



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO  
EN INGENIERÍA

SISTEMA DE PURIFICACIÓN DE AGUA  
PARA REFRIGERADORES

TESIS  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:  
JULIO CESAR HUATO SOLORIO

TUTOR  
DR. VICENTE BORJA RAMÍREZ

UNIDAD DE ALTA TECNOLOGÍA  
JURIQUILLA, QUERETARO  
AGOSTO 2020



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

# AGRADECIMIENTOS

Hace dos años me aventuré a irme a Querétaro a estudiar un posgrado y colaborar con una compañía, nada de esto hubiera sido posible sin el apoyo de mi familia y amigos. Infinitas gracias

Primeramente, debo agradecer la confianza depositada en mi por el Dr. Alejandro Ramírez Reivich y el Dr. Marcelo López Parra quienes me vincularon con la compañía y el proyecto, además de asesorarme y brindarme apoyo.

A mi tutor el Dr. Vicente Borja Ramírez, quien me enseñó la metodología de diseño centrado en el usuario y me ha dado la oportunidad de proponer, diseñar y concebir nuevos productos. Gracias por la atención y dirección de este trabajo escrito.

A César Gutiérrez, mi líder de diseño en mabe, por la disposición a trabajar en conjunto, siempre escuchando, proponiendo y mejorando el proyecto. Gracias por la experiencia que he ganado trabajando contigo.

A Hasan Torres, quien siempre estuvo al pendiente de mis avances y me ayudó en incontables ocasiones en el desarrollo técnico del proyecto. Gracias por tu optimismo y convivencia.

A Orlando Esquivel, quien me permitió trabajar con su proyecto y darle mi propia perspectiva.

A mis compañeros, Angélica Gudiño, Alejandro Robles, Ana Laura Meléndez y Fernanda Santiago por sus contribuciones con el proyecto.

Al comité e ingenieros globales que me dejaron tomar capacitaciones, realizar tareas y proyectos en conjunto.

A Osiris Ricardo, por las asesorías y manejo de la colaboración.

En lo que respecta al diseño editorial de este trabajo, mi agradecimiento por las asesorías, ayudas y comentarios de Fer Santiago y Lorena Mejía.

Finalmente, gracias por el apoyo del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) a través del Programa Nacional de Posgrados de Calidad.

# CONTENIDO

Agradecimientos .....	2
Resumen.....	6
Introducción.....	7

## Antecedentes

1.1 Proyecto UNAM- mabe .....	10
1.2 Colaborador .....	11

## Definición del problema

2.1 Objetivo .....	14
2.2 Alcances .....	14
2.3 Proceso de diseño .....	15
2.4 Equipo y forma de trabajo .....	17

## Primera etapa del proyecto

3.1 Reto de diseño .....	19
3.2 Información de contexto .....	20
3.2.1 México, principal consumidor de agua .....	20
3.2.2 Patrones de consumo de agua en México .....	21
3.2.3 Consumo de agua embotellada en México .....	24
3.3 Competencias .....	26
3.3.1 Purificadoras .....	26
3.3.2 Sistemas de purificación domésticos .....	28
3.3.3 Refrigeradores .....	29
3.4 NOM-127-SSA1-1994 .....	32
3.4.1 Características microbiológicas .....	32
3.4.2 Características físicas y organolépticas .....	33
3.4.2 Características químicas .....	35
3.5 Tratamientos de purificación .....	36
3.6 Identificación de las necesidades.....	43
3.7 Especificaciones meta .....	43

## Segunda Etapa del proyecto

4.1 Actualización del reto.....	45
4.2 Selección del método de purificación.....	46
4.3 Elementos de purificación.....	49
4.3.1 Sistemas de generación de ozono .....	49
4.3.2 Preparación del gas de alimentación .....	50

4.3.3 Dosificación .....	50
4.3.4 Regulaciones en EE.UU.....	51
4.3.5 Medición y monitoreo de ozono en agua .....	51
4.3.6 Intercambio iónico - factores de influencia.....	55
4.3.7 Regeneración de la resina y consideraciones del proceso.....	56
4.3.8 Sólidos disueltos totales (TDS).....	56
4.4 Diseño conceptual .....	58
4.5 Prototipos .....	62
<b>Tercera etapa del proyecto</b>	
5.1 Evaluación de la desinfección .....	71
5.1.1 Proceso .....	71
5.1.2 Resultados.....	74
5.2 Diseño a detalle .....	78
5.2.1 Inyector venturi.....	78
5.2.2 Sensor de nivel de agua.....	80
5.2.3 Modelado CAD .....	82
5.2.4 Tarjeta de control .....	85
5.3 Fabricación del prototipo final.....	88
<b>Cuarta etapa del proyecto</b>	
6.1 Experiencia de usuario.....	92
6.1.1 Mapa de viaje de usuario .....	93
6.2 Interfaz de usuario .....	99
6.2.1 Concepto final .....	99
6.2.2 Prototipo.....	100
6.2.3 Experiencia final de usuario.....	102
Conclusiones .....	107
Trabajo a futuro.....	108
Referencias .....	109

# RESUMEN

Actualmente, México es uno de los principales consumidores de agua embotellada en el mundo. Tan solo en 2017, el 76% de los hogares mexicanos compró agua a los principales distribuidores de bebidas azucaradas del país o bien a las pequeñas purificadoras locales que se encuentran a lo largo del territorio mexicano.

La principal causa del alto consumo de agua embotellada en este país, es la falta de confianza en el agua de la red de distribución pública. Dos principales motivaciones de esto son, las supuestas enfermedades que pueden ser contraídas al beber agua de la llave o simplemente porque el sabor, olor y/o color no son de su agrado.

En este sentido y como parte de la búsqueda de alternativas para proveer agua pura, fresca y saludable como una oportunidad de negocio, se realizó una colaboración con una compañía dedicada al diseño, fabricación y venta de aparatos electrodomésticos con el propósito de diseñar un sistema de purificación de agua para ser integrado en el refrigerador.

A lo largo de este proyecto, se puede apreciar las distintas etapas en el desarrollo de un producto, desde la definición del reto de diseño hasta la creación de la experiencia final del producto con el usuario. Siendo esencial el diseño y la fabricación de prototipos para la validación de conceptos y funciones basados en investigación tecnológica y de innovación.

# INTRODUCCIÓN

El diseño y desarrollo de nuevos productos es un proceso largo que inicia frecuentemente con la búsqueda de nuevas oportunidades de negocio, mercados emergentes y nuevas tecnologías que beneficien a fabricantes y usuarios.

En este sentido, algunas empresas destinan recursos para investigación y vinculación con universidades. Tal es el caso de Mabe Tecnología y Proyectos que durante varios años ha colaborado con un grupo de profesores del Centro de Diseño e Innovación Tecnológica (CDMIT) de la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

La metodología utilizada para el desarrollo de los distintos trabajos de colaboración, ha sido principalmente el diseño centrado en el usuario que tiene como objetivo la creación de productos que resuelvan necesidades concretas de usuarios finales. Para el caso particular de este proyecto se abordará el tema de purificación de agua con una propuesta de solución para el refrigerador.

Este trabajo de investigación está organizado en 6 capítulos. El primero explica los antecedentes del proyecto, como lo son, la colaboración entre la iniciativa privada y el equipo de diseño de la facultad de ingeniería, así como información relacionada con el colaborador.

En el segundo capítulo se detallan los objetivos y alcances del proyecto, de igual manera se desarrolla el proceso de diseño a seguir,



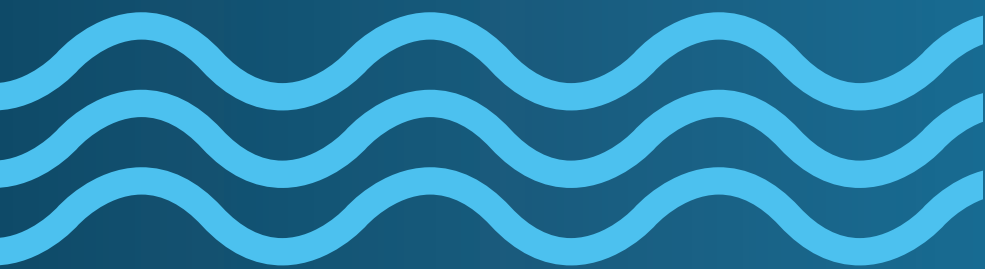
se presenta al equipo y forma de trabajo.

El tercer capítulo está relacionado con la información de contexto, el estado del arte, los tratamientos y normas para la purificación de agua en México, concluyendo con las primeras necesidades y especificaciones del usuario y el colaborador.

El cuarto capítulo aborda la selección de las tecnologías a utilizar, se generan conceptos de solución y se empiezan a construir los primeros prototipos para validar ideas y métodos de purificación.

Para el quinto de capítulo, ya se tiene un concepto de solución final y las tecnologías para la purificación de agua, por lo que se desarrolla la técnica para la evaluación de la desinfección. También, se describe el diseño a detalle del producto y se fabrica el prototipo final.

Finalmente, el sexto capítulo describe el diseño de la experiencia de usuario a través de la interacción del producto, por medio de la interfaz propuesta y fabricada.



# 1

# CAPÍTULO

Antecedentes

# 1.1 PROYECTO UNAM - MABE

El proyecto reportado en este trabajo de investigación es una colaboración entre profesores del Centro de Diseño Mecánico e Innovación Tecnológica de la UNAM e ingenieros de diseño de Mabe Tecnología y Proyectos. Desde hace varios se han realizado proyectos relacionados con cuidado de la ropa, cocinado y refrigeración que son las líneas principales de productos que Mabe diseña, fabrica y vende.

Actualmente, la compañía está buscando nuevas oportunidades de negocio, identificando necesidades del mercado y generando soluciones innovadoras mediante productos o servicios. La purificación de agua es uno de los nuevos negocios que se encuentra en fase de exploración, debido a que México es uno de los principales consumidores de agua embotellada en el mundo. Es por ello que la realización de este proyecto está vinculada con este tema.



Figura 1 - Equipo de diseño mabe - UNAM


## 1.2 COLABORADOR



Figura 2 - Mabe tecnología y proyectos, Qro. [1]

Mabe, es una empresa dedicada al diseño, fabricación, distribución y venta de aparatos electrodomésticos, nació en 1946 con un pequeño taller en la Ciudad de México en donde se fabricaban bases para lámparas e importaban artículos varios. En 1948, los fundadores comenzaron a producir gabinetes y muebles para cocina. Más tarde en 1968, Mabe comenzó a tener presencia en Centro y Sudamérica; en 1976, inició la construcción de su primera planta fuera de la ciudad de México.

Esta planta aún se encuentra ubicada en la ciudad de Querétaro, México. Años más tarde, en 1987, Mabe estableció una alianza internacional con General Electric (GE) *Appliances*, que ahora forma parte de Haier la empresa china más grande de electrodoméstico en el mundo.



En cuanto al desarrollo de tecnología, Mabe desde 1990 invirtió para establecer un Centro de Tecnología y Desarrollo de Proyectos (actualmente Mabe tecnología y proyectos (TyP)), desde entonces una parte de sus ingresos están dedicados a soportar este rubro.

Con ello, Mabe ha podido mejorar sus productos y la tecnología asociada a la conceptualización, diseño e implantación de nuevos productos. El avance tecnológico le ha permitido a Mabe mantener su participación de mercado y competir contra las nuevas marcas que están entrando al mercado [2].

El equipo de Mabe tecnología y proyectos con el que se trabajó pertenece al equipo NTI (New Technology Introduction) de refrigeración integrado por ingenieros de diseño senior, junior y practicantes.

Los proyectos NTI tienen como finalidad encontrar nuevos atributos que cumplan con la deseabilidad, factibilidad técnica y viabilidad económica para que puedan ser integrados a la línea de productos de Mabe. Este tipo de proyectos se dan en un marco de investigación, experimentación e innovación de productos.



# 2

# CAPÍTULO

Definición del problema



## 2.1 OBJETIVO

El objetivo de este trabajo de tesis es presentar el concepto de un sistema de purificación de agua para ser implementado en la puerta de un refrigerador.

## 2.2 ALCANCES

Los alcances para este trabajo de tesis son:


- Propuesta de diseño conceptual.
- Modelo de apariencia del concepto final.
- Prototipo funcional para validación con usuarios.

## 2.3 PROCESO DE DISEÑO



Figura 3 – Metodología de diseño





El desarrollo de este trabajo de tesis tiene como fundamento el diseño centrado en el usuario (DCU), metodología de diseño que tiene por objetivo la creación de productos que resuelvan necesidades concretas de sus usuarios finales, consiguiendo la mayor satisfacción y mejor experiencia de uso posible con el mínimo esfuerzo de su parte [3].

Las etapas que constituyen al método se presentan a continuación:

**Definir:** es la primera etapa de diseño, y en ella se establece el reto, la problemática, el objetivo, los alcances y dependiendo de la iteración se pueden refinar o redefinir conceptos de solución.

**Conocer:** en esta etapa se obtiene información de los usuarios en su contexto, se realiza investigación relacionada con el reto, aspectos sociales, culturales, normativos, económicos, así como tecnológicos. Se analiza el estado del arte, se investiga sobre el mercado, la competencias, productos análogos y patentes.

**Generar:** es la etapa creativa donde se desarrollan la mayor cantidad de ideas posibles con la finalidad de conocer aspectos que se consideren importantes para el desarrollo del producto.

**Probar:** es la etapa donde se validan la mayor cantidad de ideas generadas a través del uso de simuladores o prototipos, aquí se evalúan conceptos y se validan soluciones.

**Aprender:** en esta etapa se obtienen y analizan los hallazgos más significativos de las pruebas y los comentarios de colaboradores y equipos externos que puede refinar, mejorar o definir el concepto final del producto o servicio.

## 2.4 EQUIPO Y FORMA DE TRABAJO



Figura 4 – Equipo de diseño Mabe

El proyecto del sistema de purificación de agua para refrigeradores estuvo a mi cargo dentro de Mabe. Las revisiones de avances se realizaban semanalmente con César Gutiérrez como líder del área de nuevas tecnologías de refrigeración. Hasan Torres y Orlando Esquivel me apoyaron con las revisiones técnicas y de ingeniera.

Paralelamente, se trabajó en distintas etapas con los compañeros Angélica Gudiño como ayudante del proyecto, así como Alejandro Robles y Ana Laura Meléndez en las pruebas de factibilidad de la tecnología. Finalmente, trabajé con Fernanda Santiago del área de diseño industrial, diseñando la interfaz y experiencia de usuario del producto.

Mensualmente, se presentaban los avances del proyecto al Comité Directivo de Mabe TyP y se programaron entregables semestrales con los profesores Vicente Borja y Alejandro Ramírez quienes compartían su retroalimentación en el desarrollo del producto.



# 3

# CAPÍTULO

Primera etapa del proyecto



## 3.1 RETO DE DISEÑO

El agua es esencial para la vida, es un recurso natural indispensable, y su calidad puede verse comprometida por la presencia de agentes infecciosos, productos químicos tóxicos y partículas nocivas para la salud.

Fue a principios de los años 90 cuando una epidemia de cólera afectó a la mitad del país. Las autoridades sanitarias anunciaron que el consumo de agua de la llave era una de las principales causas de la enfermedad [3].

Actualmente, México es uno de los principales consumidores de agua embotellada en el mundo. Tan solo en 2017, el 76% de los hogares mexicanos compró agua y se destinaron 52 pesos de su gasto semanal [4].

Por otro lado, se estima que diariamente el consumo de agua embotellada genera 21 millones de botellas de plástico que son tiradas a la basura, de las cuales solo el 20% se reciclan [5].

Teniendo conocimiento de lo anterior ¿Cuáles podrían ser alternativas de solución para la problemática de purificación de agua?



## 3.2 INFORMACIÓN DE CONTEXTO

A continuación, se presenta información relacionada con el contexto del agua purificada en México con el propósito de entender la problemática, generar conocimiento y buscar oportunidades de innovación o mejora en los productos o servicios existentes.

### 3.2.1

#### México, uno de los principales consumidores de agua embotellada en el mundo

México es el tercer país en el mundo que consume más agua embotellada según el último reporte de la *International Bottled Water Association*. En las dos primeras posiciones están China con 96,410.2 millones de litros y Estados Unidos con 51,899.8 millones de litros. Véase figura 5.

#### TOP 10 PAÍSES LÍDERES EN CONSUMO DE AGUA EMBOTELLADA 2012 - 2017

#	País	2012	2017
1	China	55,190	86,410
2	EE. UU.	36,761	51,899
3	México	28,452	32,869
4	Indonesia	18,799	30,882
5	Brasil	17,457	21,934

El volumen está en millones de litros anuales

Figura 5 – Principales países consumidores de agua embotellada [5]

Sin embargo, los mexicanos tienen la primera posición en consumo por persona al año con 254.3 litros, le sigue Tailandia con 217.6 litros e Italia con 182.4 litros [5].

Históricamente son dos hechos que llevaron a la población mexicana a consumir más agua embotellada: la primera fue el terremoto de 1985 en la ciudad de México, que dejó en mal estado las tuberías del suministro de agua potable y la segunda fue una epidemia de cólera en 1991 cuando el gobierno mexicano adjudicó dicha enfermedad al agua suministrada en la red de distribución pública.

## 3.2.2

### Patrones de consumo de agua en México

Los resultados del módulo de hogares y medio ambiente que proporciona el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) provee información sobre los patrones de consumo de agua en México.

El porcentaje de hogares que compran agua de garrafón o botella para beber aumentó poco más de 5 puntos porcentuales en los últimos años, al pasar de 70.8% en 2015 a 76.3% en 2017 [6].

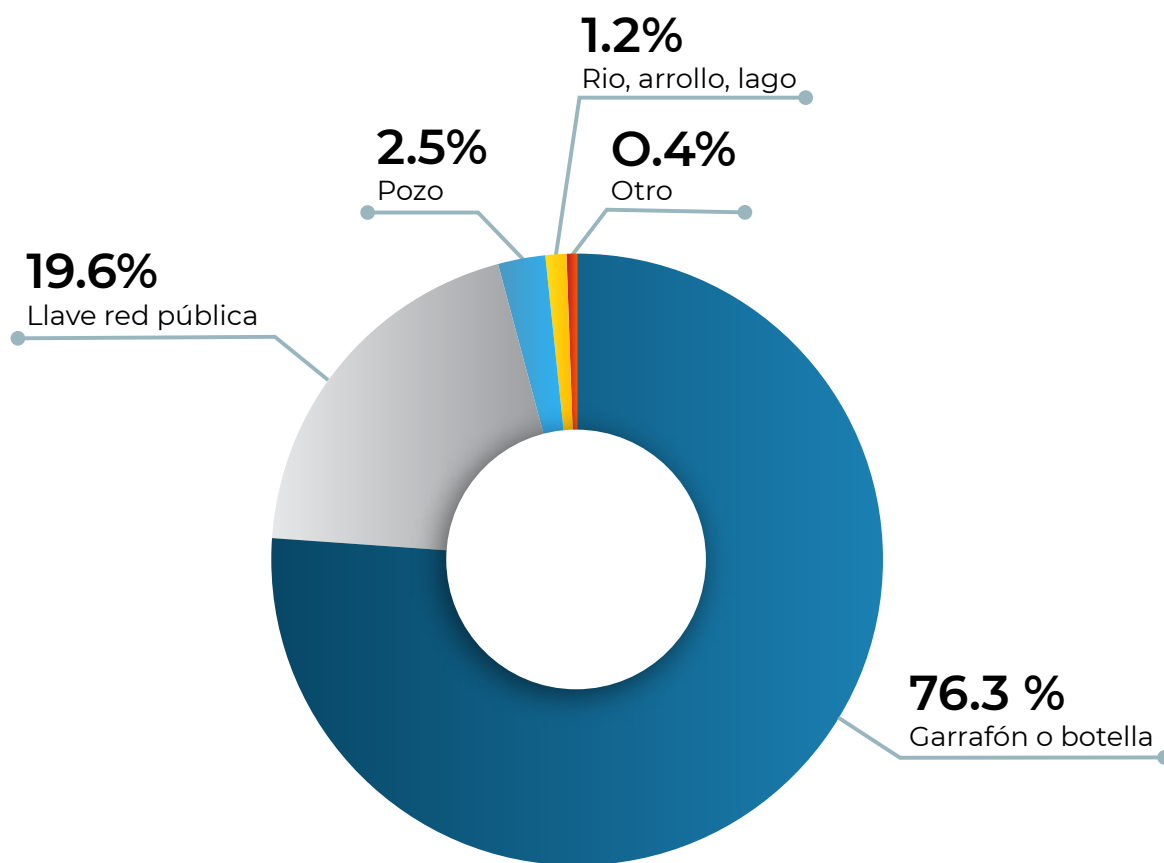


Figura 6 – Fuentes de abastecimiento de agua para beber [6]

Contra lo que pudiera pensarse, el consumo de agua embotellada no es sólo un fenómeno urbano, sino que también ha ido ganando presencia en el ámbito rural, donde, en 2017, alcanzó a casi la mitad de los hogares.

