remota.
3. Mostrar los estados de energía, circulación y retroalimentación del agua y purga del RBT de forma clara y sencilla para el operario.

4. Ubicar cada opción dentro de la interfaz tomando como base la experiencia del usuario y la usabilidad del subsistema.

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:

1. Regular la energía eléctrica proveniente de la alimentación para el correcto funcionamiento de la bomba y soplador.
2. Distribuir la energía eléctrica regulada a cada subsistema para su correcto funcionamiento.
3. Controlar de manera manual el encendido y apagado del RBT, la purga de la bomba y la recirculación del agua residual.
4. 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:

1. Diseñar una estructura estable, ergonómica y adaptable al diseño predeterminado.
2. Diseñar una estructura cuyo ensamble y desensamble sea accesible para el usuario.
3. Proporcionar los espacios suficientes para cada uno de los componentes de los subsistemas.
4. Proteger a cada uno de los componentes que se encuentren en contacto con factores externos.
5. 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.

[20] Las especificaciones del producto no indican al grupo cómo manejar las necesidades del proyecto, pero representan una base sobre lo que el grupo deberá hacer para satisfacer las necesidades del proyecto. [20] Tomando como base lo anterior, se identificaron las especificaciones de cada subsistema para su análisis individual.

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

Tabla 3. Especificaciones del subsistema de Instrumentación.

Necesidad	Especificación	Unidad de medida	Justificación	Especificación
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.	1
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 analógicos.	2
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.	3
2,5	pH del agua	Adimensional	El rango del pH de agua reutilizable para uso doméstico se encuentra entre los valores 6.5-8.5 [11]	4
2,5	Oxígeno disuelto	$\frac{mg}{l}$	El oxígeno disuelto es la cantidad de oxígeno gaseoso que está disuelto en el agua, si tenemos una concentración de 7.5 a 9.5 $\frac{mg}{l}$ hay oxígeno suficiente para la vida acuática. [12]	5



2,5	Turbidez	NTU	La turbidez del agua es un indicador de la calidad del líquido, por lo tanto, en un rango de 1-5 [NTU] ( <i>Nephelometric Turbidity Units</i> ) se tiene una calidad del agua adecuada para fines domésticos. [13]	6
2,5	Flujo del agua	L/min	Con base en los componentes existentes y estudios realizados por los responsables del proyecto, se tiene un flujo máximo de 300 L/min.	7
3	Distancia de comunicación	cm	Se propone un espacio de trabajo de 10 a 200 [cm] para la comunicación entre subsistemas.	8
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.	9

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

Tabla 4. Especificaciones del subsistema de Interfaz.

Necesidad	Especificación	Unidad de medida	Justificación	Especificación
1	Velocidad de los datos	Baudios	Se propone una velocidad de 9600 a 115200 baudios para la comunicación entre la parte de Interfaz e Instrumentación debido a que son velocidades de transmisión estándar soportadas por todos los puertos seriales. [14]	1
1,2, 4	Información de las variables de estudio	Subjetivo	Se busca conectar al usuario y al software de forma subjetiva, por lo que la evaluación de este depende del usuario.	2
2,1	Administración de datos	$\frac{Mb}{s}$	Se propone trabajar con una velocidad de 20 $[\frac{Mb}{s}]$ para conectar el servicio de internet con el subsistema de Interfaz, debido a que es la	3

			velocidad estándar básica ofrecida por los proveedores de internet en México. [15]	
<b>3</b>	Suministro de energía al sistema	Bit	Se consideró trabajar con señales digitales, en donde encendido corresponde al estado lógico 1 y apagado al estado lógico 0.	<b>4</b>
<b>3</b>	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.	<b>5</b>
<b>3</b>	Purga	Bit	Se consideró trabajar con señales digitales, en donde encendido corresponde al estado lógico 1 y apagado al estado lógico 0.	<b>6</b>

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

*Tabla 5.* Especificaciones del subsistema de Bombas y Energía.

<b>Necesidad</b>	<b>Especificación</b>	<b>Unidad de medida</b>	<b>Justificación</b>	<b>Especificación</b>
<b>1</b>	Regulación de energía eléctrica	Volt [V]	Se busca acondicionar la alimentación en un valor de 110-130 [V] a la entrada del RBT.	<b>1</b>
<b>2</b>	Distribución de energía eléctrica	Metro [m]	Se propone una distribución por medio de cables y el uso de 20 [m] con base en la visita realizada presentada en el capítulo 1.	<b>2</b>
<b>3</b>	Estado del RBT	Adimensional	Se busca proporcionar al usuario por lo menos un preactuador para el estado del RBT.	<b>3</b>
<b>3</b>	Purga	Adimensional	Se busca proporcionar al usuario por lo menos un preactuador para la purga de la bomba.	<b>4</b>
<b>3</b>	Recirculación del agua	Adimensional	Se busca proporcionar al usuario por lo menos un preactuador para la recirculación del agua.	<b>5</b>
<b>4</b>	Estado de los subsistemas	Lumen	Se busca un requerimiento visual simple para que los operarios identifiquen los colores, por lo tanto, el nivel mínimo de iluminación debe ser de 200 Luxes [16]	<b>6</b>

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

Tabla 6. Especificaciones del subsistema de Ensamble.

Necesidad	Especificación	Unidad de medida	Justificación	Especificación
1,2	Estructura	Adimensional	Se busca diseñar una estructura con el menor número de piezas.	1
2,1	Ensamble y desensamble	Subjetivo	Se propone que el ensamble y desensamble del RBT sea de fácil operación para el usuario, por lo que la evaluación de este depende del usuario.	2
3	Distribución de espacios	Volumen (v)	Se plantea una distribución por el volumen que ocupan cada uno de los componentes.	3
4	Protección a componentes	Ingress Protection (IP)	Se busca un grado de protección IP56 para polvo y agua. [23]	4
5	Protección a usuario	Adimensional	Se propone integrar componentes que indiquen al operario sobre cualquier riesgo físico.	5

Cada una de las especificaciones de los subsistemas permitirán satisfacer las necesidades requeridas en cada uno de estos. El uso de métricas prácticas dará propiedades al RBT de modo que puedan ser evaluadas de una manera sencilla por los integrantes de cada subsistema. Algunas de estas métricas no podrán cuantificarse y dependerán de la subjetividad, tal es el caso de la experiencia del usuario en el subsistema de Interfaz.

## 2.3 Restricciones por subsistema

Algunas necesidades no pueden ser técnicamente realizables, se necesitan comprobar su factibilidad técnica y económica para incorporarse en el desarrollo del proyecto. Una restricción es una consideración que tiene que ver con las limitaciones impuestas por factores externos de orden físico, económico, social y funcional. [17]

Con base en estas características, cada subsistema planteó sus restricciones e identificó la especificación que corresponde a cada una.

Las restricciones para el subsistema de Instrumentación se presentan en la tabla 7.

*Tabla 7.* Restricciones del subsistema de Instrumentación.

<b>Especificación</b>	<b>Restricción</b>
<b>1,3,9</b>	El número de bits disponibles para cada operación.
<b>2</b>	El tratamiento del voltaje para dar un valor en el rango propuesto.
<b>4,5,6,7</b>	La confiabilidad de los sensores para cuantificar las variables de estudio.
<b>8</b>	El diseño de la estructura por parte del subsistema de Ensamble.

Las restricciones del subsistema de Instrumentación, en primera instancia, dependen de la parte electrónica que el subsistema tendrá que diseñar e implementar para el RBT. Los valores obtenidos por los sensores, el tratamiento y análisis de estos datos, así como de la transmisión de estos a los subsistemas que necesiten de ellos generará restricciones de confiabilidad a la parte eléctrica/electrónica, ya que en ella radica la instrumentación del RBT.

Las restricciones para el subsistema de Interfaz se presentan en la tabla 8.

Tabla 8. Restricciones del subsistema de Interfaz.

Especificación	Restricción
1	El tipo de componente electrónico a utilizar.
3	La velocidad real del servicio de internet.
2	Al ser una medición subjetiva por parte del usuario, la retroalimentación proviene del mismo.
4,5,6	El funcionamiento correcto de cada parte que conforma al subsistema, así como de la metodología en el diseño de los algoritmos.

Las restricciones de subsistema de Interfaz, en primera instancia, radican en la metodología para el diseño de algoritmos que se ajusten a mejorar la experiencia del usuario, por lo tanto, sus especificaciones se medirán de forma subjetiva. El subsistema de Interfaz desplegará la información de las variables de estudio y de los estados de todos los subsistemas, en este caso, sus restricciones radicarán en la transmisión local y remota de estos datos, así de su correcto almacenamiento para el uso en trabajos futuros.

Las restricciones para el subsistema de Bombas y Energía se presentan en la tabla 9.

Tabla 9. Restricciones del subsistema de Bombas y Energía.

Especificación	Restricción
1,2	El manejo en la regulación de la energía eléctrica que se suministra a cada subsistema.
2	El diseño de la estructura por parte del subsistema de Ensamble.
3,4,5,6	Al ser una medición subjetiva por parte del usuario, la retroalimentación proviene del mismo.

Las restricciones del subsistema de Bombas y Energía se basan principalmente en la alimentación que se le proporcionará al RBT. Deberán ajustar sus especificaciones para tener una correcta regulación de la energía y proporcionarla a cada subsistema. Por otro lado, el diseño de la interfaz

física se medirá de forma subjetiva por parte del usuario y su distribución se basará en los espacios que el subsistema de Ensamble proponga para Bombas y Energía.

Las restricciones para el subsistema de Ensamble se presentan en la tabla 10.

Tabla 10. Restricciones del subsistema de Ensamble.

<b>Especificación</b>	<b>Restricción</b>
<b>1</b>	Los elementos en existencia proporcionados por la Facultad de Química.
<b>2,3</b>	La correcta distribución de los espacios para los subsistemas.
<b>3</b>	El número de componentes a utilizar por los subsistemas.
<b>4</b>	La exposición real de los componentes con un factor externo.
<b>5</b>	Que el plan de seguridad se ajuste y trabaje conjuntamente con los subsistemas.

Las restricciones del subsistema de Ensamble se basan principalmente en el diseño realizado en un inicio por los responsables de la Facultad de Química. Como se mencionó en el capítulo I, se tiene un sistema tubular de ocho vías por donde circulará el agua residual y al finalizar el tratamiento se almacenará el agua tratada. En esta parte, la distribución de espacios y exposición real de los componentes eléctricos, electrónicos y del usuario forman parte de las restricciones que el subsistema de Ensamble deberá tomar en cuenta en sus especificaciones.

En este apartado se plantearon las restricciones que cada subsistema debería tomar en cuenta para plantear conceptos que estarían alineadas al objetivo general. El inicio del proyecto se llevó a cabo por los responsables de la Facultad de Química y, por tanto, el sistema debería cumplir con los estándares planteados por ellos. Cada subsistema ajustó sus conceptos a las condiciones iniciales del RBT generando así la etapa conceptual que se presenta en el capítulo siguiente.

### 3. Diseño conceptual

La generación de soluciones posibles se le califica por lo general como la etapa conceptual. Los esbozos de soluciones se preparan, mismos que funcionan con los detalles suficientes que indican los medios para obtener cada una de las funciones requeridas, por ejemplo, tamaños aproximados, muestras de materiales y costos. [18]

El diseño conceptual es un diseño iterativo, en donde los conceptos son los medios para generar la función, en donde la función nos dice qué debe de hacer el producto, en la figura 9, se observa dicho proceso. [19]

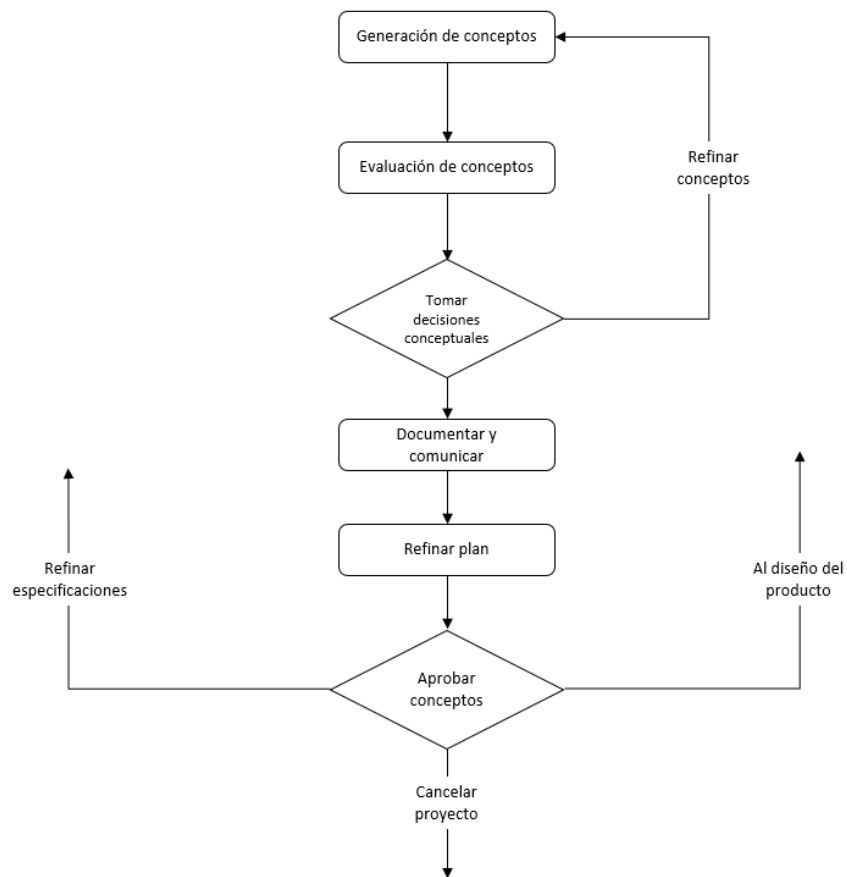


Figura 9. Proceso del diseño conceptual.

### 3.1 Sistematización

Es importante recordar la función que va a realizar el RBT, la cual se encuentra alineada con el objetivo general propuesto en el presente trabajo. La función nos dice lo que el sistema debe hacer, la forma o estructura comunica cómo el sistema o producto hará dicha acción. [19] Por el momento nos enfocaremos en explorar sistemáticamente cada subsistema. La exploración sistemática está destinada a buscar el espacio de posibilidades al organizar y sintetizar las relaciones entre cada subsistema dentro del RBT.

Todos los problemas de diseño tienen uno o dos funciones “más importantes”. Estas deben ser reducidas a una simple cláusula y colocarse en una caja negra. [19] Las entradas de esta caja son toda la energía, el material y la información que fluye hacia los límites del sistema. Las salidas son las que fluyen fuera del sistema. Partiendo de cada subsistema como un sistema en sí, se puede definir la existencia de sus propios subsistemas que desempeñarían subfunciones de la función general. Los sistemas del subsistema Instrumentación, presentados por medio de un diagrama de caja negra, se muestra en la figura 10.



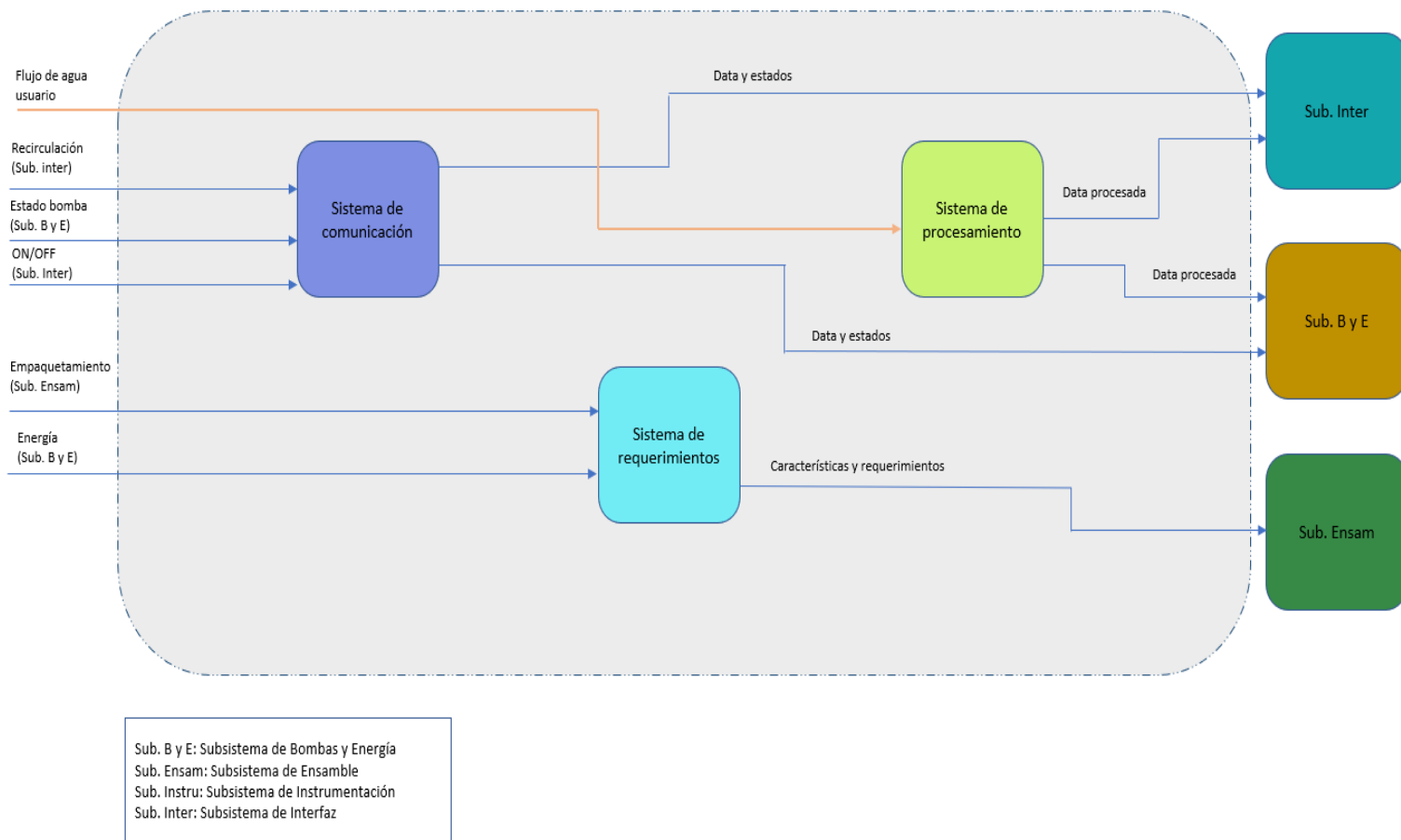


Figura 10. Sistemas del subsistema Instrumentación.

Se identificaron tres sistemas en el subsistema Instrumentación. El sistema de comunicación tendrá como entradas el estado ON/OFF del subsistema de Interfaz, el estado de la bomba por parte de Bombas y Energía, además de la señal de recirculación del agua en el RBT. Este sistema transmitirá los datos y estados a los subsistemas de Interfaz y Bombas y Energía para mostrar y accionar los elementos necesarios para el funcionamiento del RBT. Por otro lado, a la entrada del sistema de procesamiento se tendrá el flujo del agua residual, este sistema administrará los datos para transferirlos de manera consistente a los subsistemas Interfaz y Bombas y Energía respectivamente. Finalmente, Instrumentación necesita la protección y los espacios necesarios para la instalación del subsistema. Esta característica estará proporcionada por el sistema de

requerimientos, el cual recabará las condiciones de uso, protecciones y empaquetamiento del subsistema de Instrumentación.

Los sistemas del subsistema de Interfaz, presentados por medio de un diagrama de caja negra, se muestra en la figura 11.

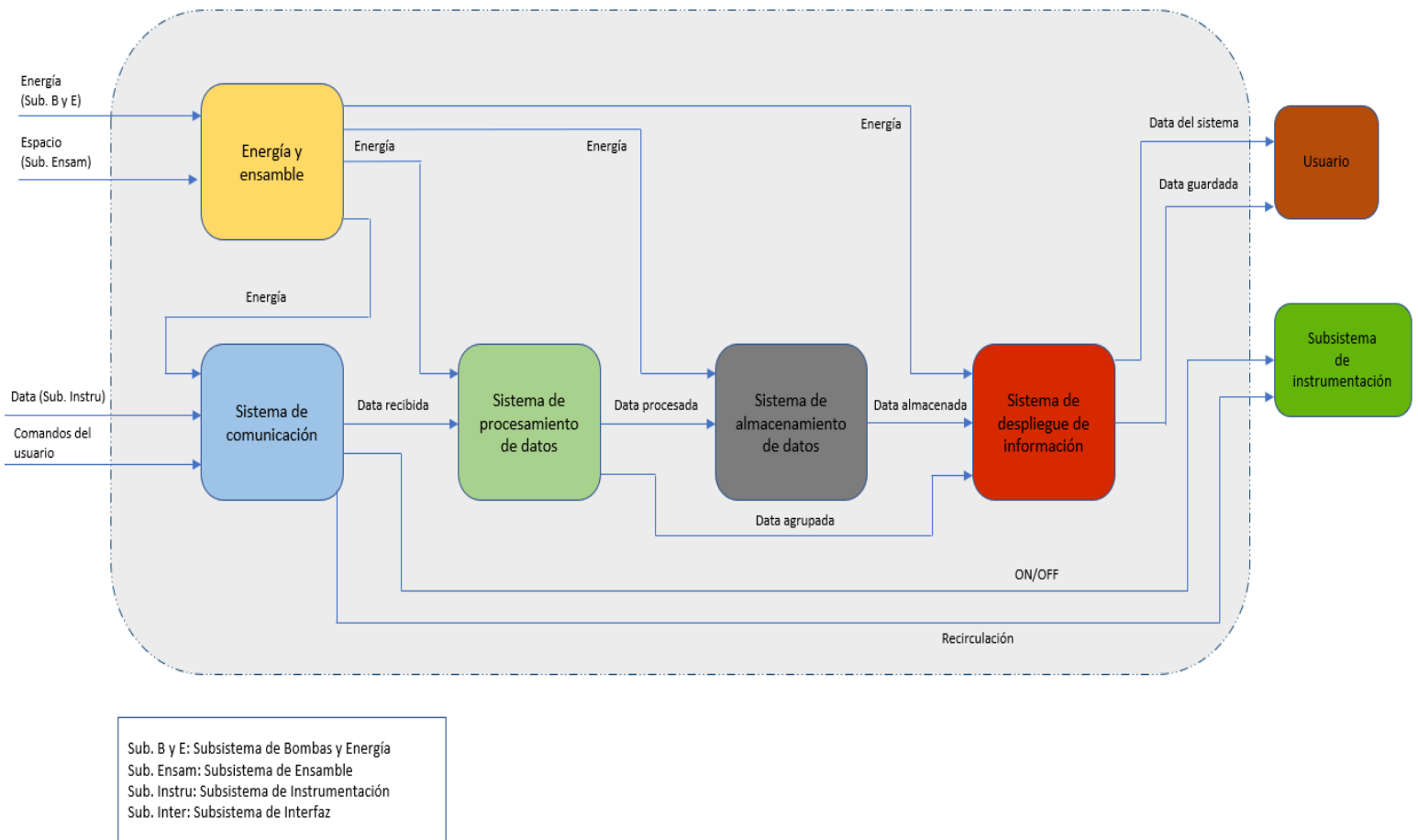


Figura 11. Sistemas del subsistema Interfaz.

La figura 11 muestra los sistemas que conforman al subsistema de Interfaz, se identificaron cinco sistemas, el sistema de energía y ensamble tendrá como entradas la energía de alimentación, el

espacio y la protección de cada componente de la interfaz. El sistema de comunicación manejará los datos provenientes del subsistema de Instrumentación, así como los comandos del usuario. Estos datos se procesarán, almacenarán y desplegarán para mostrarlos al operario del RBT. Aquí es donde se generan los sistemas de procesamiento, almacenamiento y despliegue de información hacia el usuario. Finalmente, el mismo sistema de comunicación tendrá la responsabilidad de enviar el estado ON/OFF y recirculación del agua al subsistema de Instrumentación con la finalidad de controlar el RBT de forma manual y remota.

Los subsistemas del sistema de Bombas y Energía, presentados por medio de un diagrama de caja negra, se muestra en la figura 12.

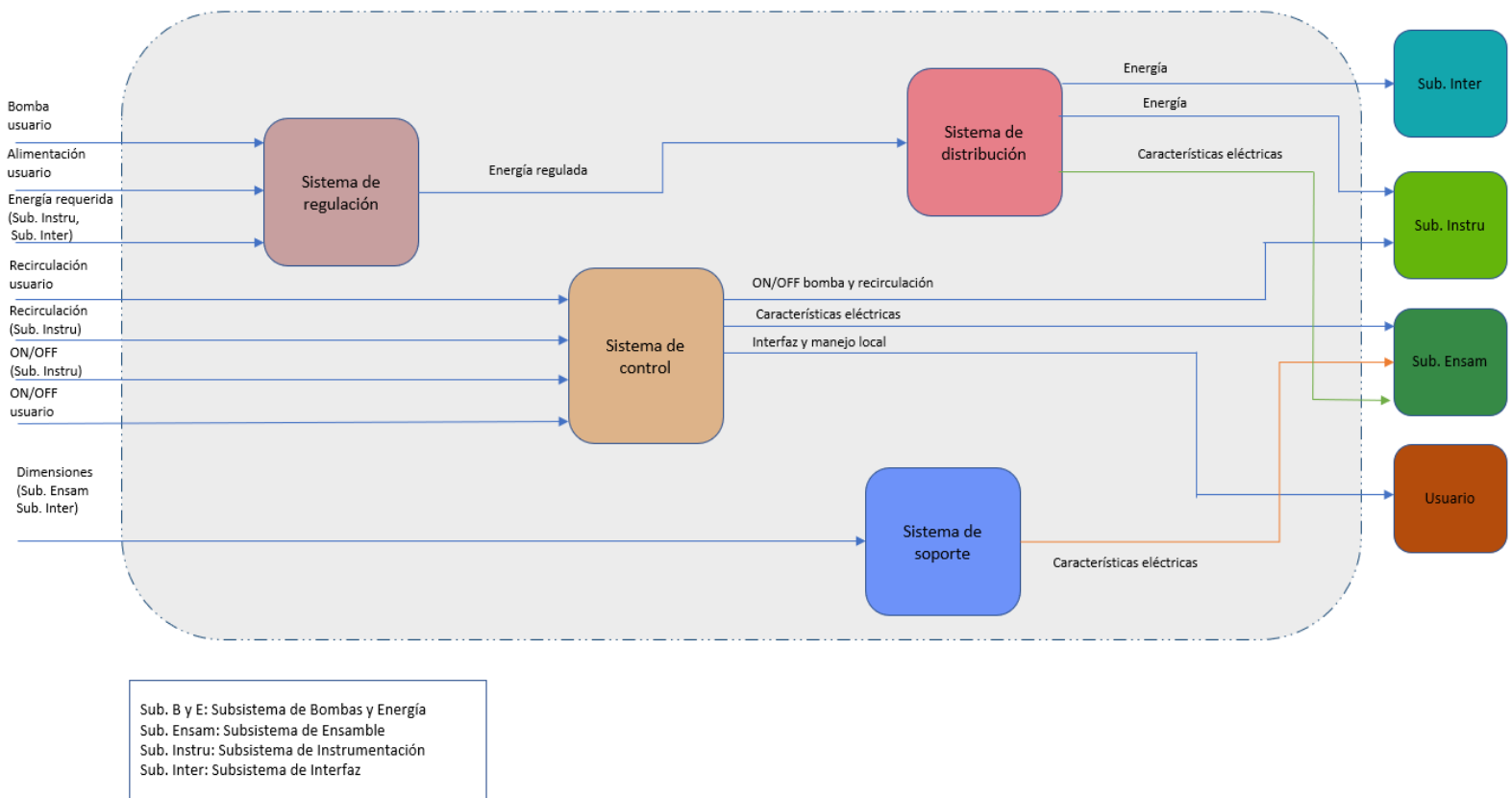


Figura 12. Sistemas del subsistema Bombas y Energía.

Los sistemas planteados en el subsistema de Bombas y Energía están relacionados con la alimentación de todos los subsistemas que conforman al RBT. Se tiene el sistema de regulación, el cual tendrá como entradas la alimentación regulada por el servidor de energía en México, además de los valores de la energía necesitada por los subsistemas para su correcto funcionamiento. Esta energía será distribuida a los subsistemas de Interfaz e Instrumentación por el sistema de distribución. Este mismo sistema proporcionará las características eléctricas al subsistema de Ensamble para que este evalúe la mejor vía para distribuir la energía. El sistema de control se encargará de procesar las señales de recirculación local y remota, el estado ON/OFF local y remoto del RBT y tendrá como salidas la activación y desactivación de la bomba. Finalmente, se plantea un sistema de soporte cuyas entradas serán las dimensiones del subsistema en sí y cuya salida será proporcionada al subsistema de Ensamble para garantizar los espacios necesarios.

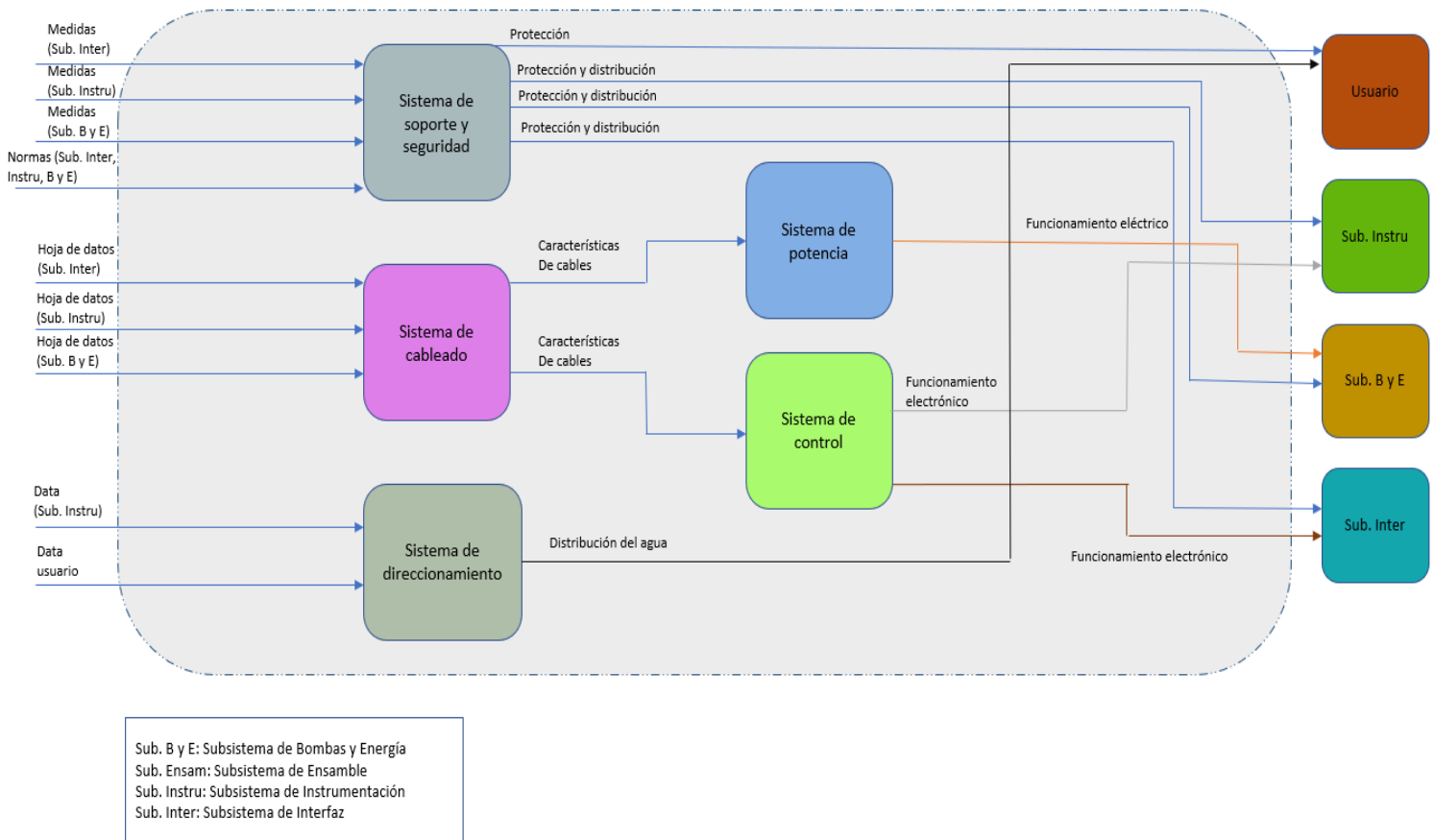


Figura 13. Sistemas del subsistema Ensamble.