Respecto de las motivaciones que la gente tiene para optar por beber agua embotellada, las de mayor frecuencia guardan relación con aspectos de salud (69.4%) y de sabor o color del agua de la red pública (19.6%), veáse Figura 7.

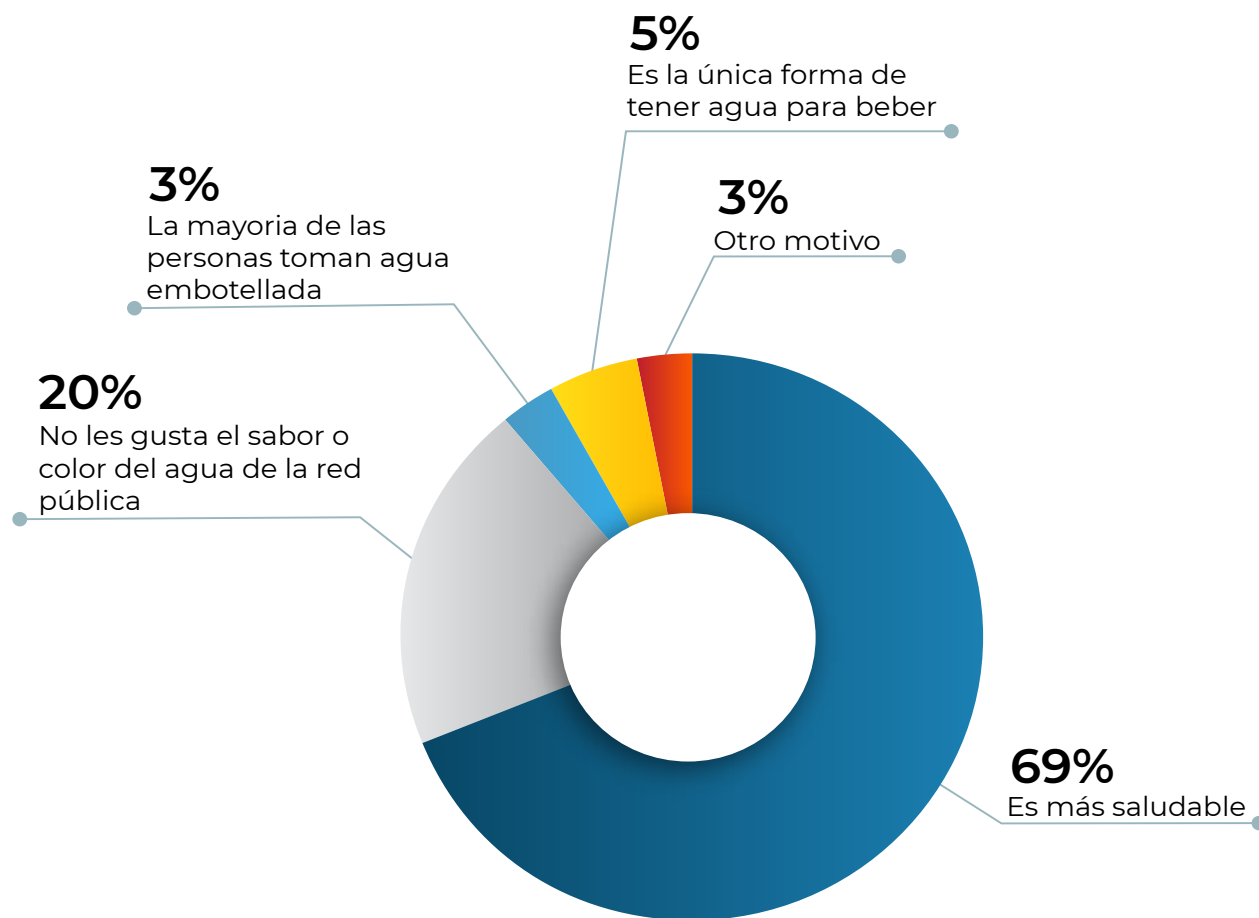


Figura 7 – Motivos para beber agua embotellada 2017 [6]

Los hogares destinaron durante 2017 un promedio de 52 pesos de su gasto semanal a la compra de agua embotellada; mientras que, de acuerdo a la información proporcionada por el INEGI [28], el gasto en agua de la red pública fue de poco menos de 41 pesos en promedio a la semana.

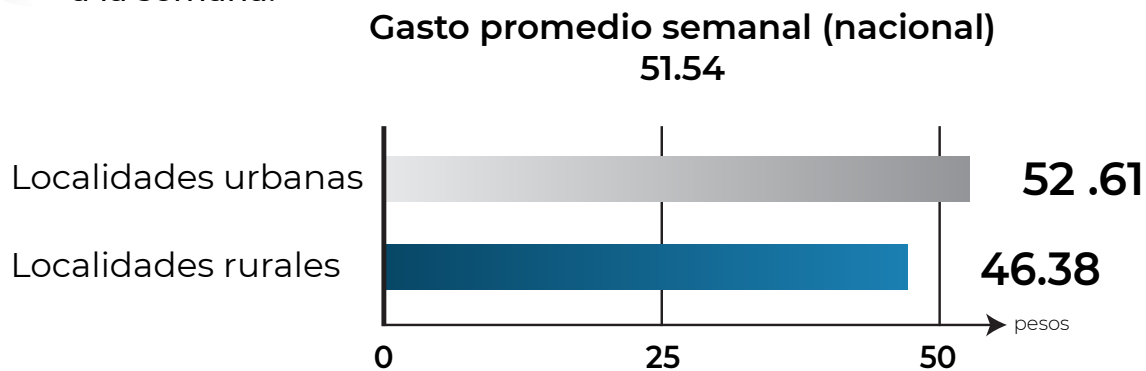


Figura 8 – Gasto promedio semanal en agua embotellada [28]

En el 36.7% de los 2 millones 114 mil hogares que informaron no tener acceso al servicio de agua de red pública se recurrió al acarreo para cubrir necesidades de este líquido. En términos del uso del tiempo, esta actividad impacta de manera diferenciada a hombres y mujeres, ya que estas últimas le dedican un mayor número de horas (8.2 contra 4.9 horas) [6].

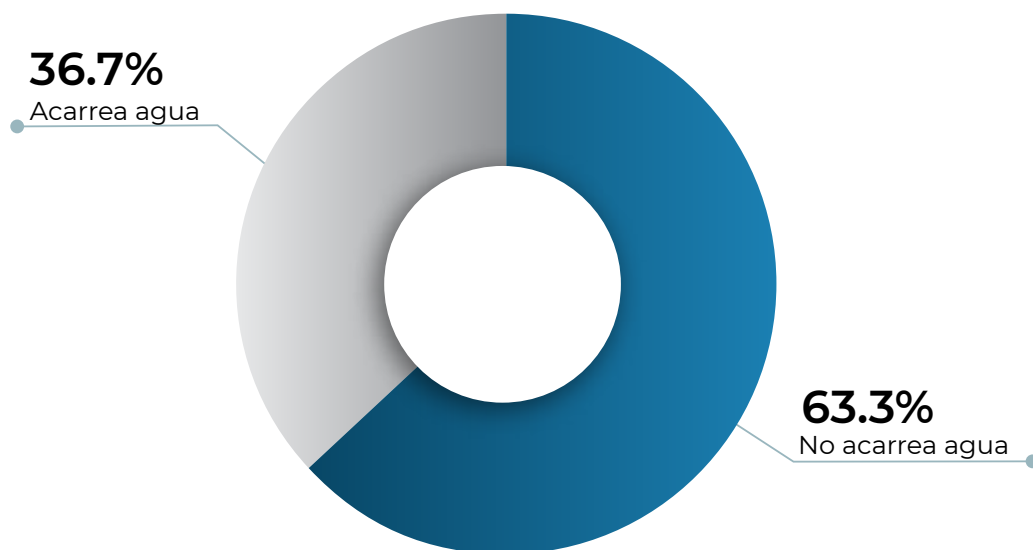


Figura 9 – Hogares sin servicio a la red pública de distribución 2017 [28]



## Panorama competitivo

Los fabricantes internacionales representaron el 85% del volumen de ventas durante 2014

<b>Compañía</b>	<b>Marca</b>	<b>Volumen de ventas</b>
Danone de México SA de CV	Bonafont	31%
Coca-Cola de México SA de CV	Ciel	25%
Pepsi-Cola Mexicana	Epura	16%
Grupo Modelo SA de CV	Nestle	13%

Las presentaciones de 500 ml, 1 Lt, y 20 Lt representan el 90% de las ventas total.

Figura 12 - Panorama competitivo [7]



## 3.3 COMPETENCIAS

Como se mencionó en la sección anterior un gran porcentaje de las ventas totales de agua embotellada la tienen compañías internacionales a través de sus distintas presentaciones de botellas de agua.

Otros productos de la competencia son el agua embotellada proveniente de las “purificadoras”, los sistemas de purificación doméstico y los filtros que tienen algunos refrigeradores. En esta sección se abordará cada una de las competencias.

### 3.3.1

#### Purificadoras

Las purificadoras son pequeños negocios que se dedican a la desinfección, embotellamiento y distribución de agua en garrafones de 20 litros, operan de forma local y su precio oscila entre los 7 y 15 pesos. Su aparición es resultado de la creencia sobre la mala calidad del agua potable y su nicho de mercado son los hogares de bajos ingresos en México que no tienen dinero suficiente para comprar garrafones de marca [29].

Todas las purificadoras por norma exhiben un documento que avala la calidad del agua que venden; sin embargo, en muchos casos el documento no es real o no está actualizado. Lo que supone un desconocimiento de la calidad de agua que proporcionan al público



Figura 13 – Purificadoras de agua locales [8]

De acuerdo con datos del INEGI del 2014, a nivel nacional estaban registradas un total de 10,049 purificadoras, a pesar de ello algunas otras no cuentan con el registro o son clandestinas. Se estima que las purificadoras abastecen el 52% del mercado nacional [9].

Las purificadoras permitieron que el consumo de agua embotellada fuera incluyente, ya que sus precios eran y siguen siendo mucho más bajos respecto a las transnacionales. Las purificadoras se abastecen de agua de la red pública o de pipas para llenar sus depósitos, operan con sistemas de purificación sencillos y tienen pocos controles por parte de las Secretarías de Salud y de Hacienda.

Lo que explica su bajo precio es que muchas purificadoras no dan mantenimiento a sus equipos, tienen poco personal y distribuyen a hogares cercanos al negocio; muchas operan de manera clandestina, por lo que hay ahorro en permisos y pago de impuestos. No tienen costos en publicidad, ya que en su mayoría solo utilizan propaganda fuera del negocio para que los consumidores las identifiquen [10].

## 3.3.2

### Sistemas de purificación domésticos

Los sistemas de purificación domésticos o residenciales son equipos con una o varias etapas de purificación principalmente filtros. La mayoría están diseñados para ser colocados debajo de las tarjas con la finalidad de utilizar las llaves del agua o conectarlos directamente a los dispensadores.

#### Etapas de purificación

Filtro de polipropileno
Filtro de carbón activado granular
Filtro de carbón activado en bloque
Membrana de ultrafiltración
Membrana de osmosis inversa
Lámpara ultravioleta

Los sistemas de purificación doméstica combinan alguna de estas etapas dependiendo la pureza del agua a suministrar.

Figura 14a - Etapas de purificación.

Los precios oscilan entre los 800 y 16,000 pesos dependiendo del nivel de pureza que se requiera.

La principal desventaja de estos dispositivos es que se tiene que cambiar los filtros cada determinado tiempo y se debe tener una presión mínima de agua para el funcionamiento. Además, dependiendo de la configuración serán los litros de agua suministrados. En la siguiente figura se presentan estos equipos.



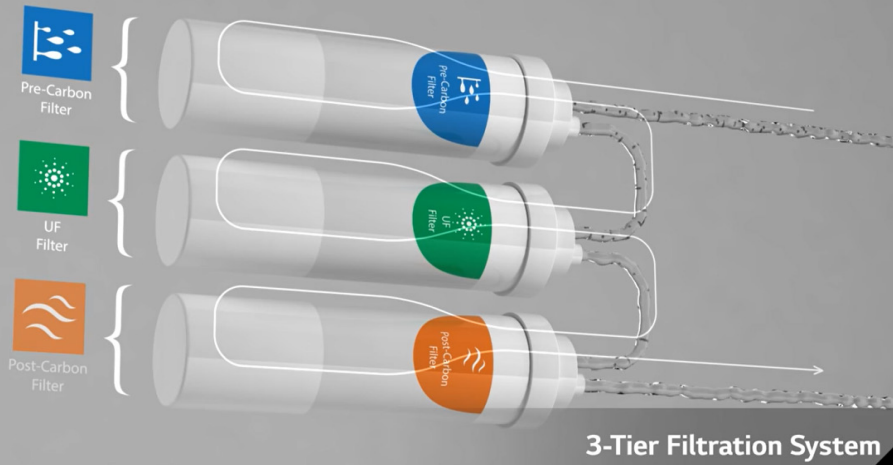
Figura 14b – Sistemas de purificación domésticos [11]



## LG Water purifying refrigerator

Como parte de la búsqueda de competencias en refrigeradores se encontró el modelo conceptual de la marca LG cuyas características pueden apreciarse en las siguientes figuras.





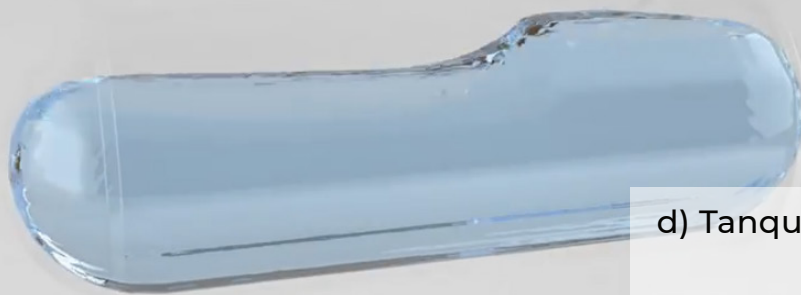
### c) Filtración de tres etapas

1. Pre – Filtro de carbón activado.
2. Membrana de ultrafiltración.
3. Post – Filtro de carbón activado.



## Stainless Steel Water Tank

Stainless Steel Water Tank can prevent water from the secondary contamination



d) Tanque de almacenamiento de acero inoxidable



### e) Dispensador con diseño Premium

1. Llenado según el tiempo o mililitros requeridos.
2. Recoge - gotas deslizante para recipientes de mayor dimisión.



## 3.4 NOM-127-SSA1-1994

“SALUD AMBIENTAL, AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO LIMITES PERMISIBLES DE CALIDAD Y TRATAMIENTOS A QUE DEBE SOMETERSE EL AGUA PARA SU POTABILIZACION”.

Esta norma oficial mexicana establece los límites permisibles de calidad y los tratamientos de potabilización del agua para uso y consumo humano, de tal manera que proporciona información necesaria para el diseño de sistemas de purificación de agua [13].

### 3.4.1

#### Características microbiológicas

##### Coliformes totales

Los coliformes totales sirven para establecer si un agua ha sido adecuadamente potabilizada. El término abarca bacterias de tipo bacilos (cualquier bacteria en forma de bastoncillo). Dichos coliformes son eliminados del agua mediante procesos de desinfección como la cloración, radiación UV y ozonización. El valor guía de la OMS y el de la NOM-127 es en ambos casos de ausente en 100 mililitros.

##### Coliformes fecales

Los coliformes fecales abarcan los generos *Escherichia* y parte de algunas especies de *Klebsiella*, *Enterobacter* y *Citrobacter*. De ellos, solo *E. coli* es específicamente de origen fecal y se encuentra siempre presente en las heces de humanos, otros mamíferos y gran número de aves. Al igual que los coliformes totales el valor permisible es de casos de ausente en 100 mililitros.

La ausencia de coliformes fecales y totales, en particular, no es indicadora de la ausencia de virus, algunos protozoarios y helmintos; debido a que éstos pertenecen a otro grupo de microorganismos que responden de manera diferente a la desinfección.

Los virus más comunes en el agua son adenovirus, enterovirus (poliovirus y virus de la hepatitis A), reovirus y virus causantes de diarrea, especialmente rotavirus y virus tipo Norwalk.

Los tratamientos para la desinfección de Bacterias, helmintos, protozoarios y virus recomendados son la desinfección con cloro, compuestos de cloro, ozono o luz ultravioleta.

## 3.4.2

### Características físicas y organolépticas

Las características físicas y organolépticas se refieren, en general, a mediciones indirectas de componentes químicos presentes en el agua que pueden o no ser tóxicos. Dentro de este tipo de parámetros se encuentran aquellos relacionados con la calidad estética, cuya importancia reside en que el agua debe agradar a los consumidores y no provocarles desconfianza ni perjuicios en sus instalaciones o bienes.


#### Color

El color es importante ya que da una indicación rápida de la calidad del agua. Además, junto con el olor y el sabor, determina la aceptación por parte del consumidor.

Hay dos tipos de color: el verdadero, producido por sustancias disueltas y que es el parámetro considerado en la NOM, y el aparente, provocado por el color verdadero más el efecto de los sólidos en suspensión.

El color en el agua de abastecimiento puede ser originado por la





presencia de iones metálicos como hierro y manganeso y plancton o algas. El valor permisible de la norma mexicana es de 20 unidades, en la escala platino cobalto.

En el caso del color verdadero, se recurre a sistemas más complejos como la absorción en carbón activado, oxidación y filtración en zeolitas, según sea el origen del color

### **Olor y sabor**

Los problemas de sabor con frecuencia son la causa principal de las quejas por parte del consumidor.

El olor y sabor en el agua potable depende de los niveles de concentración de los compuestos orgánicos e inorgánicos presentes, así como de la presencia de algunos microorganismos. En secciones posteriores se profundizará el tema del sabor en el agua de la red de distribución pública.

Por la amplia variedad de incertidumbre en este tema, no se establece un valor guía para el olor y sabor basado en aspectos de salud, sino que lo hace en términos de la aceptabilidad del agua.

El ozono es el método más eficaz para controlar los olores y sabores de origen orgánico. Además, en combinación con carbón activado tiene una gran eficacia para remover olores y sabores causados por compuestos orgánicos.

### **Turbiedad**

La turbiedad incrementa el color aparente del agua y se debe a la presencia de materia suspendida, orgánica e inorgánica, como arcilla, sedimentos, plancton y organismos microscópicos. El límite permisible es 5 unidades de turbiedad nefelométricas (UTN)

Los principales tratamientos para la potabilización de las características físicas y organolépticas son la coagulación, floculación, precipitación, filtración o adsorción en carbón activado u oxidación.

## 3.4.2

### Características químicas

De manera natural, el agua que contiene sustancias inorgánicas como arsénico, selenio, cromo, cobre, molibdeno, níquel, zinc y sodio. Algunas de ellas son elementos esenciales en la nutrición.

En la siguiente tabla se presentan los límites permisibles de algunas sustancias presentes en el agua y en su caso el tratamiento recomendado para su eliminación o disminución.

<b>Característica</b>	<b>Límite permisibles</b>	<b>Tratamientos</b>
Aluminio	0.20	
Arsénico	0.05	
Bario	0,70	
Cadmio	0.005	Intercambio iónico u ósmosis inversa
Cianuros	0.07	
Cloro residual	1.5	
Cloruros	250	
Cobre	2	
Cromo	0.05	
Dureza	500	Intercambio iónico
Fenoles	0.001	carbón activado u oxidación con ozono
Fierro	0.3	Intercambio iónico u ósmosis inversa
Manganeso	0.15	
Mercurio	0.001	carbón activado granular
plaguicidas	0.03	
Plomo	0.025	Intercambio iónico u ósmosis inversa
Sodio	200	
Solidos disueltos totales	1000	intercambio iónico
Zinc	5	Destilación o intercambio iónico.