Los subsistemas del sistema Ensamble, presentados por medio de un diagrama de caja negra, se muestra en la figura 13.

Los sistemas generados en el subsistema de Ensamble se relacionan con el soporte y la forma de distribuir la energía eléctrica a todos los subsistemas. Se tiene el sistema de soporte y seguridad, encargado de recibir las medidas y normas para el correcto funcionamiento de los componentes que integran al RBT, este sistema dará la protección y distribución de cada uno de estos valores a los sistemas de Instrumentación, Interfaz y Bombas y Energía. El sistema de cableado será el responsable de dar los medios de distribución de la energía eléctrica a Bombas y Energía. El sistema de potencia y sistema de control, tendrán como entradas las características de los cables generados en el sistema de cableado, y proporcionarán el correcto funcionamiento eléctrico y electrónico de Bombas y Energía, Instrumentación e Interfaz respectivamente. Finalmente, se propone un sistema de direccionamiento del agua, teniendo como entradas los datos de Instrumentación y del usuario, esto con la finalidad de almacenar o recircular el agua tratada.

### 3.2 Generaciones de conceptos

El concepto de un producto es una descripción aproximada de la tecnología, principios de trabajo y forma del sistema. Un concepto, por lo general se expresa como un bosquejo o como un modelo tridimensional aproximado. [20]

La generación de un concepto puede ser llevada a cabo con una mayor rapidez en comparación con el resto del proceso de desarrollo. El proceso de generación de conceptos empieza con un conjunto de necesidades del sistema y especificaciones objetivo, lo cual da como resultado un conjunto de conceptos del sistema general de los que el equipo hará una selección final. [20]

A continuación, se presentan los conceptos generados de cada uno de los subsistemas, así como de su respectiva interpretación.

C1. Sub  
Instru

Se presenta el sistema de procesamiento que muestra la ubicación de los sensores de las variables de estudio en una posición que permite el contacto con el agua residual. Estas señales se conectan a la instrumentación, la cual integra componentes electrónicos para el proceso de las entradas, ejecutando las salidas correspondientes a cada función.

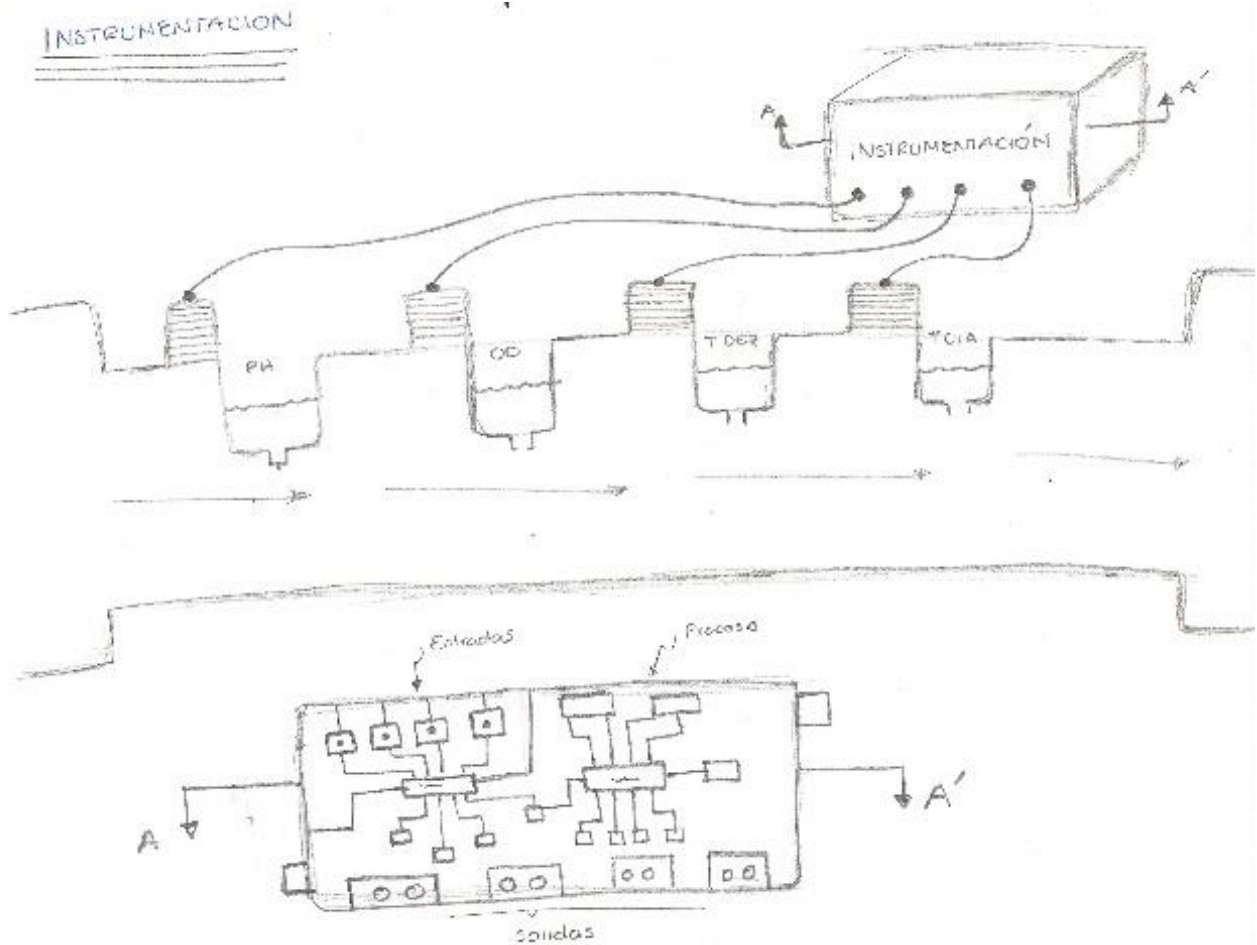


Figura 14. Representación del concepto C1. Sub Instru.

C2. Sub Instru

Se presenta en una vista frontal el sistema tubular que conformaría el sistema de requerimientos que integraría el empaquetamiento de los componentes, en la parte izquierda se encuentra la instrumentación que comunica al subsistema de interfaz el estado de las variables de estudio, en la parte inferior se observa el sistema de comunicación remota para la administración de los datos.

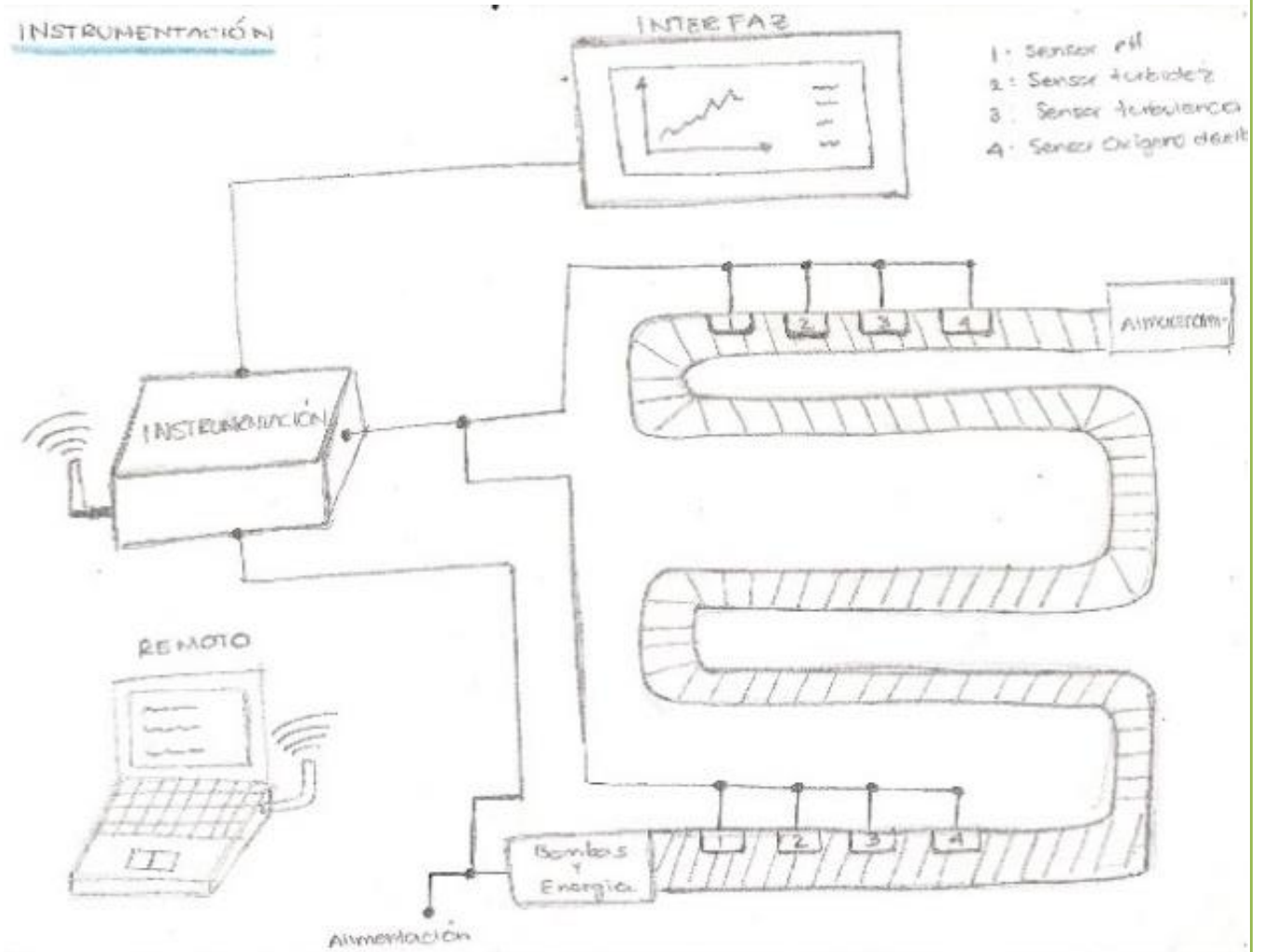


Figura 15. Representación del concepto C2. Sub Instru.

C3. Sub  
Inter

Para el sistema de comunicación se propone una comunicación inalámbrica para el despliegue de datos de manera remota, dentro del procesamiento, almacenamiento y despliegue de la información de las variables de estudio se propone dos interfaces, una física y otra en una computadora (remota), así como el respectivo almacenamiento de los datos en un espacio propio de la computadora.

### INTERFAZ

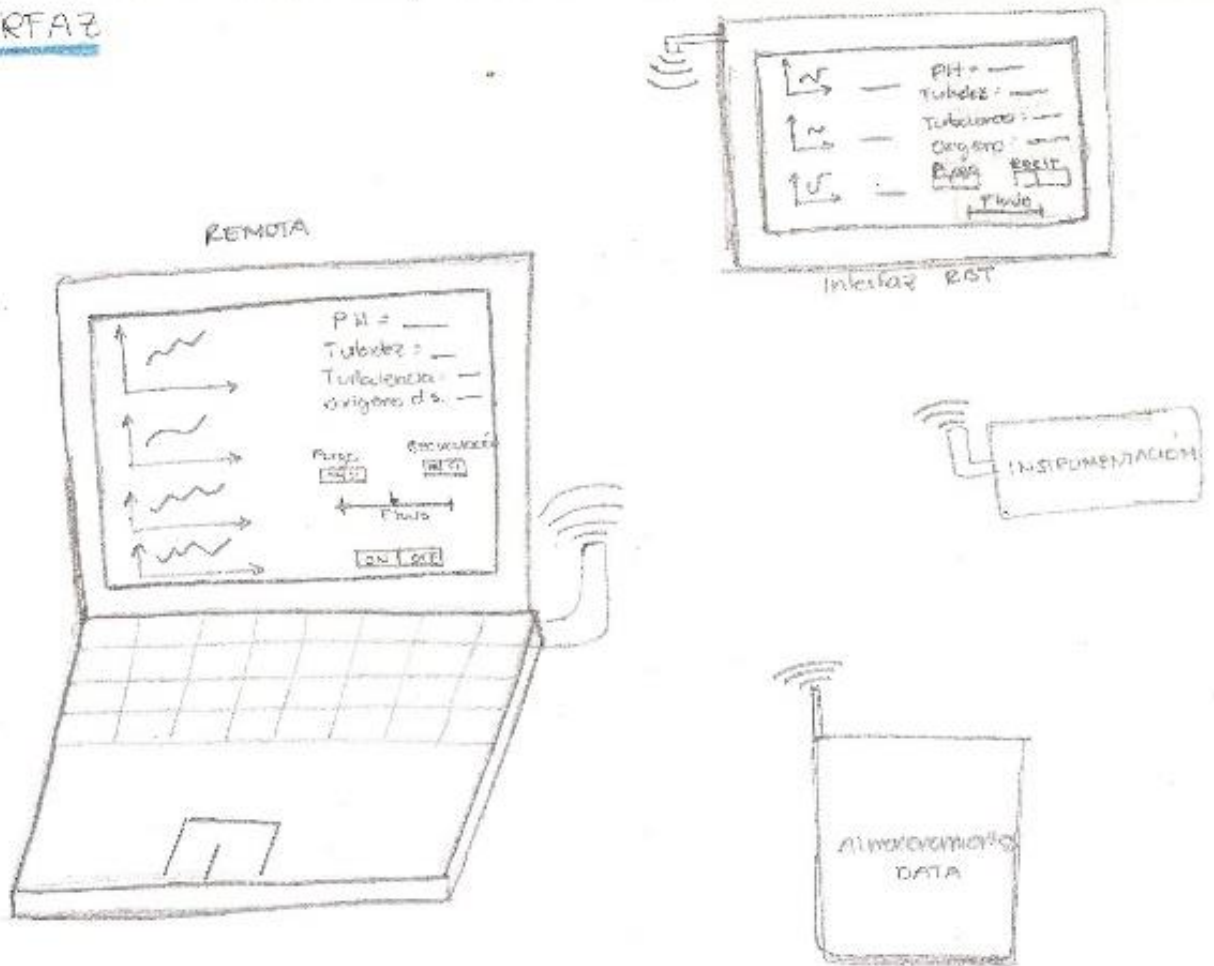


Figura 16. Representación del concepto C3. Sub Inter.



C4. Sub  
Inter

Se propone el sistema de comunicación con la ubicación de cada componente en la interfaz remota. La variable de estudio en la parte central para una mejor visualización, las opciones de ON/OFF, el paro de emergencia, una interacción numérica con los procesos y selección de la variable a estudiar. Se agrega un modo "Sync" (sincronización) para la transmisión de datos entre los subsistemas de Instrumentación e Interfaz.

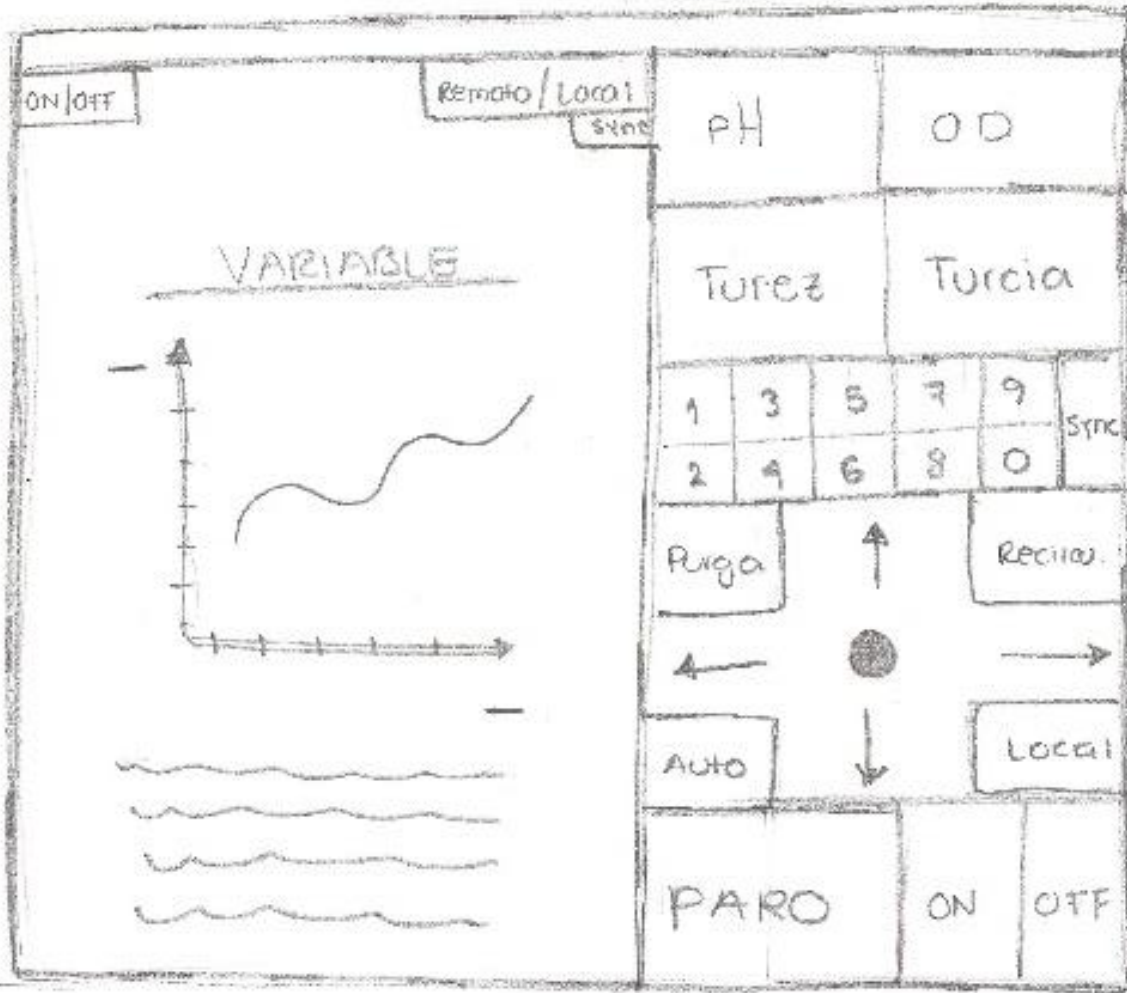


Figura 17. Representación del concepto C4. Sub Inter.

C5. Sub  
B y E

Se propone un panel físico que representaría el sistema de control, esto con la finalidad de proporcionar la interacción del usuario con el RBT. El sistema de distribución y regulación estarían representados por el bloque "Alimentación". De igual forma, se muestra una válvula para decisión de recirculación del agua en la parte superior derecha, así como su salida de almacenamiento.

### Bombas y Energía

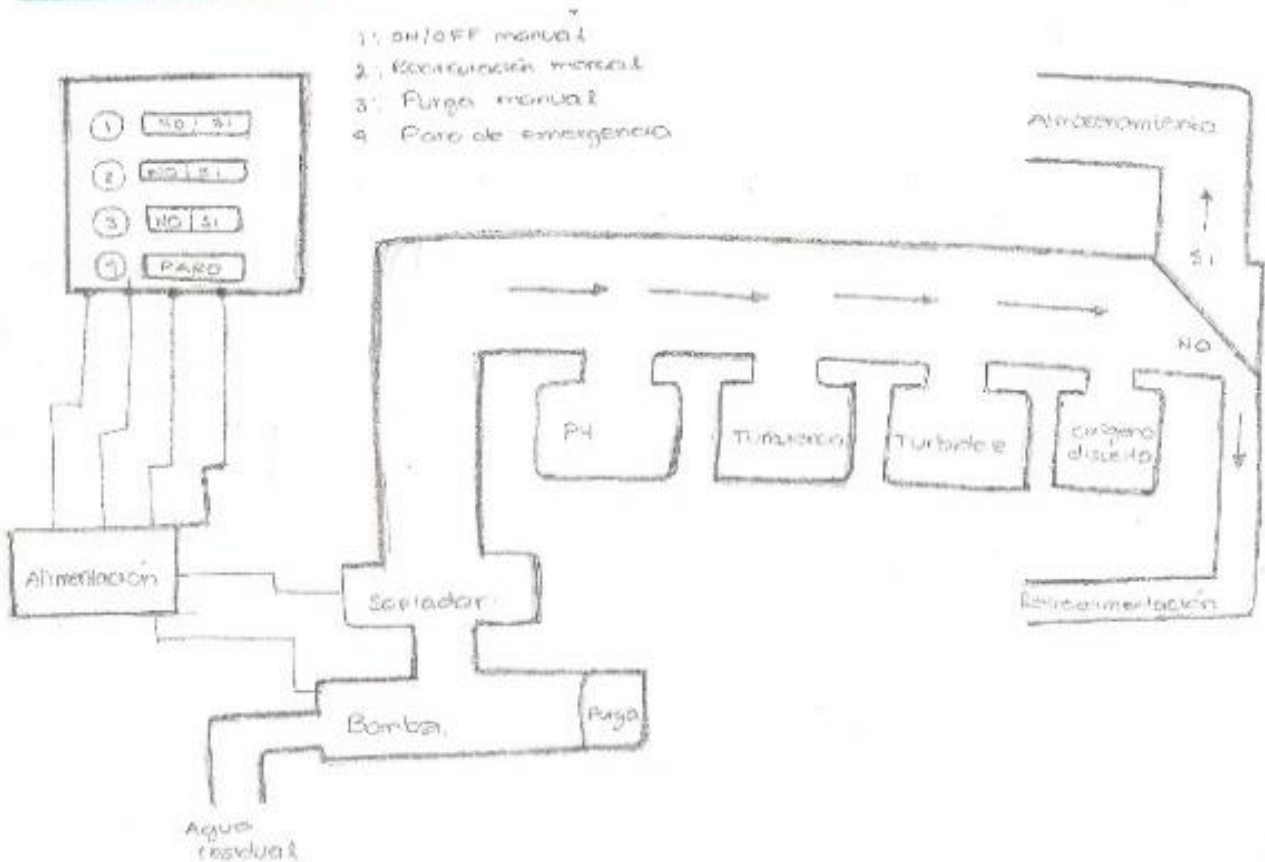


Figura 18. Representación del concepto C5. Sub B y E.

C6. Sub  
B y E

Se observa la conexión de la bomba y soplador más de cerca, así como la distribución del agua recirculada y de la tratada, estas características estarían representadas por los sistemas de distribución y soporte. Por otro lado, la regulación de la energía conectada a los subsistemas por medio de un panel con botones representaría al sistema de regulación y control respectivamente.

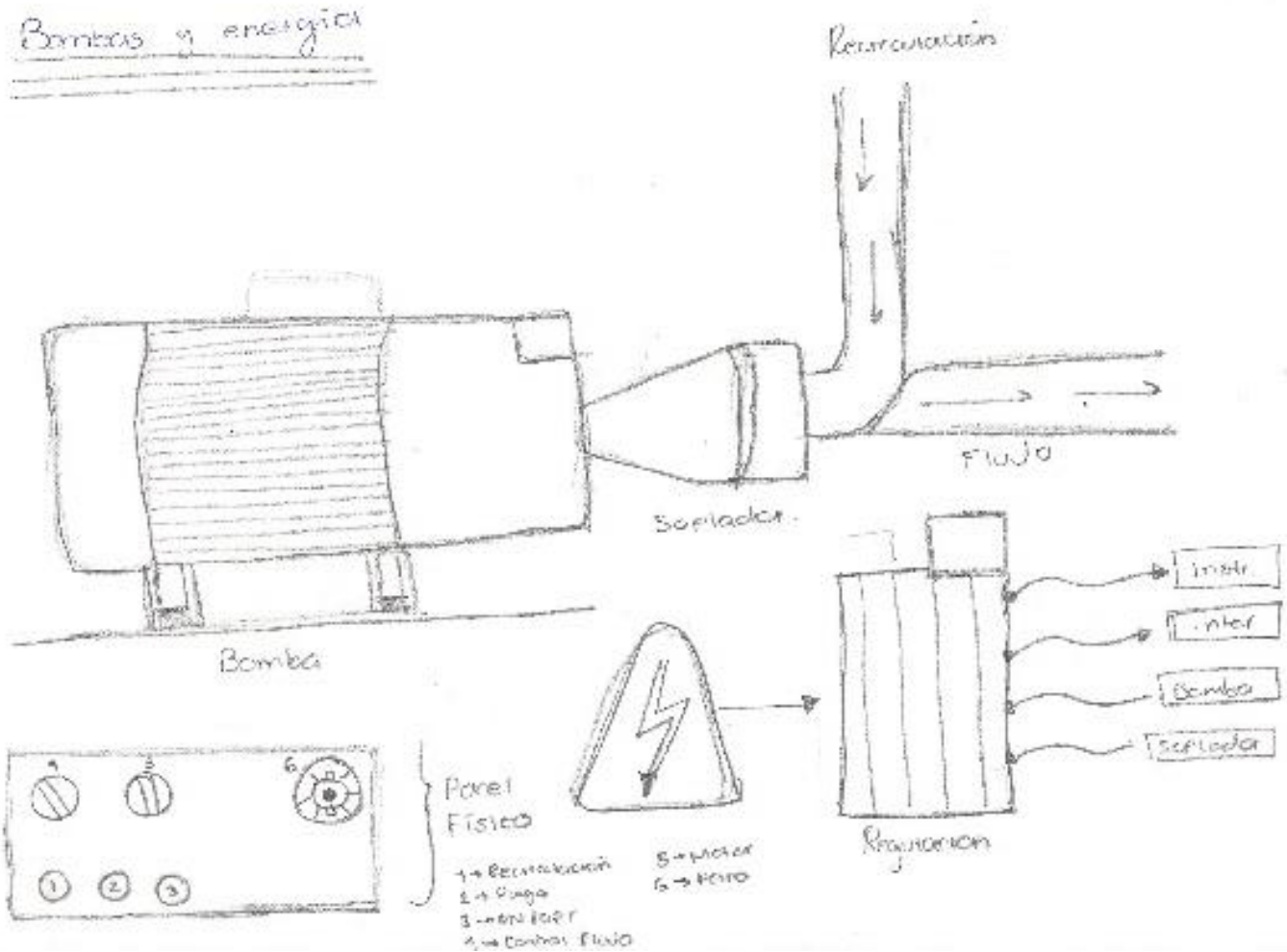


Figura 19. Representación del concepto C6. Sub B y E.

C7. Sub  
Ensam

Se propone una estructura anclada a una base donde se almacenaría el agua tratada, la cual conformaría el sistema de soporte y seguridad. Los sistemas de potencia y control integrados por el panel e interfaz física para el operario se ubican a un costado del RBT para tener una mayor área de operación. La protección de los sensores por medio de carcasas de mayor diámetro al tubo y el sistema de B y E que alimenta al RBT.

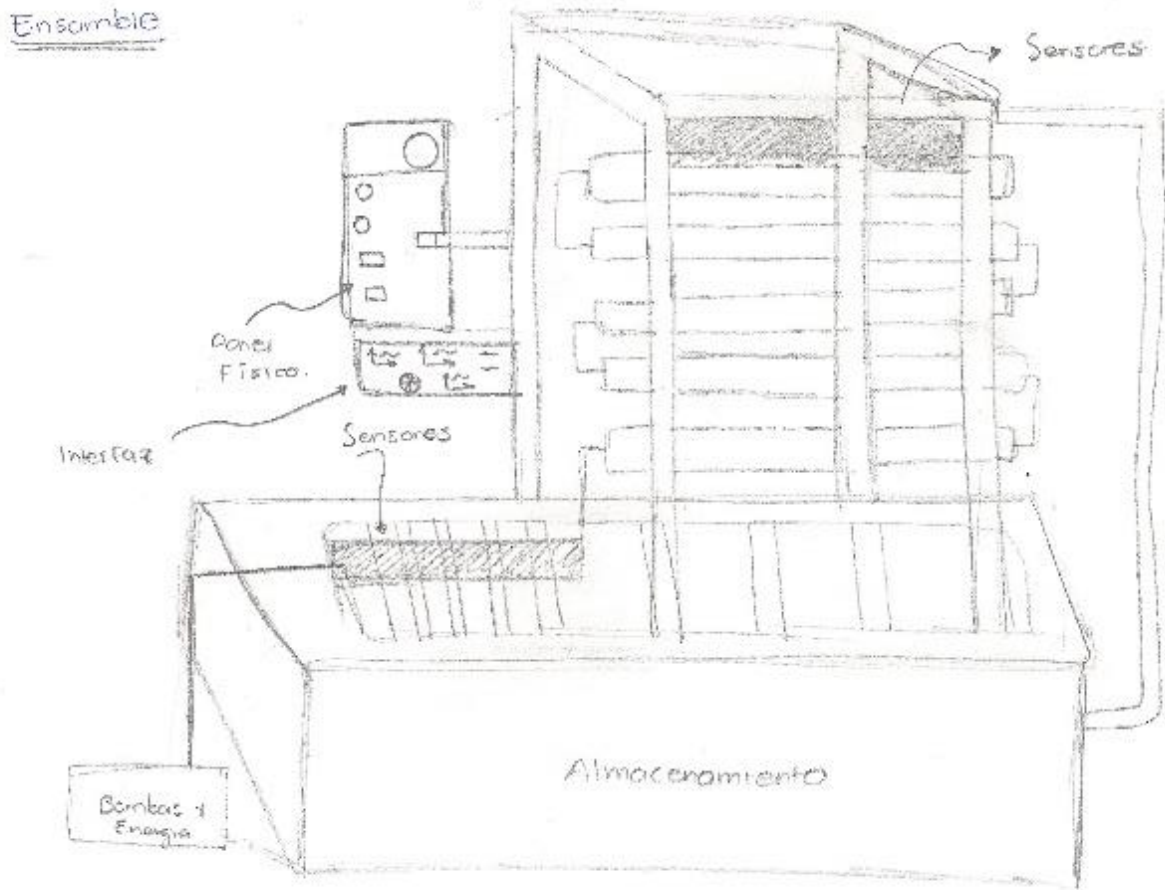


Figura 20. Representación del concepto C7. Sub Ensam.

C8. Sub  
Ensam

Se muestra una vista frontal del sistema tubular que está sostenido por una estructura más compacta. El sistema de protección a los sensores en la entrada y salida, así como un sistema de direccionamiento y almacenamiento del agua tratada. De igual forma, una conexión tubular para la recirculación de agua y el panel físico para el operario a un costado que conformarían el sistema de potencia y de control.

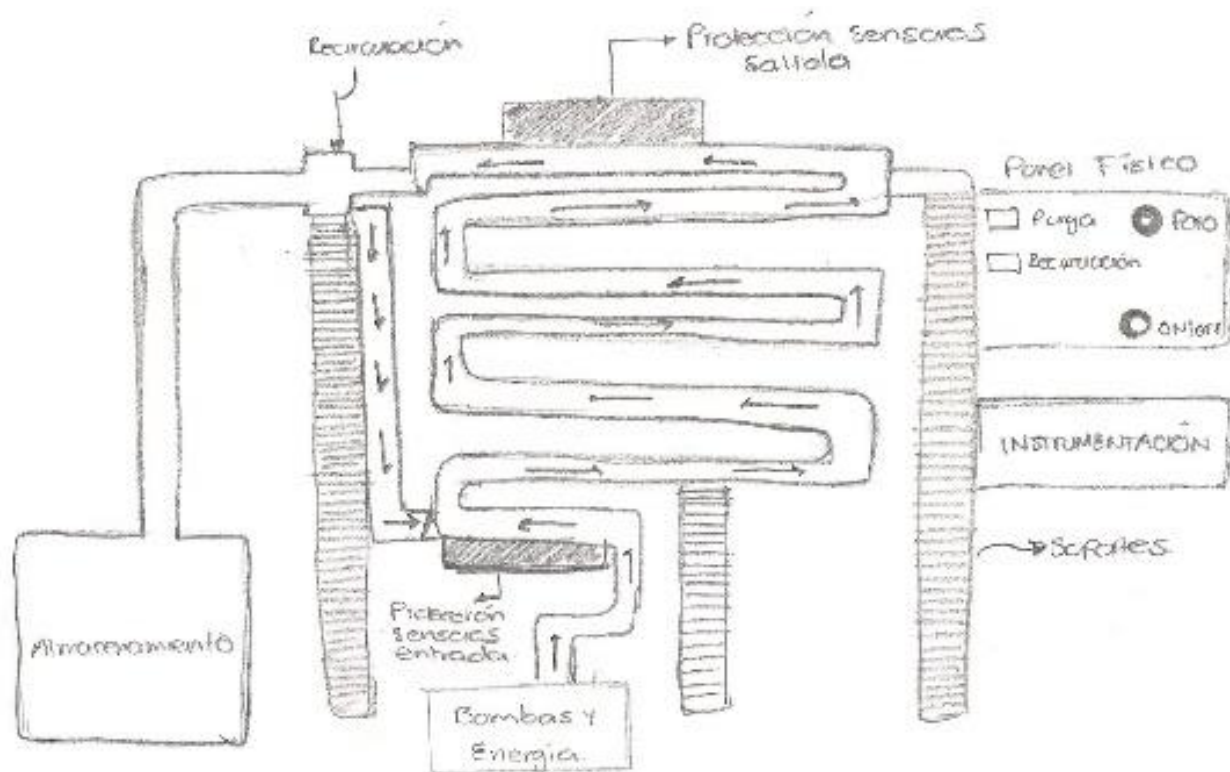


Figura 21. Representación del concepto C8. Sub Ensam.

Con base en estos conceptos se propone la construcción de una matriz morfológica, la cual se define como una técnica para identificar e investigar un conjunto de soluciones posibles (“configuraciones”) para un problema. [26] Existen tres pasos para esta técnica, el primero es agrupar y enumerar cada una de las funciones que debe realizar el sistema. El segundo paso es

encontrar conceptos que se ajusten a las funciones del sistema y el tercero es la combinación de estos conceptos unos con otros para generar un concepto general que cumpla con los requisitos funcionales del sistema.

En la tabla 11 se muestra la matriz morfológica del subsistema de instrumentación tomando en cuenta los conceptos generados y las funciones que debe realizar el subsistema.

El concepto generado C se propone como resultado de los conceptos C1. Sub Instru y C2. Sub Instru del subcapítulo 3.2

Tabla 11. Matriz morfológica del subsistema de Instrumentación.


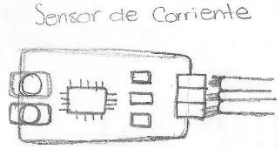

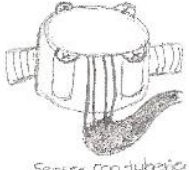

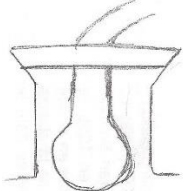
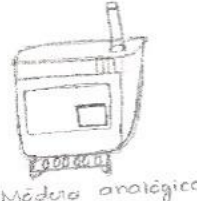

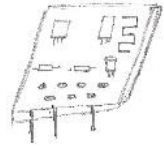
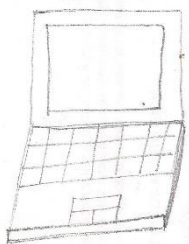
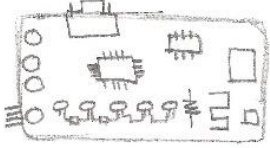
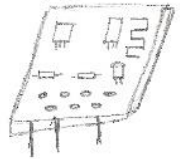
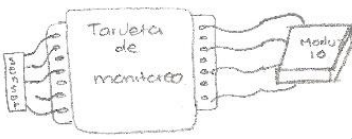

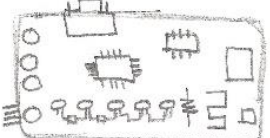
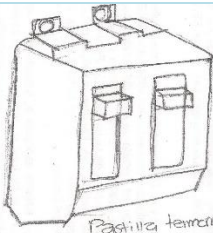
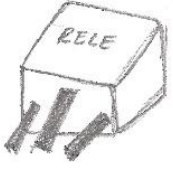
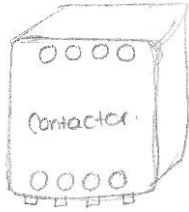

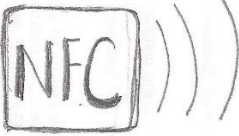

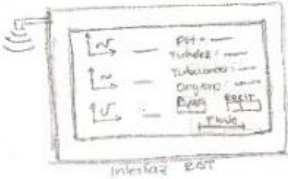
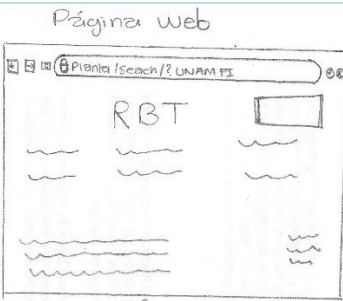


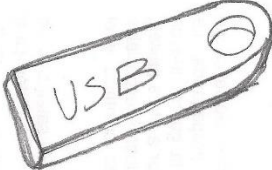
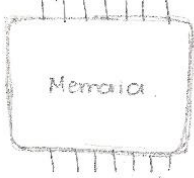
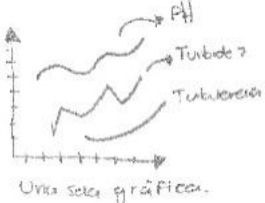
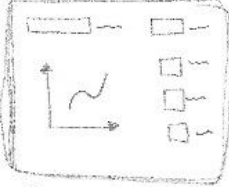
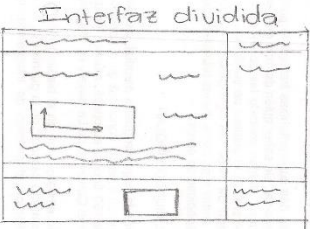
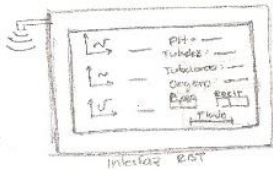
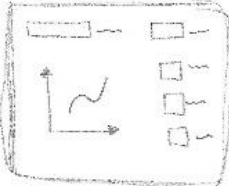
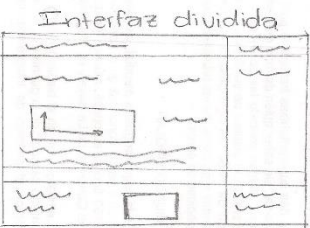
MATRIZ MORFOLÓGICA DEL SUBSISTEMA DE INSTRUMENTACIÓN			
Funciones	Concepto A	Concepto B	Concepto Generado C
Proporcionar el estado ON/OFF del subsistema			
Cuantificar los valores de las variables físicas			
Comunicar local y remotamente el RBT con el operario			

Tabla 11. Matriz morfológica del subsistema de Instrumentación.

<p>Permitir el control local y remoto de la circulación y retroalimentación del agua</p>	<p>Computadora</p> 	 <p>Microcontrolador</p>	<p>Módulo electrónico</p> 
<p>Monitorear local y remotamente las variables de estudio</p>	<p>Tarjeta de monitoreo</p> 	<p>Módulo remoto WiFi</p>  <p>Router</p>	 <p>Microcontrolador</p>
<p>Controlar la activación y paro de la bomba.</p>	 <p>Relay térmico magnético</p>	<p>RELE</p> 	<p>Contacto</p> 

El concepto generado F se propone como resultado de los conceptos C3. Sub Inter y C4. Sub Inter del subcapítulo 3.2



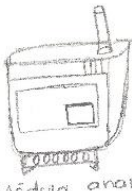



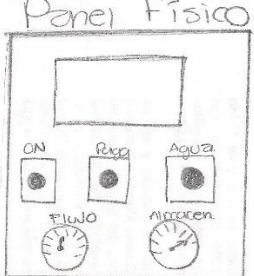
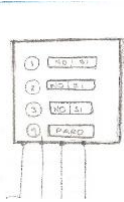
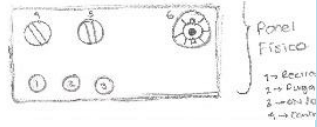



Tabla 12. Matriz morfológica del subsistema de Interfaz.

Matriz MORFOLÓGICA DEL SUBSISTEMA DE INTERFAZ			
Funciones	Concepto D	Concepto E	Concepto Generado F
Transmitir la información de las variables de estudio	 Alámbrico.	 NFC	 Inalámbrico.
Desplegar la información de las variables	 Interfaz RBT	 Página web	
Administrar los datos de las variables de estudio de manera local y remota	 Espacio en Servidor	 USB	 Memoria.
Mostrar los estados de energía, circulación y recirculación del agua	 Una sola gráfica.	 Panel touch.	 Interfaz dividida
Generar una experiencia de usuario y usabilidad	 Interfaz RBT	 Panel touch.	 Interfaz dividida



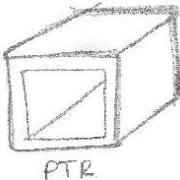

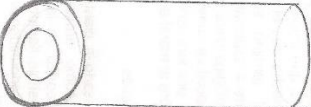
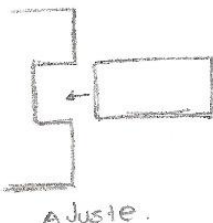
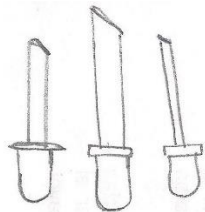
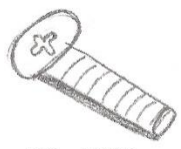
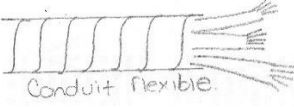

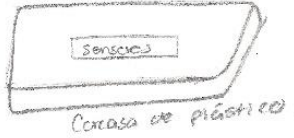



El concepto generado I se propone como resultado de los conceptos C5. Sub B y E y C6. Sub B y E del subcapítulo 3.2

Tabla 13. Matriz morfológica del subsistema de Bombas y Energía.

MATRIZ MORFOLÓGICA DEL SUBSISTEMA DE BOMBAS Y ENERGÍA			
Funciones	Concepto G	Concepto H	Concepto generado I
Regular la energía eléctrica para los subsistemas, la bomba y el soplador	 <p>Módulo de Regulación</p>	 <p>Arreglo de resistencias</p>	 <p>Módulo analógico</p>
Distribuir la energía eléctrica regulada a cada subsistema	 <p>Alambres</p>	 <p>Inalambres</p>	
Controlar manualmente el comportamiento del RBT	 <p>Panel Físico</p>		 <p>Panel Físico</p> <p>1 -&gt; Encio 2 -&gt; Purga 3 -&gt; Agua 4 -&gt; RBT</p>
Indicar al operario el estado de cada subsistema	 <p>PARO DE EMERGENCIA</p>	 <p>Bombilla</p>	 <p>LED</p>

El concepto generado L se propone como resultado de los conceptos C7. Sub Ensam y C8. Sub Ensam del subcapítulo 3.2

Tabla 14. Matriz morfológica del subsistema de Ensamble.

MATRIZ MORFOLÓGICA DEL SUBSISTEMA DE ENSAMBLE			
Funciones	Concepto J	Concepto K	Concepto Generado L
Diseñar una estructura estable y adaptable para el RBT	 <p>PTR</p>	 <p>Perfil "T"</p>	<p>Tubo</p> 
El ensamble y desensamble del RBT debe ser accesible para el usuario	 <p>Ajuste.</p>	 <p>Remaches</p>	 <p>Tornillos</p>
Proteger a los componentes de los subsistemas	 <p>Conduit flexible.</p>	 <p>Protección individual.</p>	 <p>Sensora Carcasa de plástico.</p>
Protección al usuario	 <p>Bombilla.</p>	 <p>Letras.</p>	 <p>LED.</p>

### 3.3 Selección y evaluación de conceptos

Las diversas soluciones se evalúan y la más apropiada es la que se selecciona. La evaluación a menudo incluye la representación de un sistema mediante un modelo para luego llevar a cabo una simulación con el objetivo de establecer cómo puede reaccionar a las entradas. [18]

El objetivo es gastar la menor cantidad de recursos para decidir qué conceptos tienen el mayor potencial para convertirse en un concepto de calidad. La dificultad en la evaluación de conceptos y la toma de decisiones es que debemos elegir qué conceptos dedicar tiempo a desarrollar cuando todavía tenemos conocimientos y datos muy limitados en los que basar esta selección. [19]

Una matriz de decisión es una forma de filtrar, ordenar y seleccionar los mejores conceptos. El filtrado es una evaluación rápida y aproximada destinada a producir algunas alternativas viables. La evaluación es un análisis más cuidadoso de estos relativamente pocos conceptos con el propósito de escoger el concepto individual que tenga más probabilidad de llevar el producto al éxito. [20]

Para seleccionar el concepto que mejor se adapte a las necesidades del RBT, los integrantes de cada subsistema plantearon matrices de decisión en la evaluación de los conceptos. Dentro de cada matriz se encuentran las Funciones/Especificaciones de cada subsistema, así como su correspondiente porcentaje de importancia, los conceptos generados y la evaluación de estos, cada matriz se muestra a continuación.

Para determinar el mejor concepto, se proponen los siguientes rangos para las matrices de decisión, -3: Inaceptable, -2: Gran dificultad, -1: No deseable, 0: Cuestionable, 1: Deseable, 2: Excede expectativas, 3: Excede expectativas y da una ventaja.

Tabla 15. Matriz de decisión del subsistema de Instrumentación.

MATRIZ DE DECISIÓN SUBSISTEMA DE INSTRUMENTACIÓN							
Función/Especificación	Peso	Concepto A		Concepto B		Concepto C	
Proporcionar el estado ON/OFF del subsistema	10	-2	-20	2	20	1	10
Cuantificar los valores de las variables físicas	30	1	30	2	60	1	30
Comunicar local y remotamente el RBT con el operario	20	-2	-40	3	60	1	20
Permitir el control local y remoto de la circulación y retroalimentación del agua	10	-3	-30	2	20	1	10
Monitorear local y remotamente las variables de estudio	20	1	20	3	60	2	40
Controlar la activación y paro de la bomba	10	-2	-20	1	10	1	10
<b>Total</b>			<b>-60</b>		<b>230</b>		<b>120</b>

La proporción de importancia en cada Función/Especificación se establece en un 100% donde la mayor importancia recae en la cuantificación de los valores de las variables físicas debido a que el punto modular del RBT es establecer los estándares de calidad de agua con las variables pH, oxígeno disuelto, turbulencia y turbidez, sin estos valores no sería funcional el RBT. Siguiendo este orden de ideas, la comunicación y el monitoreo local y remotamente son para el usuario, de esta forma el subsistema de instrumentación genera este puente de comunicación entre el usuario y RBT. Si me omitiera desaparecería el subsistema de Interfaz y no habría como transmitir la información recaba por instrumentación al usuario; por tanto, es de alta importancia, pero el RBT funcionaría sin necesidad de transmitir y monitorear sus funciones. Finalmente, proporcionar el estado ON/OFF del sistema, el control local y remoto de la recirculación del agua y la activación de la bomba tienen el nivel de importancia menor, por un lado, el sistema puede estar encendido desde un inicio sin la necesidad de apagarlo, el control local así como la activación y paro de la

bomba y soplador recaen en el subsistema de Bombas y Energía por lo tanto, se establece esta segunda opción de manejo pero suprimir esta función no involucra un cambio significativo al RBT.

En la tabla 15 se tiene la selección el concepto B como sistemas del subsistema Instrumentación para llevar a cabo cada una de las funciones individuales del subsistema.

En la tabla 16 se presenta la matriz de decisión del subsistema de Interfaz y su correspondiente análisis.

Tabla 16. Matriz de decisión del subsistema de Interfaz.

MATRIZ DE DECISIÓN SUBSISTEMA DE INTERFAZ							
Función/Especificación	Peso	Concepto D		Concepto E		Concepto F	
Transmitir la información de las variables de estudio	20	-1	-20	3	60	2	40
Desplegar la información de las variables	30	1	30	3	90	2	60
Administrar los datos de las variables de estudio de manera local y remota	20	-1	-20	-2	-40	3	60
Mostrar los estados de energía, circulación y recirculación del agua	20	-2	-40	1	20	2	40
Generar una experiencia de usuario y usabilidad.	10	1	10	2	20	2	20
<b>TOTAL</b>			<b>-40</b>		<b>150</b>		<b>220</b>

La proporción de importancia de cada Función/Especificación se establece en un 100% donde la mayor importancia recae en el despliegue de la información de las variables, como subsistema de Interfaz se tiene como objetivo principal establecer la interacción usuario/sistema. Sin su participación dentro del subsistema el término Interfaz carecería de sentido y tendría que ser omitido. El siguiente nivel de importancia se establece en transmitir la información de las variables de estudio, administrar los datos de estas variables y mostrar los estados de energía del RBT. Si bien estas son formas de distribuir y manejar cada función dentro de la interfaz la función principal

del subsistema se puede llevar a cabo sin estas funciones que dan el tratamiento adecuado a los datos más no su despliegue. La experiencia del usuario y la usabilidad del subsistema tienen la menor importancia debido a que es parte del diseño visual de cada función más no un tratamiento analítico del subsistema.

Se tiene la selección el concepto F como sistemas del subsistema Interfaz para llevar a cabo cada una de las funciones individuales del subsistema.

En la tabla 17 se presenta la matriz de decisión del subsistema de Bombas y Energía, así como su respectivo análisis.

Tabla 17. Matriz de decisión del subsistema de Bombas y Energía.

MATRIZ DE DECISIÓN SUBSISTEMA DE BOMBAS Y ENERGÍA								
Función/Especificación	Peso	Concepto G		Concepto H		Concepto I		
Regular la energía eléctrica para los subsistemas, la bomba y el soplador.	30	2	60	-3	-90	-2	-60	
Distribuir la energía eléctrica regulada a cada subsistema	30	2	60	3	90	1	30	
Controlar manualmente el comportamiento del RBT	35	2	70	1	35	1	35	
Indicar al operario el estado de cada subsistema	5	2	10	1	5	-1	-5	
<b>TOTAL</b>			<b>200</b>		<b>40</b>		<b>0</b>	

La proporción de importancia de cada Función/Especificación se establece en un 100% donde la mayor importancia recae en el control manual del RBT, si bien excede expectativas y da una ventaja en su manejo, el control manual debe ser integrado si llegara a fallar la interfaz y la instrumentación. La regulación y distribución de la energía eléctrica hacia cada uno de los subsistemas son funciones que van llevadas de la mano y que juegan un papel indispensable para

el funcionamiento del RBT. La función de menor importancia es la interacción usuario subsistema, esto debido a que dicha interacción se da en el subsistema de Instrumentación y se puede carecer de él.

Se tiene la selección el concepto G como sistemas del subsistema Instrumentación para llevar a cabo cada una de las funciones individuales del subsistema.

En la tabla 18 se presenta la matriz de decisión del subsistema de Ensamble y su respectivo análisis.

Tabla 18. Matriz de decisión del subsistema de Ensamble.

MATRIZ DE DECISIÓN SUBSISTEMA DE ENSAMBLE							
Función/Especificación	Peso	Concepto J		Concepto K		Concepto L	
Diseñar una estructura estable y adaptable para el RBT	15	1	15	3	45	1	15
El ensamble y desensamble del RBT debe ser accesible para el usuario	5	3	15	-2	-10	1	5
Proporcionar el espacio correcto para cada componente de los subsistemas	20	2	40	1	20	1	20
Proteger a los componentes de los subsistemas	30	2	60	2	60	1	30
Protección al usuario	30	2	60	-2	-60	-1	-30
<b>TOTAL</b>			<b>190</b>		<b>55</b>		<b>40</b>

La proporción de importancia de cada Función/Especificación se establece en un 100% donde la mayor importancia recae en la seguridad de componentes y usuario, esto debido a que el correcto funcionamiento de los subsistemas es de vital importancia para el RBT, sin este subsistema no sería posible la administración de los valores de las variables de estudio. La protección al usuario es

necesaria debido a que si se diseña un sistema inseguro no se podrá dar un análisis a fondo del fenómeno estudiado. Los espacios que ocupan los subsistemas se manejan como secundarios debido a que si la función es realizada no importa el tamaño utilizado. Por otro lado, el diseño adaptable del RBT puede ser considerado como deseable más no de suma importancia, esto debido a que se pueden realizar las modificaciones pertinentes para el correcto funcionamiento del sistema general. Finalmente, el ensamble y desensamble del RBT accesible para el usuario tiene el nivel de importancia menor, debido a que son aspectos de uso del subsistema, se puede desarrollar la función principal del subsistema sin necesidad de estas funciones.

Se tiene la selección del concepto J como sistemas del subsistema Instrumentación para llevar a cabo cada una de las funciones individuales del subsistema.



## 4. Diseño de configuración

En este punto, se tiene un conjunto de conceptos seleccionados y evaluados que cumplen con la viabilidad en el proceso de diseño. La siguiente fase es llamada diseño de realización, esta es la fase donde los conceptos de diseño son empleados para dar forma física al sistema en general, en este caso al RBT.

El diseño de realización se divide en dos sub-fases:

- **Arquitectura del producto:** Se selecciona el mejor sistema general para el éxito funcional una vez que se ha elegido un concepto de diseño. El sistema general se organiza en bloques de construcción llamados módulos (presentados en el subcapítulo 3.1). Cada módulo está formado por una colección de componentes que realizan funciones [21] la relación entre los componentes de los módulos y las funciones que realizan es la parte medular de la Arquitectura del producto.
- **Diseño de configuración:** Es el encargado de dar selección preliminar a los materiales y procesos de manufactura modelando el tamaño de las piezas generadas, en otras palabras, el diseño de piezas especializadas y la selección de componentes estándar, como bombas y motores [21]. Una pieza estándar es aquella que tiene una función genérica y se fabrica de forma rutinaria sin tener en cuenta un producto en particular [19]. Una pieza de propósito especial se diseña y fabrica para un propósito específico en una línea de productos específica. [21]

## 4.1 Análisis por subsistema

Los módulos presentados en la arquitectura del producto se organizan en diagramas esquemáticos en donde se ubican los conceptos seleccionados en el subcapítulo 3.3. Estos conceptos se representan con flechas que salen (salidas) y entran (entradas). Se puede dar el caso donde un componente pueda aceptar entradas y salidas.

En la figura 22 se presenta el diagrama esquemático del subsistema de Instrumentación, en él, se presentan con bloques las relaciones de cada concepto seleccionado con el subsistema.

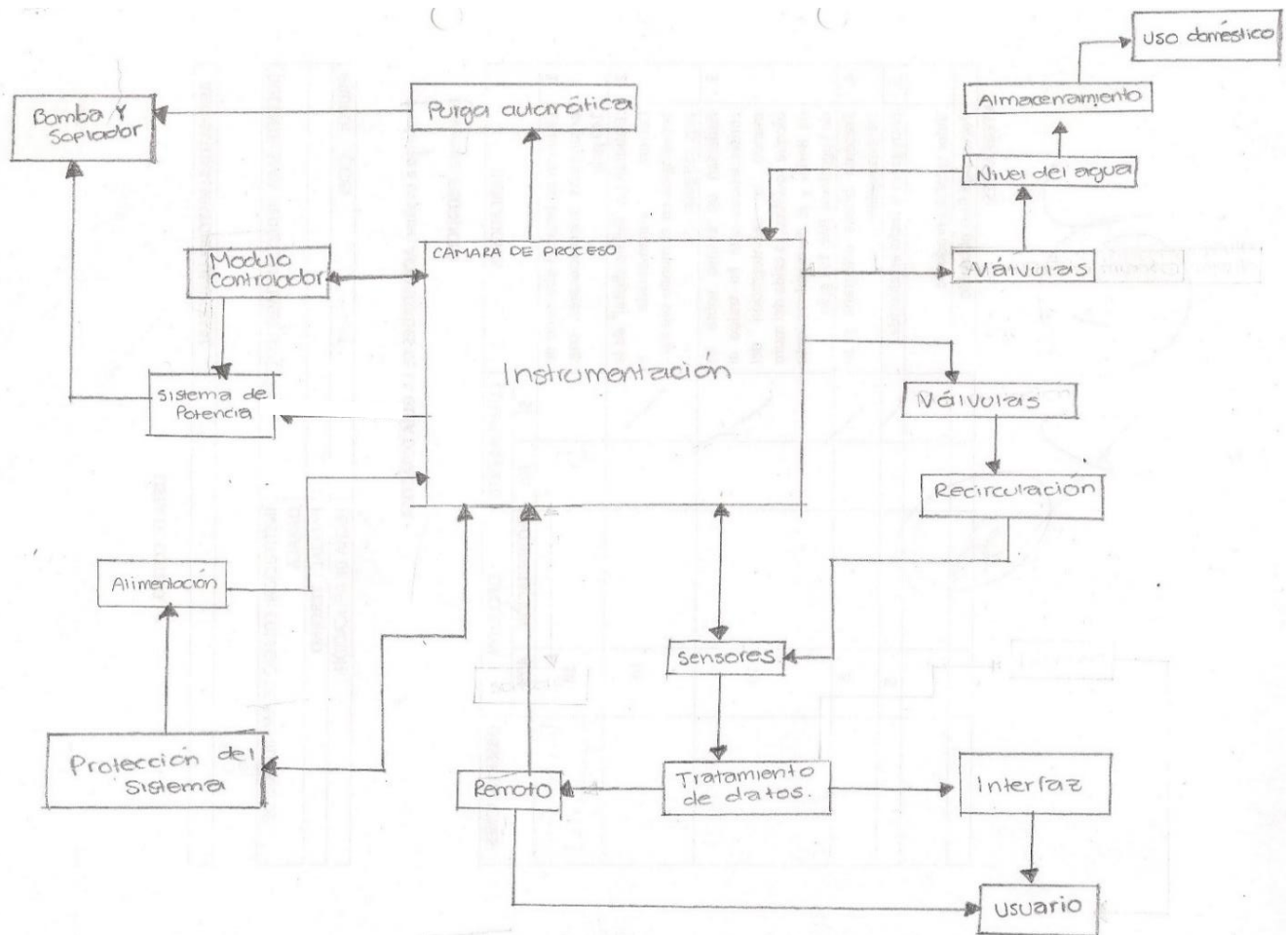


Figura 22. Diagrama esquemático del subsistema de Instrumentación.

En la figura 23 se presenta el diagrama esquemático correspondiente al subsistema de Interfaz, en donde existen las interconexiones entre cada componente.

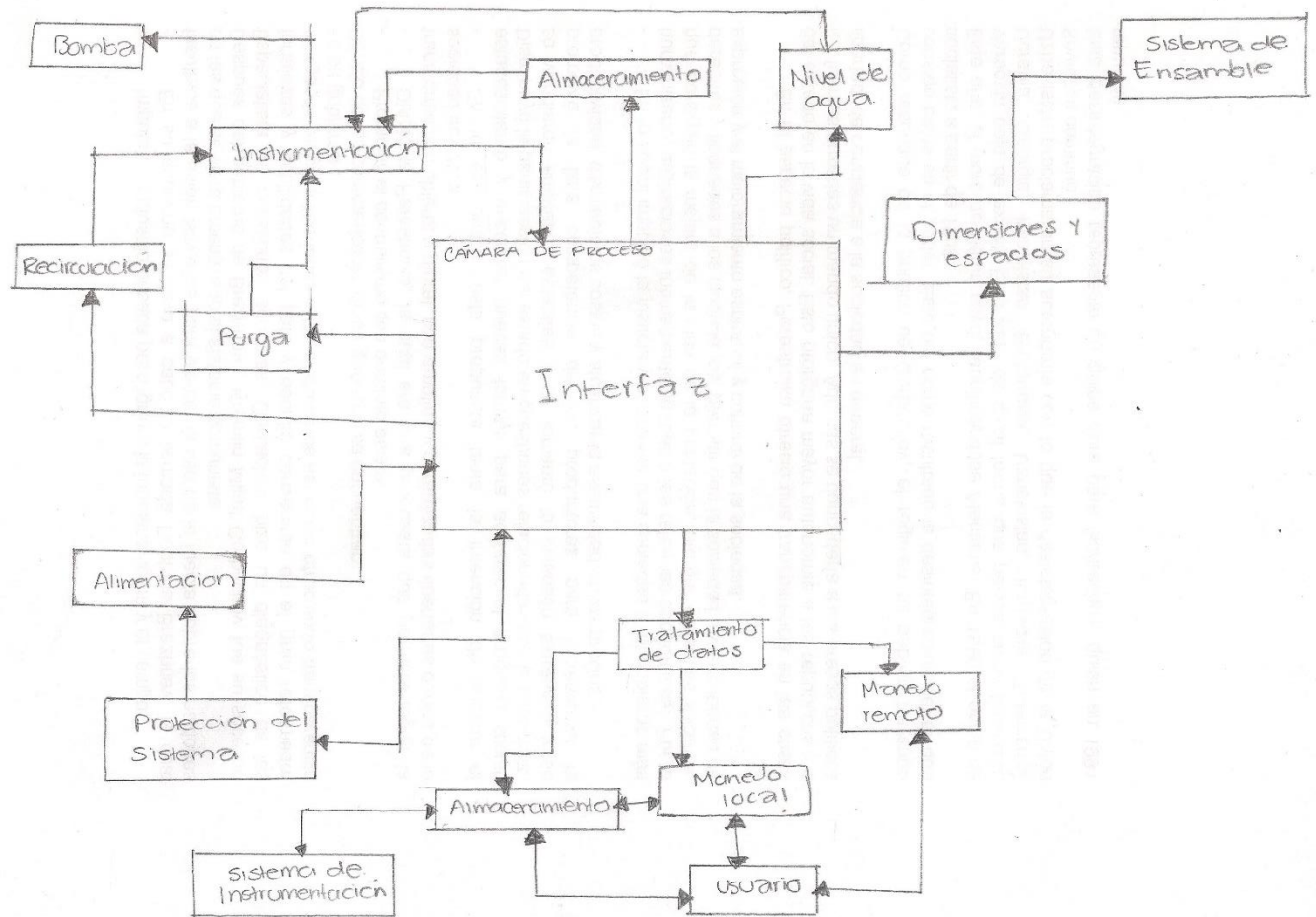


Figura 23. Diagrama esquemático del subsistema de Interfaz.

En la figura 24 se presenta el diagrama esquemático correspondiente al subsistema de Bombas y Energía, en donde existen las interconexiones entre cada componente.