Figura 17 - Límites permisibles y tratamientos de químicos [13]



## 3.5 TRATAMIENTOS DE PURIFICACIÓN

En la sección pasada se resumió la información más relevante de la NOM 127 en la que se recomiendan tratamientos de purificación de agua. En este apartado se explica con mayor detalle los principales procesos que se aplican para purificarla.

### ¿Desinfectar, filtrar o purificar?

**Desinfectar:** Destrucción de organismos patógenos por medio de la aplicación de productos químicos o procesos físicos.

**Filtrar:** Remoción de partículas suspendidas en el agua, haciéndola fluir a través de un medio filtrante de porosidad adecuada.

**Purificar:** se refiere a hacer pura el agua, y se utiliza como sinónimo de potabilización que consiste en eliminar del agua todas las sustancias que la hagan inadecuada para beberla sin riesgos a la salud. Debe entenderse que la purificación es el proceso de potabilización, en tanto que la desinfección es una parte de dicho proceso [14].

### Métodos de desinfección

Los tres métodos más comunes para desinfectar agua son cloro, ozono y luz ultravioleta, los dos primeros también son oxidantes químicos como se explica a continuación.

La oxidación química se emplea en la potabilización para remover constituyentes químicos que se encuentran en un estado reducido, como compuestos orgánicos tóxicos o compuestos olorosos y compuestos inorgánicos como hierro, manganeso o sulfuro de hidrógeno.



Las principales aplicaciones de los oxidantes son:

- Control del olor y sabor.
- Remoción de color.
- Desinfección.

### Desinfección con cloro

El cloro es barato, fácil de usar y destruye la mayoría de los microbios comúnmente presentes en el agua, además de que remueve compuestos que provocan olor y sabor.

El cloro es el principal compuesto empleado para la desinfección del agua, debido a su disponibilidad y bajo costo. Se usa en forma gaseosa, sólida o líquida y en forma pura o combinada. La tasa de desinfección depende de la concentración y forma en que se encuentre el cloro disponible, el tiempo de contacto, el pH y la temperatura.


Sin embargo, la cloración de aguas superficiales que contienen ácidos húmicos, provenientes de la descomposición de vegetales y animales, genera la formación de trihalometanos (THMs). Los más comunes son el cloroformo y el bromodiclorometano. Hay altas probabilidades de que estos compuestos sean carcinógenos en concentraciones por arriba de 0.1 mg/L.

### Desinfección con ozono

Es un gas fuertemente oxidante que reacciona con la mayoría de las moléculas orgánicas, así como con muchas inorgánicas y se produce por la acción de un campo eléctrico sobre el oxígeno.

El ozono es más reactivo que el cloro y sus reacciones son rápidas al inactivar microorganismos, oxidar hierro, manganeso y sulfuros, mientras que oxida lentamente compuestos orgánicos como sustancias húmicas, fúlvicas y pesticidas.

Los inconvenientes que presenta el uso de ozono son que su dosificación requiere mayor tecnología, siendo el costo de inversión y operación mayor en comparación con el cloro, además de que tiene



una vida media en agua de aproximadamente 10 a 30 minutos, por lo cual debe ser generado in situ.

### Desinfección con luz ultravioleta

La luz ultravioleta es una radiación electromagnética que está presente en el espectro natural de la radiación solar. Tiene una longitud de onda menor a la de la luz visible (400 nm) y mayor a la de los rayos X (100 nm).

Las longitudes de onda debajo de 200 nanómetros no pueden penetrar el agua, por lo tanto, no se consideran germicidas. Por otra parte, se ha establecido que la radiación de luz ultravioleta penetra la pared celular de los organismos y es absorbida por el ADN y el ARN alterando su composición, lo cual impide la reproducción o produce directamente la muerte de la célula por medio de la formación de dobles enlaces entre sus nucleótidos.

Esta absorción del ADN no se lleva a cabo a longitudes de onda mayores de 300 nm, por lo que el rango germicida se encuentra entre 200 y 300 nm, siendo la longitud óptima 254 nm. Cabe mencionar que el éxito de la desinfección con luz UV depende de las características del agua, en particular de la transmitancia, del contenido de sólidos disueltos y de la turbiedad por lo que siempre se recomienda un pretratamiento del agua a desinfectar [15].

## Filtración y procesos de membrana

### Carbón activado

El carbón activado tiene una estructura altamente porosa, con un amplio rango de tamaños de poros, desde los visibles a simple vista, hasta los de tamaño molecular. Las interacciones moleculares en los poros más pequeños proveen las fuertes fuerzas de adsorción de las moléculas contaminantes sobre el carbón activado. El carbón activado es un efectivo adsorbente porque provee una enorme área superficial a la cual los contaminantes químicos se pueden adherir. La remoción de sabor y olor causados por compuestos naturales, materia orgánica, eliminación de color, sólidos suspendidos y



Figura 18 - Carbón activado granular [30]

desinfectantes residuales son las principales ventajas de usar carbón activado. Sin embargo, tiene que reactivarse o cambiarse cada determinado tiempo

### Procesos de membrana

Los procesos de membrana comúnmente utilizados en la producción de agua potable son:

- Microfiltración (MF)
- Ultrafiltración (UF)
- Nanofiltración (NF)
- Ósmosis inversa (OI)

La Microfiltración y Ultrafiltración son procesos que usan membranas microporosas para remover materia particulada (incluida turbiedad y microorganismos). Estos procesos no remueven iones u otros constituyentes disueltos. Las membranas de UF y MF pueden manufacturarse a partir de una variedad de materiales, incluyendo acetato de celulosa y polímeros sintéticos como fluoruro de polivinilo, polipropileno, polisulfonas y poliacrilonitrilo.



Los procesos Osmosis inversa y Nanofiltración usan membranas semipermeables para remover principalmente contaminantes disueltos por medio de un proceso de difusión controlada. Aunque los procesos OI y NF también remueven partículas, las membranas semipermeables pueden incrustarse cuando son expuestas a una carga de partículas significativa [16].


Cuando se aplica presión en exceso en un gradiente natural osmótico, el agua es forzada a pasar a través de la estructura molecular de la superficie de la membrana mientras que los sólidos disueltos son rechazados. Aunque los solutos pueden también difundirse a través de las membranas semipermeables, la tasa de masa transferida es muy inferior que la de agua. Por lo tanto, el agua que pasa a través de

<b>Tipo de membrana</b>	<b>Contaminantes que remueve</b>
Microfiltración	<ul style="list-style-type: none"><li>• Giardia</li><li>• Cryptosporidium</li><li>• Bacterias</li><li>• Turbiedad/materia particulada</li><li>• Materia orgánica coagulada</li><li>• Precipitados inorgánicos</li></ul>
Ultrafiltración	Todos los contaminantes que remueve MF, <ul style="list-style-type: none"><li>• Virus</li><li>• Macromoléculas orgánicas</li></ul>
Nanofiltración	Todos los contaminantes que remueve MF y UF <ul style="list-style-type: none"><li>• Iones divalentes/dureza</li><li>• Iones monovalentes</li><li>• Carbono orgánico disuelto</li><li>• Color</li></ul>
Osmosis inversa	Todos los contaminantes que remueve NF <ul style="list-style-type: none"><li>• Iones disueltos</li></ul>

Figura 19 - Contaminantes que se remueven mediante procesos de membrana [16]

la membrana tiene muy pocos sólidos disueltos.

La cantidad de energía requerida para que el agua atraviese la membrana depende del material y de su espesor, así como de la presión osmótica de alimentación. El proceso de osmosis inversa



se llama así porque el agua tiene que vencer el gradiente natural osmótico.

La nanofiltración y el proceso de osmosis inversa presentan elevados costos, además este último requiere una enorme cantidad de agua. Tales sistemas típicamente devuelven solo el 50 por ciento del agua empujada a través del mismo.

### Intercambio iónico

El intercambio iónico es un proceso químico que consiste en la remoción de los iones indeseables de un agua cruda transfiriéndolos a un material sólido, llamado intercambiador iónico que acepta y cede un número equivalente de iones de una especie deseable, que se encuentran almacenados en su esqueleto. Se aplica comúnmente para la remoción de contaminantes específicos, como metales pesados [17].



Figura 20 - Resina de intercambio iónico [18]



## 3.6 IDENTIFICACIÓN DE LAS NECESIDADES

Las necesidades identificadas a partir de la información de contexto, las competencias y las prácticas con el colaborador se presentan en la siguiente figura.

<b>Necesidad</b>	<b>Requerimiento</b>	<b>Importancia</b>
El agua suministrada tiene que ser confiable para beber.	El agua es confiable para beber	1
El sabor y olor del agua tiene que ser agradable para los usuarios.	El olor y sabor son agradables para los usuarios	2
El usuario puede disponer del agua en el momento que el desee.	La disposición del agua es continua	3
El producto debe ser barato	El producto es de bajo costo	4
El producto debe ser pequeño	Es poco el espacio que el producto ocupa	5
La interfaz con el usuario debe ser intuitiva	La interfaz con el usuario es intuitiva	6
Debe tener poco mantenimiento	Es poco el mantenimiento	7
No debe tener alto consumo energético	El consumo energético es bajo	8

Figura 21 - Tabla de necesidades y requerimientos



## 3.7 ESPECIFICACIONES META

El conjunto de especificaciones que se presentan a continuación representa los primeros detalles precisos y medibles de lo que el producto tiene que hacer. Sin embargo, éstas pueden cambiar con el desarrollo del producto debido a que en esta etapa aún no se tienen restricciones de diseño.

<b>Especificación</b>	<b>Métrica</b>	<b>Importancia</b>
El agua es confiable para beber	Certificación de laboratorio NOM-244-SSA1-2008	1
El olor y sabor son agradables para los usuarios	<i>NOM-127-SSA1-1994</i>	2
La disposición del agua es continua	Tiempo de llenado [seg] Tiempo de purificación [min]	3
El producto es de bajo costo	Pesos	4
Es poco el espacio que el producto ocupa	Dimensiones por definir [in]	5
La interfaz con el usuario es intuitiva	Códigos visuales por definir	6
Es poco el mantenimiento	Tiempo entre mantenimientos [meses]	7
El consumo energético es bajo	kW/hr	8

Figura 22 – Tabla de especificaciones meta



# 4

# CAPÍTULO

Segunda Etapa del proyecto



## 4.1 ACTUALIZACIÓN DEL RETO

El capítulo pasado está enfocado en entender el contexto del agua purificada desde la perspectiva de las competencias, la norma y los tratamientos de purificación. También, en las últimas secciones se presentaron las primeras necesidades y especificaciones meta del proyecto.

Para esta segunda etapa, se ha decidido que el diseño del sistema de purificación esté colocado en el refrigerador como un atributo que pueda brindar agua pura, fresca y saludable, sin la necesidad de comprar otro dispositivo que ocupe espacio e instalación dentro de la cocina. En consecuencia, en este capítulo se habla de la selección del método de purificación, se detalla información relacionada con la tecnología. Finalmente se presentan y prototipan conceptos de solución.

## 4.2 SELECCIÓN DEL MÉTODO DE PURIFICACIÓN

Como se mencionó en el capítulo pasado purificar o potabilizar el agua implica un proceso de desinfección cuyo objetivo es eliminar a los patógenos. En la Figura 23 se presentan las ventajas y desventajas de las principales tecnologías de desinfección de agua.

Método	Descripción	Ventaja	Desventaja
Luz ultravioleta	La luz UV incide sobre el ADN de los microorganismos y cambian la estructura del material genético, provocando en corto tiempo la muerte de los patógenos.	-Garantiza la eliminación del 99,9% de microorganismos causante de enfermedades. -Puede trabajar con baja presión de alimentación	-Es imprescindible que los procesos previos del agua eliminen de forma casi total cualquier turbiedad de la misma, ya que la Luz Ultravioleta debe atravesar el flujo de agua a tratar
Cloro	El cloro mata patógenos como las bacterias y los virus, rompiendo las uniones químicas moleculares.	-Es un método económico para eliminar bacterias.	-Sabor desagradable - Se pueden formar trihalometanos, compuestos carcinógenos al clorar ácidos húmicos.
Ozono	El ozono interfiere e interrumpe el metabolismo de las células bacterianas, a través control enzimático eliminándola.	-Reduce de manera importante el aspecto turbio, el mal olor y sabor del agua. Degrada eficazmente una gama amplia de plaguicidas y otras sustancias orgánicas.	-No disminuye minerales, sales y metales -Bajo ciertas condiciones puede producir ácido nítrico

Figura 23 – Desinfectantes ventajas y desventajas [14]


Son dos los principales motivos por los que se decidió utilizar el ozono como método desinfectante.

1. Una de las principales especificaciones es que el olor y sabor sean agradables para los usuarios, en este sentido el ozono cumple como desinfectante, desodorizante, además de mejorar el sabor, degradar plaguicidas y sustancias orgánicas
2. En la compañía se están desarrollando tres proyectos con ozono uno de conservación de alimentos, otro de desinfección de vegetales y un último en cuidado de la ropa.

Como parte del proceso de purificación de agua es necesario una etapa de filtrado. En la Figura 24 se presentan las ventajas y desventajas de las principales tecnologías de filtración.

Tecnología	Descripción	Ventajas	Desventajas
Carbón Activado	El carbón activado, contiene millones de agujeros microscópicos que capturan y rompen las moléculas de los contaminantes.	-Elimina cloro, mal olor, sabores desagradables y sólidos pesados en el agua. También retiene algunos contaminantes orgánicos, como insecticidas, pesticidas y herbicidas	-Pueden saturarse y contaminarse con microorganismos y si no se cuenta con un sistema de desinfección colocado después del filtro el agua no es segura para beber.
Microfiltración Ultrafiltración Nanofiltración	Se basan en el mecanismo de separación física de la filtración haciendo pasar el agua a través de unas membranas aplicando presión al fluido. La diferencia entre estos métodos es el tamaño de poro de la membrana, que determina hasta qué punto son eliminados los sólidos disueltos, la turbidez y los microorganismos	-Elimina arcilla, Giardia, algas y parte de bacterias. -Elimina todos los tipos de bacterias y casi todos los virus. -Elimina quistes, material húmico y moléculas orgánicas.	-No retiene todos los virus -Altos costos de operación -Requiere alta presión
Ósmosis Inversa	Utiliza una membrana que separa y elimina del agua sólidos, sustancias orgánicas, virus y bacterias disueltas en el agua. Las membranas sólo dejan pasar las moléculas de agua, atrapando incluso las sales disueltas	-Puede eliminar alrededor de 95% de los sólidos disueltos totales (SDT) y 99% de todas las bacterias	-Por cada litro que entra a un sistema de ósmosis inversa se obtienen 500 ml de agua de la más alta calidad, sin embargo, deben desecharse los otros 500 ml que contienen los SDT

Figura 24 – Método de filtración ventajas y desventajas [15]



Las propiedades y ventajas que tiene el carbón activado, así como su uso en los filtros de algunos refrigeradores fabricados por la compañía son el motivo por el que se decidió utilizarlo como medio filtrante. De igual manera y por recomendación de la NOM 127, se seleccionó la resina de intercambio iónico por sus ventajas de eliminación de metales pesado y sólidos disueltos totales.



## 4.3 ELEMENTOS DE PURIFICACIÓN

Una vez seleccionados los métodos para la purificación de agua se extenderá la información relacionada con ozono e intercambio iónico con la finalidad de proponer prototipos y conocer los fenómenos.

### 4.3.1

#### Sistemas de generación de ozono


Los principales métodos de generación de ozono son los siguientes:

**Electrólisis del ácido sulfúrico.** Es el método más antiguo y atractivo para bajas concentraciones. Emplea un bajo voltaje de corriente directa, no requiere gas de alimentación y el equipo es compacto. Sin embargo, se desgasta muy rápido y necesita electrolitos especiales o agua con baja conductividad.

**Fotoquímico.** Se basa en el principio de ionización del aire u oxígeno por medio de luz ultravioleta. Se usa una lámpara que emita una radiación con longitud de onda menor a 200 nm. Este método es muy económico para el tratamiento de pequeñas cantidades de agua que no demanden gran cantidad de ozono. Pero consume gran cantidad de energía y es severamente afectado en su eficiencia por la humedad y la durabilidad de la lámpara.

**Corona de descarga.** En este método se aplica alto voltaje entre dos electrodos utilizando un dieléctrico para distribuir la carga de alto voltaje a través del área de descarga. Es práctico y útil para grandes cantidades, sin embargo, consume mucha energía.





Al pasar una corriente de aire u oxígeno, libre de humedad, a través de una descarga eléctrica, los enlaces entre las moléculas de oxígeno se rompen, produciendo radicales de oxígeno, que se enlazan con otras moléculas de oxígeno formando ozono. Sus ventajas son las concentraciones que se pueden producir con respecto a otros métodos, además de mayor durabilidad del sistema. Es el método más utilizado industrialmente para generar ozono.

## 4.3.2

### Preparación del gas de alimentación

La preparación del gas de alimentación para la generación de ozono es extremadamente crítica porque es necesario un gas limpio y libre de humedad. El aire debe estar seco para evitar la formación de ácido nítrico y aumentar la eficiencia del generador.

La calidad y la concentración del ozono producido dependen del secado del aire de alimentación. Para la producción de ozono por efecto corona se recomienda el aire a 60 °C.

## 4.3.3

### Dosificación

Los principales mecanismos de mezclado de ozono con un agua son:

- Difusores de burbujas. Es lo más usado. Consiste en material poroso cerámico.
- Inyectores tipo Venturi
- Otros métodos como columnas empaquetadas, columnas de flujo inverso, cámaras de pulverización, turbinas

## 4.3.4

### Regulaciones en E.U.A

El Ozono es generalmente reconocido como seguro (GRAS) en E.U.A para desinfección de agua embotellada y como sanitizador en procesos de plantas de agua embotellada (FDA 1995).

La enmienda a las regulaciones de aditivos alimentarios de la FDA permite el uso de ozono cuando se utiliza como gas o disuelto en agua como agente antimicrobiano para los alimentos (CFR 173).

Desde el punto de vista de la seguridad del trabajador, los procesos deben asegurar que los empleados no estén expuestos a contracciones de ozono mayores que:

- 0.1 ppm en volumen ( $0.2 \text{ mg/m}^3$ ) sobre un promedio ponderado por tiempo sobre una base de 8 h/d.
- 0.3 ppm en volumen ( $0.6 \text{ mg/m}^3$ ) como tiempo límite máximo de exposición por 15 minutos, no más de 4 veces diarias según la Administración de Seguridad y Salud Ocupacional de los Estados Unidos (OSHA, CFR 1997).

Dado que en México no existe una regulación clara del ozono en agua, se utiliza la de Estados Unidos.

## 4.3.5

### Medición y monitoreo de ozono en agua

La principal razón por la que se mide la concentración de ozono es asegurar la desinfección del agua, es decir si la concentración fue suficiente para eliminar a los microorganismos.

La concentración de ozono en el agua se puede medir principalmente por kits de prueba colorimétricos o sensores amperiométricos. Las unidades de medición de ozono son partículas por millón (ppm) o miligramos.



## Métodos colorimétricos

Las dos principales sustancias químicas utilizadas para medir la concentración de ozono en agua son DDPD (N,N-dietil-p-fenilendiamina) y trisulfonato de índigo.

Para el primer caso, se añade yoduro de potasio a la muestra antes del análisis. El ozono reacciona para liberar yodo libre y éste a su vez reacciona con el reactivo DDPD para producir un color violeta azul, esta intensidad es comparada en una tabla y según la coloración será la concentración de ozono obtenida.

Sin embargo, varios halógenos libres y agentes halogenantes también producen el color violeta azul con el reactivo DDPD, y por lo tanto interfieren con el análisis del ozono haciéndolo poco confiable e imposible de utilizarlo como método de control de dosificación en el refrigerador[19].

Para el segundo caso, el reactivo de trisulfonato de índigo reacciona instantánea y cuantitativamente con ozono, blanqueando el color azul del índigo en proporción directa a la cantidad de ozono presente.

## Sensores amperiométricos

Los monitores o controladores electrónicos para medir el ozono disuelto en agua utilizan un sensor amperiométrico cubierto por una membrana permeable al gas sobre un electrodo de platino.