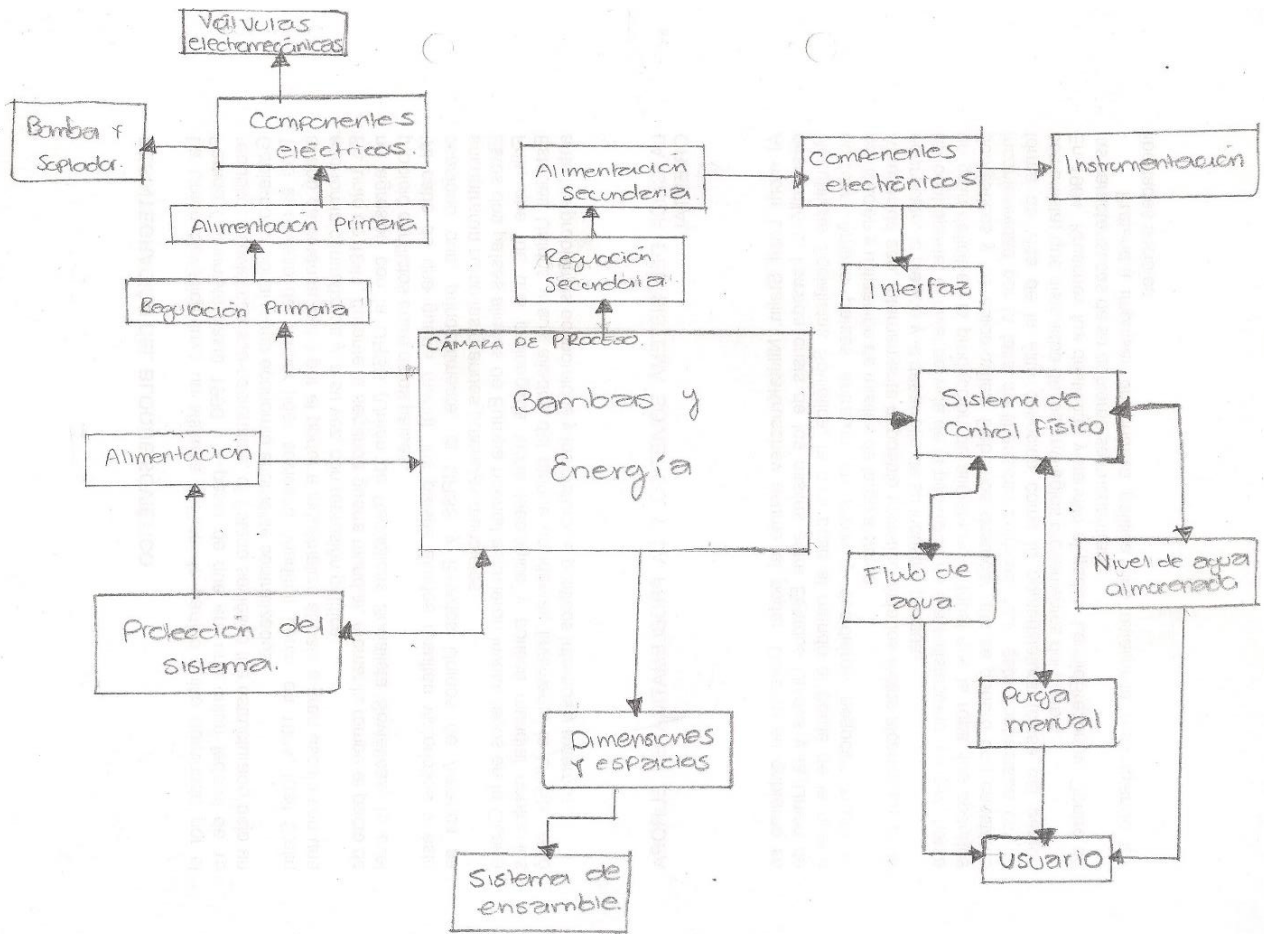


Figura 24. Diagrama esquemático del subsistema de Bombas y Energía.

En la figura 25 se presenta el diagrama esquemático correspondiente al subsistema de Ensamble, en donde existen las interconexiones entre cada componente.

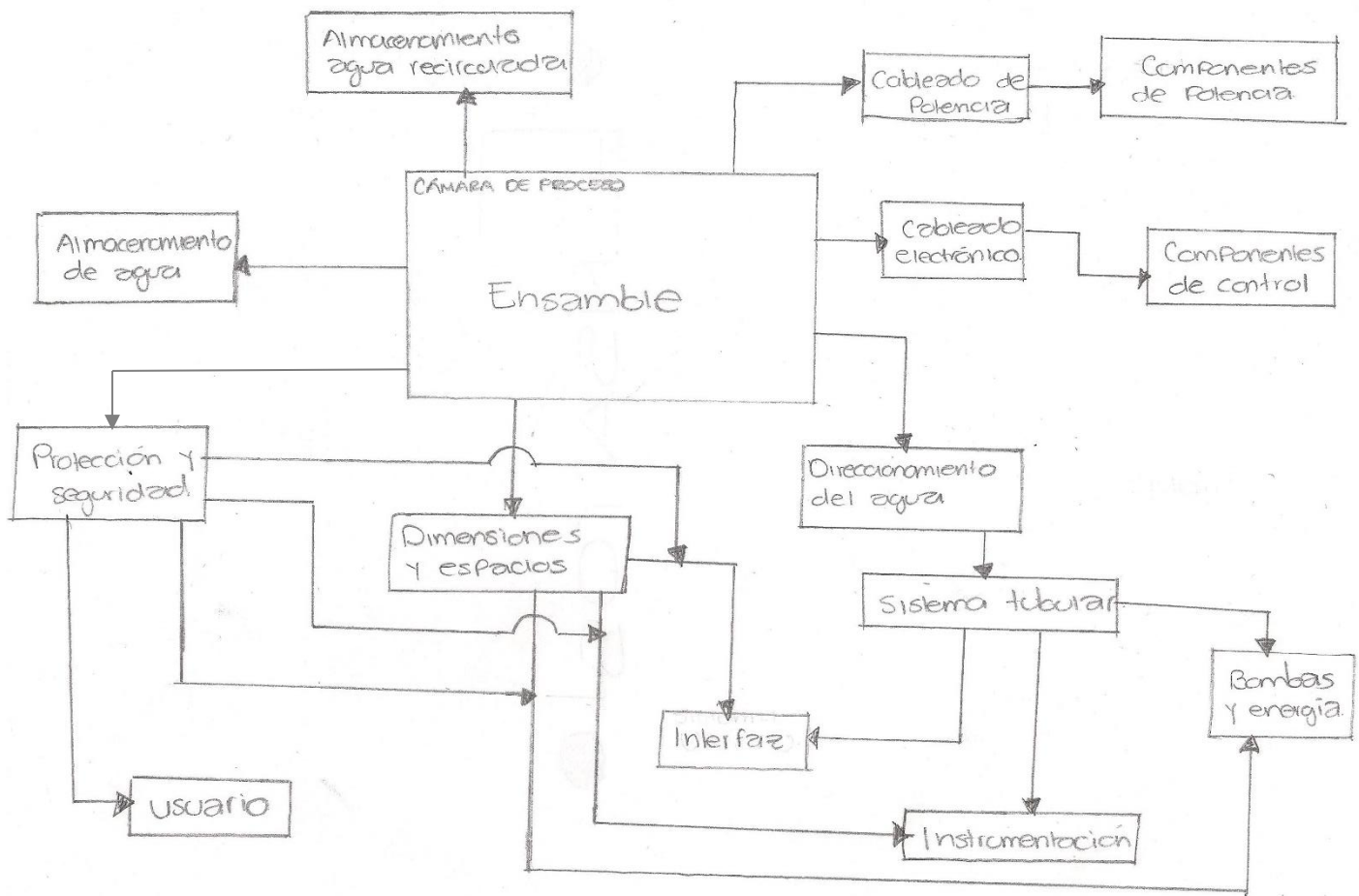


Figura 25. Diagrama esquemático del subsistema de Ensamble.

La finalidad de identificar las relaciones entre cada componente del subsistema es asignar cada elemento de diseño a un módulo para su correspondiente configuración dentro del subsistema. La existencia de los módulos se presentó en el subcapítulo 3.1 mientras que en este capítulo se presentan los módulos con sus respectivos elementos. En la figura 26 se muestran los módulos del subsistema de Instrumentación.

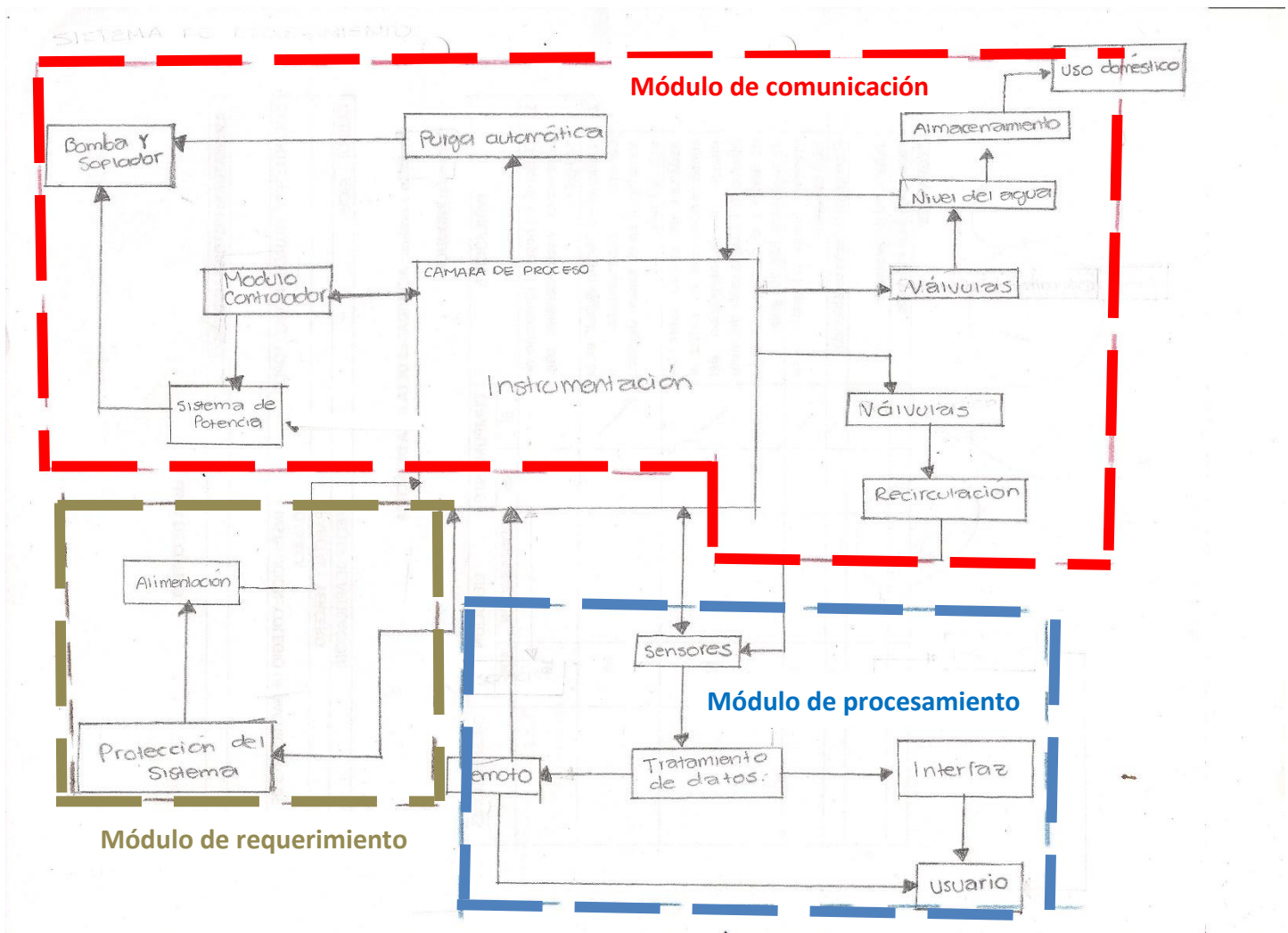


Figura 26. Módulos del subsistema de Instrumentación.

Se identifican tres módulos, el primero marcado con las líneas de color rojo representa el módulo de comunicación en donde se encuentra el estado de la bomba, la recirculación del agua y el almacenamiento del agua tratada. Las líneas de color azul representan el módulo de procesamiento, en donde se encuentran los sensores y el puente de comunicación entre el subsistema de Interfaz. Finalmente, con las líneas de color café se presenta el módulo de

requerimiento, el cual integra las condiciones y la protección al subsistema, así como la alimentación de este.

Los módulos correspondientes al subsistema de interfaz se muestran en la figura 27.

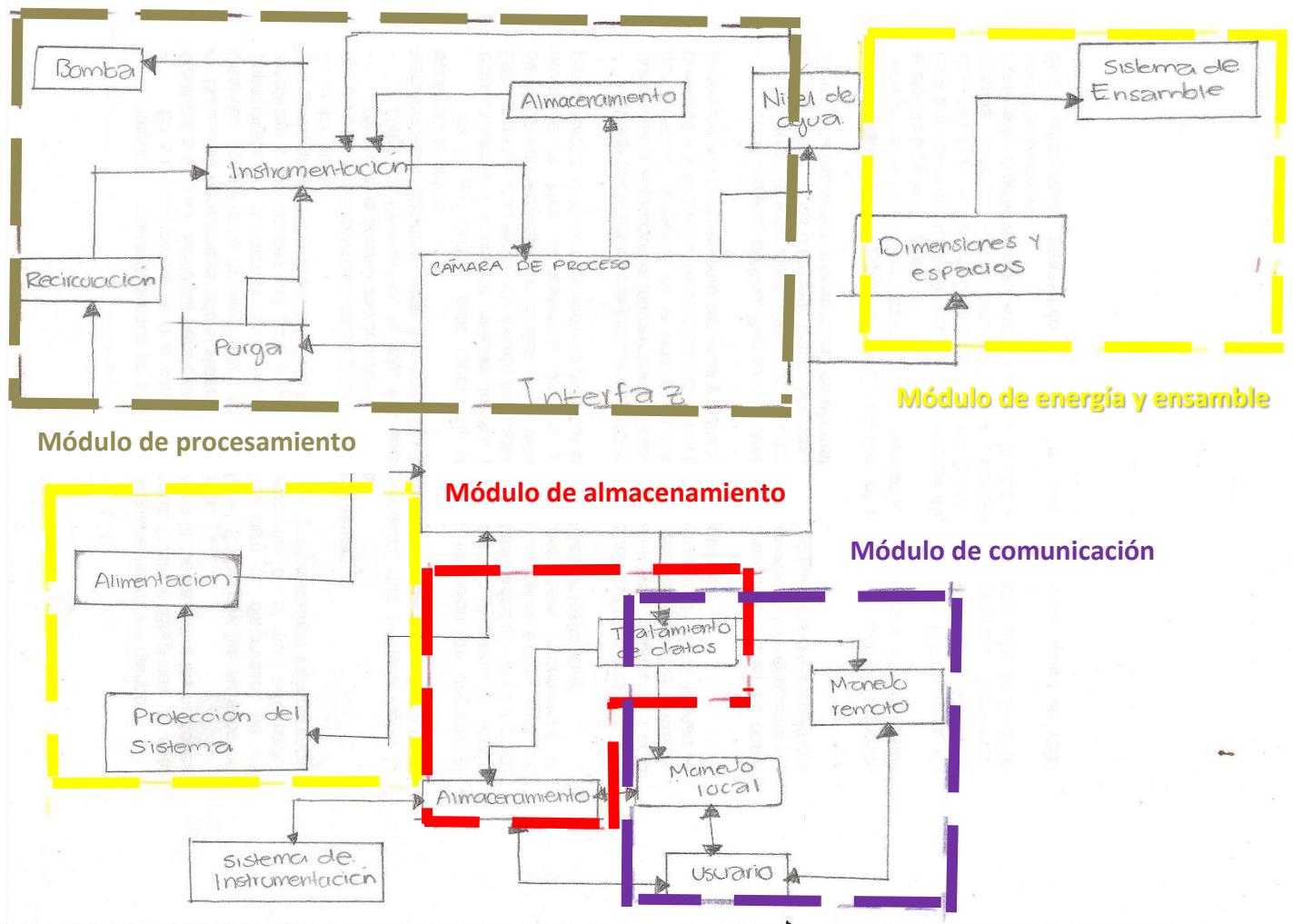


Figura 27. Módulos del subsistema de Interfaz.

Se representan cuatro módulos, las líneas de color café representa el módulo de procesamiento y despliegue de datos que involucra los subsistemas de Interfaz e Instrumentación. Las líneas de

color amarillo representan el módulo de energía y ensamble, las líneas de color rojo el módulo de almacenamiento y las líneas de color morado el módulo de comunicación entre el subsistema y el usuario por medio del control local y remoto respectivamente.

Los módulos correspondientes al subsistema de Bombas y Energía se muestran en la figura 28.

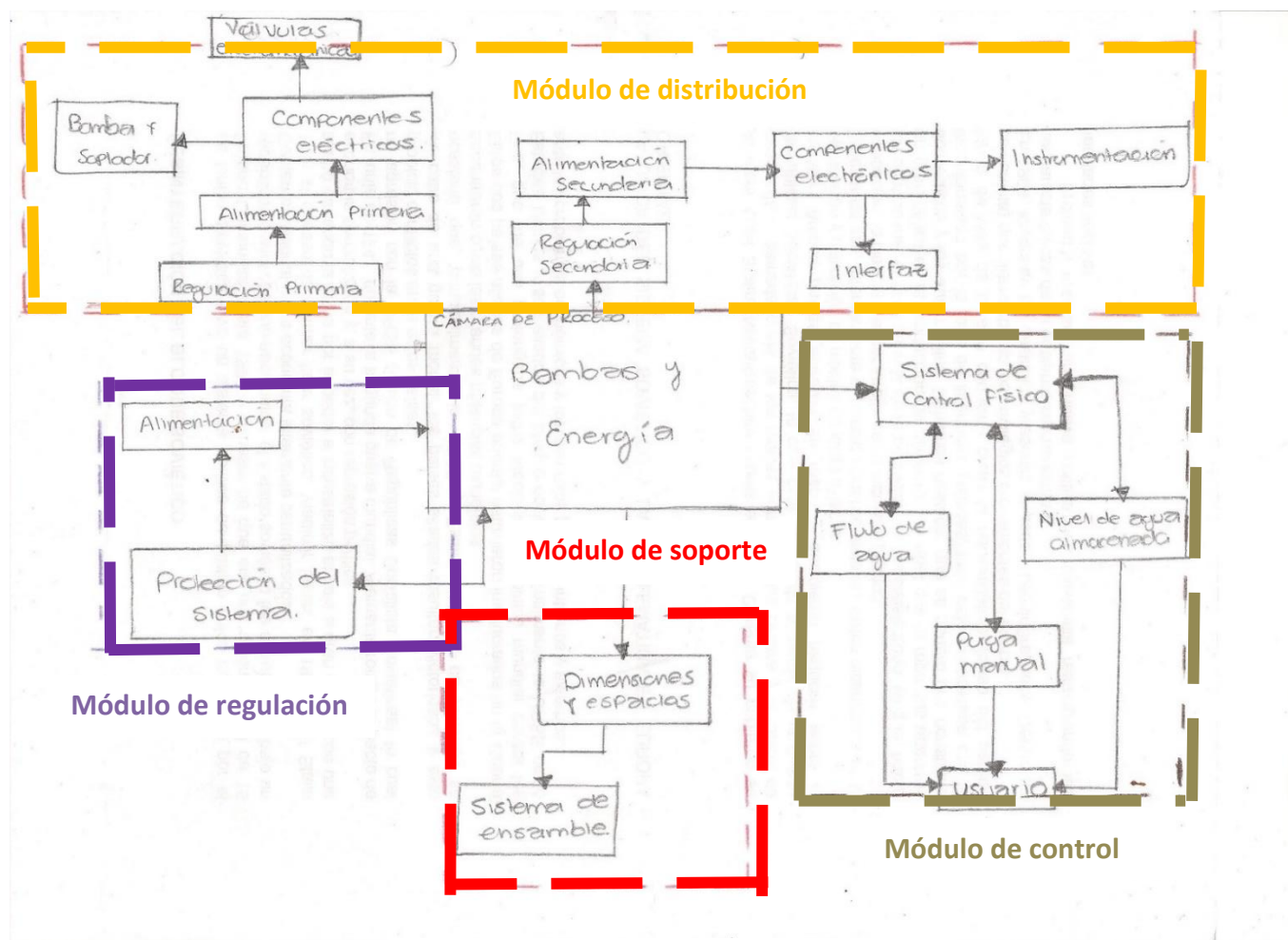


Figura 28. Módulos del subsistema de Bombas y Energía.

Se identifican cuatro módulos, las líneas de color naranja representan el módulo de distribución, el cual está relacionado con la alimentación primaria y secundaria de los componentes eléctricos y electrónicos respectivamente, las líneas de color café el módulo de control, el cual está relacionado con la interacción física del RBT con el usuario, las líneas de color morado el módulo



de regulación de energía y finalmente, las líneas de color rojo el módulo de soporte y protección al subsistema y usuario.

Los módulos correspondientes al subsistema de Ensamble se muestran en la figura 29.

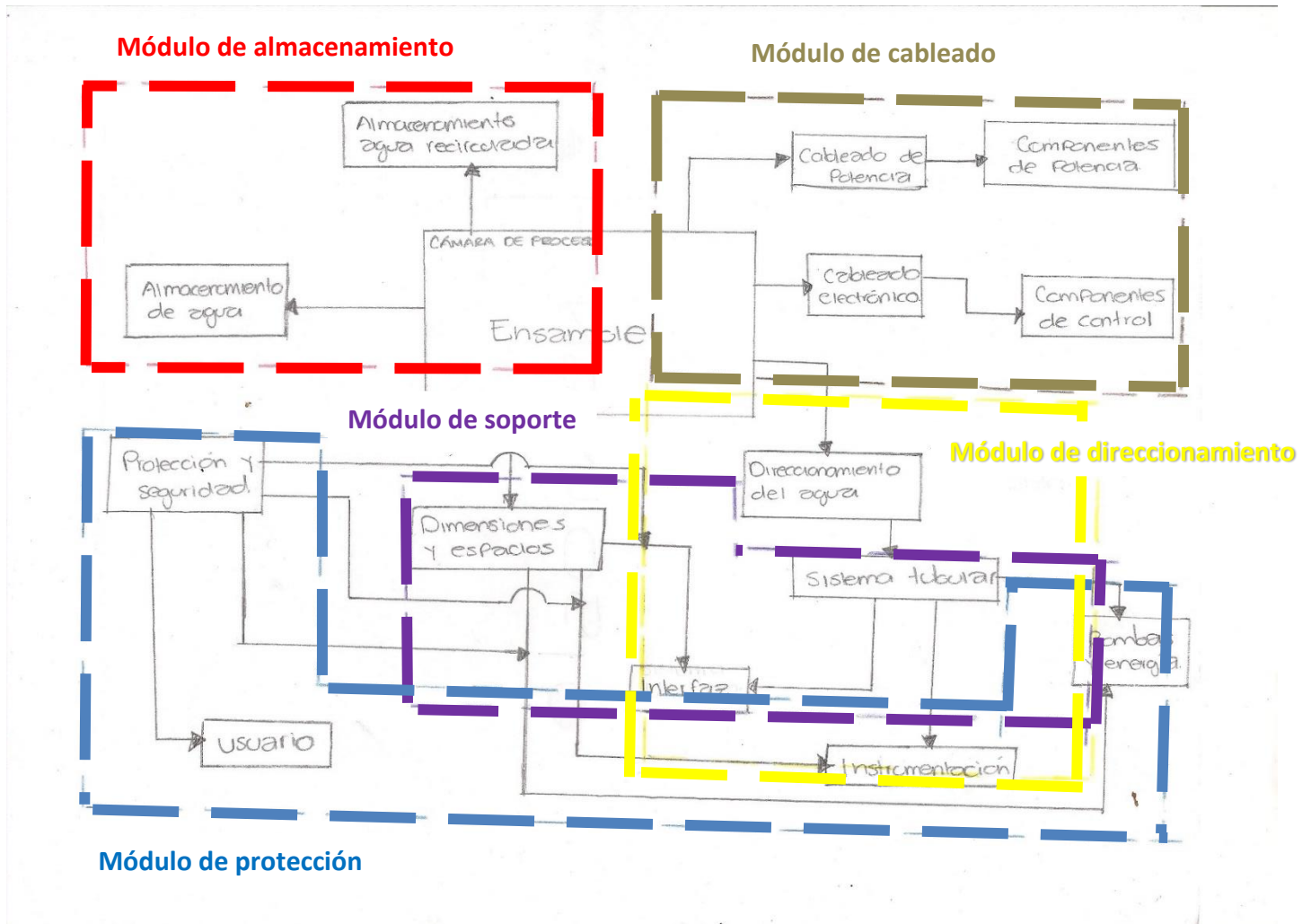


Figura 29. Módulos del subsistema de Ensamble.

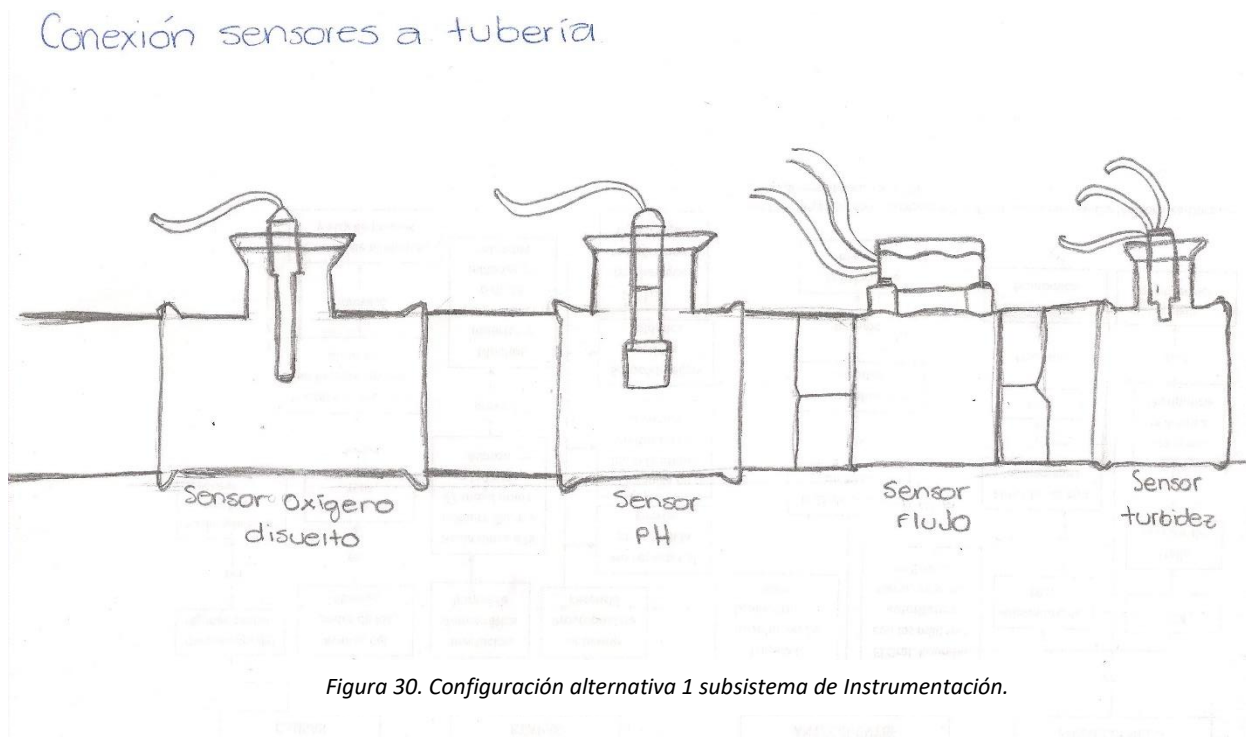
Se identifican cinco módulos, las líneas de color rojo representan el módulo de almacenamiento, el cual está relacionado con la recirculación y almacenamiento del agua recirculada y tratada respectivamente, las líneas de color café el módulo de cableado, ya sea de tipo eléctrico o

electrónico, hacia el resto de los subsistemas, las líneas de color amarillo el módulo de direccionamiento del agua residual, las líneas de color morado el módulo de soporte y espacios para cada subsistema y finalmente las líneas de color azul representadas por el módulo de protección a los subsistemas y al usuario.

## 4.2 Configuración por subsistema

Con la identificación de los módulos de cada subsistema, así como los elementos de cada módulo representados por los conceptos seleccionados en el subcapítulo 3.3, se proponen las interacciones entre los módulos de cada subsistema.

En la figura 30 se presenta la configuración alternativa (CA) 1 del subsistema de Instrumentación.



Dentro del módulo de procesamiento se tiene la adquisición de las variables físicas de pH, oxígeno disuelto, turbidez y turbulencia. La ubicación de estos sensores se podría proponer como una ubicación serial acopladas con sensores de punta. El sensor de flujo tendría una cápsula de almacenamiento de agua para una lectura adecuada debido a que no se puede usar un ensamble reductor por el posible cambio de presión en el agua dando como resultado una lectura errónea.

En la figura 31 se presenta la configuración alternativa (CA) 2 del subsistema de Instrumentación.

En la CA 2 se observan las interconexiones de los módulos de procesamiento, comunicación y protección. Se observa que el procesamiento está dado por un microcontrolador, tal y como se seleccionó en el subcapítulo 3.3, el cual es la vía principal entre el subsistema de Instrumentación y la Interfaz. Se ubican los módulos de los sensores con su correspondiente conexión al microcontrolador, la comunicación remota por medio del módulo remoto WiFi, así como las válvulas de recirculación y almacenamiento del agua tratada.

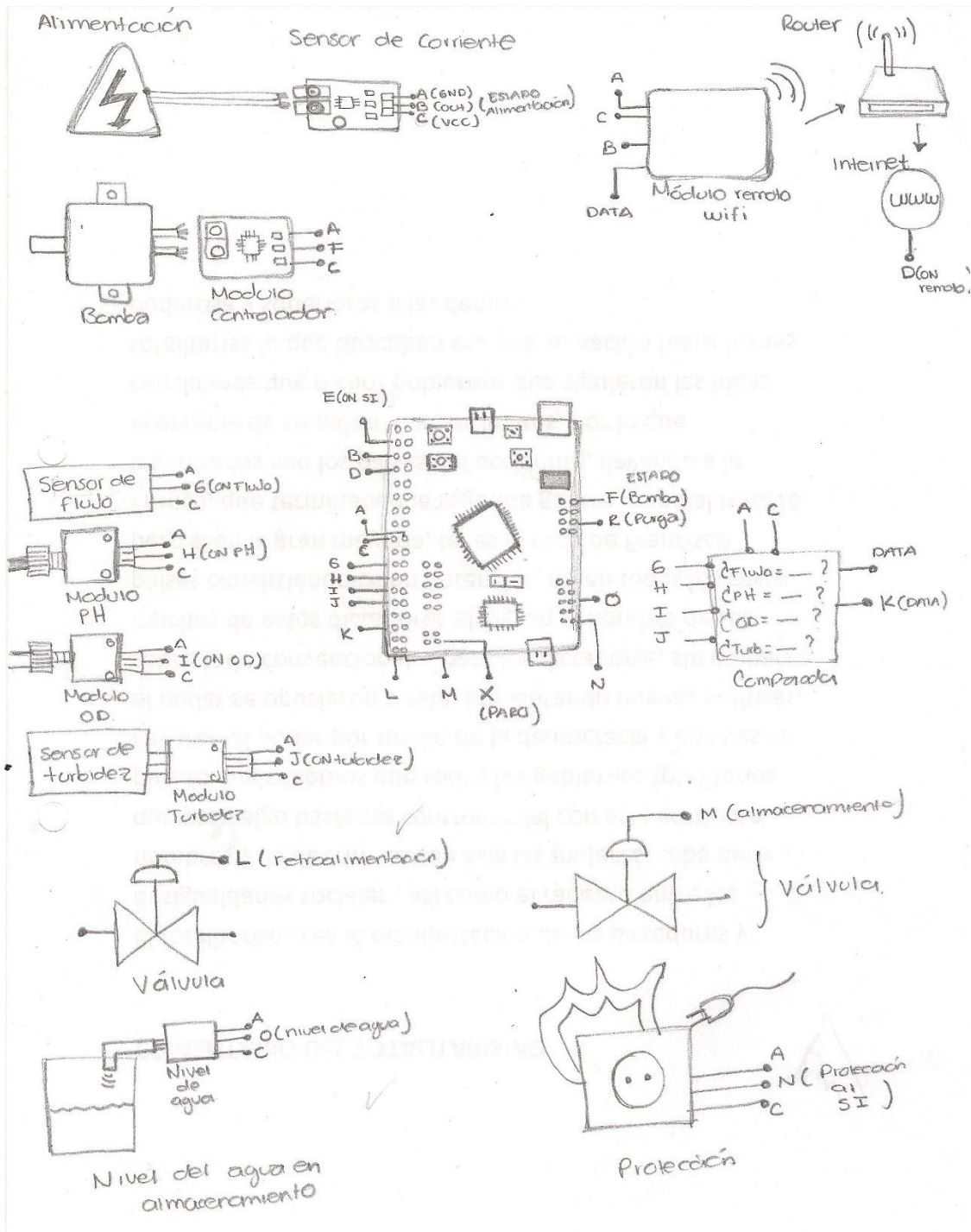


Figura 31. Configuración alternativa 2 subsistema de Instrumentación.