Durante la operación, el ozono se difunde desde la muestra a través de la membrana. Una vez dentro del sensor, el ozono reacciona con la solución electrolítica para formar un compuesto intermedio. Un voltaje de polarización aplicada al cátodo reduce completamente este compuesto intermedio, produciendo una corriente entre el cátodo y el ánodo, que mide el analizador. Esta corriente es directamente proporcional a la velocidad a la que el ozono se difunde a través de la membrana hacia el sensor, que en última instancia es proporcional a la concentración de ozono en la muestra.

Una ventaja del método electrónico es que mide la muestra en

tiempo real y permite el control del generador de ozono, así como la medición de los niveles de ozono disuelto. Las desventajas son el mayor gasto de capital y los costos de mantenimiento [19, 20].

### Sensor ORP

ORP significa potencial oxido reducción y es una medida en mili volts (mV) del nivel de oxidación en el agua. Este índice representa la actividad del desinfectante en el agua en vez del nivel de concentración del mismo.

Desde una perspectiva microbiológica, un oxidante extrae electrones de la membrana celular, lo que hace que se desestabilice. La destrucción de la integridad de la membrana celular conduce a una muerte rápida de la bacteria.

Un sensor de ORP es en realidad un voltímetro que toma una medida del voltaje de un proceso electroquímico en un circuito formado por un electrodo de referencia que se construye de alambre de plata y toma otra medida del electrodo construido sobre una banda de platino.

Aunque ORP no mide el ozono disuelto (a menos que el ozono es la única sustancia oxidante que está presente en la solución), puede ser muy útil para controlar la producción de generadores de ozono. Cuando se excede un nivel de ORP preestablecido, se envía una señal al generador de ozono para disminuir la producción de ozono, y viceversa [22].

Investigaciones han demostrado que con un valor de ORP de 650 a 700 mV, las bacterias patógenas como E. coli o especies de Salmonella se eliminan en 30 segundos. Véase Figura 25.

Patógeno	Sobrevivencia en segundos (s) a ORP (mV)		
	<485	500 < x < 620	>665
E coli	>300s	<60s	<10s
Salmonella	>300s	>300s	<20s
Listeria Monocytogenes	>300s	>300s	<30s
Coliformes termo-tolerantes	>48h	>48h	<30s

Figura 25 - Patógenos vs ORP [23]

La levadura y los tipos más sensibles de hongos formadores de esporas también se eliminan a este nivel después de un tiempo de contacto de unos minutos o menos. Otras investigaciones han relacionado las mediciones de ORP con ppm de ozono como se muestra en la siguiente figura.

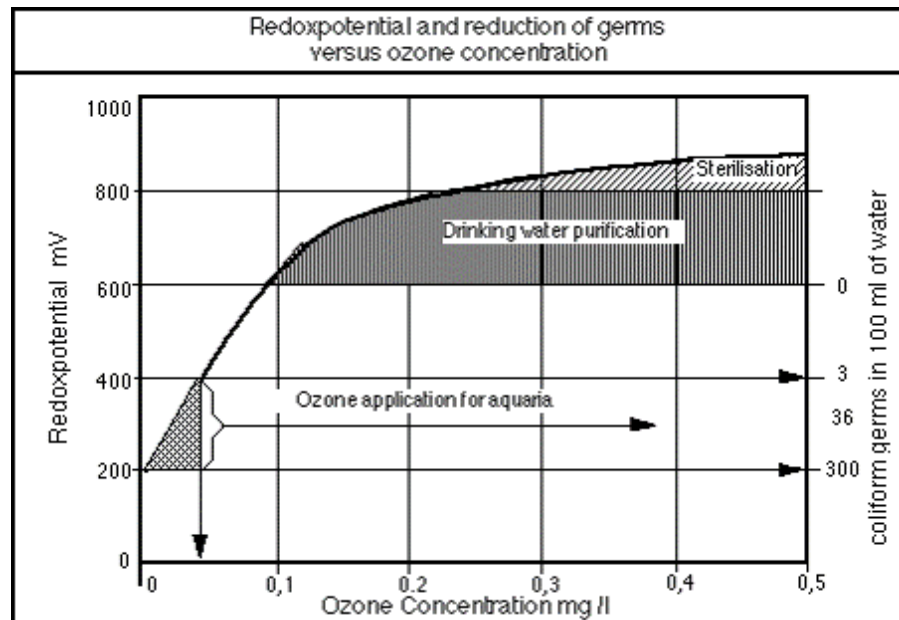


Figura 26 - Relación entre ORP y ppm de ozono [22]

De la figura se resume que entre 600 y 800 mV de ORP se encuentra la aplicación de purificación de agua, siendo valores por encima de 800 mV la esterilización. El área sombreada es el tiempo de contacto CT que conforme pasa el tiempo se ve incrementada de 0,1 a 0,5 mg/L o ppm. También se observa que los coliformes en 100 ml de agua decrecen hasta cero a partir de 600 mV. Dada la aparente aplicación del sensor oxido reducción se utilizará para monitorear el ozono como se explicará en secciones posteriores [23,24].

## 4.3.6

### Intercambio iónico - factores de influencia

Los intercambiadores iónicos se usan para la separación de sales (cationes y aniones) del agua. Sus aplicaciones en la potabilización del agua son:

- **Ablandamiento:** Separación de iones de calcio y magnesio.
- **Desmineralización:** Remoción de  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4$ ,  $\text{NO}_3^-$ .
- **Remoción de nitratos:** bario, cadmio, arsénico, percloratos y cromatos.

Los factores que influyen en el proceso son:

- **pH.** Es muy importante porque la adsorción está relacionada con la solubilidad y, por lo tanto, con el pH. Por ejemplo, la adsorción de metales depende de su solubilidad en el agua y por esto, su adsorción máxima ocurre a un pH bajo.
- **Temperatura.** Afecta la viscosidad de las soluciones y a consecuencia influye en la adsorción.
- **Tiempo de contacto.** Existe generalmente un tiempo mínimo de contacto para asegurar la máxima adsorción o remoción completa del contaminante.
- **Tamaño de la partícula adsorbente.** En general, la remoción del adsorbato sucede en dos etapas: la primera es el traslado de la molécula adsorbida desde el líquido hasta la superficie del adsorbente y, la segunda, la migración del adsorbato desde la superficie del adsorbente hasta el sitio de adsorción, dentro de la partícula del adsorbente [25].

## 4.3.7

### Regeneración de la resina y consideraciones del proceso

El proceso de intercambio iónico se realiza en una columna de resina, el agua a tratar fluye a través de la resina hasta que el objetivo del tratamiento se alcanza. Las etapas de regeneración de una resina son importantes en la eficiencia global del proceso.

Existen dos métodos para regenerar una columna de intercambio iónico:

- Co-corriente: El regenerante pasa a través de la resina en la misma dirección que el flujo del agua sometida a tratamiento.
- Contracorriente: El regenerante pasa a través de la resina en la dirección opuesta a la del flujo del agua sometida a tratamiento.

En la mayoría de los casos, la operación a contracorriente provoca una menor generación de desecho y mayores eficiencias químicas. Este tipo de operación se utiliza cuando se requiere:

- Alta pureza del agua
- Consumo mínimo de reactivos químicos

La capacidad de regeneración de la resina de intercambio iónico es relevante sí se piensa en prolongar la vida útil de un filtro que en promedio es de 6 meses.

## 4.3.8

### Sólidos disueltos totales (SDT)

Los sólidos disueltos totales (SDT) o TDS por sus siglas en inglés, incluyen tanto las sales inorgánicas (carbonatos, bicarbonatos, cloruros, sulfatos, fosfatos y nitratos de sodio, potasio, calcio, magnesio y hierro) como materia orgánica.

El intervalo usual de sólidos disueltos totales en agua de abastecimiento varía de 25 a 5 000 mg/L, en función de la geología local. La concentración normalmente deseable es de 200 mg/L.

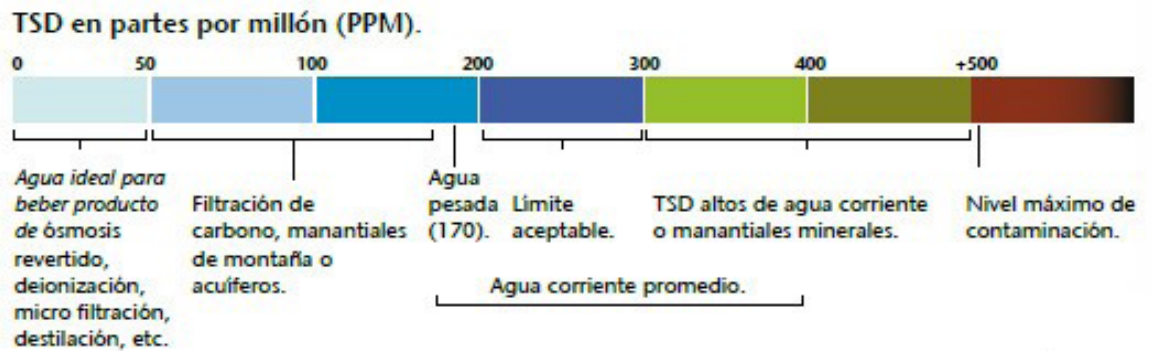


Figura 27– Escala de solidos disueltos totales [26]

Los sólidos disueltos pueden tener importantes efectos en el sabor. Se considera que menos de 600 mg/L no se perciben, aunque contenidos muy bajos producen un agua insípida.

Cuando están por arriba de 1,200 mg/L el agua comienza a ser rechazada. Asimismo, los sólidos disueltos promueven la corrosión, por lo que la OMS recomienda no exceder 1000 mg/L, que es igual al valor de la NOM - 127.



# 4.4 DISEÑO CONCEPTUAL

En este apartado, se presentan los conceptos de solución generados con base en la información obtenida en secciones anteriores relacionada con las tecnologías para la purificación de agua.

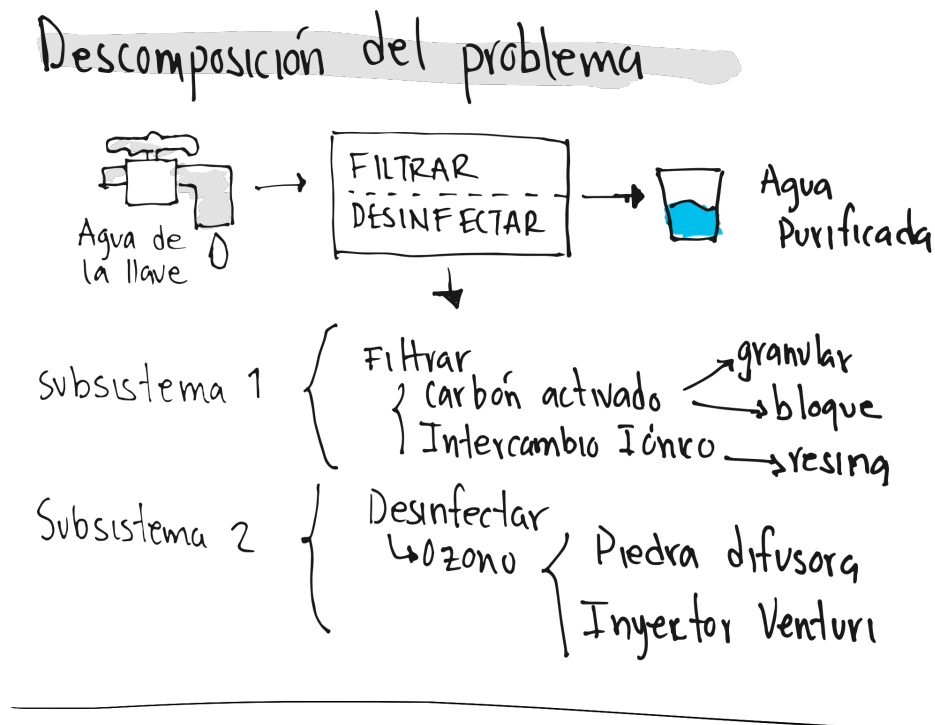


Figura 28 - Descomposición del problema

Para un mayor entendimiento del problema, se utilizó la herramienta de la descomposición por funciones [31]. El primer subsistema encontrado fue el de filtración, en el que se pretende utilizar un filtro con carbón activado e intercambio iónico. El segundo subsistema está relacionado con la desinfección provocada por el ozono que a su vez es mezclada con agua a través de piedras difusoras o inyectores venturi.

Por otro lado, una de las preocupaciones más importantes fue el tipo de llenado para la purificación de agua. La primera es el llenado automático que conecta la toma de agua de la llave al sistema para su posterior filtración y desinfección, siendo la principal ventaja el no llenado constantemente del purificador.

Sin embargo, información del colaborador, menciona que la instalación extra para la conexión entre la llave del agua y el refrigerador suele ser molesto y costoso. Por lo que los usuarios finales deciden no realizarlo y dejar en desuso los elementos que necesitan agua como el dispensador o la fábrica de hielos.

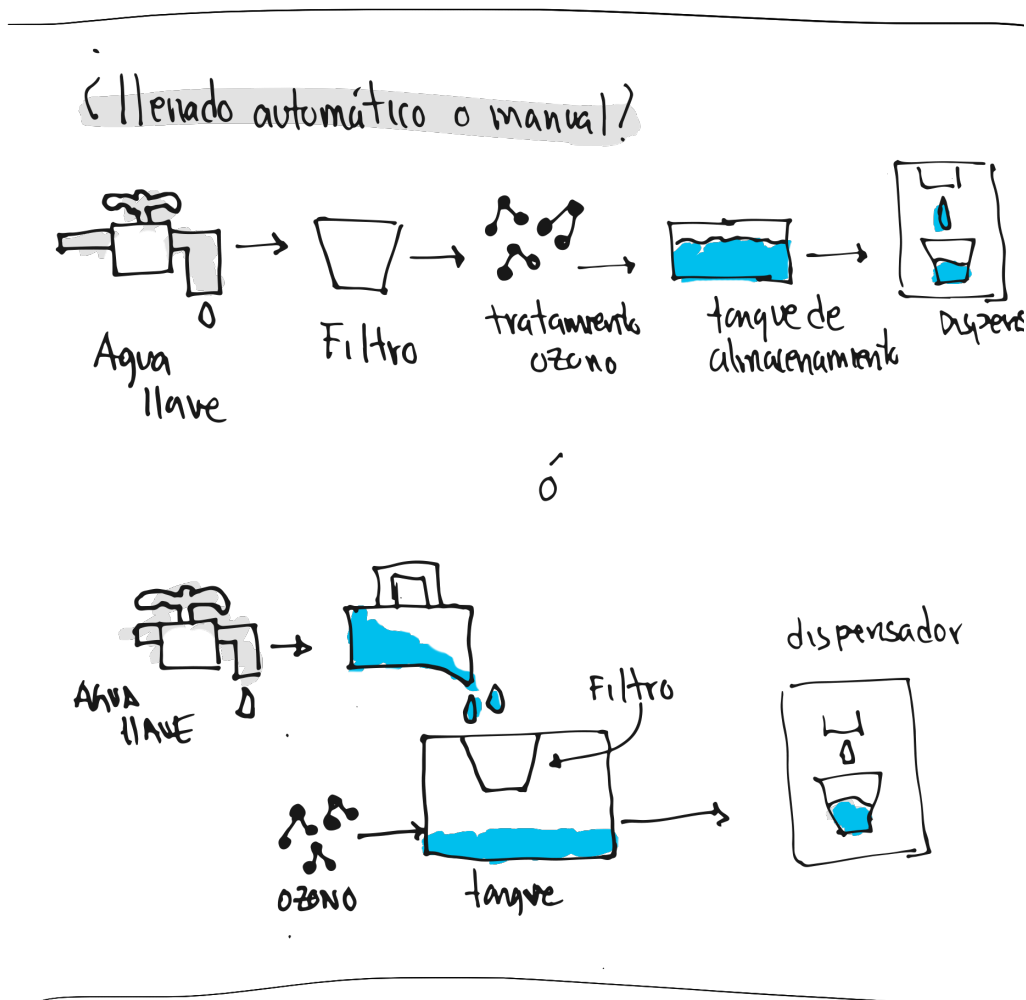
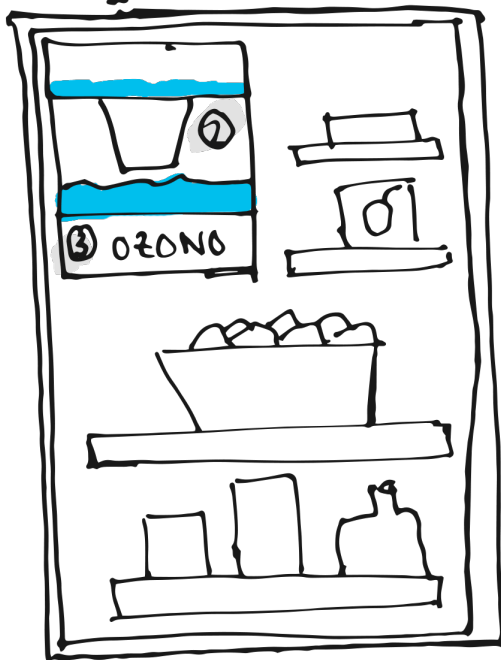


Figura 29 - Tipo de llenado



## Propuesta de diseño



- 1.- El usuario llena con agua de la llave el primer tanque
- 2.- El agua pasa a través del filtro por gravedad y llena el segundo tanque
- 3.- Una vez llenado el segundo tanque comienza el tratamiento con ozono
- 4.- Cuando el agua este purificada el dispensador será habilitado para beber

Figura 31 - Propuesta de diseño conceptual para el sistema de purificación

## 4.5 PROTOTIPOS

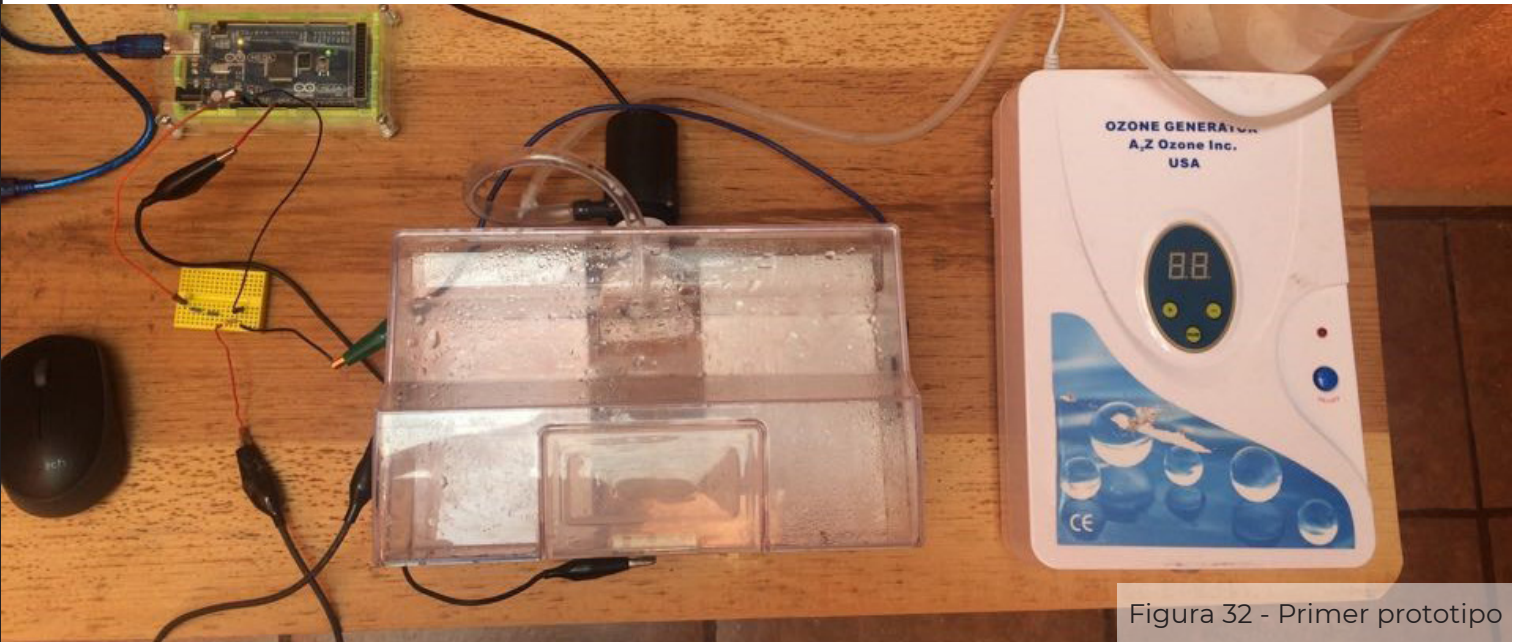


Figura 32 - Primer prototipo

Una vez teniendo un concepto de solución para el purificador de agua y con base en la investigación realizada en secciones pasadas, se adquirieron generadores de ozono, sensores de ORP y de sólidos disueltos con el propósito de construir prototipos rápidos y entender el fenómeno.

Para la fabricación del primer prototipo, se reutilizó un tanque de agua de un refrigerador al cual se le hicieron barrenos para colocar los sensores y se fabricó un venturi con mangueras. Además, se utilizó la piedra difusora incluida con el ozonizador para iniciar con las primeras mediciones de la oxidación provocada por el ozono en el agua. En la figura 32 se presenta dicho prototipo.



El comportamiento típico medido por el sensor ORP se presenta en la figura 33. Para el caso particular de esa prueba, se tomaron mediciones por 5 minutos antes de encender el generador de ozono, 10 minutos de ozonización y 10 minutos de descomposición del mismo.

De la gráfica se observa como las mediciones iniciales rondan los 500 mV y éstas se ven incrementadas 1 minuto después de encender el ozonizador hasta el minuto 12 cuyas mediciones se estabilizan alrededor de los 900 mV. Finalmente, el generador se apaga al minuto 15 y posteriormente se puede apreciar un decaimiento.

Con estas primeras pruebas se pudo comprobar que el sensor oxido - reducción funciona para detectar el fenómeno de oxidación y de acuerdo con la información encontrada en la literatura para valores entre 600 y 800 mv se obtiene la desinfección de agua.

También, se encontró que a bajas temperaturas el ozono se mezcla más rápidamente con el agua por lo que llega más pronto al punto de saturación, dicha información fue corroborada en la literatura [19].

Por otro lado, los valores iniciales medidos por el sensor varían dependiendo de la calidad del agua y la concentración de cloro que también es un oxidante y por ende un parámetro de ruido.

Finalmente, se concluyó que la eficiencia de la mezcla ozono – agua

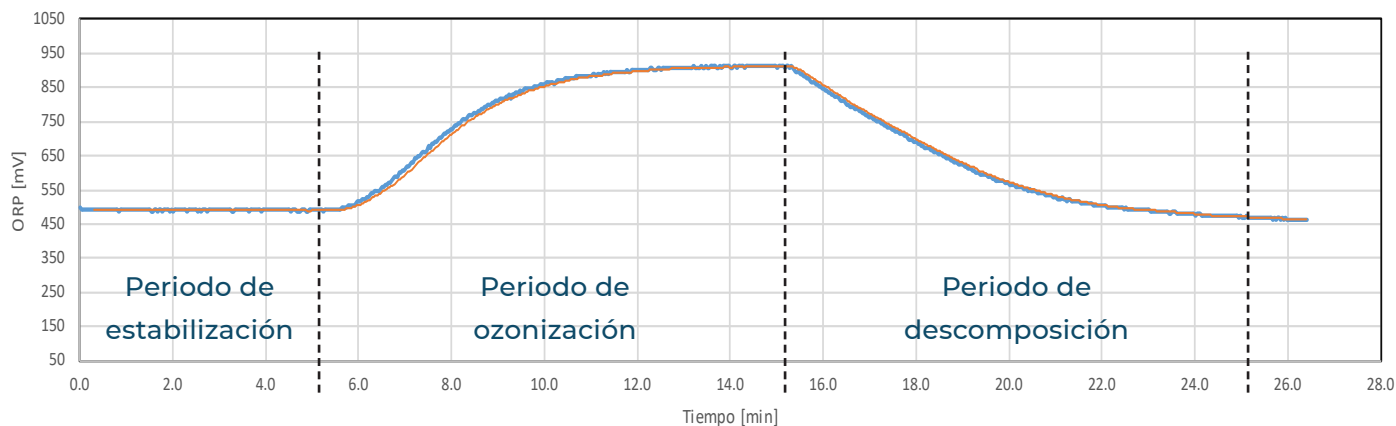


Figura 33 - Comportamiento del ozono en agua

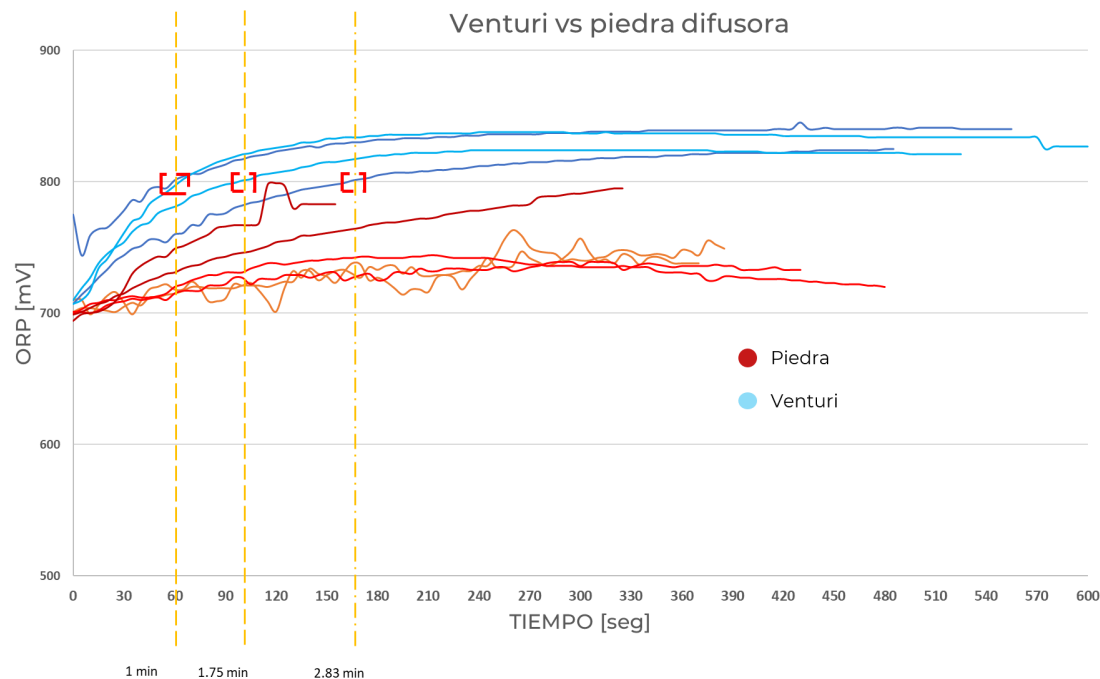


Figura 34 – Comparación entre inyector venturi y piedra difusora

es de mucha importancia si se desea llegar de manera más rápida a un valor de control que podría estar entre 600 y 800 mV. Dicho lo anterior se diseñó y fabricó un venturi con manufactura aditiva con el objetivo de comparar las mediciones entre éste y la piedra difusora para determinar cuál es más eficiente.

El resumen de estas pruebas se presenta en la figura 34 donde las mediciones en color azul les pertenecen a las distintas corridas con el venturi y las rojas a la piedra difusora.

De la gráfica, se observa como al utilizar el método de mezclado con venturi, se llega al nivel de control de 800 mV más rápido que con el difusor cerámico. Por lo que se comprueba la eficiencia con respecto al otro. Esta es la razón por la que se decidió utilizar un venturi como método de dosificación y mezclado de ozono.

La mezcla ozono – agua se da a través del contacto del gas en la superficie de la burbuja. De esta manera al tener muchas burbujas se amplía la superficie de contacto y se mejora la eficiencia de mezclado.



Figura 35 - Segundo Prototipo

## Segundo prototipo

Con la información recabada del primer prototipo se dio paso a la construcción del segundo, con la distinción de parecerse más a la propuesta del diseño conceptual presentada en la sección anterior. Véase Figura 35

Para esta segunda iteración se adquirieron varios filtros y sensores de sólidos disueltos totales para realizar nuevas pruebas y fundamentar los conceptos de diseño.

Los filtros adquiridos se presentan en la figura 36. Ambos son filtros de gravedad cuyas características son las siguientes:

### a) Filtro de 5 etapas:

1. Malla – partículas y sedimentos
2. Distribuidor de espuma
3. Capa de carbón activado.
4. Resina de intercambio iónico.
5. Membrana ultra fina

### b) Filtro 3 etapas:

1. Malla fina
2. Capa de carbón activado
3. Resina de intercambio iónico

Para el caso del filtro de 5 etapas se midió el tiempo de filtración por litro, además se midieron los sólidos disueltos totales (TDS) y los milivots del sensor ORP antes y después de la filtración. Los resultados se presentan a continuación.



Figura 36 – a) Filtro 5 etapas, b) Filtro 3 Etapas

#	Litros	Tiempo [min]	ORP Antes	ORP después	TDS Antes	TDS después
1	1	7.2	520	288	525	1
2	2	14	580	330	519	0
3	2	14.1	604	384	527	0
4	2	14.2	621	363	527	0
5	2	14.1	627	449	535	0
6	2	14	638	463	515	0
7	2	13.3	586	468	426	0
8	2	14.1	632	457	439	0
9	2	14.15	660	484	450	0
10	2	14.15	678	524	467	0
11	2	13.3	680	548	469	0
12	2	14	686	575	465	0
13	2	12.3	699	618	477	0
14	2	14	607	529	467	1
15	2	13	629	545	473	3
16	2	18	607	536	501	6
17	2	21.16	690	558	493	9
18	2	33	666	566	521	10
19	2	30	651	570	508	9
20	2	120	693	550	477	8


Figura 37 - Resultados de la pruebas con Filtro 5 etapas.

Las conclusiones de los resultados de las pruebas son los siguientes:

Los litros utilizados para las pruebas fueron 29 antes de la saturación del filtro, que incremento el tiempo promedio de filtrado de 7 minutos a 1 hora por litro y permitió el paso de un mayor número de SDT.

Al abrir el filtro para conocer las etapas de filtrado, se observa la gran proporción que tiene la resina de intercambio iónico en comparación con la otras por lo que es altamente probable que sea la etapa que tiene que regenerarse para volver a funcionar según la información de la sección 4.3.7.





Por otro lado, Las mediciones de ORP antes y después de las pruebas tienen una diferencia significativa de 260 mV en su punto máximo y 80 mV en la saturación del filtro. Por lo que se ven disminuidas las sustancias como el cloro que interfiere con las mediciones al ser un agente oxidante.

En cuanto a los sólidos disueltos totales se observa un cambio drástico al terminar en 0 practicante todas las pruebas lo que demuestra el potencial del filtro y el intercambio iónico.

Finalmente, y a pesar de los excelentes resultados del filtro, resulta ineficiente filtrar 20 litros máximos. Por lo que se concluye que las proporciones y el tiempo de contacto del agua con la resina de intercambio son fundamentales para disminuir los TDS, mejorar la percepción del sabor y pureza del agua.

Dadas los hallazgos encontrados con las pruebas descritas anteriormente para el filtro de 3 etapas solamente se midieron los TDS obteniendo resultados de disminución de 150 ppm en promedio. Esto a consecuencia del tamaño que es una tercera parte del primer filtro probado.

Recordemos que la percepción de sabor y salud se presentan por debajo de las 300 ppm de solidos disueltos totales.



Figura 38 – Tercer Prototipo

### Tercer prototipo

El tercer prototipo que se fabricó para el desarrollo del proyecto contempló proporciones del refrigerador y un compartimento para los componentes de electrónica.

Se adquirieron generadores de ozono de menor tamaño de 300 mg/hr de corriente directa lo que facilitó diseñar una tarjeta electrónica para controlar la concentración de ozono en el agua por medio del sensor ORP.

Para el desarrollo de la etapa de control, primero se adquirió la señal de ORP para su posterior acondicionamiento que consta de un filtro electrónico para disminuir ruido en las lecturas.

Seguidamente se utilizaron amplificadores operaciones para amplificar la señal y se procesó en el software del microcontrolador utilizando un filtro digital para suavizarla.

Ya con el procesamiento de la señal se comenzó a diseñar un controlador proporcional integral (PI) con un *target* de 850 mV. Para controlar el generador de ozono se utilizó un transistor con una señal de PWM.

En la figura 40 se presenta el comportamiento sub – amortiguado la señal de control.

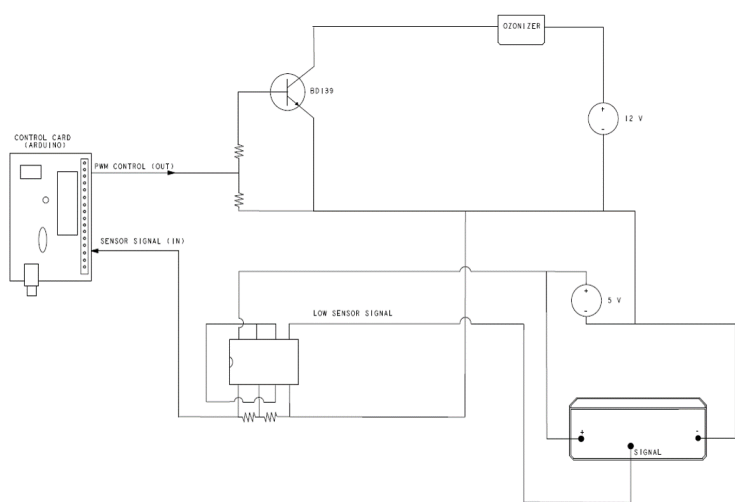


Figura 39 – Diagrama de la tarjeta de control

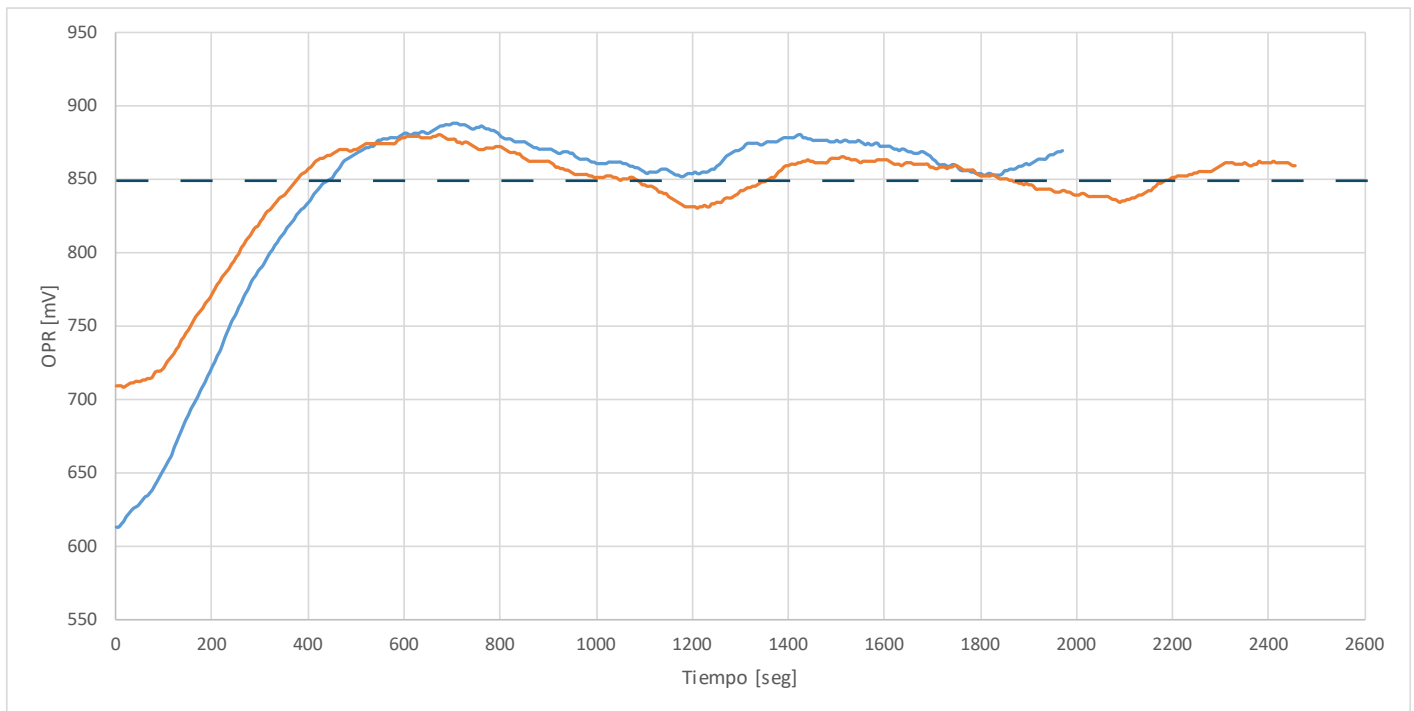


figura 40 – Señal de control PI

La figura anterior representa el comportamiento del control PI con dos sintonizaciones distintas. Con el diseño de este algoritmo de control queda demostrado la utilidad del sensor óxido – reducción como retroalimentación al sistema para controlar la concentración de ozono en el agua. En el capítulo siguiente se decidirá si es necesario la implementación de este controlador o bien la de un control de prendido y apagado.



# 5

# CAPÍTULO

Tercera etapa del proyecto



# 5.1 EVALUACIÓN DE LA DESINFECCIÓN

Para esta tercera etapa del proyecto, ya se tiene un concepto de solución del sistema de purificación de agua cuyos elementos se han validado con pruebas y prototipos. El siguiente paso fue evaluar la desinfección del agua provocado por el ozono.

Se investigó durante varias semanas la técnica más útil para la evaluación de la desinfección. En el proceso y con varias pruebas fallidas se determinó una manera de realizar la validación cuyo procedimiento se describe en la siguiente sección.

La técnica para evaluar la desinfección causada por el ozono está basada en la norma oficial mexicana NOM-112-SSA1-1994, Bienes y servicios. Determinación de bacterias coliformes. Técnica del número más probable.


## 5.1.1

### Proceso

Para el desarrollo de estas pruebas se utilizó el tercer prototipo fabricado ya que su configuración es la más parecida al diseño conceptual final del purificador.

La idea general es conocer el número de bacterias antes y después de la desinfección con ozono y realizar las respectivas comparaciones.

A continuación, se enumera el procedimiento para la evaluación de la desinfección de manera resumida.



El procedimiento anterior es un resumen general del método para la cuantificación de las bacterias, las particularidades de las pruebas son las siguientes:

- Se utilizó agua purificada embotellada para estandarizar la calidad de agua y minimizar los factores de ruido como cloro, sales, metales etc.
- El volumen de agua para cada una de las pruebas fue de dos litros de acuerdo con las especificaciones del tanque de almacenamiento.
- Se hace uso de las placas RAC (*rapid aerobic count plate*) Petrifilm de 3M por facilidad de uso. Además, se adquirió material y equipo de laboratorio.
- El área de trabajo del laboratorio, así como el material y equipo se somete a un proceso de esterilización para eliminar falso positivos en los resultados.
- Para casos de repetividad se realiza la inoculación e incubación de varias placas Petrifilm en cada prueba antes y después de la desinfección.
- En cada una de las placas se escriben leyendas para la identificación y posterior análisis.

## 5.1.2

### Resultados

Con el método descrito anteriormente, se realizaron alrededor de 12 corridas con el propósito de construir una curva de desinfección del ozono en agua.

Se estima que midiendo la oxidación con el sensor ORP se tiene la certeza de la eliminación de las bacterias, siempre y cuando se sobrepase el límite de desinfección que según la literatura consultada es por encima de 600 mV.

De esta manera, se espera que el control del sistema no sea con base en el tiempo, sino más bien con respecto a la calidad del agua.