En la figura 32 se presenta la configuración alternativa (CA) 3 del subsistema de Interfaz.

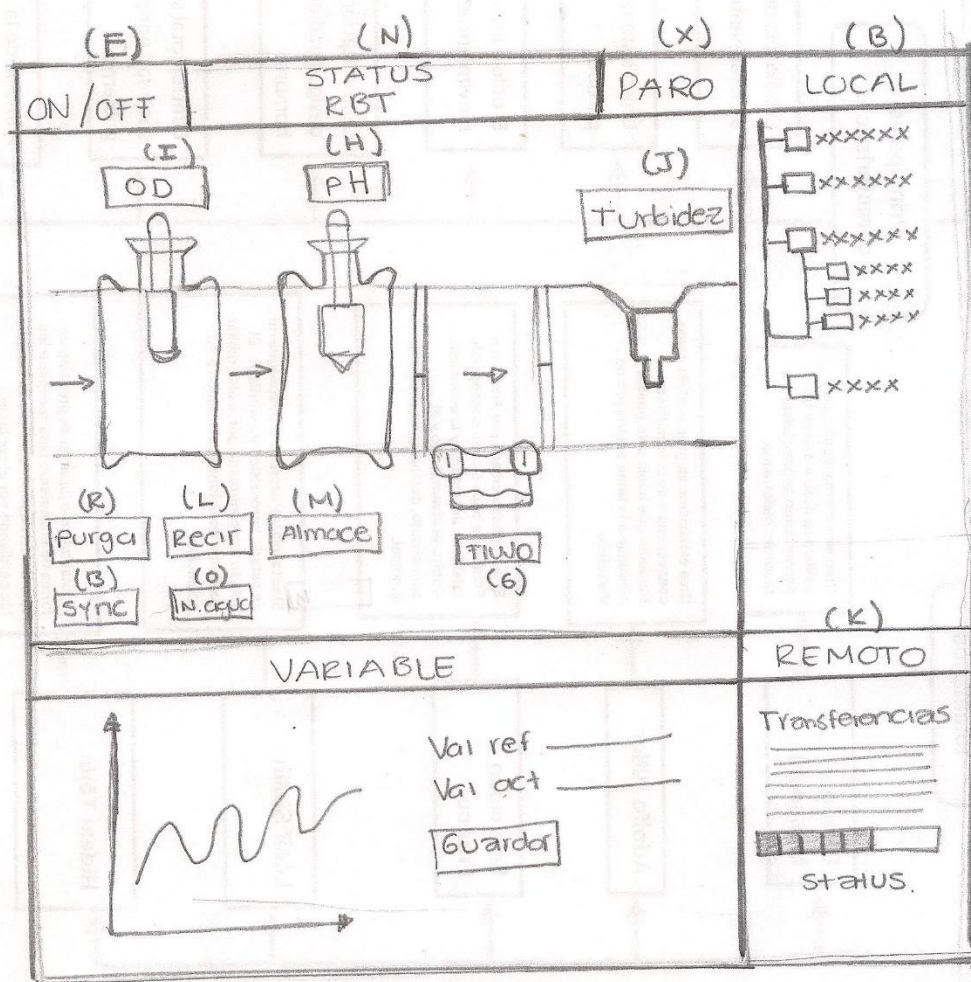


Figura 32. Configuración alternativa 3 subsistema de Interfaz.

La CA 3 muestra la interfaz dividida en cuatro cuadrantes, en el primero una vista gráfica del sistema de tuberías con los sensores cuya información se despliega en la parte inferior izquierda al momento de presionar el botón con el nombre de la variable. En dicho cuadrante se da una explicación completa del comportamiento del valor en el tiempo. El cuadrante superior derecho muestra la parte local del RBT y el cuadrante inferior derecho la parte remota del RBT.

En la figura 33 se presenta la configuración alternativa (CA) 4 del subsistema de Bombas y Energía.

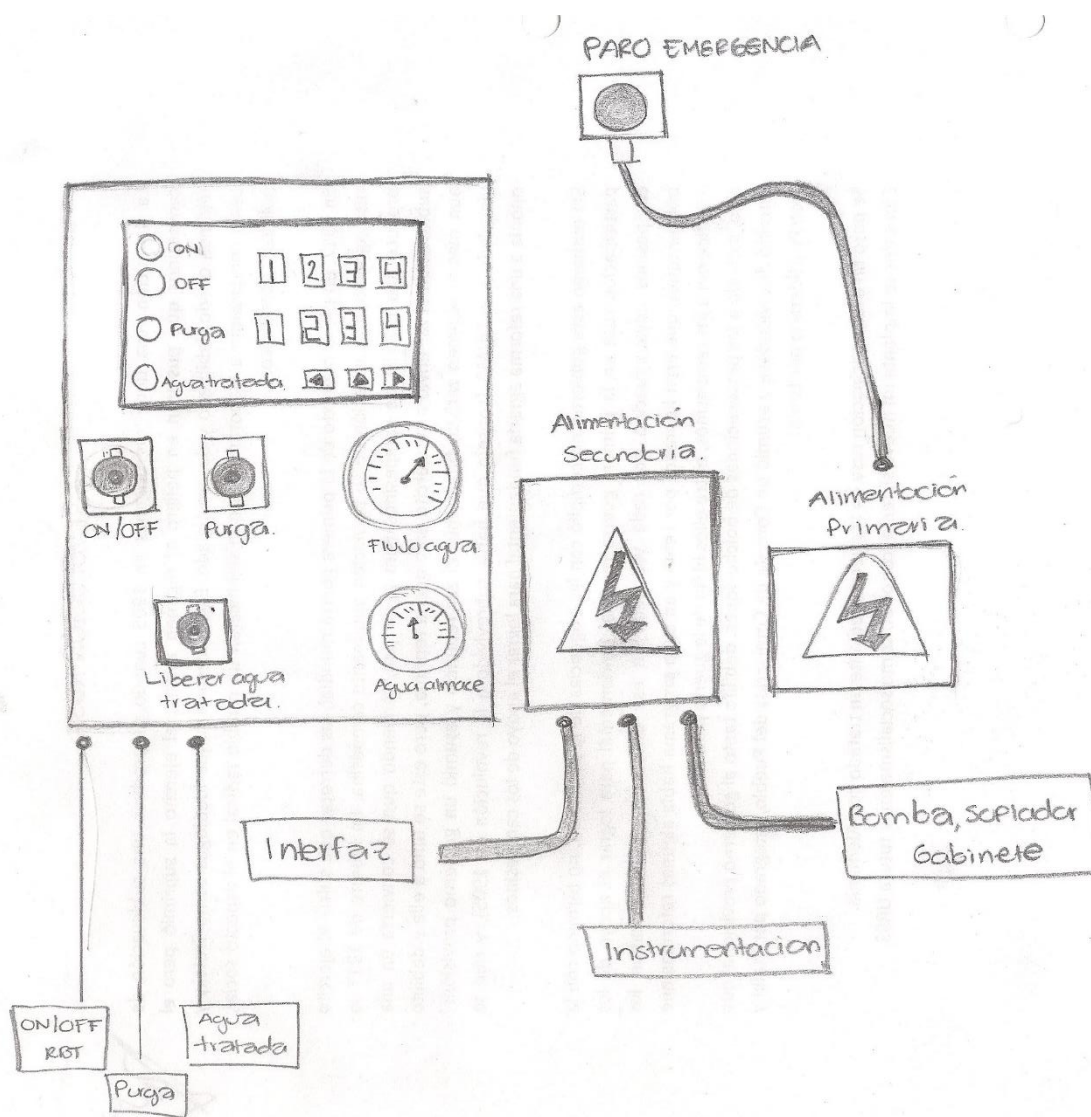


Figura 33. Configuración alternativa 4 subsistema de Bombas y Energía.

En la CA 4 se muestra la ubicación de cada módulo dentro del RBT, una alimentación primaria donde se conectarían los elementos de potencia y una alimentación secundaria donde estaría la parte electrónica. Una interacción física usuario/sistema por medio de botones y su correspondiente paro de emergencia.

En la figura 34 se presenta la configuración alternativa (CA) 5 del subsistema de Bombas y Energía.

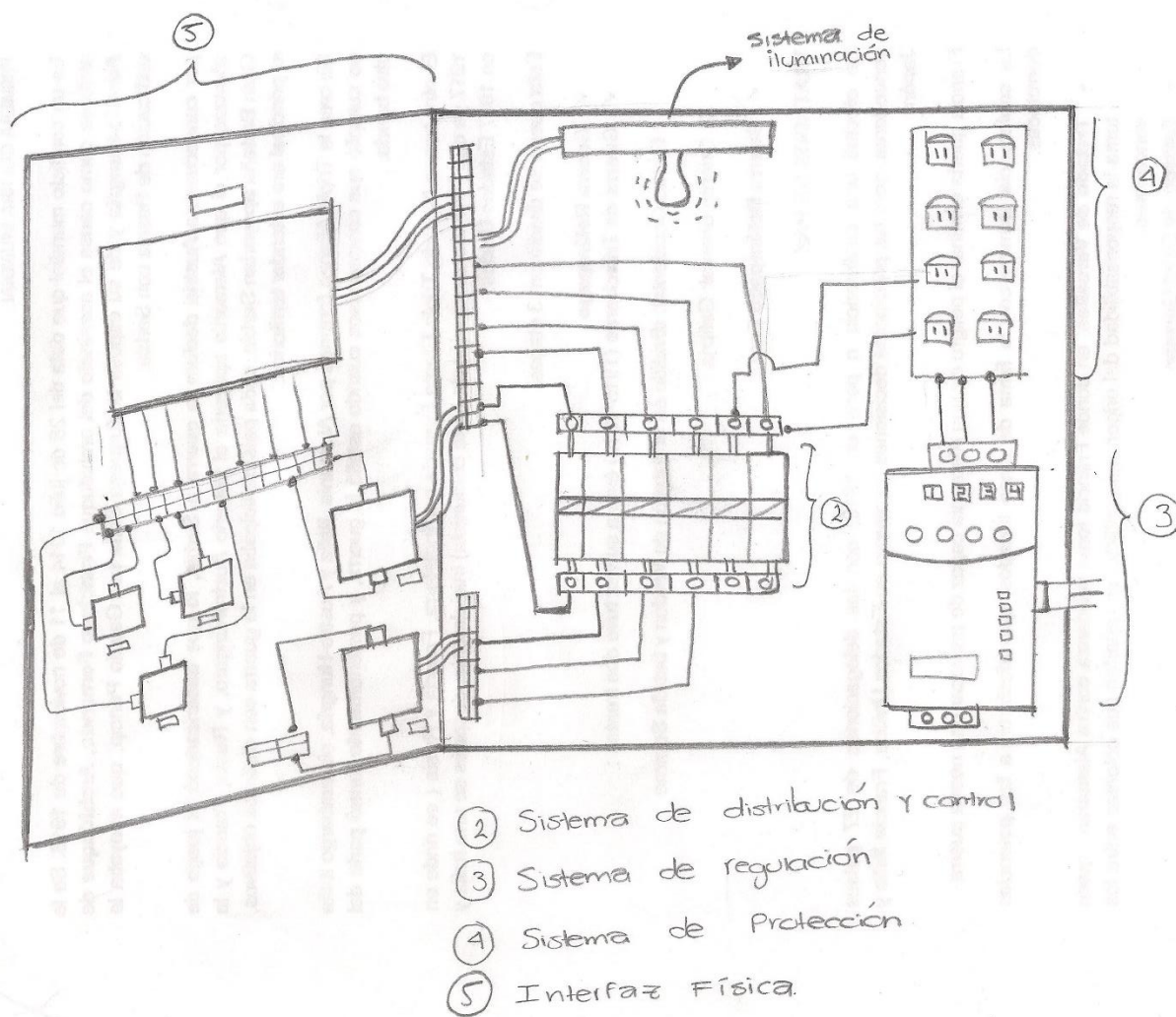


Figura 34. Configuración alternativa 5 subsistema de Bombas y Energía.

La CA 5 muestra la ubicación de la parte de regulación y protección para cada subsistema, por un lado, canaletas para una correcta distribución de la energía eléctrica y la parte de control para la interfaz física.

En la figura 35 se presenta la configuración alternativa (CA) 6 del subsistema de Ensamble.

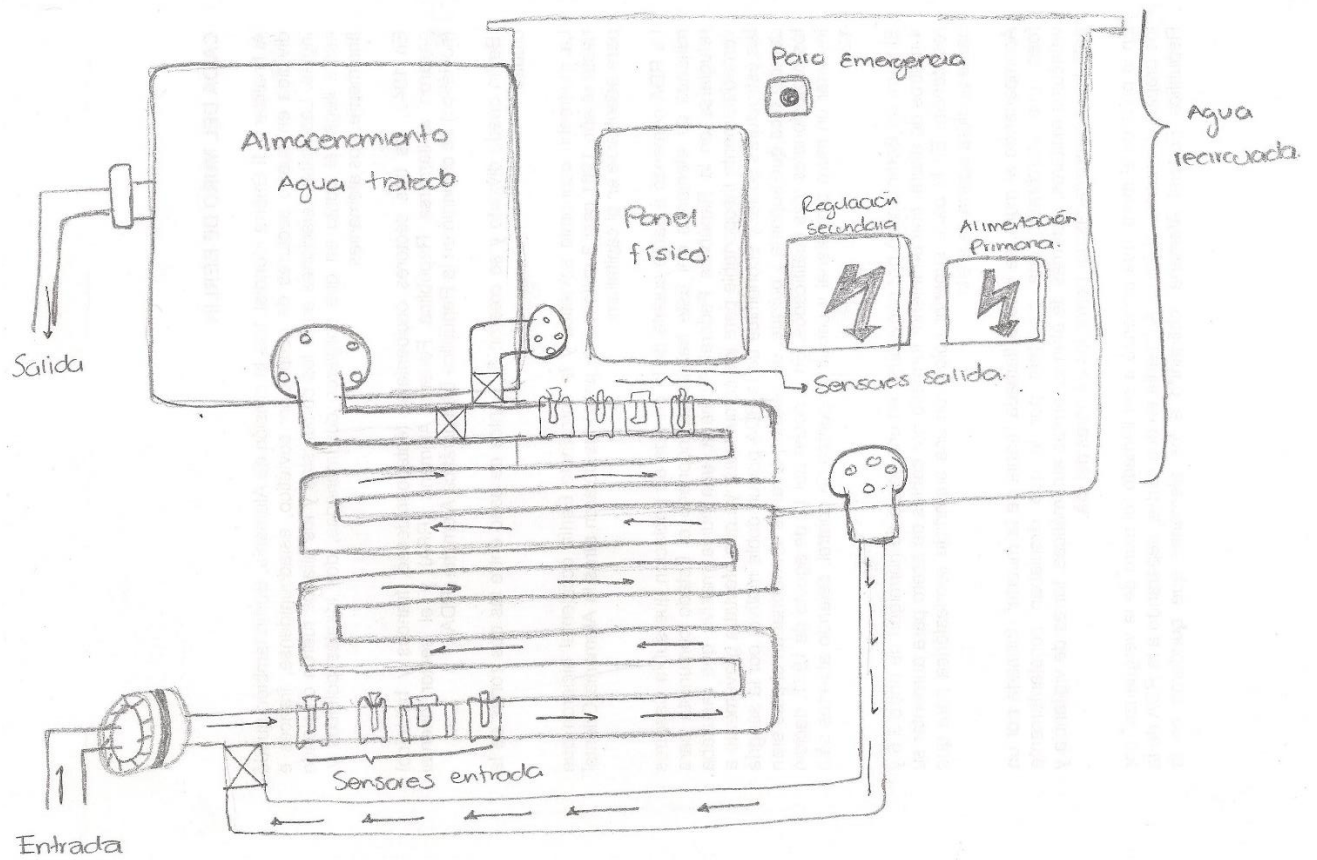


Figura 35. Configuración alternativa 6 subsistema de Ensamble.



Se puede observar la ubicación de los módulos de almacenamiento de agua tratada y recirculada en la parte superior para distribuir el agua por gravedad. Las válvulas en la toma de decisiones de los subsistemas de Instrumentación e Interfaz.

En la figura 36 se presenta la configuración alternativa (CA) 7 del subsistema de Ensamble.

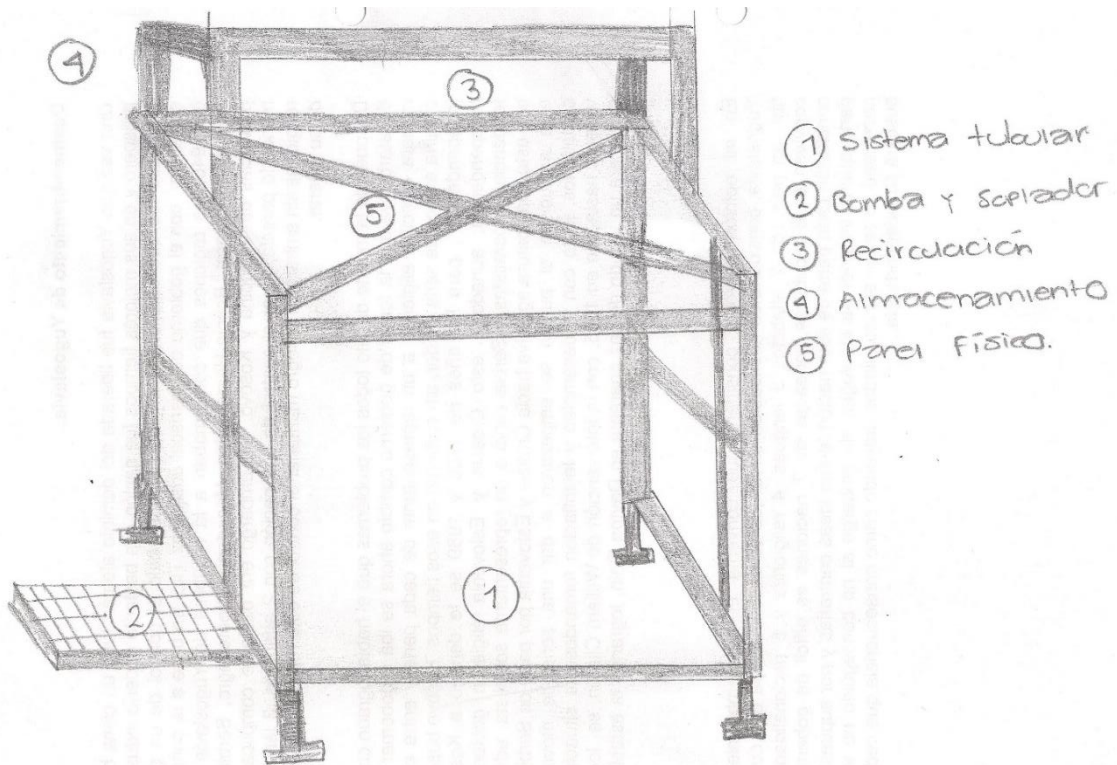


Figura 36. Configuración alternativa 6 subsistema de Ensamble.

Se observa el uso de tubo PTR como estructura del RBT, además de proporcionar la ubicación de los módulos en un espacio 3D.

### 4.3 Configuración general

La configuración general del RBT se presenta en las figuras 37,38 y 39 tomando en cuenta cada alternativa de configuración presentada en el subcapítulo 4.2.

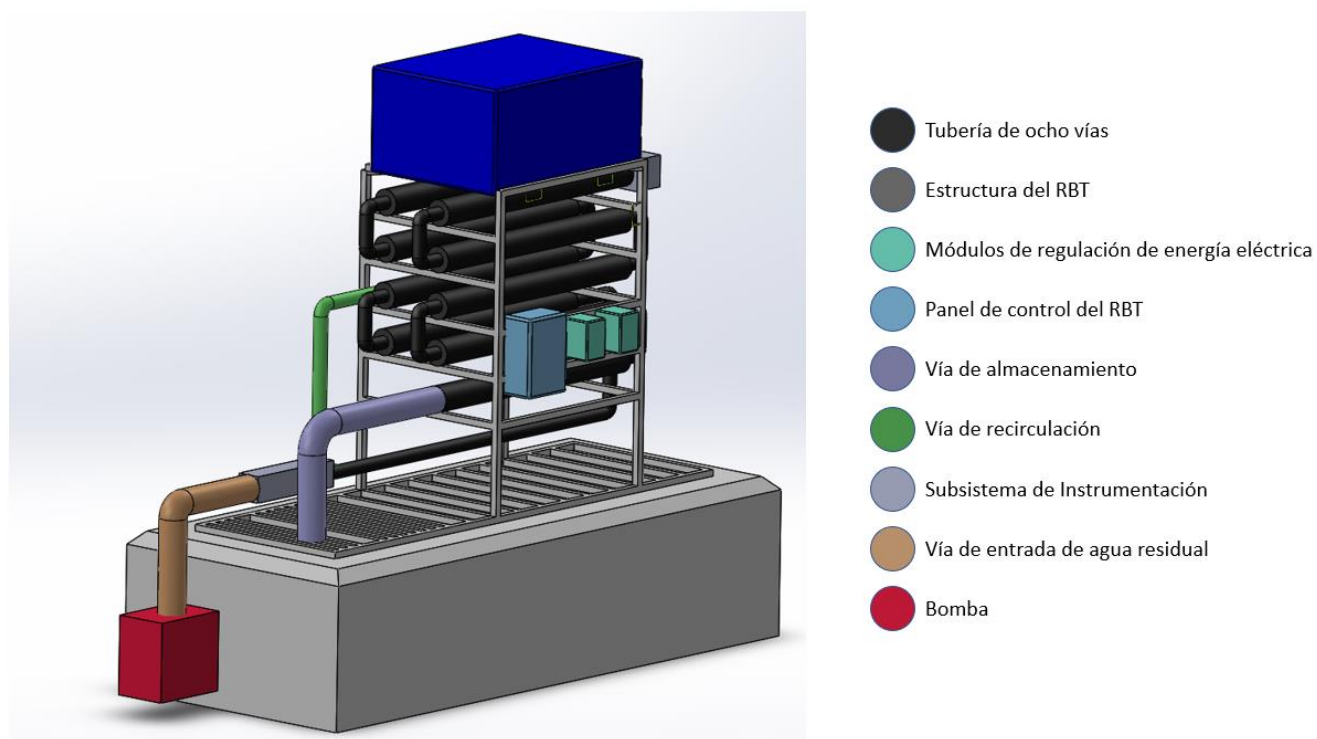


Figura 37. Configuración general del RBT.

En la figura 37 se presentan la ubicación de cada módulo y subsistemas presentes en el RBT. En primera instancia la estructura del RBT permite ubicar el tanque de almacenamiento en la parte inferior debido a la mayor área de contacto con el suelo generando así una estructura más estable. Esta geometría permite ensamblar la tubería de ocho vías a la estructura aprovechando las barras laterales del mismo. Los módulos de regulación de energía eléctrica y el panel de control del RBT se ubican a una distancia cercana debido a su importancia en el control del sistema general. La vía de almacenamiento se ubica a la salida del sistema de tuberías y se conecta al tanque de almacenamiento, en esta parte el agua presenta las condiciones para su uso doméstico. La bomba y vía de entrada del agua residual se ubican por encima del suelo y con una estructura anclada a la

estructura del subsistema de Ensamble con el fin de proteger a este componente. El subsistema de Instrumentación es el punto central del RBT, donde se encuentran los sensores para determinar la calidad del agua. En este convergen la entrada y recirculación de agua residual y tratada respectivamente.

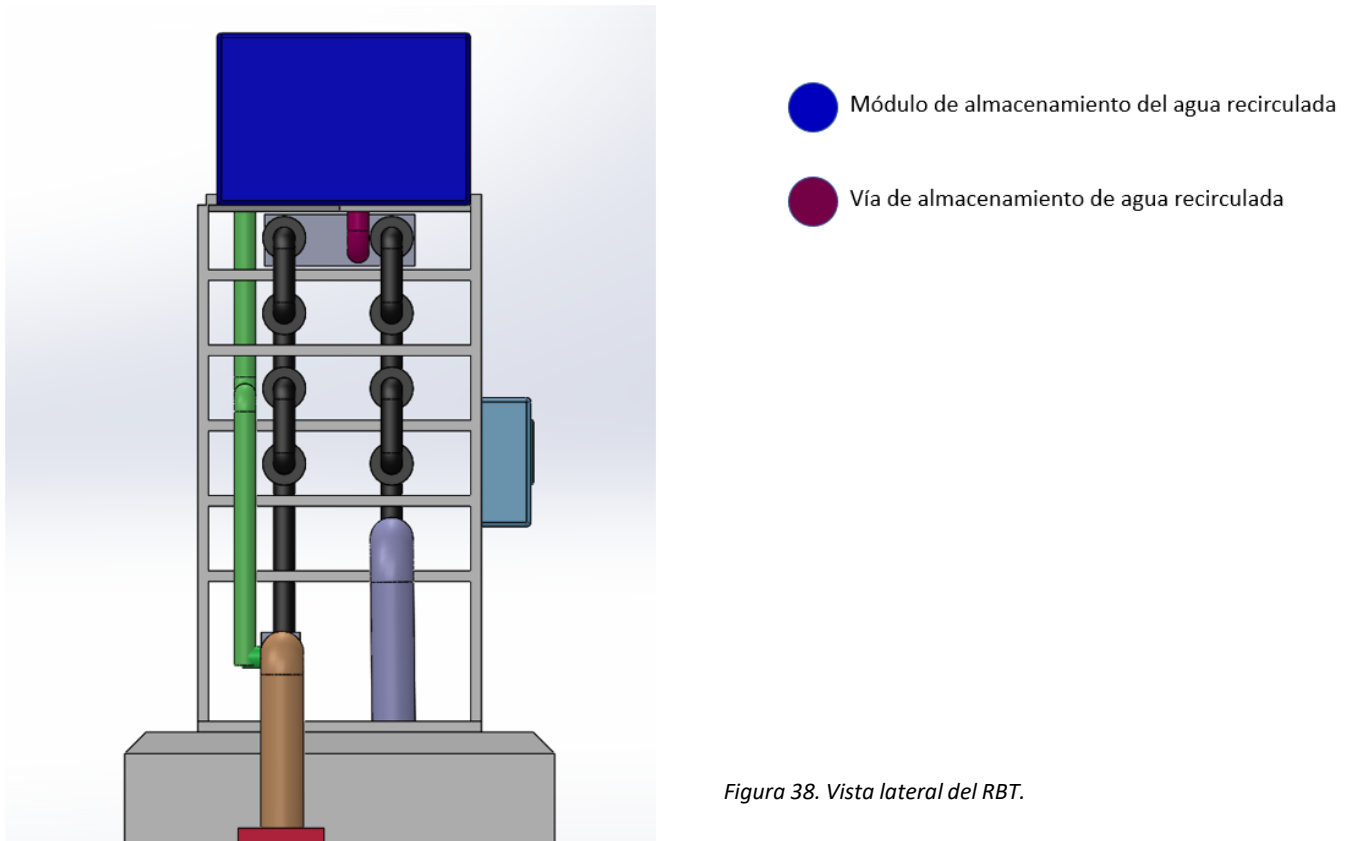
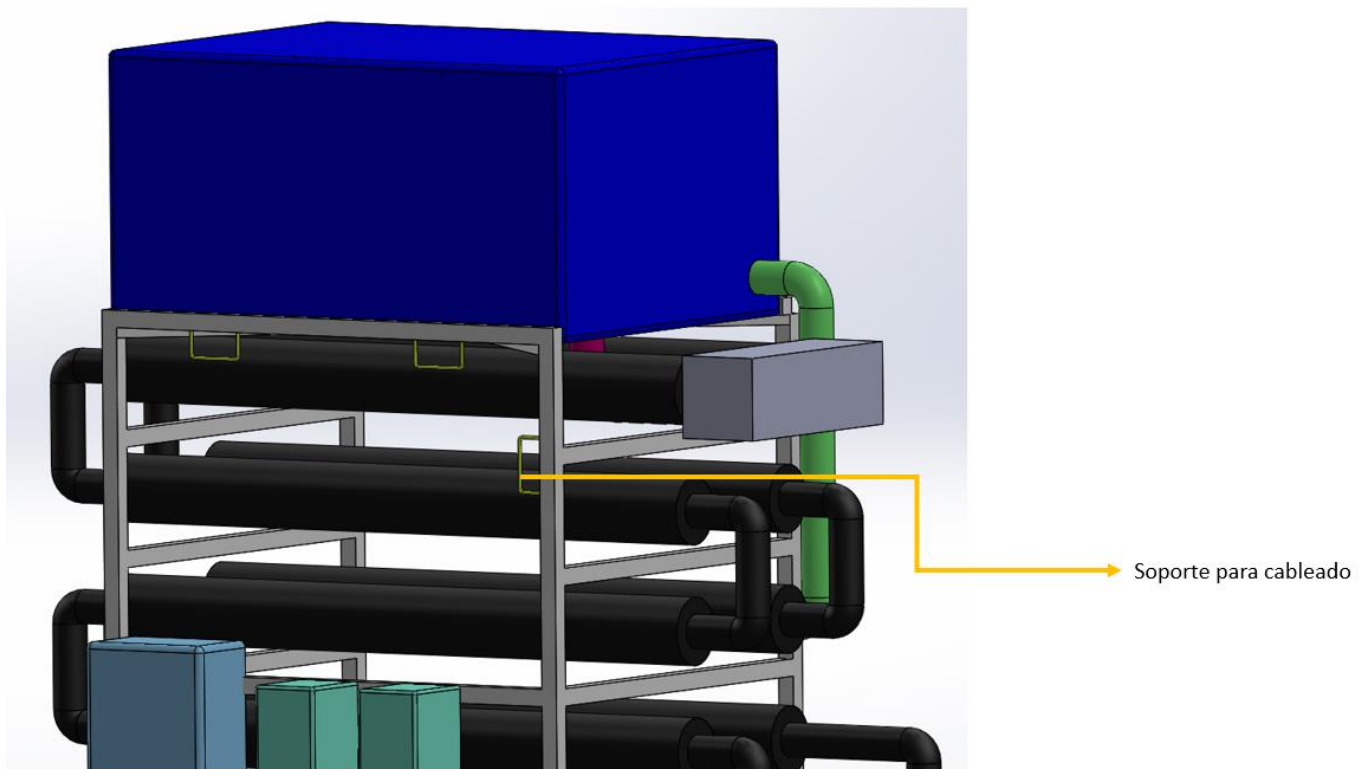


Figura 38. Vista lateral del RBT.

En la figura 38 se observa el segundo encapsulado del subsistema de Instrumentación el cual realiza una segunda prueba de la calidad del agua y decide si se almacena o se recircula. La vía de almacenamiento de agua recirculada conecta este encapsulado con el módulo de almacenamiento del agua recirculada y este último módulo se conecta con la vía de recirculación que pasa al primer encapsulado del subsistema de Instrumentación en la parte inferior del RBT.



*Figura 39. Soporte para la alimentación.*

En la figura 39 se observan los soportes para el cableado de la alimentación, estos soportes son ensamblados en la misma estructura del RBT y permitirán ofrecer un orden al momento de instalar los cables de los componentes, módulos y subsistemas que lo necesiten.

## 5. Diseño de detalle

En esta fase del diseño se da una descripción de ingeniería completa de un sistema probado y funcional. Se agrega información faltante sobre la configuración, forma, dimensiones, tolerancias, materiales y procesos de manufactura para cada parte que conforma al sistema y subsistemas. Esto da como resultado una especificación por cada pieza, especial o estándar, que se realizará o adquirirá respectivamente.

Los siguientes pasos son actividades propias del diseño de detalle [21]:

- Completar la selección y dimensionamiento de componentes
- Completar los dibujos de ingeniería
- Completar la lista de materiales
- Revisar las especificaciones de diseño del sistema
- Verificación completa del sistema general

### 5.1 Subsistema de Instrumentación

Con base en la selección de conceptos del capítulo 3.3, se selecciona el componente central del subsistema de Instrumentación, el módulo de procesamiento dado por el microcontrolador seleccionado.