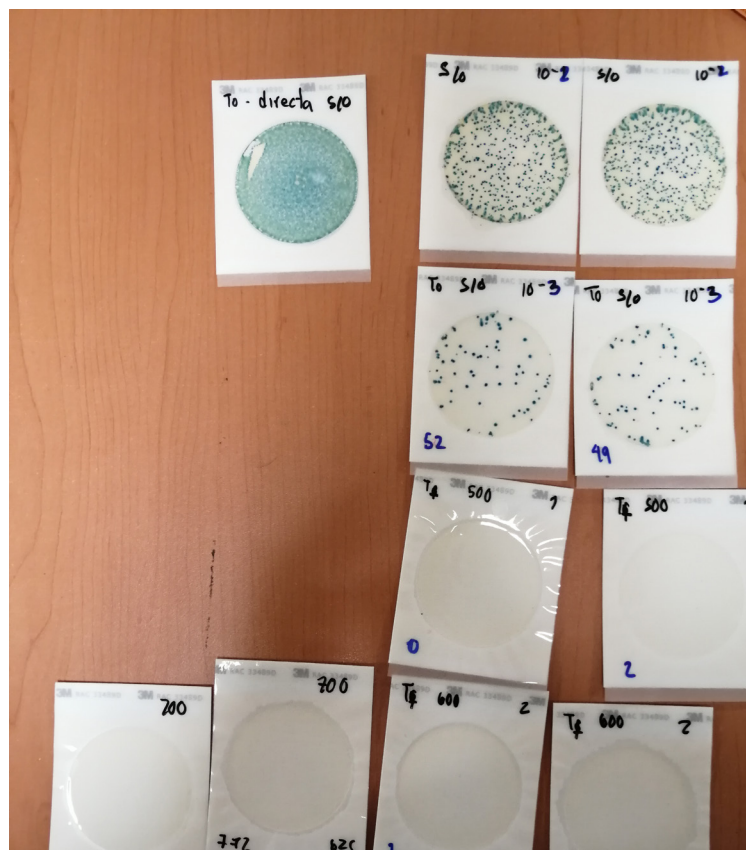
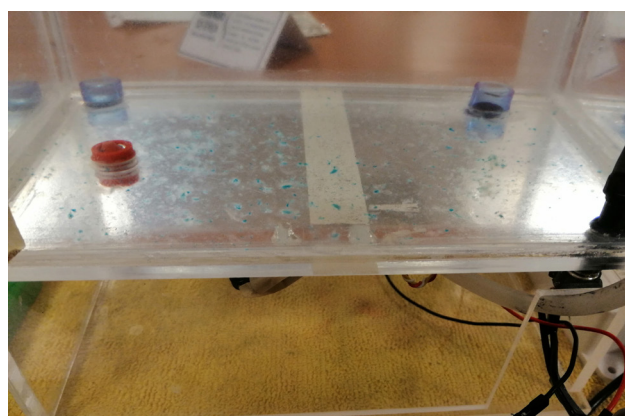
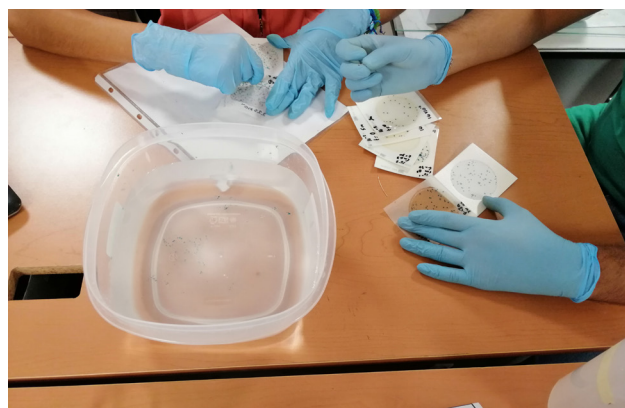



Figura 42 - Pruebas de la evaluación de la desinfección



Por ejemplo, si agua de la llave está muy contaminada el tiempo de desinfección se prolongará, en caso contrario, si la contaminación es baja el tiempo será menor. Esta hipótesis se pudo comprobar con las pruebas tal como se presenta a continuación.

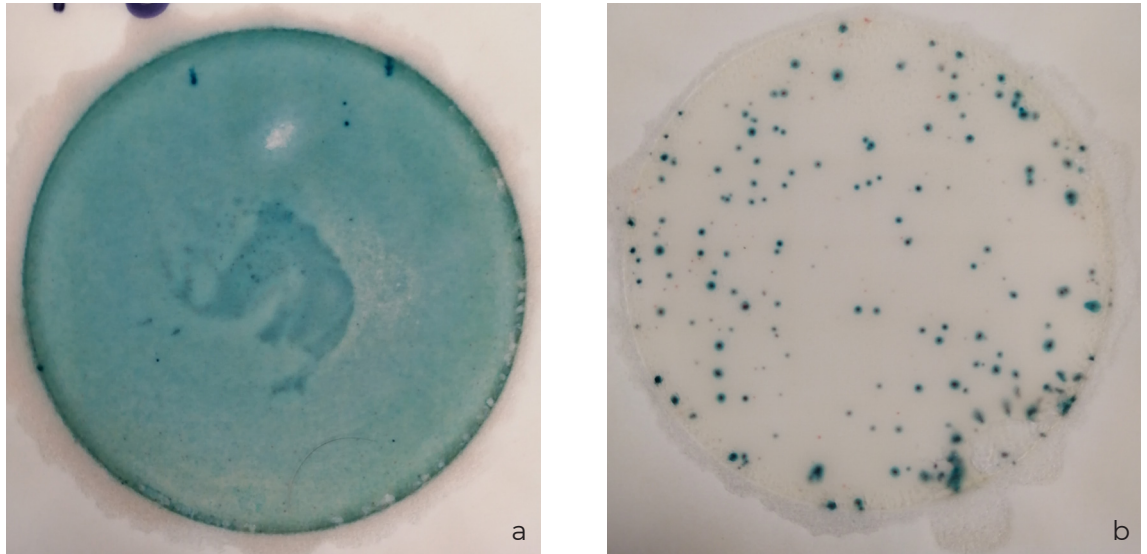


Figura 43 - Prueba con alta contaminación  
a) bacterias antes de la desinfección, b) bacterias después de la desinfección

En la figura 43 a) se aprecia cómo la placa está repleta de unidades formadoras de colonias UFC/gr y en la figura 43 b) se observa el decrecimiento bacteriano después de un tratamiento con ozono de 1.5 horas sin alcanzar el nivel de desinfección.

En la Figura 44a) puede observarse las colonias de bacterias. (Cada punto verde constituye una Unidad Formadora de Colonia). En la figura 44b) puede verse la presencia nula de colonias, una vez alcanzado el límite de desinfección con ozono por encima de 600 mV en un tiempo de promedio de 7 minutos.



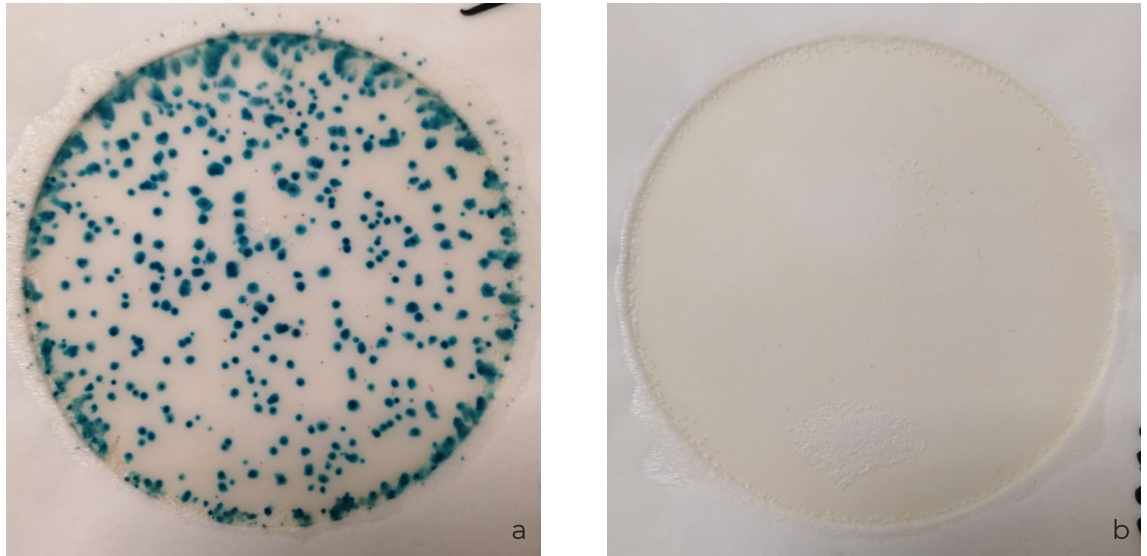


Figura 44 - Prueba con baja contaminación  
 a) bacterias antes de la desinfección, b) bacterias después de la desinfección

En resumen, con la retroalimentación del sensor ORP se puede asegurar la desinfección del agua tratada con ozono tomando en cuenta la contaminación de la misma. Cabe mencionar que el número de bacterias inoculadas está muy por encima de los encontrados en el agua de la llave cuyo conteo inicial en las pruebas fue nulo debido a su pre-tratamiento con cloro al igual del agua que se puede encontrar en tinacos y/o cisternas.

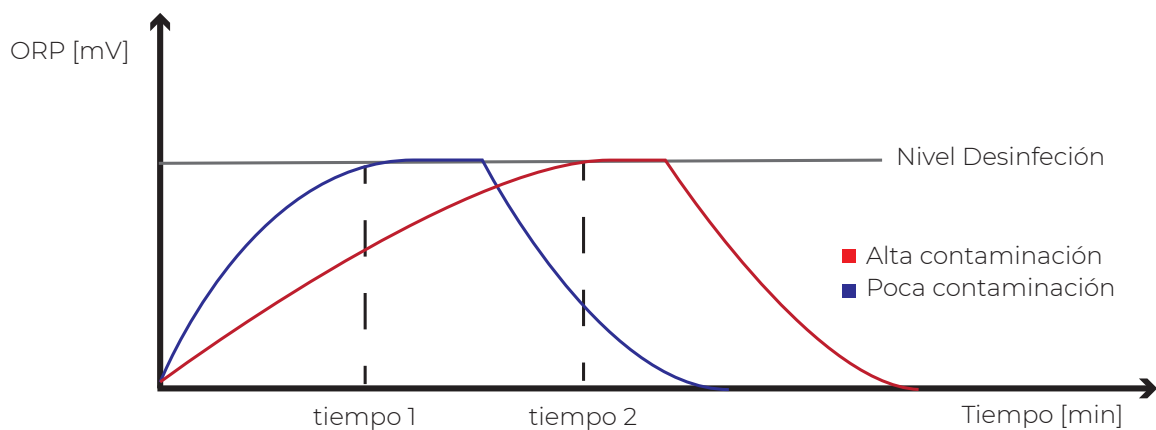


Figura 45 – Comportamiento del ozono con respecto a la contaminación del agua

Finalmente, en la siguiente figura se presenta la curva construida con el conteo de UFC/gr antes y después del tratamiento con ozono. Paralelamente se midió la oxidación con el sensor oxido reducción. La media de unidades formadoras de colonia inoculadas fue de 50,000 y como puede apreciarse hay una reducción a cero prácticamente desde 500 mV. El tiempo de ozonización promedio fue de 6 minutos.

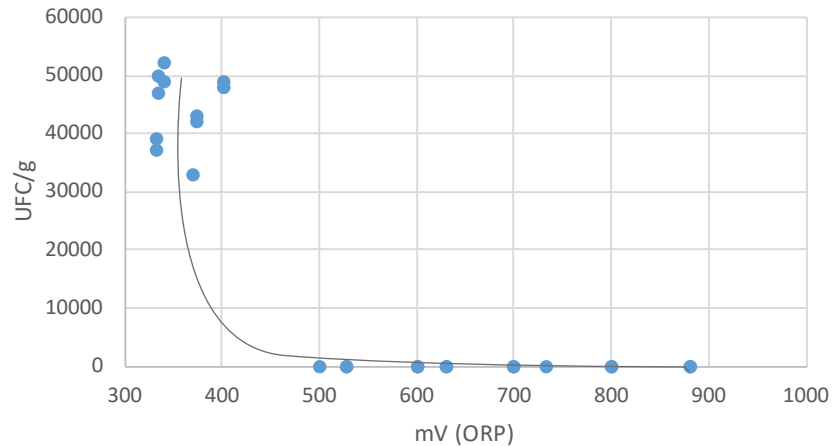


Figura 46 – Conteo de UFC antes y después del tratamiento con ozono

Las pruebas y los resultados encontrados en esta sección de la evaluación de la desinfección permiten entender el comportamiento del ozono como desinfectante. De igual manera, sirve como un primer antecedente para una posible certificación ante la NOM-244-SSA1-2008 “Requisitos sanitarios para Equipos y sustancias germicidas para tratamiento domestico de agua”. En cuyos apartados se encuentra el porcentaje de reducción bacteriana igual o mayor a un 95% de organismos mesófilos aerobios e igual o mayor al 99.99% organismos coliformes totales. También, se indica una carga total de bacterias de 5000 a 10000 UFC/ml y una concentración de organismos coliformes totales mayor o igual 100 UFC/mL.

## 5.2 DISEÑO A DETALLE

Una vez finalizada la etapa de evaluación de la desinfección se prosiguió a detallar el producto y sus componentes con el fin de diseñar y fabricar el prototipo final, montarlo en el refrigerador y realizar pruebas con usuarios.

### 5.2.1 Inyector venturi

Uno de los componentes esenciales para el subsistema de mezclado es el inyector venturi que como se describió en secciones pasadas, es el método más eficiente para realizar la mezcla ozono – agua.

Un inyector del tipo Venturi genera succión debido al diferencial de presión negativa que se produce entre su entrada y su salida al reducir el diámetro de garganta y acelerar la velocidad del fluido debido a éste decremento en los diámetros [27].

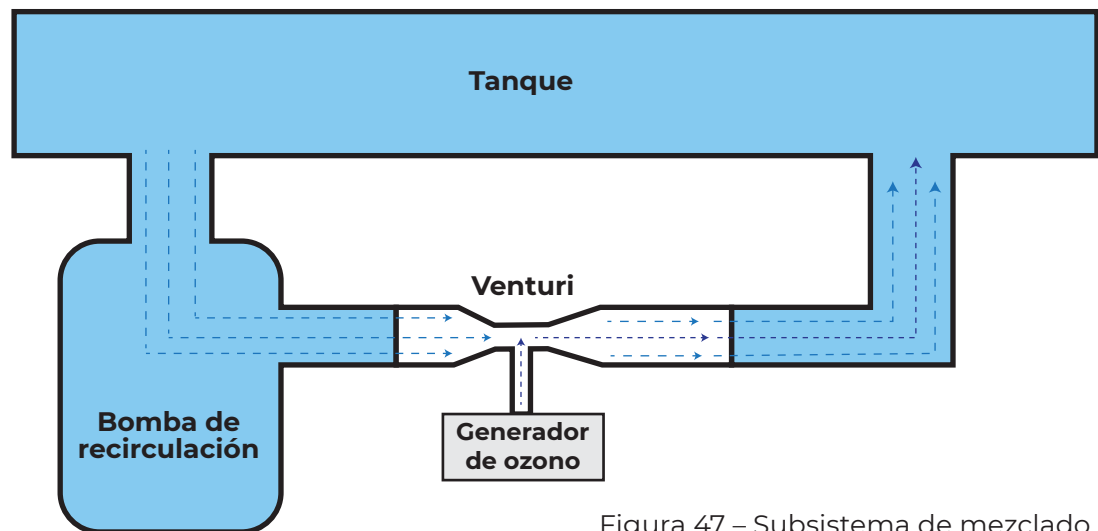


Figura 47 – Subsistema de mezclado

En la Figura 47 está representado el subsistema de mezclado, la bomba de recirculación succiona el agua depositada en el tanque y ésta pasa por el inyector venturi que a su vez succiona el ozono del generador y realiza la mezcla en forma de burbujas para que finalmente se reincorpore en el tanque.

Dicho lo anterior y basándose en la guía de diseño del capítulo 3 del libro *Orifice Plates and Venturi Tubes* [28] se tiene:

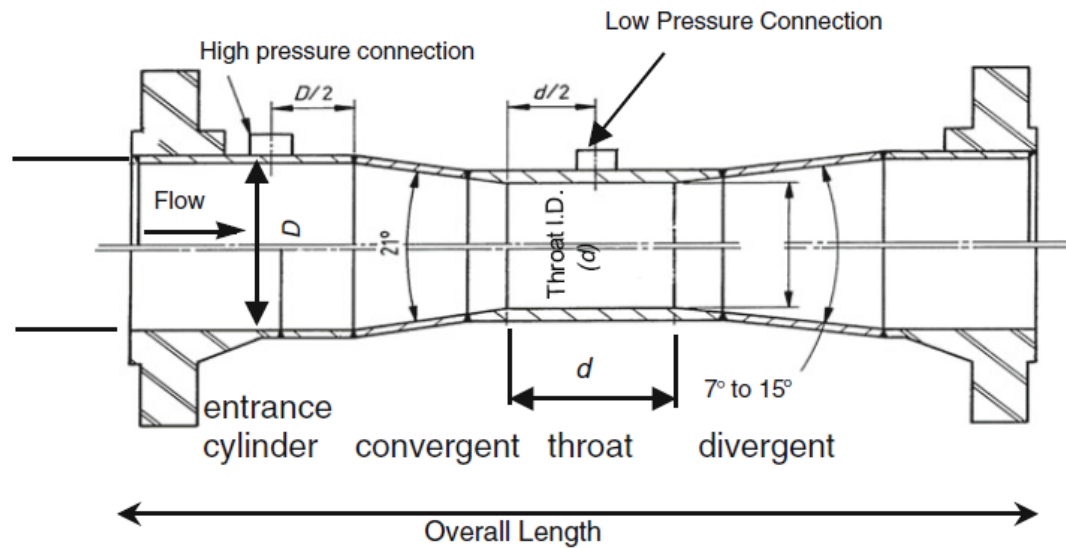


Figura 48 – Inyector venturi clásico [28]

Según la guía de diseño, el ángulo convergente recomendado es de 21°, mientras en ángulo divergente debe estar entre 7 y 15 grados. La relación de diámetros máxima recomendada es de 0.7. Además, la primera sección longitudinal del venturi debe ser 3 veces el diámetro de la tubería y la sección final 4 veces dicha medida.

Diámetro de la tubería [D]	0.189 in
Diámetro de garganta [d]	0.270 in
Relación de diámetros [ $\beta = d/D$ ]	0.7
Ángulo convergente	21°
Ángulo divergente	7°

Figura 49 – Parámetros de diseño del inyector venturi

## 5.2.2

### Sensor de nivel de agua

Con el fin de diseñar un proceso semiautomático del comienzo de la desinfección de agua con ozono y teniendo como antecedente una aplicación similar de un proyecto del colaborador, se propuso la implementación de un sensor del nivel de agua en el tanque de almacenamiento.

El propósito del sensor de nivel es activar el subsistema de mezclado una vez que el usuario haya depositado agua para purificar sin importar el volumen. En este sentido, la señal de control sería la estabilidad del nivel de agua en el tanque. Además, dicha medición podría dar información con respecto al volumen de agua depositada y enviar retroalimentación al usuario cuando no existiera agua para purificar.

La propuesta de diseño es utilizar un par de sensores opto - reflectivos, caracterizar la curva de comportamiento con base en el volumen de agua, así como generar un algoritmo de detección de estabilidad de nivel, esto último se explicará en secciones posteriores.

En la Figura 50 se presenta la configuración propuesta para la colocación del emisor y el receptor. El par infrarrojo y el fototransistor están alineados pero inclinados de tal manera que se pueda medir todo el volumen del agua en el tanque.

El diagrama esquemático se muestra en la siguiente Figura 51. Los valores de la resistencia para limitar la corriente en el emisor son  $R_E = 120 \Omega$  y para el receptor es de  $R_R = 1k\Omega$ . El objetivo de



Figura 50 - Configuración del sensor de nivel

la configuración electrónica es ampliar el rango de valores analógicos que digitalizara en convertidor analógico digital del microcontrolador.

Una vez diseñada la configuración electrónica, se procedió a la colocación y posterior caracterización de la curva de comportamiento que se observa en la figura 52.

En dicha figura se aprecia la relación entre los litros y la lectura del convertidor analógico digital. De esta manera y con el polinomio obtenido se conoce el volumen de agua dependiendo de la lectura del sensor en un rango de 0 a 4 litros.

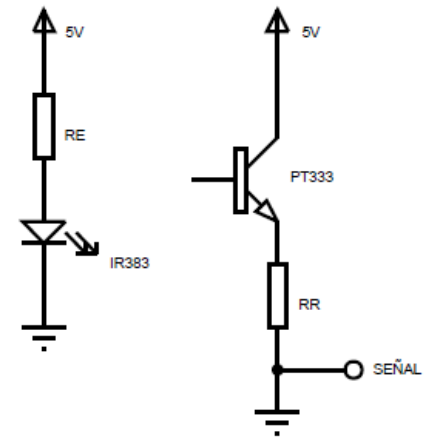


Figura 51 – Diagrama electrónico del sensor de nivel.

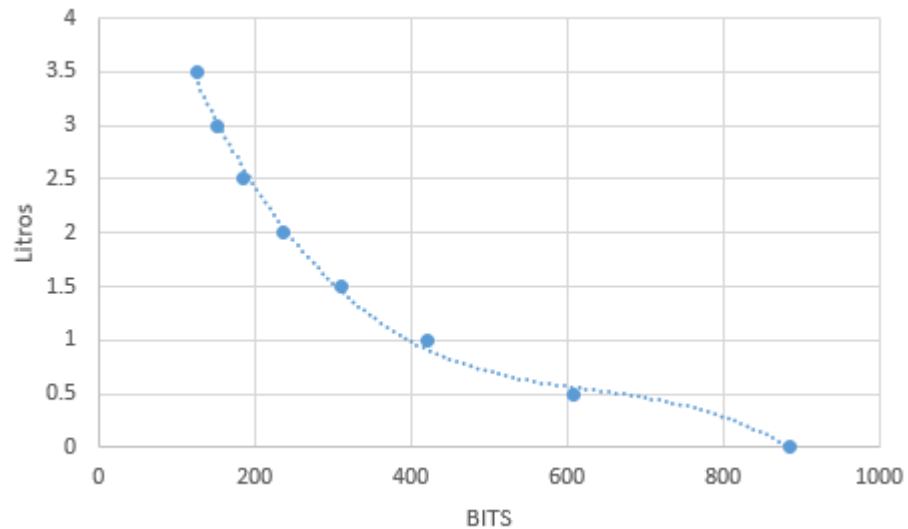


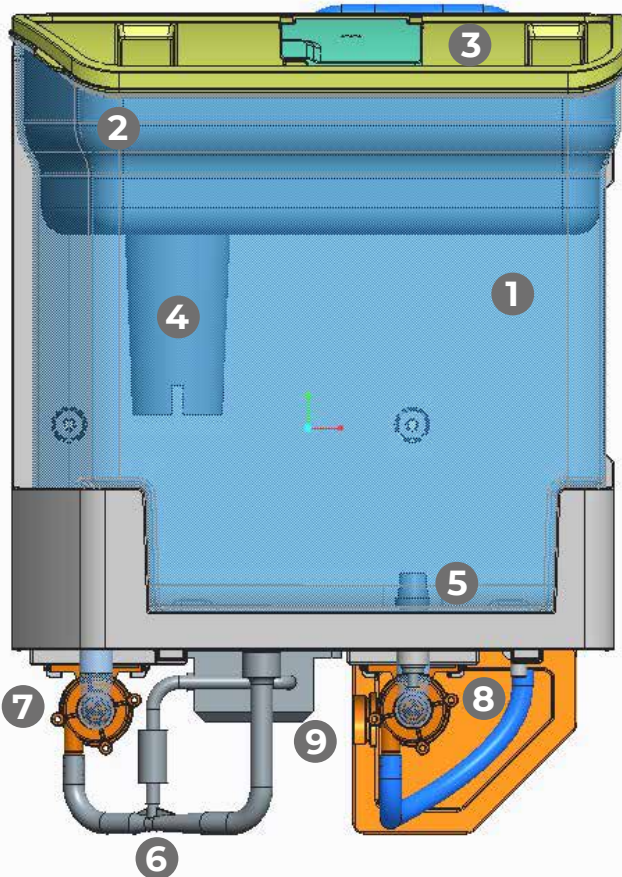
Figura 52 – Caracterización del sensor en relación de los litros y el ADC del microcontrolador.

## 5.2.3

### Modelado CAD

Como parte del proceso de diseño y con la información descrita en capítulos y secciones anteriores, se realizó el modelado por computadora del concepto de solución del sistema de purificación de agua para refrigeradores.

El modelado CAD tiene como antecedente un proyecto a cargo de Orlando Esquivel cuyo objetivo fue el diseño de un despachador semiautomático para el refrigerador con capacidad de 5 litros. Tomando como referencia su trabajo se realizaron las modificaciones pertinentes quedando el diseño de la siguiente manera:



#### Partes del modelo por computadora

1. Tanque de almacenamiento de agua purificada.
2. Tanque de llenado para la purificación.
3. Tapa del tanque de llenado.
4. Filtro de carbón activado e intercambio iónico
5. Sensor ORP.
6. Inyector venturi y válvula de no retorno.
7. Bomba de recirculación de agua para el purificado.
8. Bomba para el dispensado de agua purificada.
9. Generador de ozono.

Figura 53 - Modelado por computadora

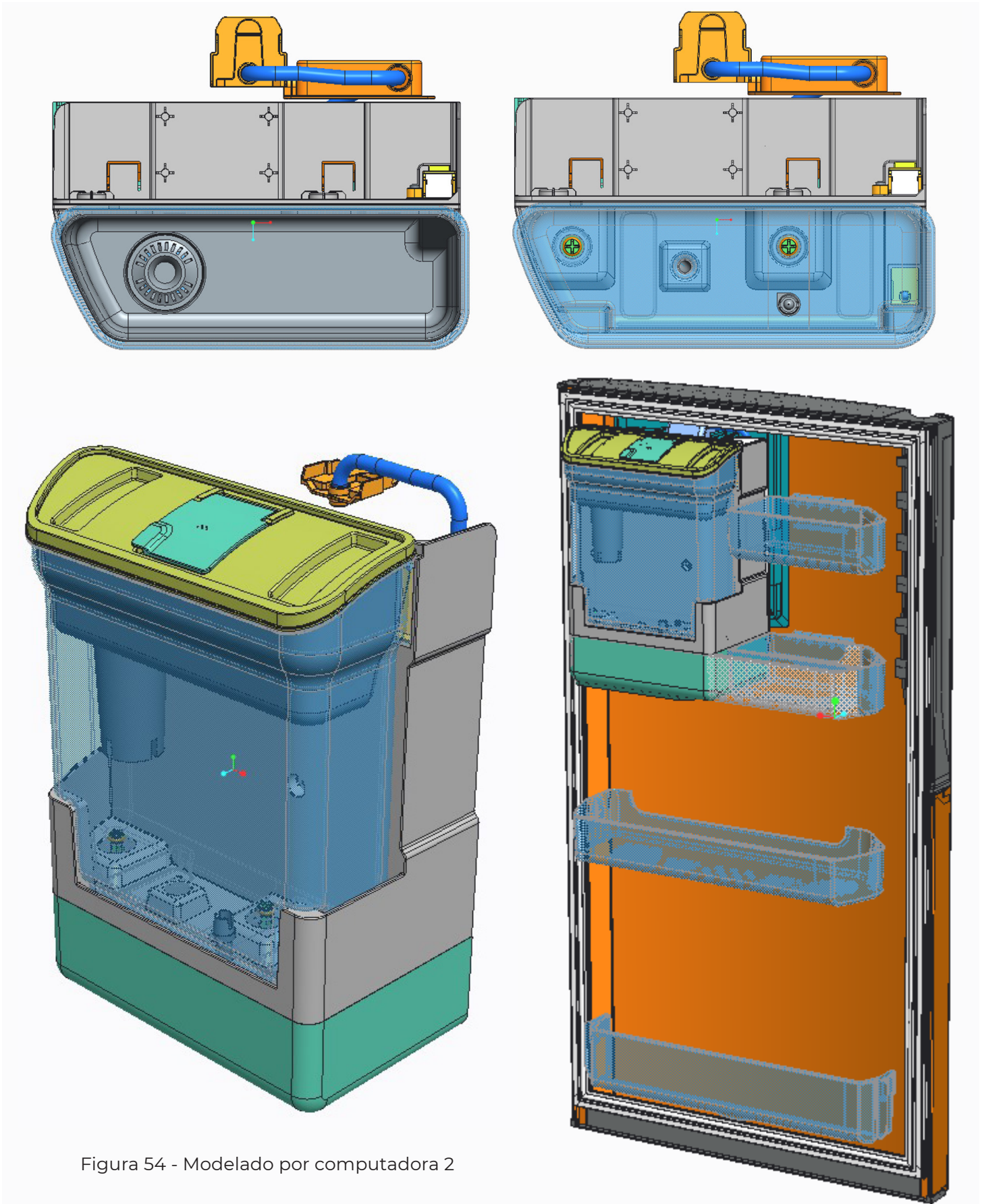


Figura 54 - Modelado por computadora 2



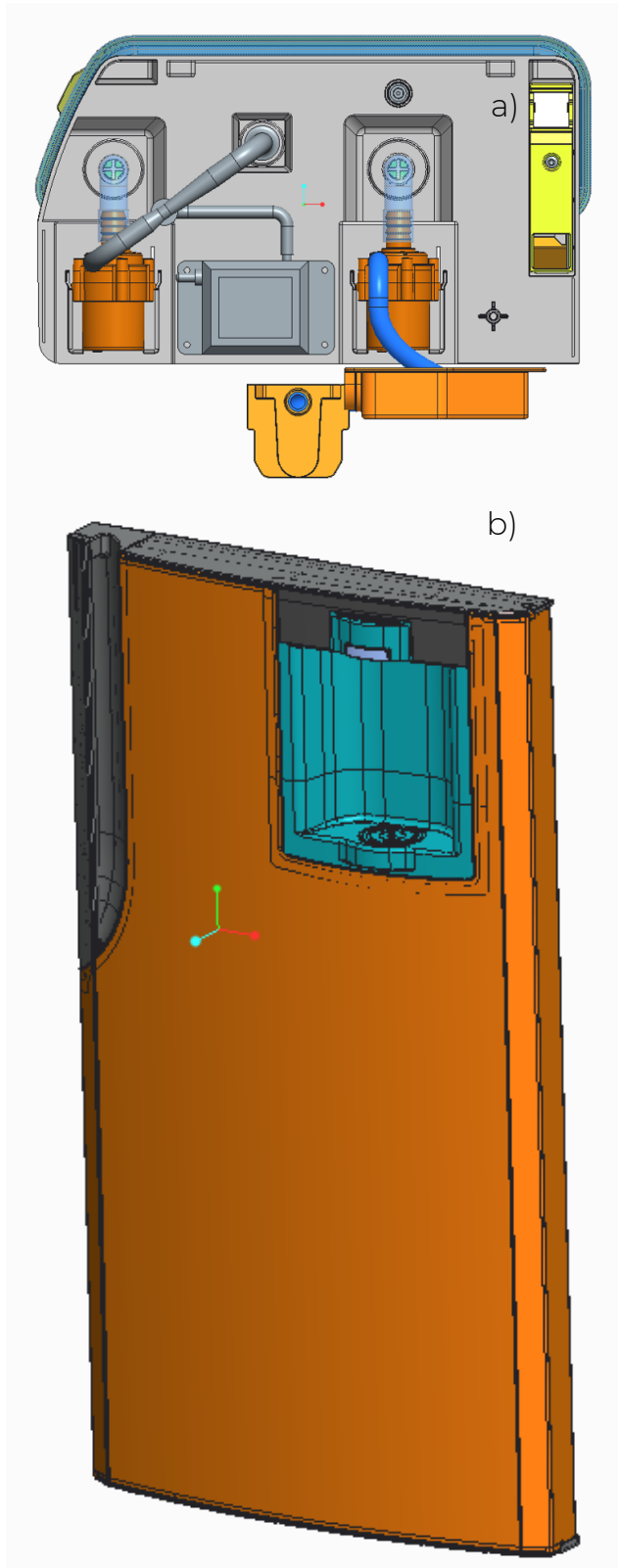


Figura 55 – a) Sensor de nivel, b) Puerta

En las Figuras 54 y 55 se muestran algunas de las vistas isométricas del ensamble de partes del modelo CAD. También se observan las proporciones del sistema de purificación con respecto a la puerta del modelo SIRIUS de Mabe.

El volumen de agua para la especificación del tanque de llenado es de dos litros y del tanque de almacenamiento de agua purificada es de 3 respectivamente. Los cambios realizados a la actual unidad SIRIUS son menores, aunque en una etapa posterior y de trabajo a futuro debe revisarse las afectaciones al subsistema de estructuras, espumado y aditamentos del refrigerador.

## 5.2.4

### Tarjeta de control

Uno de los elementos más importantes para el funcionamiento del sistema de purificación de agua es la tarjeta de control. En ella, se adquieren las señales provenientes de los sensores que a su vez son acondicionadas (eliminación del ruido electrónico, amplificación, etc.) para finalmente ser procesadas por un microcontrolador programable que contiene los algoritmos de control del sistema.

Para el caso particular del proyecto se diseñó una tarjeta electrónica que permita controlar las funciones del prendido y apagado de las bombas de recirculación, dispensado, así como del generador de ozono a través de las señales emitidas tanto por el sensor de nivel, como el sensor ORP.

La primera señal que debe ser acondicionada es la medida por el sensor óxido - reducción con una etapa de filtrado y amplificación para un mejor procesamiento analógico. En la figura 56 se presenta el diagrama esquemático del acondicionamiento de la señal.

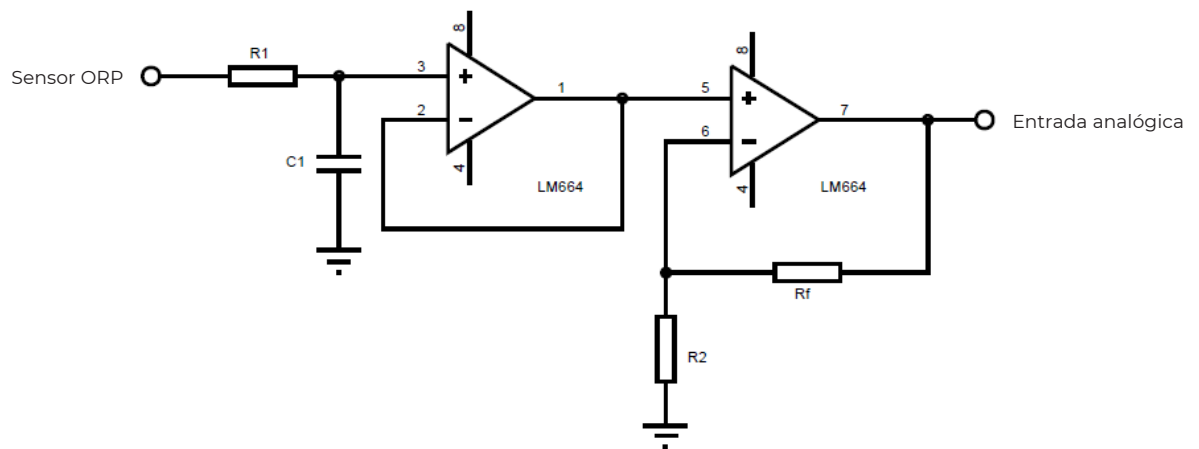


Figura 56- Diagrama de acondicionamiento ORP

La primera parte de esquemático es un filtro paso bajas pasivo de primer orden de una resistencia y un condensador que como su nombre indica solo permite el paso de frecuencias bajas y atenúa las frecuencias altas. El valor de la resistencia es  $R1=1\text{ M}\Omega$  y el condensador

es  $C1 = 470 \text{ nF}$  lo que permite atenuar frecuencias por encima de 300 Hz según la ecuación  $F_c = 1/(2\pi \cdot R1 \cdot C1)$ .

Para la amplificación de la señal se utilizó el integrado LM664 un doble amplificador operacional rail to rail, lo que significa que proporciona toda la diferencia de potencial de la fuente de voltaje. La configuración usada en la primera parte es un seguidor de voltaje para después utilizar un amplificador no inversor con una ganancia de 2.5 con  $R2 = 1 \text{ k}\Omega$  y  $R_f = 1.5 \text{ k}\Omega$ .

Para controlar el encendido y apagado del generador de ozono se utiliza un transistor en una configuración de interruptor, que es accionado por una señal digital del microcontrolador. Se le adicionó un LED en paralelo para conocer el estado del mismo. En la siguiente Figura 57 se presenta el diagrama esquemático con valores de las resistencias  $R1 = R2 = 330 \Omega$ ,  $R3 = 270 \Omega$ .

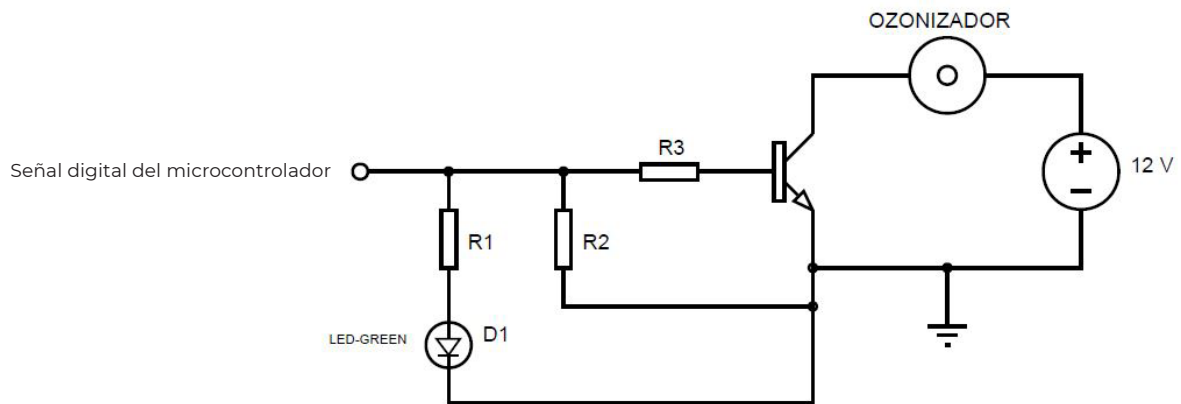


Figura 57 – Diagrama esquemático generador de ozono

El último diagrama esquemático presentado es la configuración para el encendido y apagado de las bombas de recirculación y dispensado. Para estos elementos se utilizó un MOSFET por la corriente requerida, un diodo como protección y una fuente de alimentación de 12 volts. Los valores de las resistencias  $R4 = 330 \Omega$  y  $R5 = 10 \text{ k}\Omega$ . El diagrama se observa en la siguiente Figura.

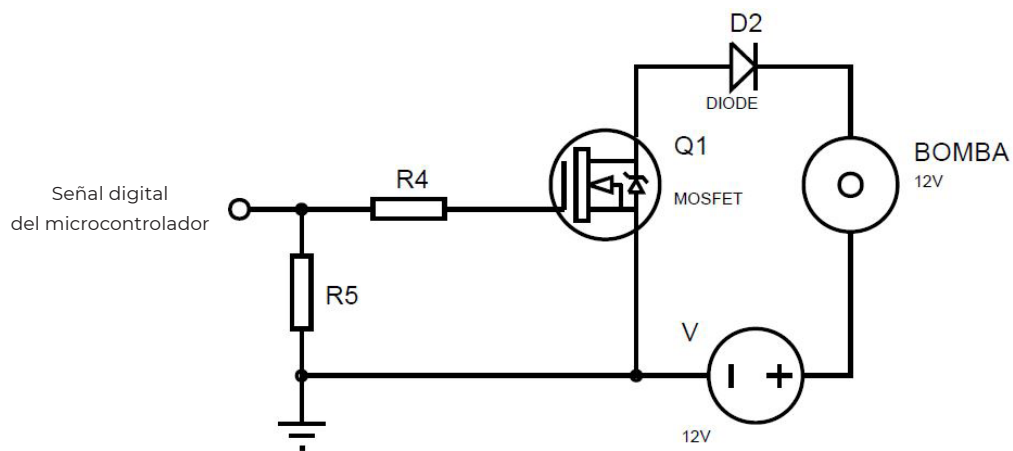


Figura 58 – Diagrama esquemático bombas de agua

Una vez diseñados los diagramas esquemáticos, se procedió a la fabricación de la tarjeta electrónica que contiene el acondicionamiento de la señal sensor ORP, la activación de generador de ozono y las dos bombas, además se agregaron las borneras y arneses correspondientes. La tarjeta de control se presenta en la siguiente imagen.