El microcontrolador procesará los estados y valores que tenga en sus entradas para dar una salida específica a cada necesidad. Tomando como referencia la facilidad de uso, la comunidad de desarrollo y compatibilidad con las plataformas de programación en la que se trabaja el componente, se opta por trabajar con el microcontrolador ARM Cortex-M4F integrado en la tarjeta de desarrollo TIVA TM4C1294NCPDT (figura 40) cuyas características técnicas se pueden revisar en el apéndice I de este trabajo.

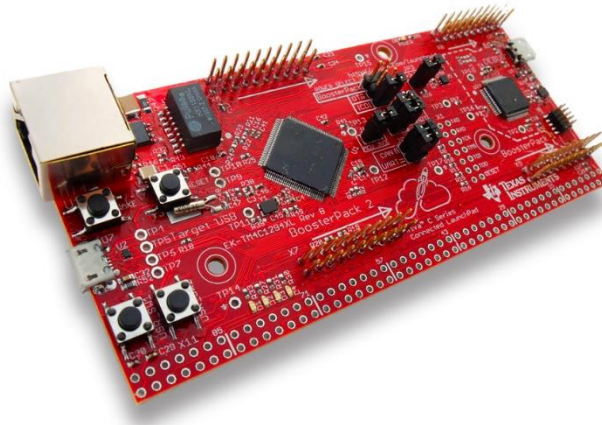


Figura 40. TIVA TM4C1294NCPDT.

Dentro de las principales características de esta tarjeta de desarrollo se encuentran:

- Monitoreo y conectividad remota
- Paneles de control HMI
- Dispositivos de red, puertas de enlace y adaptadores

Se necesitan cuatro pines analógicos para cada uno de los sensores, la tarjeta de desarrollo integra 36 pines analógico, de los cuales 20 son de uso exclusivo para señales analógicas, por lo que la tarjeta sobrepasa las expectativas. Para la transmisión remota se tiene diez módulos I2C (*Inter Integrated Circuits*) para la conectividad por medio de dispositivos de red.

El manejo de datos analógicos en un microcontrolador hace necesario el uso de convertidores analógicos-digitales (ADC), la tarjeta presenta dos módulos ADC de 12 bits para su manejo, lo cual es compatible con los dos sensores analógicos a los que es necesario hacer una conversión de señal.

La compatibilidad con paneles de control HMI permite una estructura base para el control del RBT, la existencia de módulos externos compatibles con la tarjeta y los recursos generados por la comunidad de desarrollo.

Para el sensado de las variables de estudio se proponen los componentes presentados en la tabla 19. Como se mencionó anteriormente, dos de los cuatro sensores envían señales analógicas puras (pH y oxígeno disuelto), el sensor de turbidez provee señales digitales y analógicas, además de que el umbral es ajustable en el modo de señal digital. El sensor de flujo envía señales de pulsos PWM de las cuales el microcontrolador integra en la tarjeta de desarrollo. Los sensores de pH y oxígeno disuelto integran una sonda con cable BNC que se conecta a la placa controladora. El sensor de turbidez presenta una geometría fácil de adaptar a la tubería del RBT. Finalmente, el sensor de flujo integra una rosca externa de 2 [in] que se suele colocar directamente en la tubería que transporta el fluido generando así un fácil ensamble y desensamble del componente.

Tabla 19. Componentes para el sensado de las variables físicas.

Cuantificar los valores de las variables físicas	
Sensor de pH	
<p><b>Sensor analógico de pH V2.</b></p> <p>Con una alimentación de 5 [V] y un potenciómetro de precisión multivuelta para la correcta calibración, este sensor permite un fácil manejo para el operario. El rango de medición es de 0-14 [pH], con lo cual se encuentra en el rango de calidad de la tabla 3. La temperatura de medición es de 0-80 [°C] con una precisión <math>\pm 0.1\text{pH}</math> a 25 [°C]. Tiene la ventaja de que la sonda integrada sea sustituida por modelos como el E-201, E-201-C, E-900 y E-900-1. (Apéndice II) Las dimensiones del controlador (43x32mm) lo hace un componente que ahorra espacio de trabajo en el subsistema de Instrumentación.</p>	

### Sensor de oxígeno disuelto

#### Kit sensor de oxígeno disuelto *Gravity DFRobot*

Presenta un controlador con un circuito de acondicionamiento de señal para un mejor uso. Su alimentación es de 3.3~5.5 [V], un rango de detección de 0~20 [mg/L] que se encuentra en el rango de calidad de la tabla 3. El controlador se adapta a un electrodo con una longitud de 2 [m] ideal para su correcta instalación. El rango de la temperatura es de 0~40 [°C] lo cual se adapta a las necesidades del fluido en estudio.



### Sensor de turbidez

#### Sensor de turbidez SEN0189

Su funcionamiento se basa en generar un voltaje equivalente al NTU leído, llega a leer hasta 500 NTU, un rango de calidad ideal para los datos de la tabla 3. El voltaje de operación del sensor es de 5 [V] con una corriente de 40 [mA] cuyos valores son proporcionados por la tarjeta de desarrollo. La temperatura de operación es de 5~90 [°C] ideal para las necesidades del fluido además de que el adaptador posee dimensiones pequeñas (38x28x10mm) que crea mejor operabilidad y protección para el conjunto completo.





## Sensor de flujo

### Sensor de flujo YF-DN50

Este sensor integra dos roscas externas para acoplarse a tuberías de 2 pulgadas NPS cuyo rango de flujo es de 10-200 [L/min]. La presión de trabajo máxima de este sensor es de 2 MPa con una temperatura que oscila en el rango de 5-80 [°C]. La alimentación para este componente es de 5-18 [V] y 15 [mA] como corriente máxima. Todo esto integrado en 6.6 x 6.6 x 9.2 [cm] cuyas dimensiones pueden adaptarse correctamente al sistema de tuberías del RBT.



Se necesitará un sistema de monitoreo y comunicación remota trabajando conjuntamente con el subsistema de Interfaz para analizar y transferir el valor de las variables de estudio y el control de la bomba y soplador.

El módulo WiFi XBee-PRO XSC S3/S3B presenta características adaptables para el manejo conjunto con la tarjeta de desarrollo TIVA. En la tabla 20 se presentan los detalles de este componente.

Tabla 20. Módulo WiFi XBee-PRO S3B.

## Módulo WiFi XBee-PRO XSC S3/S3B

El módulo cuenta con un transceptor ADF7023 entregando hasta 28 millas en línea de visión, además de una operación de banda ISM (*Industrial, Scientific and Medical*) sin licencia de 900 [MHz] cumpliendo la distancia de operación con el subsistema de Interfaz. La ventaja de este módulo radica en la integración de una antena tipo RPSMA la cual genera una velocidad de datos de 20 [kbps] justificable para el despliegue único de datos.



Para realizar la activación o paro de la bomba de agua se propone el uso de un módulo relé de varios canales, esto debido al ciclo continuo al hacer la circulación y recirculación del agua. El módulo relé propuesto es el de cuatro canales, aunque se puede encontrar con ocho canales, lo cual no afecta a la aplicación propuesta. Las características principales de uso se muestran en la tabla 21.


Tabla 21. Módulo relé de varios canales.

Módulo relé	
<p>Al ser un proceso donde se necesita conmutar cargas, se selecciona el módulo relé de varios canales, ya que permite un voltaje hasta de 10 [A] a 220 [VAC] ideal para el funcionamiento de la bomba, además de una entrada de 5 [V] de corriente continua cuya alimentación puede ser por medio de la tarjeta TIVA o por un circuito especial para la aplicación. Cada salida tiene un LED indicador de actividad y presenta un pin por canal, uno conectado a tierra y el otro a voltaje. Esta última característica se puede aprovechar como indicador de estado en cada componente conmutado.</p>	

## 5.2 Subsistema de Interfaz

Dentro del subsistema de Interfaz existe la necesidad de procesar la información de salida del subsistema de Instrumentación, por lo cual se necesita un componente que tenga acceso a internet además de evitar problemas con el licenciamiento y obsolescencia de herramientas específicas. En la tabla 22 se propone el ordenador de placa reducida Raspberry PI 3B.

Tabla 22. Ordenador de placa reducida Raspberry PI 3B.

Raspberry PI 3B	
<p>La conectividad inalámbrica de la Raspberry PI 3B es de 2.4 [GHz] y 5 [GHz] por lo que puede recibir señales de internet proveniente de cualquier proveedor de internet. Además, posee una conectividad de red de hasta 300 [Mbps] lo cual es compatible con el módulo WiFi presentado anteriormente. El puerto Micro SD integrado a la placa permitirá un almacenamiento de los valores que puede extenderse hasta los 512 [GB]. Esto integrado en 82 x 56 x 19.5 [mm] de espacio.</p>	 A photograph of a Raspberry Pi 3B single-board computer. The board is green and populated with various components including a central processor chip, a USB Type-C port, an HDMI port, a 40-pin GPIO header, a USB Type-A port, an Ethernet port, and a Micro SD card slot. The board is shown from a top-down perspective.

Aprovechando la opción de memoria Micro SD y conexión USB de la tarjeta Raspberry PI 3B se propone tomar la opción de almacenamiento por memoria Micro SD vista en el subcapítulo 3.3. El tamaño de esta memoria varía dependiendo del uso y cantidad de datos a almacenar, considerando una memoria Micro SD que sustituya a un disco duro extraíble se puede proponer un tamaño de 512 [GB] de almacenamiento.

Tomando como base el módulo de internet utilizado en el subsistema de Instrumentación, el acceso a internet y conectividad inalámbrica de baja y alta frecuencia de la Raspberry PI 3B, la selección de un paquete de internet estaría limitado a la cobertura e infraestructura del proveedor; sin embargo, el paquete básico de transmisión de datos se puede ajustar sin ningún inconveniente en el RBT. Se propone el uso del paquete Telmex 20 [Mbps] debido a que el servicio es único para la planta de tratamiento y la velocidad de datos proveniente del módulo WiFi es baja para considerar un aumento en el servicio.

### 5.3 Subsistema de Bombas y Energía

El grupo de trabajo de la Facultad de Química pone a su disposición el uso de un soplador VB-290G, cuyas características se presentan en la tabla 23. Para el caso de la bomba se deben tener en cuenta dos conceptos importantes. El primero es la alimentación a la que se va a operar tomando en cuenta el módulo relé analizado en la tabla 21 y el segundo si la bomba está en contacto directo con el agua o no.

Al tener una alimentación comercial/domestica, el uso de bombas monofásicas serían la mejor opción debido a su alimentación a 127 [V]. Al tener un lugar de almacenamiento del agua residual es necesario el uso de una bomba sumergible que permita el paso de sólidos de pequeñas dimensiones (1 [in]) y así tener un segundo filtrado más fino antes de ingresar al RBT.


Tomando estas dos características principales se propone el uso de la bomba sumergible monofásica VXm 8/35 -N cuyas especificaciones se muestran en la tabla 24.

Tabla 23. Especificaciones del soplador VB-290G.

Soplador VB-290G. El flujo máximo presentado es de 350 [L/min] con una presión de 0.008 [MPa]. Su alimentación se basa en 120 [V] de corriente alterna a una frecuencia de 60 [Hz]. Sus dimensiones son 230 x 199 x 215 [mm]



Tabla 24. Especificaciones de la bomba sumergible.

Bomba sumergible VXm 8/35 -N	
<p>El uso de esta bomba es para drenaje con movimiento de agua ligeramente sucia. Monofásica con una aplicación hasta 10 [m] de altura manométrica. Permite el paso de sólidos hasta 35 [mm] por lo que tiene un sistema de filtración adecuado para el RBT. Tiene una potencia de 0.75 [HP] y un caudal de 300 [L/min] a una altura de 2.7 [m] siendo compatible con el flujo del soplador. Para evitar fugas, presenta un sello mecánico de carburo de silicio para mayor agarre.</p>	

Dentro del gabinete se contará con pulsadores normalmente abiertos y cerrados además de un paro de emergencia como módulo de protección al usuario. Se propone el uso del *Pilot light Harmony XB4BVG1* como botón pulsador y el botón paro de emergencia de 40 [mm]. Las características principales de estos componentes se muestran en la tabla 25.

Tabla 25. Componentes principales para el panel físico del RBT.

<b>Pilot light Harmony XB4BVG1</b>	
<p>El diámetro de montaje es de 22 [mm] lo que lo hace un componente de fácil instalación. Los límites de tensión de alimentación son de 100-132 [V] AC, lo cual se ajusta a la alimentación de 127 [V]. Al presentarse en un ambiente en presencia de agua, este componente integra el LED protegido por una membrana de plástico. Se puede encontrar en diversos colores.</p>	
<b>Paro de emergencia rojo 40 [mm]</b>	
<p>Su diámetro de montaje es de 22 [mm] lo que lo hace un componente práctico al momento de ensamblar. Su reinicio se realiza girando el botón, con esto permite un manejo sencillo para el usuario. La composición de los contactos es 1NA (Normalmente Abierto) + 1NC (Normalmente Cerrado) por lo que sus contactos son estándar. Permite los grados de protección IP66, IP67, IP69 y IP69K.</p>	

#### 5.4 Subsistema de ensamble

El subsistema de Ensamble necesita acoplar los tubos PVC del sistema RBT para generar una geometría conveniente para colocar los sensores, por lo tanto, se propone el uso de “Ts” de PVC de 4 [in] (figura 41) cumpliendo un ajuste adecuado con el tubo principal. Con este componente se podría evitar la perforación del tubo principal y al mismo tiempo fugas del fluido.



Figura 41. T de PVC 2 [in].

Para generar una resistencia mecánica entre cada conexión se propone el uso de adhesivos epóxicos para componentes metálicos y pegamento para PVC FOSET para componentes PVC. Este tipo de adhesivos se describen detalladamente en la tabla 26.

Tabla 26. Adhesivos para componentes y soportes del RBT.

### 3M Adhesivo Epóxico - Transparente

Permite sellar y encapsular componentes eléctricos y electrónicos en tableros de circuito lo que es ideal para proveer la protección al conjunto de componentes del RBT. En general, los adhesivos epóxicos tienen la mayor resistencia general y ofrecen el mejor rendimiento y la mayor resistencia a las altas temperaturas, solventes e intemperie. [27] Además, adhiere aluminio, acero inoxidable y cobre, materiales que existen en la estructura del sistema.



### Pegamento para PVC FOSET

Pegamento de secado rápido especial para tuberías, drenajes, acoples en sistemas de agua, ventilación y tubo tipo conduit en condiciones de humedad [28]. Puede pegar tubos hasta de 101.6 [mm] cédula 40 y 80, lo que es ideal para el diámetro del sistema de tuberías de 4 [in].



Para la distribución de la energía eléctrica por medio de cables se toma en cuenta que el RBT trabaja con componentes eléctricos y electrónicos además de unidades que trabajan hasta 7 [A]. Se tiene una alimentación primaria y otra secundaria. La primera para componentes con consumo de corriente alta y la otra para corriente muy baja. Tomando como corriente alta 10 [A] y muy baja 1 [A] se propone trabajar con los cables eléctricos de la tabla 27.



Tabla 27. Calibres de cables para componentes y unidades.

Cable	Uso
<b>AWG 12</b>	Consumo de corriente alto (10 [A]). En este grupo entraría la alimentación de 127 [V], bomba, soplador, botones de activación y paro del panel físico. Debido a su alto consumo de energía.
<b>AWG 20</b>	Consumo de corriente medio-alto (2 [A]). En este grupo entrarían los componentes electrónicos, microcontrolador, sensores, componentes periféricos etc. Debido a su bajo consumo de energía.



Para proveer el soporte de cables y evitar accidentes dentro del RBT, se propone el uso de bases para montaje de cinchos de  $\frac{3}{4}$  [in] para cables de diversos tamaños y tubo tipo conduit flexible de  $\frac{3}{4}$  [in]. Las características detalladas de estos componentes se exponen en la tabla 28.

Tabla 28. Componentes para organizar cables del RBT.

<b>Tubo tipo conduit flexible de <math>\frac{3}{4}</math> [in]</b>	
<p>Tubo metálico flexible engargolado de forma helicoidal recubierto de PVC para proporcionar protección mecánica y hermética al cableado eléctricas de difícil acceso. Además, permite un blindaje contra corrientes parásitas originadas por campos magnéticos.</p>	 A photograph of a flexible, grey, corrugated metal conduit tube. The tube is coiled into a loose 'U' shape, showing its flexibility. It has a metallic, ribbed appearance and is set against a plain white background.
<b>Bases para montaje de cinchos de <math>\frac{3}{4}</math> [in]</b>	
<p>Permiten tener una organización de cada cable a la entrada y salida. Evitan el desgaste por rozamiento con vibración, así como cortos circuitos o rozamientos de los cables con componentes conductores. Por otro lado, las terminales permiten un agarre total del cable evitando que el cable se venza.</p>	 A photograph showing two black plastic cable clamps mounted on a blue background. Each clamp is secured with a metal screw. Two yellow cables are shown passing through the clamps, demonstrating how they hold the cables in place.

## 5.5 Sistema general

La configuración del sistema general se realizó en el software SolidWorks con licencia estudiantil, debido a su calidad y cantidad de aplicaciones integradas, además de tener una comunidad de soporte a nivel mundial. A continuación, se presenta el sistema general partiendo de los subsistemas que lo conforman. En la figura 42 se presenta los sistemas de comunicación y requerimientos planteados en el subcapítulo 3.1.

Dentro del sistema de comunicación, se presenta la tarjeta de desarrollo Tiva (número 1) en cuyas terminales estará conectada un regulador de voltaje (número 2) cuya alimentación se proporciona en el sistema de regulación secundario perteneciente al subsistema de Bombas y Energía. Se tendrá otro regulador de voltaje (número 3) para alimentar el HMI (número 4) el cual actuará como la interfaz de comunicación entre el sistema y el usuario. Los módulos de los sensores de pH, oxígeno disuelto a la entrada y salida (número 5) tendrán su regleta (número 6) para conectar sus terminales a tierra, corriente y señal en la tarjeta de desarrollo. De igual forma, los módulos de los sensores de turbidez a la entrada y salida (número 7) dispondrán de estos conectores para su instalación, así como el módulo de WiFi (número 8). Finalmente, para el accionamiento de las electroválvulas se tendrá un módulo de ocho relés (número 9), de los cuales cuatro son de uso exclusivo para las electroválvulas y dos más para la activación/desactivación del paro de emergencia y la señal de alerta (figura 43, números 10 y 11 respectivamente).

En la figura 44 se muestra la ubicación de los sensores ensamblados en las tuberías por medio de T's de PVC proporcionadas por el subsistema de Ensamble. Como se puede observar en esta figura, el ubicar al sensor de flujo al inicio del sistema y al inicio de la salida de este, es debido a que es el flujo inicial con el que deben de partir los demás sensores, es decir, es el punto de referencia para realizar el análisis de cada muestreo (punto a). Sigue el sensor de pH (punto b) y el de oxígeno disuelto (punto c), ambos sensores pueden intercambiar posición debido a que sus variables son independientes. Finalmente se ubica el sensor de turbidez (punto d), el cual depende de valor proporcionado por el sensor de flujo y debido a la resistencia por arrastre del fluido dentro de la

tubería se tendrá un movimiento subamortiguado cuando el agua llegue a este punto, aprovechando este fenómeno para obtener valores cercanos al valor real.

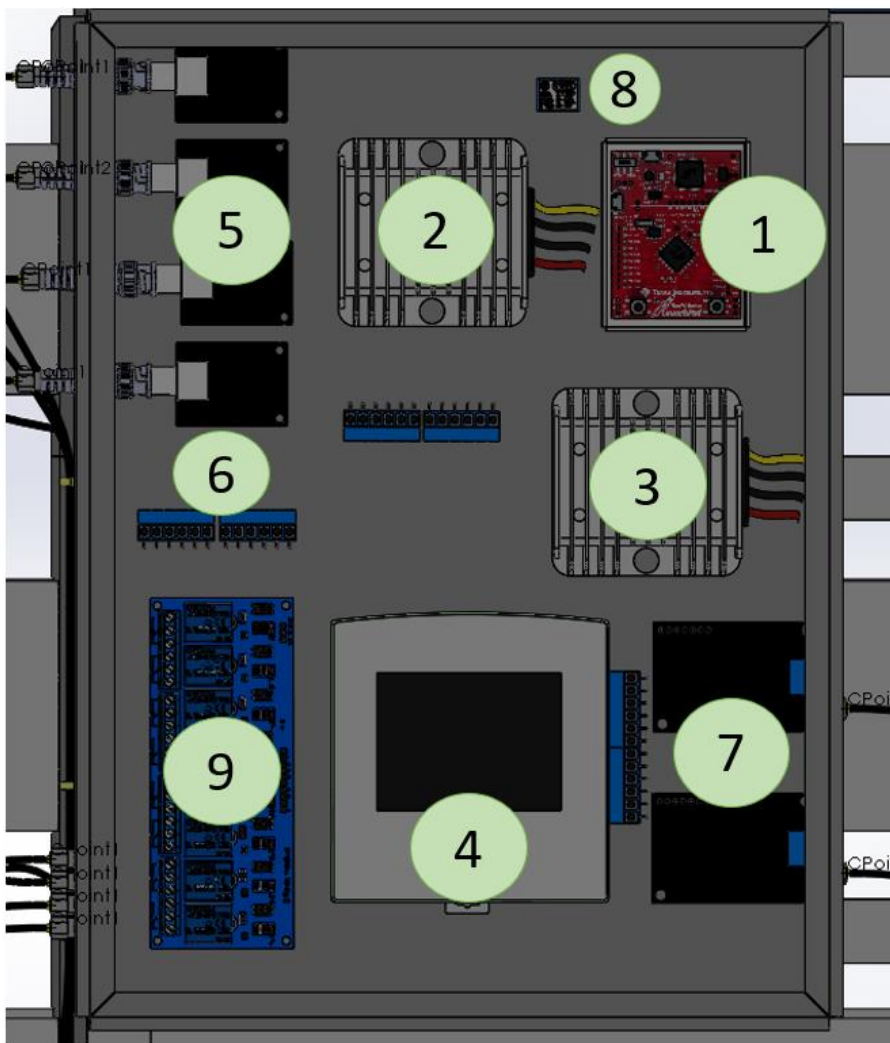
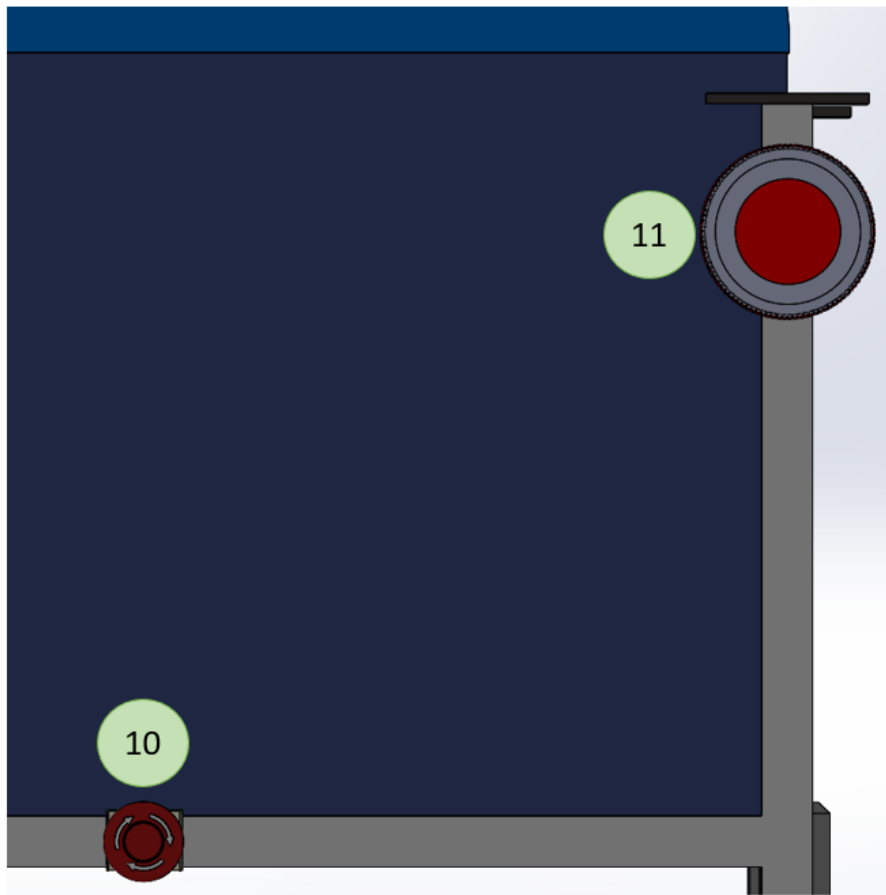


Figura 42. Sistemas de comunicación y requerimientos.



*Figura 43. Paro de emergencia y alarma.*

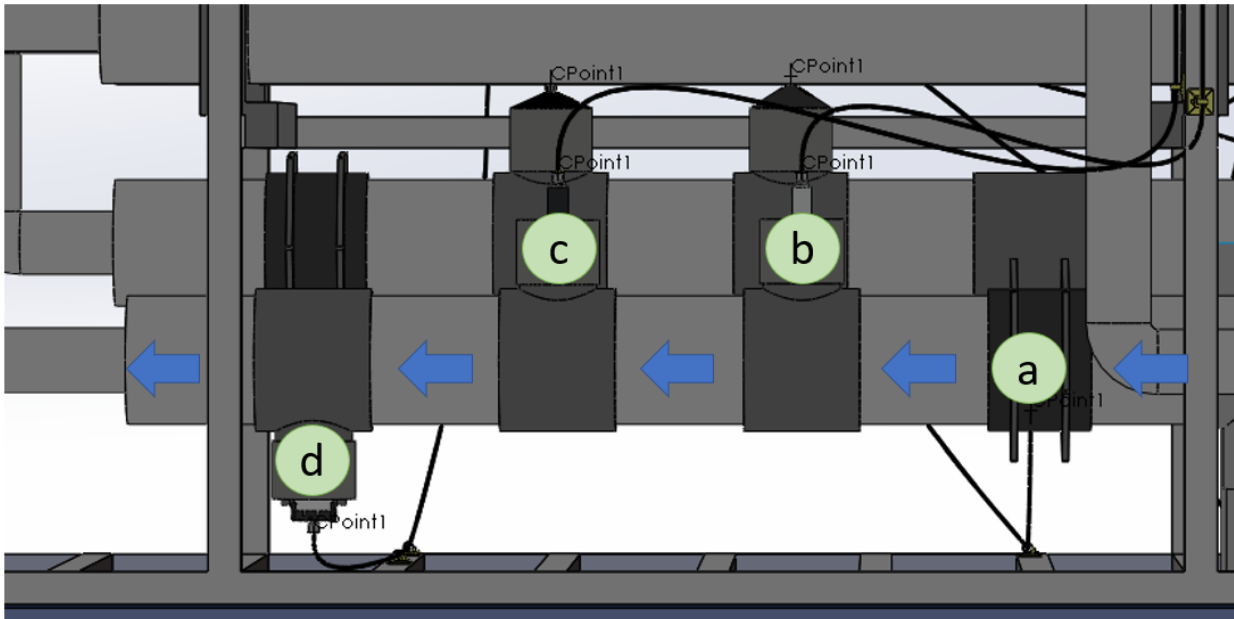


Figura 44. Orden de los sensores.

Para el subsistema de Bombas y Energía, se plantea la configuración en la figura 45. En ella podemos observar la presencia del interruptor termomagnético (1B) de la alimentación principal proveniente de nuestro suministro de energía. De igual forma, otro interruptor (2B) para la bomba y soplador y el tercero (3B) para la alimentación al subsistema de Instrumentación. Se tiene de igual forma, un contactor (4B) como protección a la activación/desactivación de la bomba. Finalmente, se tienen tres *pilot lights Harmony* (verde, amarillo y rojo), el primero para mostrar el corrector arranque del sistema con sus respectivos componentes, el segundo para proporcionar una señal de advertencia y el rojo como una señal de alerta. Cabe señalar que estos componentes están conectados al HMI del subsistema de instrumentación. Se muestran las canaletas (5B) donde se conectan los interruptores, *pilot lights* y contactor.

Para alojar y proteger a los componentes eléctricos y electrónicos del subsistema de Instrumentación y la regulación secundaria, se ensamblan gabinetes con empaques en la parte interior y tapa en la parte exterior (figura 46, 1C, 2C) para que no se tenga presencia de polvo y humedad.

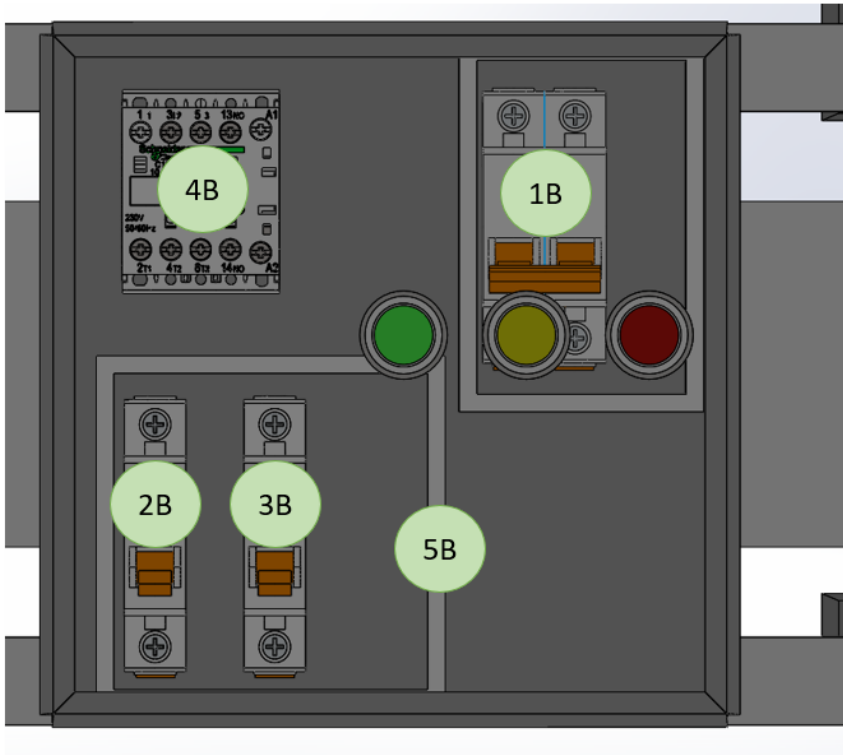


Figura 45. Subsistema de Bombas y Energía.

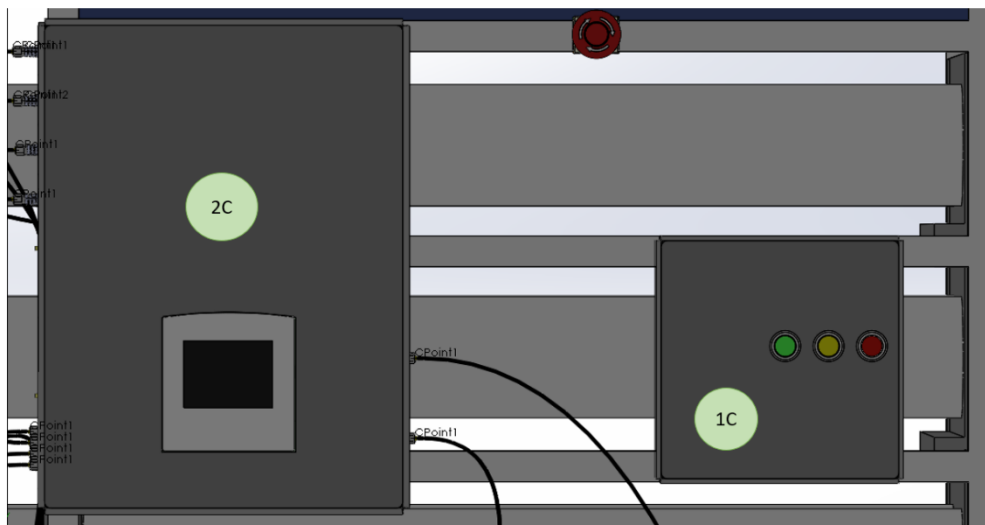


Figura 46. Gabinetes del RBT.

En la figura 47 se presenta el subsistema de Ensamble, como se puede observar, se tiene en la entrada a la Bomba sumergible VXm 8/35 -N (1D) presentada en el subcapítulo 5.3, se muestran soportes de tubo PVC (2D) para la tubería principal (3D) así como soportes para la tubería de ocho vías (4D) acopladas a la estructura principal (5D). Se optó por soportar todo tubo de PVC suspendido en la estructura principal para evitar vibraciones que pudieran afectar el funcionamiento de los sensores, de igual para tener una mayor estabilidad en el RBT.

En la parte inferior, se ubica en sistema de almacenamiento de agua tratada (6D) y en la parte superior, el sistema de almacenamiento de agua recirculada (7D).

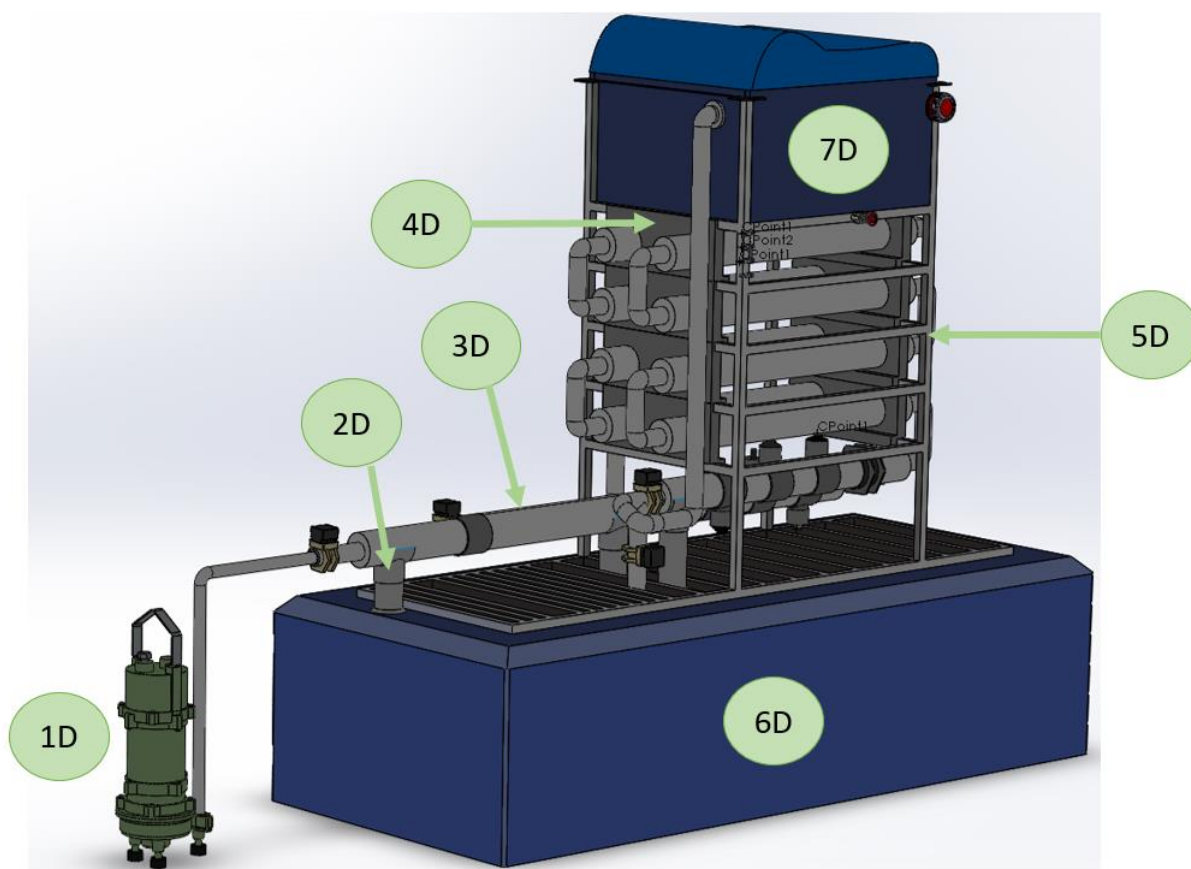


Figura 47. Subsistema de Ensamble.

El sistema general se presenta en las figuras 48 y 49

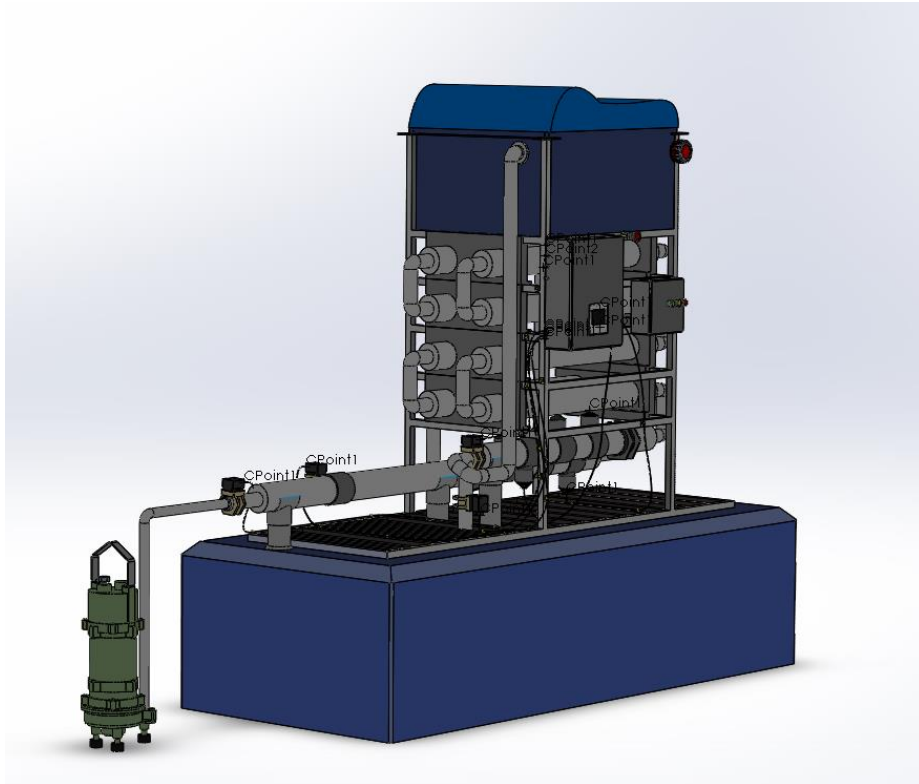


Figura 48. Vista en 3D del RBT.

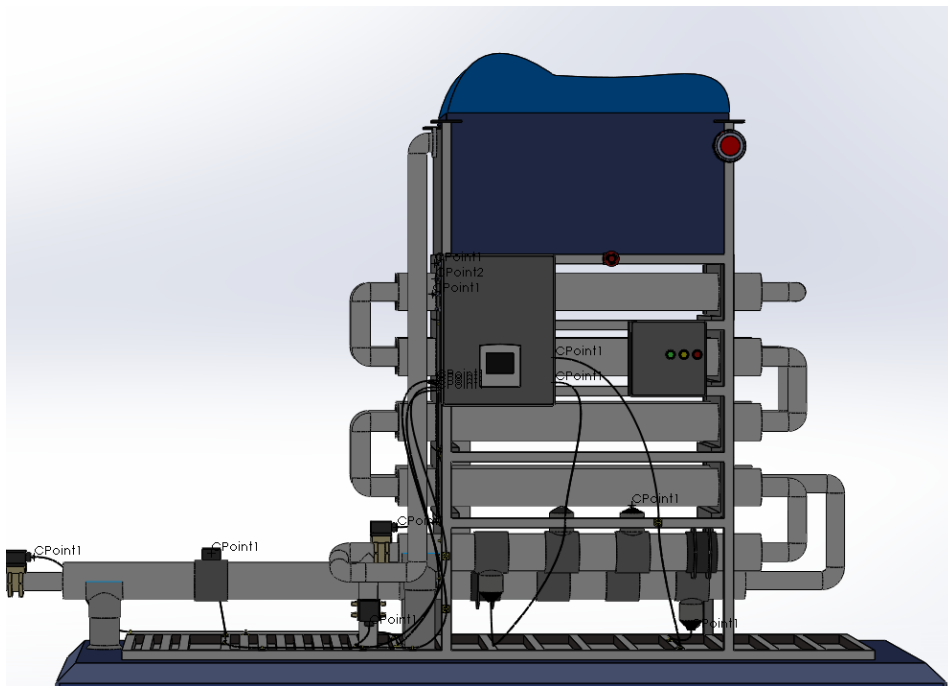


Figura 49. Vista frontal del RBT.



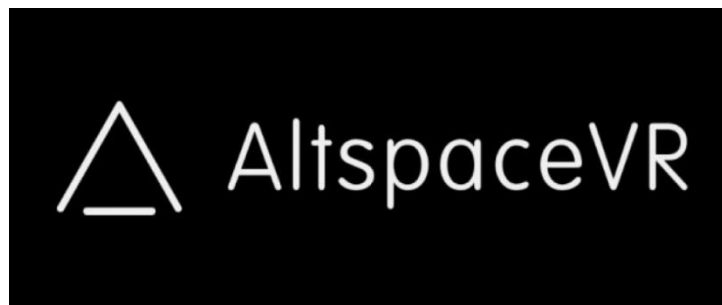
## 6. Creación de un modelo virtual

En marzo del año 2020, las actividades presenciales en la Universidad Nacional Autónoma de México fueron suspendidas debido a la pandemia mundial ocasionada por la enfermedad infecciosa Covid-19 (SARS-CoV-2). Por lo tanto, la manufactura de piezas y ensamble de componentes de manera física no pudo realizarse, como resultado, se optó por crear modelos virtuales de cada subsistema y sistema general.

Con estos modelos virtuales se espera validar el ensamble de las piezas y el aspecto visual, además de prevenir las singularidades y colisiones entre piezas dentro del sistema general.

Los modelos virtuales brindan la posibilidad de aprender de los errores sin que las equivocaciones tengan consecuencias reales, además, incrementan los niveles de adquisición y retención de conocimiento. En este sentido, los modelos planteados ofrecen la oportunidad de verificar tamaños y ensambles adecuados como si se tratara de un sistema físico.

Para coordinar la comunicación entre cada subsistema, además de la creación de cada modelo, se optó por la plataforma *AltspaceVR* (figura 50) debido a que permite a los usuarios compartir actividades en entornos virtuales.



*Figura 50. Plataforma de realidad virtual AltspaceVR.*

La plataforma *AltspaceVR* otorga a los usuarios las herramientas necesarias para crear reuniones virtuales públicas o privadas. Tomando como base lo anterior, se crearon reuniones virtuales privadas en las que se exponían los avances de cada grupo de trabajo (figura 51). Como requisito, *AltspaceVR* solicita al usuario crear un avatar como identificador en el entorno virtual.

Una vez finalizada la etapa de detalle, los modelos CAD se exportaron al entorno virtual para crear el RBT en realidad virtual.



*Figura 51. Creación de espacios virtuales con avatares.*

Para exportar los modelos a AltspaceVR desde SolidWorks se realizaron los siguientes pasos:

- 1) Cada subsistema o componentes de este se exporta desde SolidWorks en formato STL. Con esto se garantiza un objeto 3D que puede ser visualizado con las aplicaciones y herramientas propias del sistema operativo Windows 10.
- 2) Se abre el archivo STL con la aplicación "3D Builder" y se seleccionan las unidades del modelo para su importación. Con esto se tendrán las medidas proporcionadas en el CAD. Con 3D Builder se orienta el modelo y se agrega color o texturas, esto con la finalidad de obtener un modelo más real. Esto se puede observar en la figura 52.

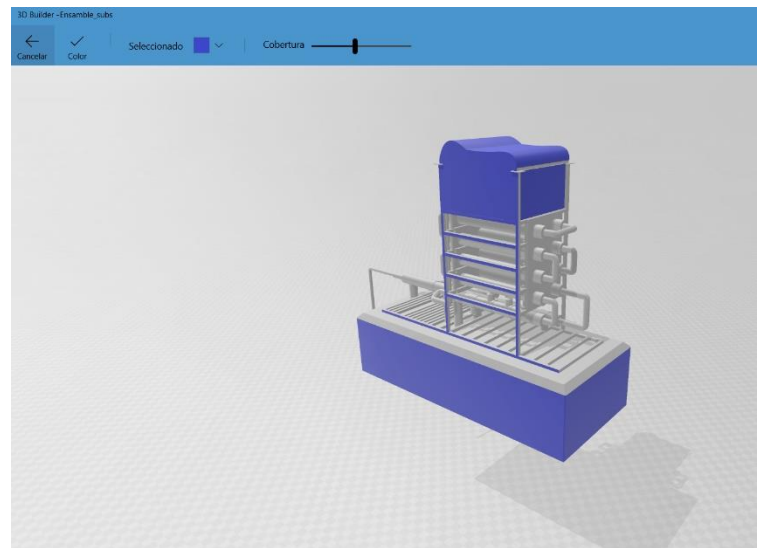
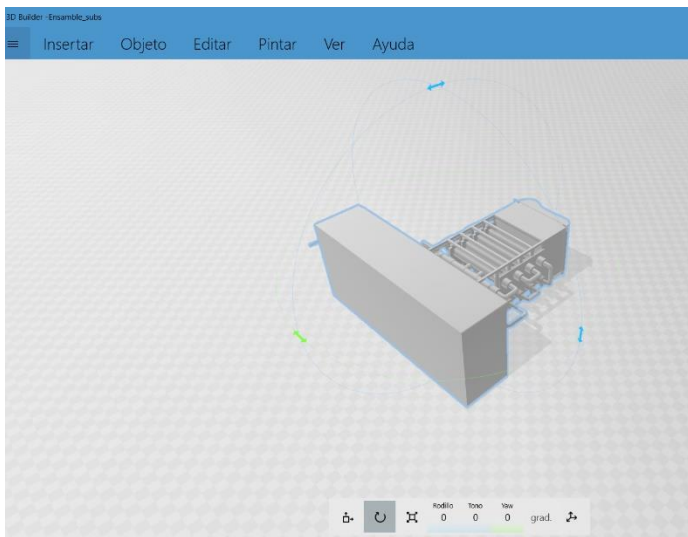


Figura 52. Uso de 3D Builder.

- 3) Se exportará el modelo en formato GLTF y al mismo tiempo 3D Builder guardará los archivos .BIN correspondientes a las texturas y colores del modelo.
- 4) Para mayor facilidad, se utilizó el programa online "GLB Packer" para obtener el modelo en formato GLB, este formato es el único aceptable por AltspaceVR en sus entornos virtuales.

- 5) El archivo obtenido por *GLB Packer* se sube en la plataforma AltspaceVR en la siguiente ruta: `altvr.com > More > Models` y se selecciona “Crear”. Se copia el “Clipboard”, se abre la aplicación AltspaceVR y se pega el enlace en la siguiente ruta: `World Editor > Altspace > Basics > GLTF`.

## 6.1 Subsistema de Interfaz

Tomando como base la configuración presentada en la figura 32 del subcapítulo 4.2, el diseño de la interfaz estaría dividida por cuadrantes. Cada uno de estos cuadrantes estarían conformados por pestañas dentro de un navegador para mostrar el comportamiento del RBT en el tiempo. Las características principales de la interfaz para el RBT son:

- **Visibilidad:** Todas las operaciones necesarias para realizar cada tarea deben ser notorias sin redundancias.
- **Simplicidad:** El grado de abstracción que implique para el usuario llevar a cabo una tarea debe ser reducido al mínimo.
- **Retroalimentación:** Informar claramente cualquier acción o cambio significativo al usuario.

Con las características mencionadas, se integró la interfaz en un mundo de *AltspaceVR* con ayuda de herramientas de desarrollo web, como fueron HTML5, CSS y JavaScript. En la figura 53 se muestra la pestaña principal del sistema en el navegador web Google Chrome y en un dispositivo móvil.



Figura 53. Interfaz adaptativa.

La visibilidad de cada opción del RBT en ambos dispositivos muestra cada tarea de manera clara y el modo de uso por medio de acciones simples, hace que el sistema presente una simplicidad adecuada para el usuario.

Por otro lado, en la figura 54 se muestra la ubicación de cada variable de estudio y las operaciones necesarias para cada tarea dentro del sistema.



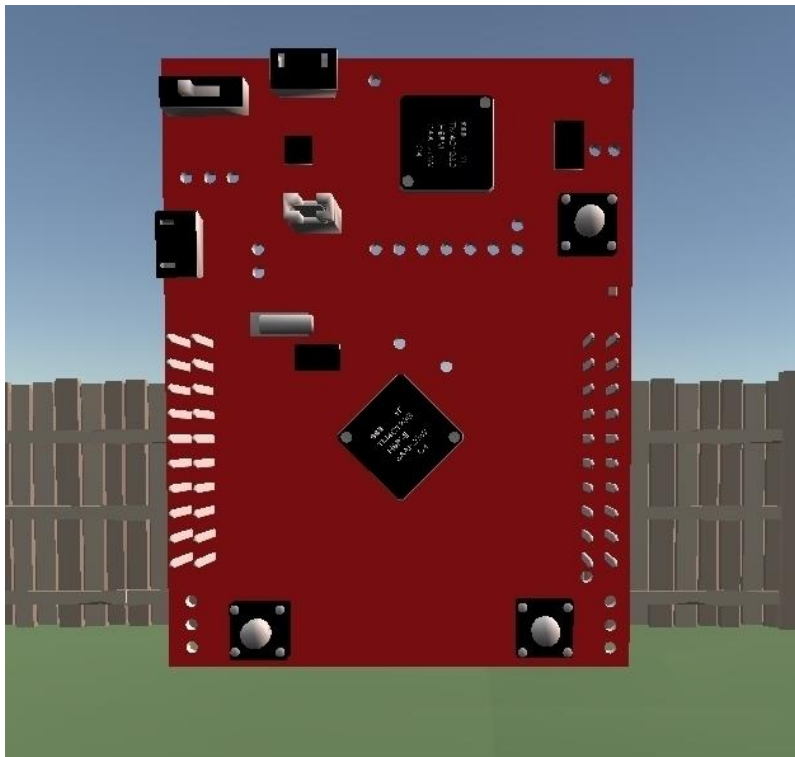
Figura 54. Interfaz para el usuario.

En este punto, cualquier cambio en las variables de estudio se muestra en las gráficas generando una pantalla adaptativa que permite al usuario visualizar la información de la manera más detallada posible. El tamaño de los botones es dependiendo de su importancia de uso, es claro que el botón de paro es el más grande y presenta un color que permite encontrarlo con facilidad. Con este sistema se informa cualquier acción o cambio significativo al usuario.

## 6.2 Subsistema de Instrumentación

En el subcapítulo 5.1 se mencionó que la tarjeta de desarrollo era el principal componente del subsistema de Instrumentación, ya que permite procesar los estados y valores presentes en sus entradas. Por otro lado, los sensores juegan un papel complementario a la tarjeta de desarrollo debido a que son ellos los encargados de proporcionar los valores sensados. Para un correcto funcionamiento de cada grupo de componentes y la protección de estos y al usuario, es necesario el uso de reguladores de voltaje.

Los componentes mencionados anteriormente, se integraron a *AltspaceVR* generando los modelos presentados en las figuras 55 y 56.



*Figura 55. Tarjeta de desarrollo Tiva.*

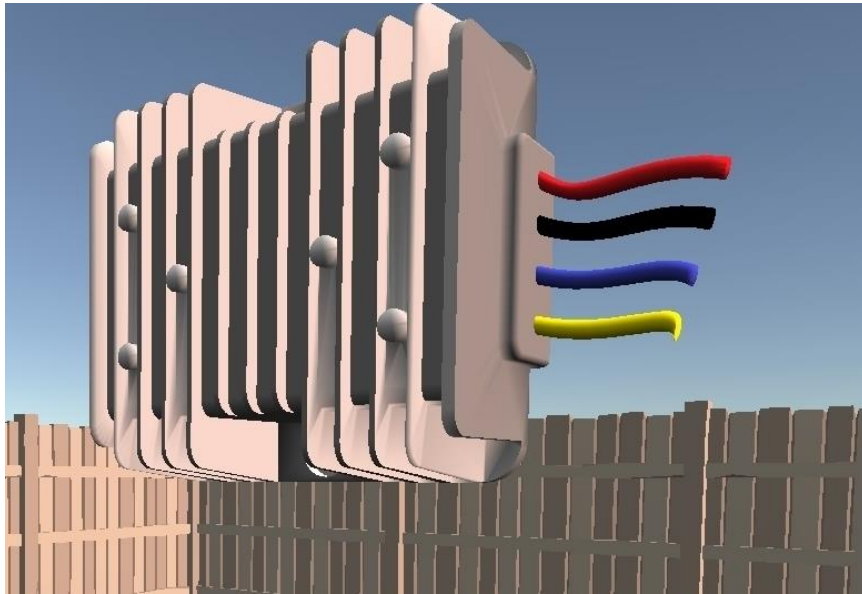


Figura 56. Regulador de voltaje.

Los sensores se muestran en la figura 57. De derecha a izquierda, se presenta el sensor de turbidez el cual se ensambla con un tubo tipo T invertido para obtener una mejor lectura del fluido, el sensor de oxígeno disuelto, el sensor de pH; ambos sensores se colocan de manera vertical permitiendo a su punta tocar el fluido en estudio. Finalmente se encuentra el sensor de flujo el cual se ensambla directamente a la tubería con ayuda de los adhesivos presentados en la tabla 26 del subcapítulo 5.4.

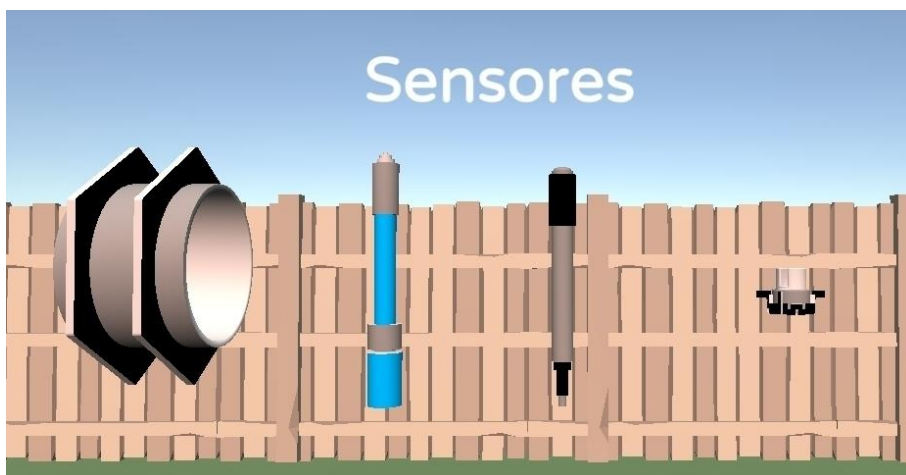
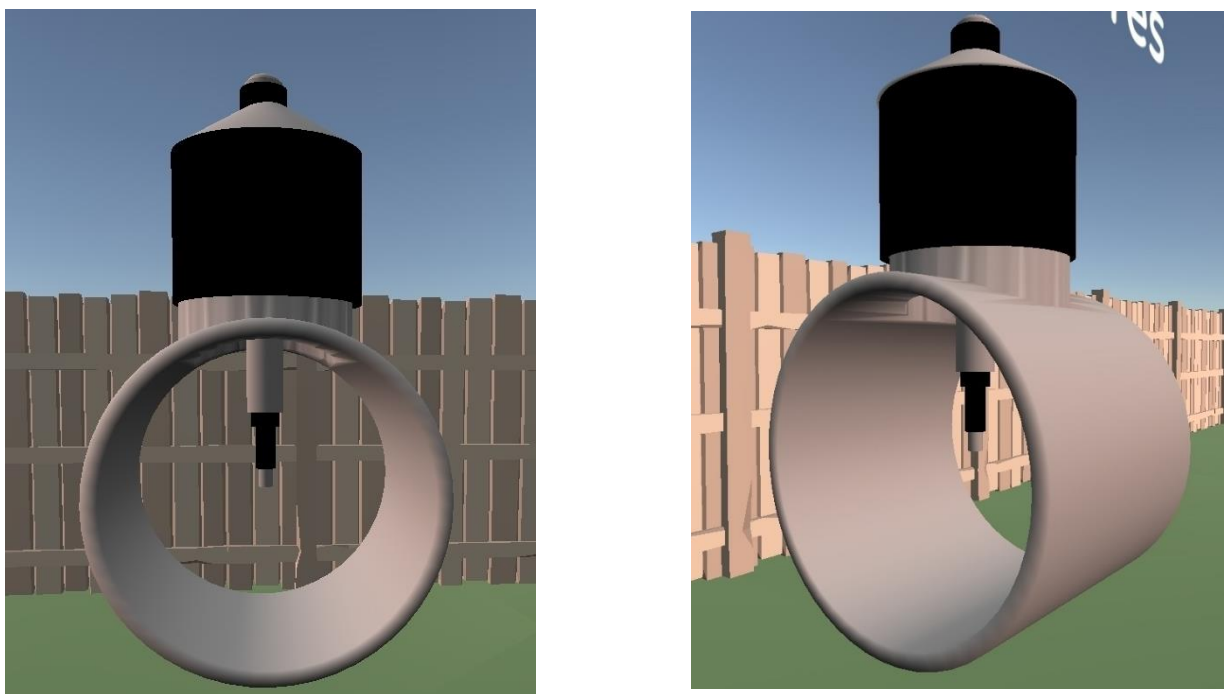


Figura 57. Sensores.



Para visualizar el correcto ensamble de los sensores de pH y de oxígeno disuelto, en la figura 58 se muestran los componentes proporcionados por el subsistema de ensamble. En este subensamble se verifican dos cosas, por un lado, el contacto de la punta del sensor con el fluido y por otro lado la protección a los electrodos de factores externos como polvo y agua.



*Figura 58. Ensamble de sensores verticales.*

### 6.3 Subsistema de Bombas y Energía

Como se presentó en el subcapítulo 5.3, el subsistema de Bombas y Energía integra a la entrada del RBT la bomba sumergible VXm 8/35 -N, de igual forma, dos paneles, uno de control y otro de regulación de energía eléctrica. Para coordinar el flujo del agua, se toman en cuenta electroválvulas conectadas al sistema de tuberías.

Tomando como base lo anterior, en *AltspaceVR* se importaron los elementos mencionados con la finalidad de validar el ensamble de las piezas y el aspecto visual de cada elemento. En la figura 59 se muestran los paneles de control (principal) y el de regulación (secundario) cuya escala fue aumentada para mejorar la visualización de cada elemento.

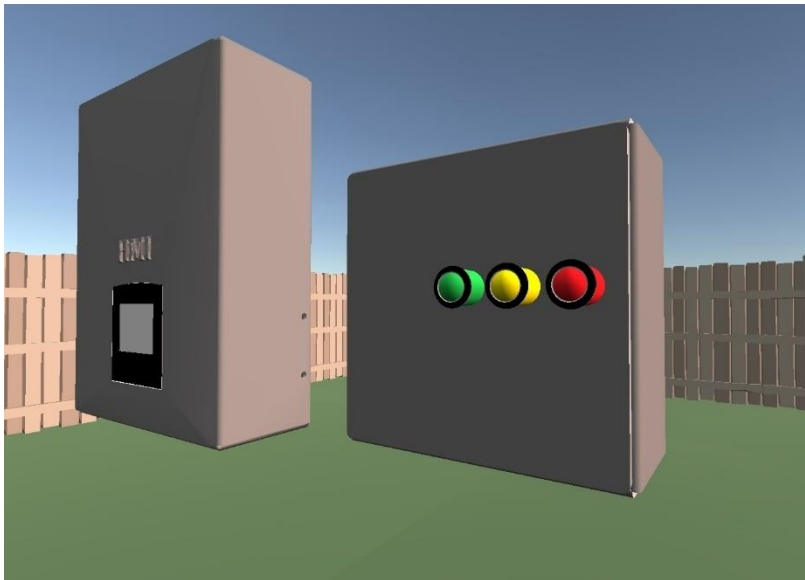
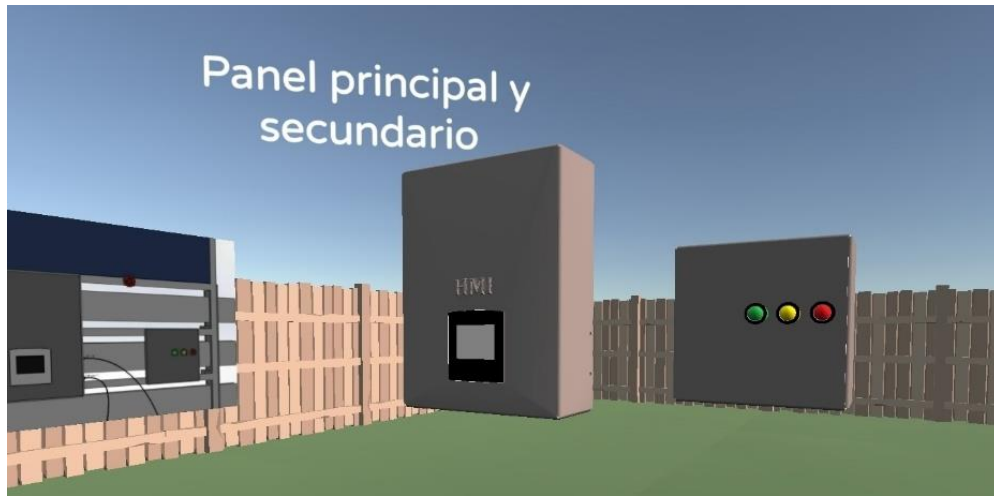


Figura 59. Panel de control y regulación.



*Figura 60. Ubicación de los paneles en el RBT.*

Como se puede observar en la figura 60, dentro del panel de control se encuentra la instrumentación y el HMI del RBT. Por otro lado, el panel secundario es el encargado de la regulación de la energía eléctrica por lo cual integra los *Pilot Light Harmony* de colores verde, amarillo y rojo dependiendo de la tensión proporcionada a los subsistemas.

Por otro lado, en las figuras 61 y 62 se presenta la bomba y la electroválvula respectivamente que van conectadas al sistema de tuberías. En estas figuras podemos verificar el tamaño de cada elemento para su correcto ensamble en el RBT.

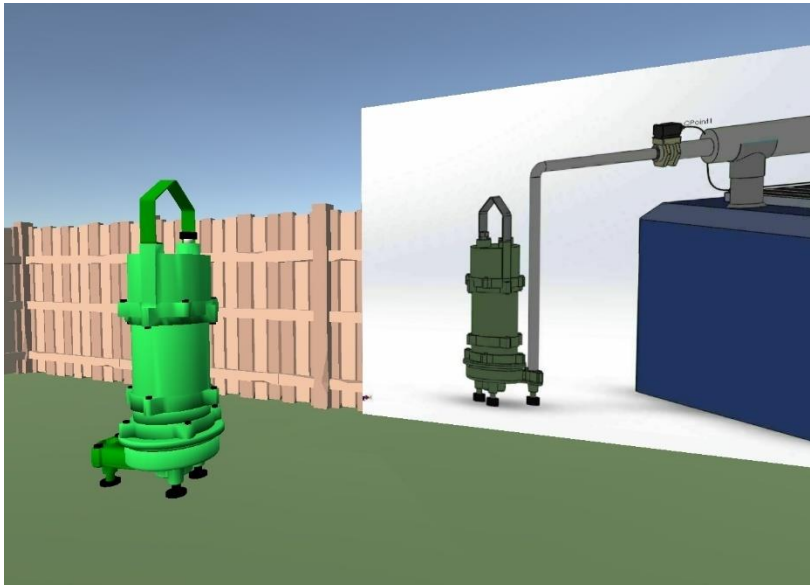


Figura 61. Bomba sumergible VXm 8/35 -N.

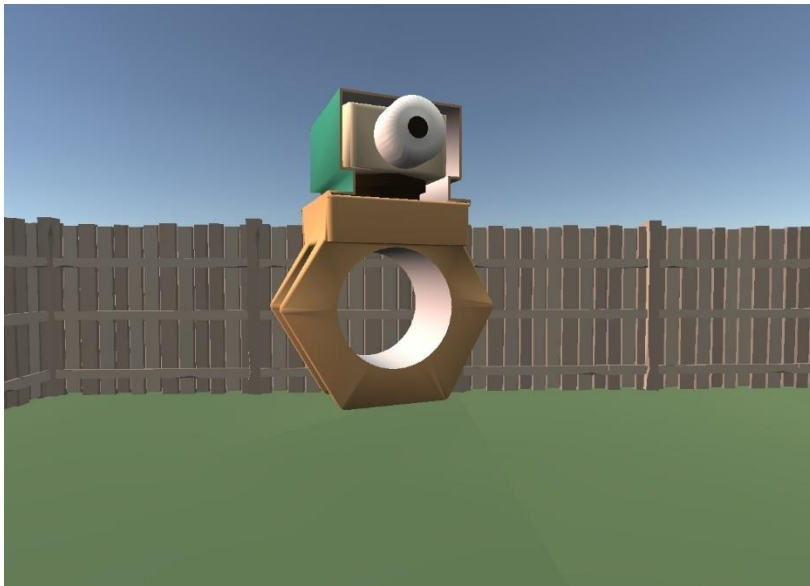


Figura 62. Electrovalvula.

## 6.4 Subsistema de Ensamble

Como se mencionó en el subcapítulo 5.4, el subsistema de ensamble integra los elementos físicos para dar soporte y seguridad a los componentes del RBT. Los modelos generados para *AltSpaceVR* fueron el tubo de ocho vías, los tanques de almacenamiento y recirculación, las protecciones para los sensores y las T's.

En la figura 63 se muestra el sistema de tuberías con la respectiva ubicación del tanque de recirculación en la parte superior y el tanque de almacenamiento en la parte inferior. En la figura 64 la protección para los sensores unidos por medio de T's. Con la visualización presentada en tamaño real, se verifica el ensamble de cada componente previniendo colisiones entre elementos.



*Figura 63. Sistema tubular de ocho vías.*

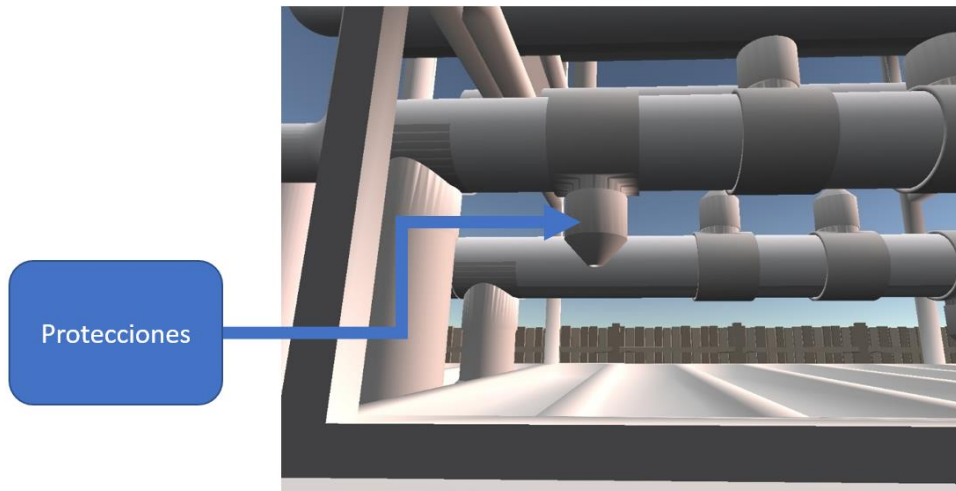


Figura 64. Protecciones para los sensores.

## 6.5 Sistema general

Integrando cada subsistema en un sistema general a escala real, se genera el modelo presentado en la figura 65.

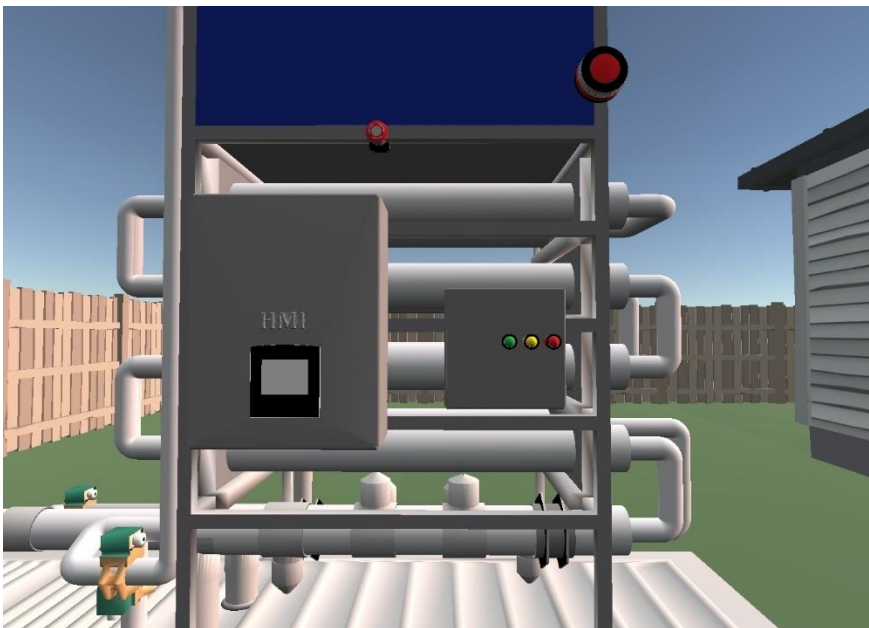
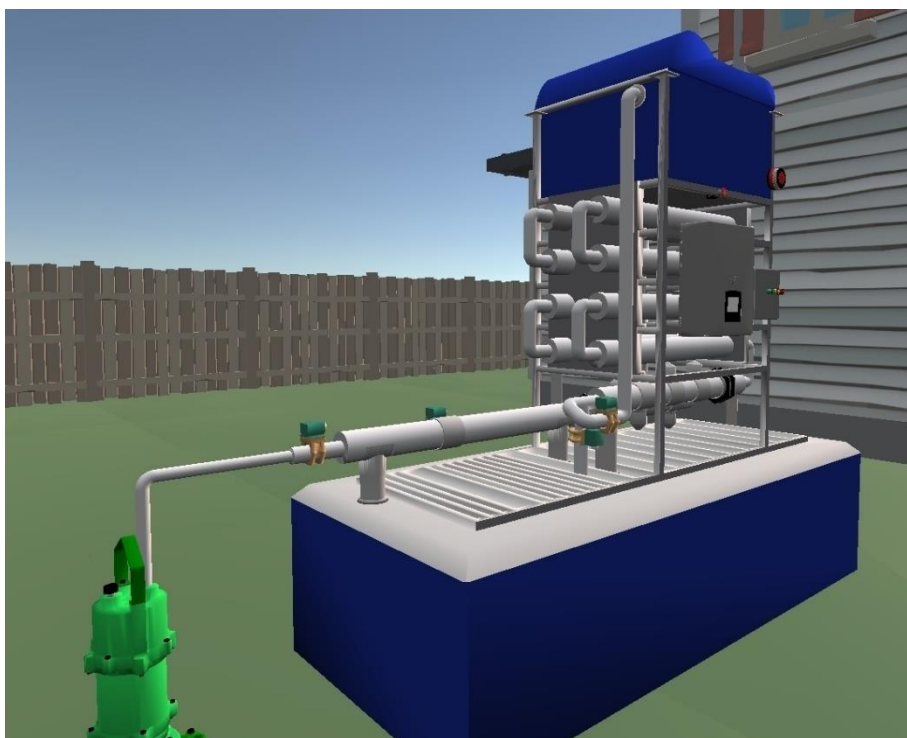


Figura 65. Ubicación a escala real de paneles principal y secundario.

En esta figura se puede apreciar la ubicación a escala real de los componentes, tomando como referencia el panel principal y secundario, la ubicación se adapta a la estatura de un trabajador mexicano de 18 a 65 años cuya altura es de 1.68 [m] [24] el paro de emergencia se encuentra a una distancia de 1.78 [m] que permite una ubicación óptima para el alcance máximo vertical el cual es de 2.04 [m] [24].

Por otro lado, en la figura 66 se puede observar la ubicación de la bomba sumergible y las electroválvulas, estos componentes se encuentran a una distancia de 51.5 [cm] lo cual permite un manejo adecuado del operario.



*Figura 66. Ubicación de bomba y electroválvula.*

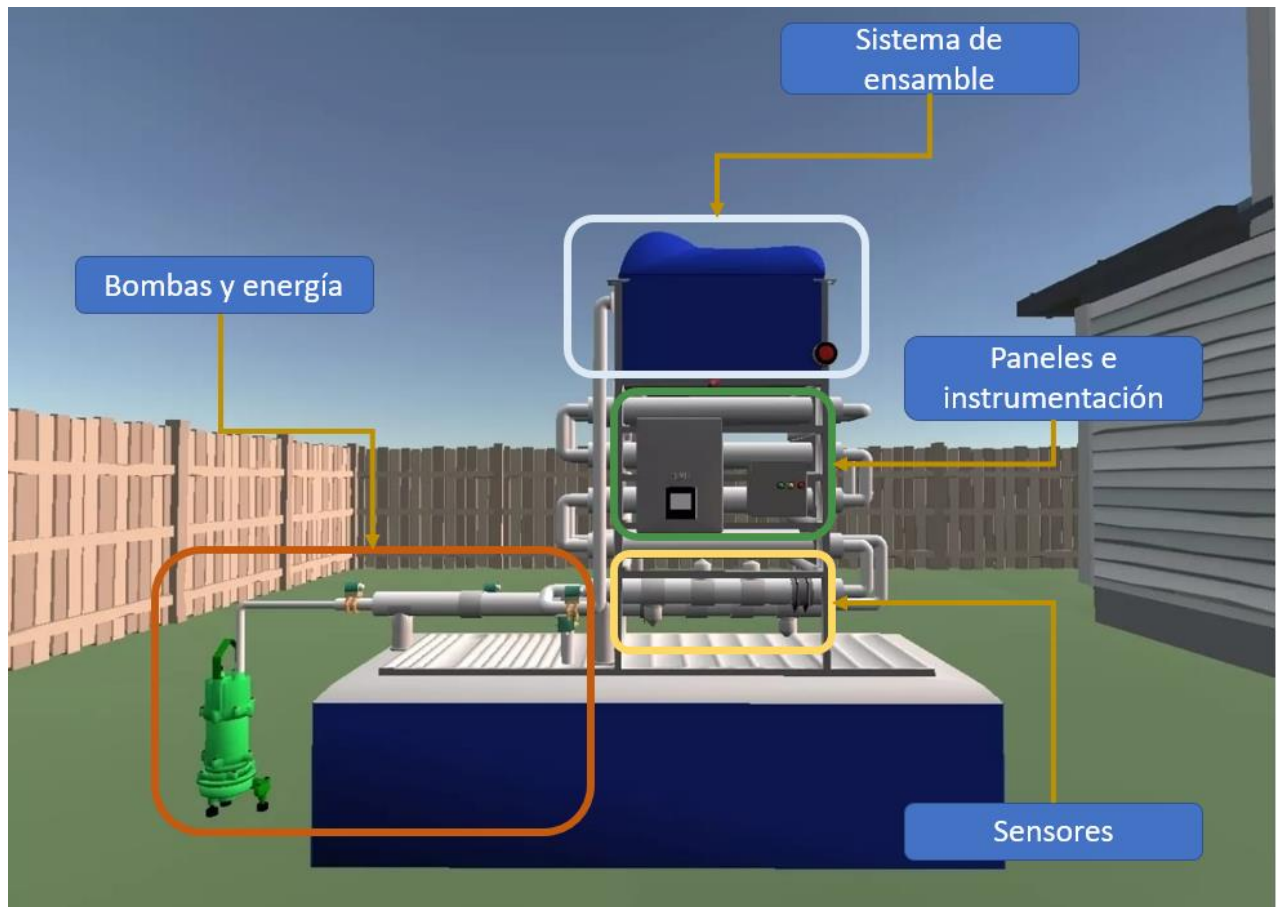


Figura 67. Ubicación de cada subsistema en el modelo virtual.

Finalmente, en la figura 67 se presenta la ubicación de cada subsistema en el modelo virtual, en la entrada del RBT, el subsistema de Bombas y Energía conformado por la bomba y las electroválvulas, seguido del sensado de las variables de estudio, estas variables se controlan por medio de la instrumentación que se localiza en el panel principal y se alimentan por medio del panel secundario, el subsistema de Ensamble proporcionando la estructura del RBT y almacenamiento del agua recirculada y tratada.

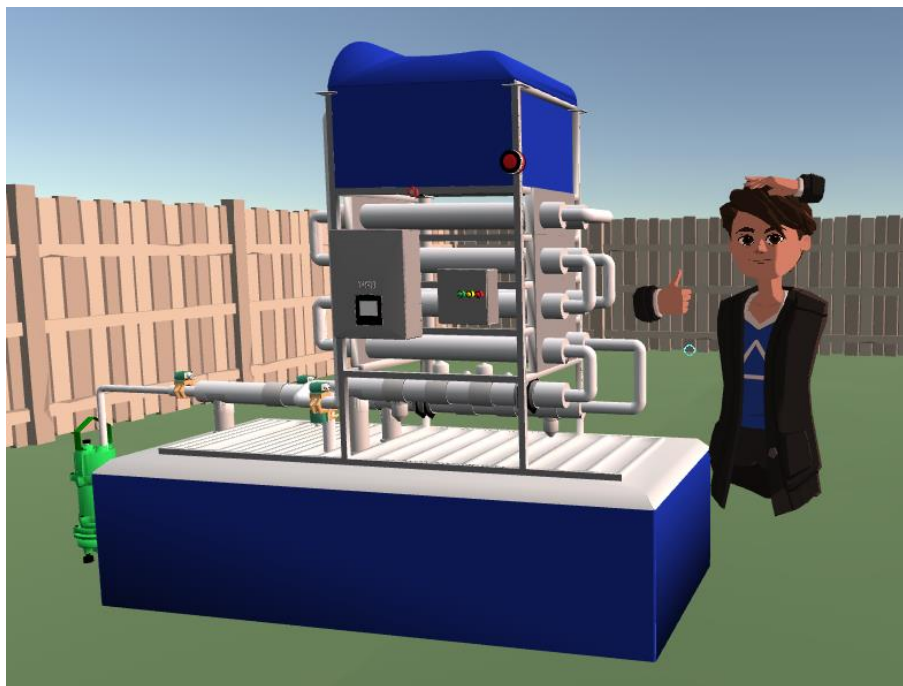
En este capítulo se concluye el proceso de diseño con la virtualización de los subsistemas que conforman al Reactor Biológico Tubular, lo cual permitió simular diferentes tipos de escenarios



acorde a las necesidades de los responsables del proyecto. En este trabajo, la virtualización nos permitió aumentar la frecuencia de pruebas para encontrar posibles errores en el ensamble, es decir, un modelo gemelo digital que replique los cambios que ocurren en el producto final.

## 7. Resultados

Los modelos presentados en el capítulo 6 permitieron comprobar que la selección de componentes a través del proceso de diseño fue la adecuada, esto debido a que el modelo virtual nos permitió examinar que no existían colisiones entre los subsistemas y elementos. De igual forma, se pudo comprobar que la configuración presentada en el subcapítulo 5.5 se adaptaba correctamente a las medidas antropométricas de un operario mexicano (figura 68)



*Figura 68. Medidas a escala real operario – RBT.*

Los modelos exportados a *AltspaceVR* permitieron visualizar el sistema RBT con las especificaciones principales de dimensionamiento y disposición, así como la distribución de los

elementos como si se tratase de un sistema físico. Simultáneamente, permitió compartir de forma versátil cada uno de los modelos virtuales entre diferentes grupos de estudio, los cuales pueden trabajar conjuntamente en el entorno virtual.

Como se explicó en las primeras líneas del capítulo 6, por la situación del covid-19 a nivel mundial, la manufactura y ensamble del RBT no pudo llevarse a cabo de forma física, los modelos virtuales facilitaron la interrelación entre el operario y el sistema con las especificaciones principales para su puesta en marcha.

Algunas limitantes dentro de la visualización detallada de cada componente en el mundo virtual fueron la complejidad de las superficies en los modelos CAD, esto se manifiesta en el formato STL utilizado para generar los archivos GLB. Cuando más detallado sea el archivo STL, más polígonos se generarán en la superficie del modelo, el número máximo de polígonos en AltSpaceVR para poder virtualizar sin problemas un modelo es de 100 000 [22] por lo que algunos componentes se simplificaron, reduciendo su nivel de detalle sin afectar las relaciones espaciales, un claro ejemplo fue la tarjeta de desarrollo tal y como se muestra en la figura 69.

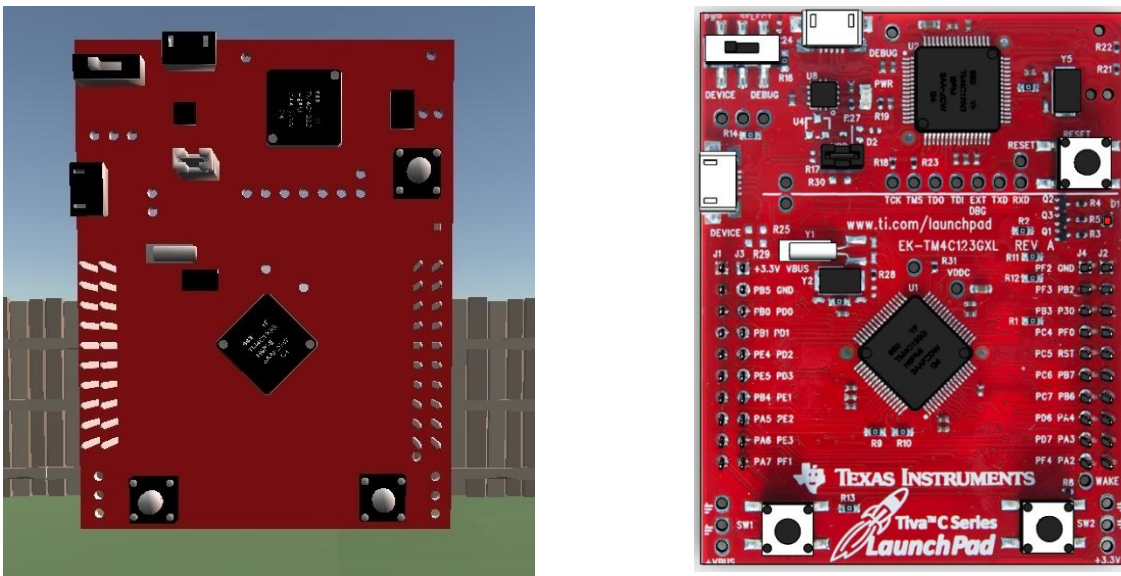


Figura 69. Modelo virtual generado vs modelo CAD.

La documentación generada por el proceso de diseño permite tener una configuración de la estructura general del RBT, componentes y piezas potenciales, modelos CAD y la virtualización del sistema, dando una oportunidad para la continuación y mejora del RBT cuando las condiciones sanitarias; así lo permitan.

## 8. Conclusiones

Con base en lo presentado en los capítulos anteriores, se puede concluir lo siguiente:

- En esta tesis se instrumentó una planta tubular para el tratamiento de aguas residuales y se desplegó la información de las variables de estudio en una interfaz adaptativa para el usuario. Considerando que las condiciones actuales de salud limitaron la manufactura del RBT y con ello el control del sistema presencial y remotamente, el presente trabajo genera la documentación y proceso de diseño para su puesta en marcha cuando las condiciones de salud sean las adecuadas.
- El método adaptativo de diseño seleccionado permitió, gracias a la serie de pasos seguidos, incrementar las funciones del proyecto base a cargo del Dr. Sergio Adrián García González con base en una serie de requerimientos y restricciones establecidos.
- La toma de decisiones llevada a cabo en el proceso de diseño y las consideraciones realizadas a lo largo de este, permitieron abordar el diseño de lo general a lo particular por medio de subsistemas, analizándolos independientemente y tomando como base las entradas, salidas y funciones realizadas; esto con la finalidad de validar el ensamble en un sistema general.
- Las especificaciones presentadas en el subcapítulo 2.2, permitieron asignar una unidad de medida a cada requerimiento, esto generó claridad al momento de seleccionar las piezas y componentes necesarios, así evitar fallas y colisiones en el ensamble virtual de cada subsistema y sistema general.

- La integración de un subsistema de interfaz permitió obtener información sobre el funcionamiento del RBT que antes no se tenía y esto contribuirá a la línea de investigación en la que se desarrolla el proyecto, permitiendo así, una mejora posterior del reactor.
- La exportación de los modelos CAD a la plataforma de trabajo colaborativo virtual *AltspaceVR* permitió, por un lado, modelar el sistema en un espacio tridimensional donde la existencia de avatares verificó el modelo a escala real y, por otro lado, revisar en conjunto el ensamble general, señalando, visualizando e interactuando con cada subsistema en sí como si se tratara de un sistema físico.

## 9. Trabajo a futuro

La metodología seguida en este trabajo genera la estructura base para desarrollar el Reactor Biológico Tubular de manera presencial en un espacio físico cuando las condiciones así lo permitan. Si bien, todo proyecto tiene mejoras en su desarrollo, este no es la excepción, por lo tanto, con un equipo multidisciplinario conformado por el área de la ingeniería, química y diseño, los subsistemas pueden evolucionar para impactar en un mejor funcionamiento.

El subsistema de Instrumentación seleccionó componentes acordes a las necesidades de los responsables del proyecto, pero también llevó consigo restricciones que podrían reducirse: sensores con una mayor precisión y exactitud que permitan reducir el muestreo de las variables; generando así, un menor consumo de energía al momento de retroalimentar el agua residual, una mayor agrupación de los componentes en placas de circuitos impresos, así como la implementación de nuevos componentes acorde a las tecnologías actuales.

El subsistema de Interfaz integró técnicas de desarrollo web para generar un diseño adaptativo para el usuario, no obstante, podría incorporar almacenamiento en la nube para reducir componentes físicos involucrados, así como limitar el acceso a los datos provenientes de las variables de estudio a ciertas credenciales autorizadas por los responsables del proyecto con el fin de evitar problemas en la administración de los datos.

La toma de decisiones por parte del subsistema de Bombas y Energía permitió seleccionar componentes funcionales, pero con un alto consumo de energía eléctrica, una problemática actual a nivel global. El uso de bombas sumergibles de bajo consumo como la bomba automática *Tsurumi Pump* serie U (apéndice III), la cual entrega a la salida una potencia de 0.25 [Kw], menos de la mitad que la bomba sumergible actual. De igual forma, así como componentes de regulación más eficientes al momento de distribuir la energía, aumentarían la eficiencia del RBT.

Finalmente, el subsistema de Ensamble desarrolló una estructura donde el resto de los subsistemas desarrollaron sus funciones, dándoles protección y una facilidad al momento de ensamblarlos, sin embargo, se integraron piezas de unión permanente algo que en un futuro el mantenimiento podría verse afectado. La selección de componentes de tornillería y conexiones con juntas y pernos, algo que en un futuro podría afectar al mantenimiento por la poca capacidad de sustituir esas piezas.

## 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] E. González Carmona and C. Torres Valladares, "La sustentabilidad agrícola de las chinampas en el valle de México: caso Xochimilco", *Revista Mexicana de Agronegocios*, pp. 707-708, 2014.
- [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*, 1er ed. Ciudad de México, 2017, pp. 23-64.
- [10] Meza González, Jorge. "Evaluación cualitativa de los contaminantes orgánicos en agua de los canales del área natural protegida de Xochimilco". (Tesis de Maestría). Universidad Nacional Autónoma de México, Coordinación General de Estudios de Posgrado, UNAM. Recuperado de <https://repositorio.unam.mx/contenidos/3479964>, 2019.

[11] California environmental protection agency, "The Clean Water Team Guidance Compendium for Watershed Monitoring and Assessment State Water Resources Control Board", Folleto informativo 3.1.4.0 2010.

[12] California environmental protection agency, "The Clean Water Team Guidance Compendium for Watershed Monitoring and Assessment State Water Resources Control Board", Folleto informativo 3.1.1.0 2010.

[13] California environmental protection agency, "The Clean Water Team Guidance Compendium for Watershed Monitoring and Assessment State Water Resources Control Board", Folleto informativo 3.1.1.0 2010.

[14] "Velocidades de Transmisión Serial (Baud Rate) Soportadas por NI-VISA", *National Instruments Corp*, 2020. [Online]. Disponible: <https://www.ni.com/es-mx/support/documentation/supplemental/18/serial-baud-rates-supported-by-ni-visa.html>. [Acceso: 01- Dic- 2020].

[15] "Servicios de internet en México", *Whistle Out MX*, 2021. [Online]. Disponible: <https://www.whistleout.com.mx/CellPhones/Guides/servicios-de-internet>. [Acceso: 01- Dic- 2020].

[16] Secretaria de Gobernación, "NORMA Oficial Mexicana NOM-025-STPS-2008, Condiciones de iluminación en los centros de trabajo", Ciudad de México, 2008.

[17] J. Bernal, "Diseño conceptual de productos asistido por ordenador: Un estudio analítico sobre aplicaciones y definición de la estructura básica de un nuevo programa", Doctorado, Universidad Politécnica de Cataluña, 2004.

[18] W. Bolton, *Mecatrónica. Sistemas de control electrónico en la Ingeniería Mecánica y Eléctrica*, 5th ed. México: Alfaomega, 2013.

[19] D. Ullman, *The mechanical design process*, 4th ed. United States: Mc Graw-Hill, 2003.

[20] K. Ulrich and S. Eppinger, *Diseño y Desarrollo de Productos*, 5th ed. Ciudad de México: McGrawHill, 2013.

- [21] G. Dieter and L. Schmidt, *Engineering Design*, 4th ed. New York: McGraw-Hill, 2009.
- [22] "Importing glTF models", *Microsoft*, 2021. [Online]. Disponible: <https://docs.microsoft.com/en-us/windows/mixed-reality/altspace-vr/world-building/importing-models>. [Acceso: 11- Mar- 2021].
- [23] "User manual. Ingress Protection", *MANUALZZ*, 2021. [Online]. Disponible: <https://manualzz.com/doc/37302105/ingress-protection>. [Acceso: 11- May- 2021].
- [24] R. Ávila Chaurand, L. Prado León and E. González Muñoz, *Dimensiones antropométricas de población latinoamericana*, 2nd ed. Guadalajara México: Universidad de Guadalajara, 2007, pp. 84-111.
- [25] Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, "Desarrollo de rutas de instrumentación de las contribuciones nacionalmente determinadas en materia de mitigación de gases y compuestos de efecto invernadero (GyCEI) del sector de aguas residuales de México", Ciudad de México, 2018.
- [26] R. A. Dean, L. S. Maglione, y F. O. Cappellari, Análisis de función y matriz morfológica aplicado al diseño de un implemento agrícola, *AS*, vol. 11, n.º 1, pp. pág. 11-20, jul. 2018.
- [27] "3M Scotch-Weld Adhesivo Époxico DP100, Transparente, 48.5 mL Paquete Dual, 12/caja". 3M Ciencia. Aplicada a la vida. 2021. [Online]. Disponible: [https://www.3m.com.mx/3M/es\\_MX/p/d/v100010713/](https://www.3m.com.mx/3M/es_MX/p/d/v100010713/). [Acceso: 04- Jul-2021].
- [28] "FOSET Conexiones de PVC y cementos (pegamentos)". FOSET Catálogo 2021. [Online]. Disponible: <https://www.truper.com/CatVigente/Conexiones-De-PVC-Y-Cementos-pegamentos-FOSET-SANIFLOW-507.html>. [Acceso: 04- Jul-2021].





## Apéndices

### Apéndice I

Especificaciones de la tarjeta de desarrollo TIVA TM4C1294NCPDT	
Parámetro	Valor
Voltaje de suministro a la placa	4.75 [ $V_{DC}$ ] a 5.25 [ $V_{DC}$ ]
Dimensiones	12.45 [cm] x 5.29 [cm] x 10.8 [mm] (Largo x ancho x alto)
CPU	ARM Cortex-M4 de 120 bits y 32 bits
Memoria	Flash de 1 MB, SRAM de 256 KB, EEPROM de 6 KB
LEDs	4 leds de usuario
Convertidores analógico digital (ADC)	ADC dobles de 12 bits y 2 MSPS, PWM de control de movimiento
Conectores	Sitios de conexiones duales macho y apilables Boosterpack XL
Conector USB	Conector USB 2.0 Micro A / B
Programación y depuración	Incluye energía como IDE basada en Processing. Interfaz de depuración en circuito integrada (ICDI)
Interruptores	1 interruptor de activación de hibernación independiente y 1 de reinicio del microcontrolador independiente.
Puerto ethernet	Conectividad Ethernet con MAC 10/100 Ethernet totalmente integrado

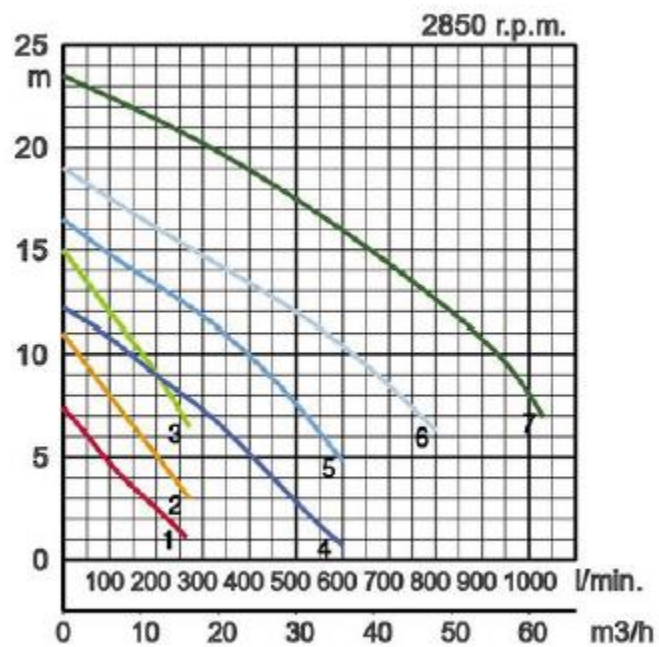
## Apéndice II

Sondas sustituibles para el sensor analógico de pH V2		
Sonda	Características principales	Imagen
E-201 / E-201-C	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bloques de terminales BNC plug</li> <li>• Temperatura de funcionamiento de 5-60 °C</li> <li>• Cable de 1 metro</li> <li>• Porcentaje teórico de pendiente de 97%</li> </ul>	
E-900 / E-900-1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bloques de terminales BNC plug</li> <li>• Temperatura de funcionamiento de 0-80 °C</li> <li>• Cable de 80 centímetros</li> <li>• Porcentaje teórico de pendiente de 85%</li> </ul>	

## Apéndice III

Bomba para agua residual <i>Tsurumi Pump</i> serie U	
Parámetro	Valor
Tipo de impulsor	Vortex. Utilizado para evitar bloqueos debidos a los grandes materiales fibrosos presentes en el vertido
Potencia de salida	0.25 [Kw]
RPM	2850 r.p.m
Fases	3
Máx. Caudal L/min	264

<b>Peso en seco</b>	14.5 [Kg]
<b>Sellado</b>	Doble junta mecánica
<b>Temperatura</b>	0 – 40 [°C]
<b>Protección</b>	Protector térmico en el motor IP68, protección total a polvo y sumergible en agua
<b>Altura a caudal</b>	7.4 [m]. Ver curva de color rojo en la gráfica 1



Grafica 1. Curva L/min vs altura a caudal modelos serie U.