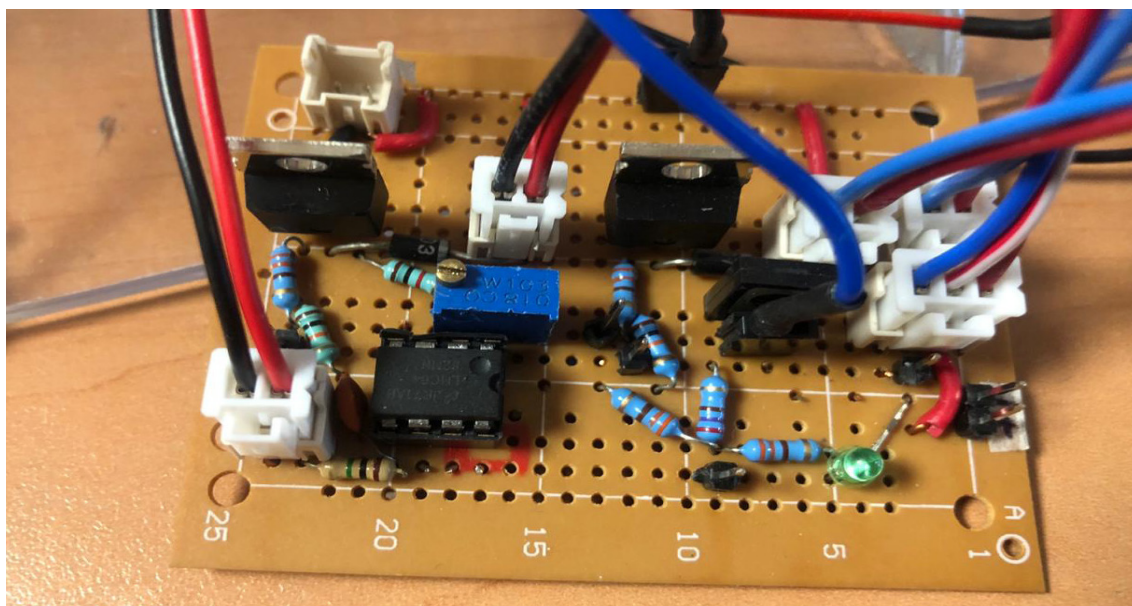


Figura 59 – Tarjeta electrónica de control

## 5.3 FABRICACIÓN DEL PROTOTIPO FINAL



Figura 60 – Fabricación del prototipo

Una vez desarrollado el diseño a detalle del producto y de los elementos importantes para el funcionamiento, se procedió a la fabricación del prototipo final para su evaluación con usuarios.

El proceso inicio con la realización de los planos de fabricación seguido de la búsqueda de alternativas para la manufactura. En un principio se pensó en un modelo completo hecho por manufactura aditiva, sin embargo, los altos costos de dicho procedimiento limito la elaboración solo a ciertos componentes de geometría irregular.

Dicho lo anterior, se comenzó con el trazado y corte de las diferentes vistas del prototipo para después pegarlas, resanarlas y pintárlas.

En todo este periodo de fabricación se utilizaron los materiales, herramientas y equipos del taller de modelos del colaborador, el personal del área siempre tuvo excelente disposición y en todo momento ayudaron.

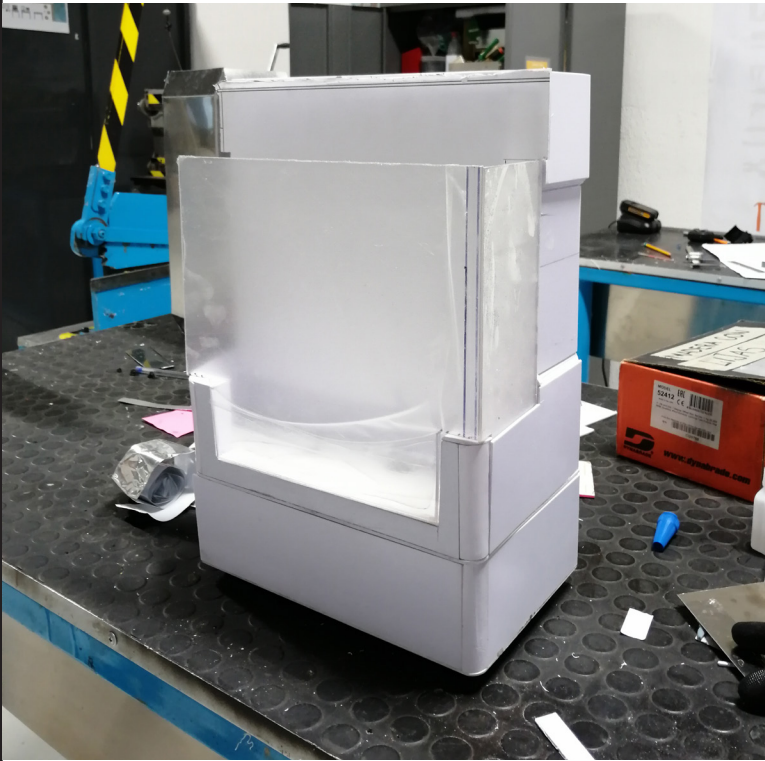


Figura 61 – Fabricación del prototipo 2



Figura 62 – Prototipo final

En las siguientes figuras se presenta parte del proceso de fabricación del prototipo.

Los materiales utilizados para la base del tanque fueron poliestireno de alto impacto (HIPS) que es lo utilizado en los interiores del refrigerador y que son moldeados por termo formado. En el caso de los tanques de agua se utilizó PET transparente, además, se eliminaron los redondeos para facilitar el proceso de fabricación.

La apariencia del prototipo final, se presenta en la Figura 62, en ella se han montado los otros elementos que conforman el sistema de purificación de agua, como lo son el filtro, las bombas de recirculación, dispensado, el generador de ozono, el inyector venturi, así como el sensor de nivel y el sensor ORP.



# 6

# CAPÍTULO

Cuarta etapa del proyecto



# 6.1 EXPERIENCIA DE USUARIO

Este último capítulo trata sobre el diseño de la experiencia de usuario a través de la comprensión de las interacciones con el producto, esto con el propósito de generar percepciones positivas en el uso del mismo. Para esta etapa del proyecto se realizó una colaboración con Fernanda Santiago del equipo de interfaces de usuario.

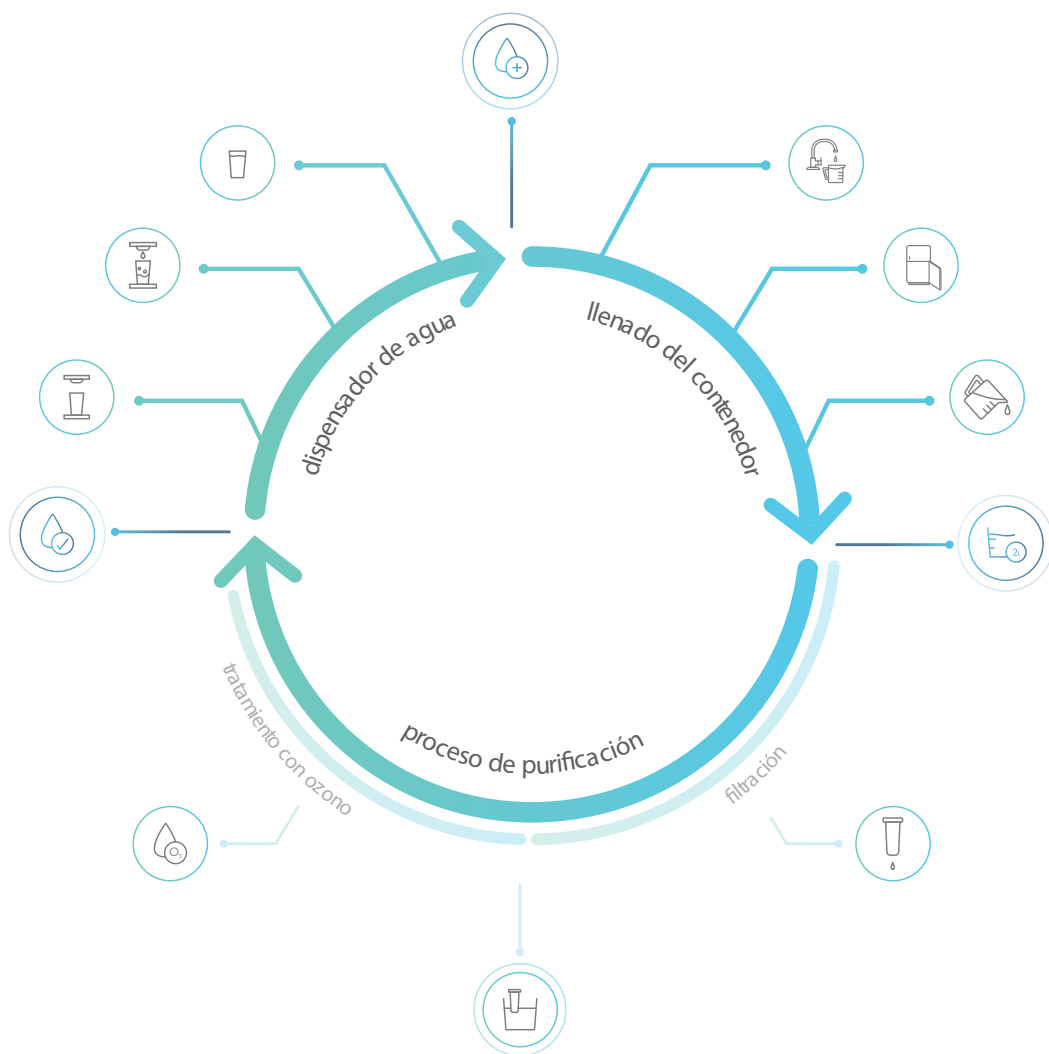


Figura 63 – Interacciones con el producto



En la Figura 63 se muestran las etapas que definen las interacciones entre el usuario y el sistema de purificación:

La **primera** es al llenar el contenedor con agua a purificar que comienza con el llenado de algún recipiente con agua de la llave, seguido de abrir la puerta del refrigerador para finalmente vaciar el agua y que el proceso de purificación comience.

La **segunda** etapa es el proceso de filtración y tratamiento con ozono en la que no hay una interacción directa del usuario con el producto.

La **tercera** etapa es el dispensado de agua purificada que inicia con la colocación del recipiente, seguida de la opción de llenado y finaliza con la remoción del mismo.

## 6.1.1

### Mapa de viaje de usuario

Como parte del diseño de la experiencia de usuario se ha determinado la necesidad de diseñar un interfaz que vincule al cliente con el producto a través de las distintas interacciones.

En este sentido, se utilizó la técnica del mapa de viaje de usuario con la finalidad de conocer las necesidades en cada etapa del proceso, proponer una posible retroalimentación y apariencia de la interfaz.

En las siguientes páginas se presenta dicha técnica.

etapa



## llenado del contenedor

interacción



revisa el nivel de agua purificada >



llenar un recipiente con agua de la llave >



abrir el refrigerador >



llenar el contenedor

necesidad



saber si hay agua disponible para beber  
+  
volumen de agua que puede verter en el contenedor

retroalimentación

notifica que ya no hay agua purificada y es necesario llenar el depósito para iniciar el proceso

indica que ya se ha agregado suficiente agua

posible apariencia

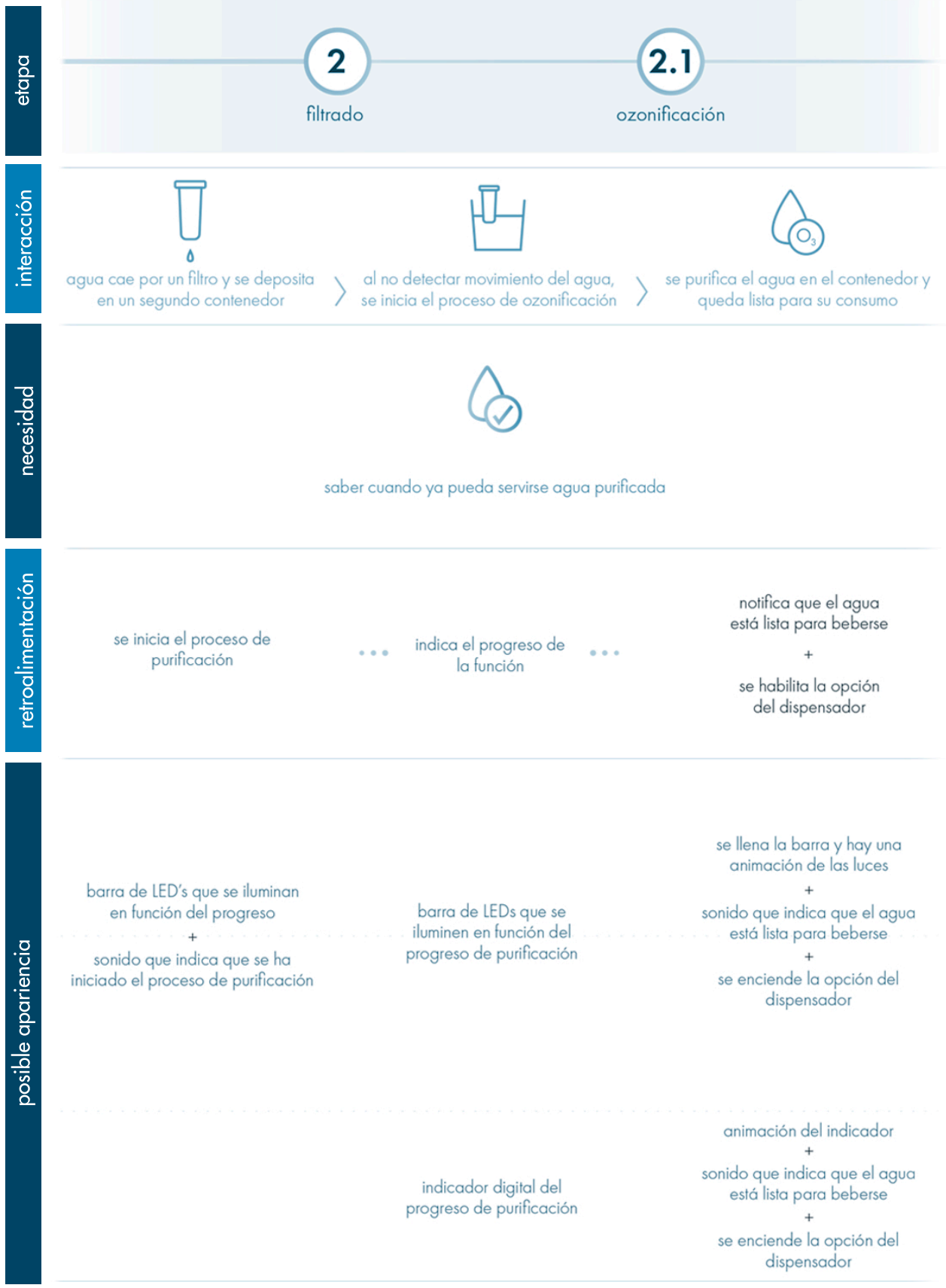
LED que se encienda en cuanto se detecte que no hay agua

el contenedor posee marcas que le indican al usuario sobre la cantidad de agua que puede introducir

barra con indicador del nivel de agua

barra que cambia de color en función del volumen de agua almacenado en el tanque

sonido que indica que ha llegado al límite de volumen que el usuario puede verter en el contenedor



etapa

interacción

necesidad

retroalimentación

posible apariencia

3

pure water  
retrieval

\*

agua permanece  
estancada



colocar un recipiente en  
el espacio designado



seleccionar la opción  
de llenado rápido



remover el recipiente



saber si hay agua disponible para beber y ser dispensada

notifica que está  
llenando

si todavía hay agua  
en el contenedor, la  
opción del  
dispensador sigue  
habilitada

sonido al seleccionar la  
opción para indicar que  
ha sido activada

sonido al seleccionar la  
opción para indicar que  
ha sido activada

+  
cambio en la barra del  
nivel del agua

mensaje intermitente  
"llenando"  
+  
cambio en la barra del  
nivel del agua

desaparece el mensaje



## 6.2.1

### Concepto final

El diseño de la propuesta de la interfaz del sistema de purificación de agua para refrigeradores se fundamenta en los elementos gráficos de la actual interfaz del refrigerador, así como de los indicadores y las operaciones obtenidas por la técnica del mapa de viaje de usuario.

En la Figura 65 puede observarse el diseño de la interfaz que contiene dos botones táctiles, el primero para el dispensado de agua purificada y el segundo que permite desinfectar el agua de nueva cuenta, si el usuario así lo desea. También, contiene dos indicadores que a través de LEDs con una secuencia definida representan el volumen de agua purificada y el estado de purificación respectivamente.



Figura 65 – Interfaz del sistema de purificación de agua

## 6.2.2

### Prototipo

De manera semejante y con el propósito de validar el funcionamiento de la interfaz propuesta en la sección anterior, se desarrolló un prototipo. Cabe señalar la importancia de cada uno de los LEDs que forman parte de los elementos visuales de dicha interfaz. Esto debido a que a través de la secuencia de prendido y apagado transmiten información relacionada con el funcionamiento del purificador.

Los LEDs que integran a la interfaz son, seis para el indicador de nivel de agua, Uno para cada medio litro de agua purificada con rango de 0.5 a 3 litros, uno para cada botón y cuatro para el indicador de purificando. Además, de dos botones táctiles capacitivos que pueden ser simples láminas de algún metal conductor de electricidad.

En las siguiente figura se presenta el diagrama esquemático de la tarjeta de control de la interfaz.

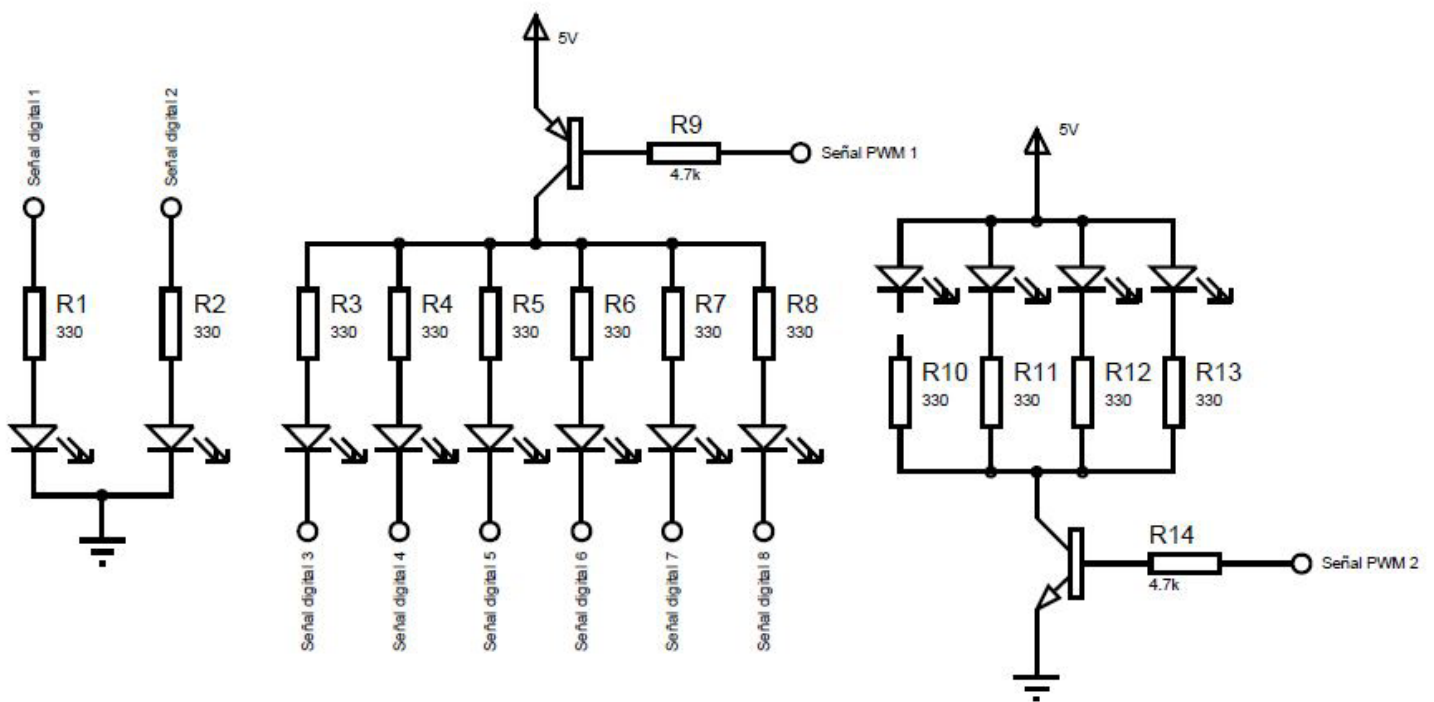


Figura 66 – Diagrama esquemático de la interfaz



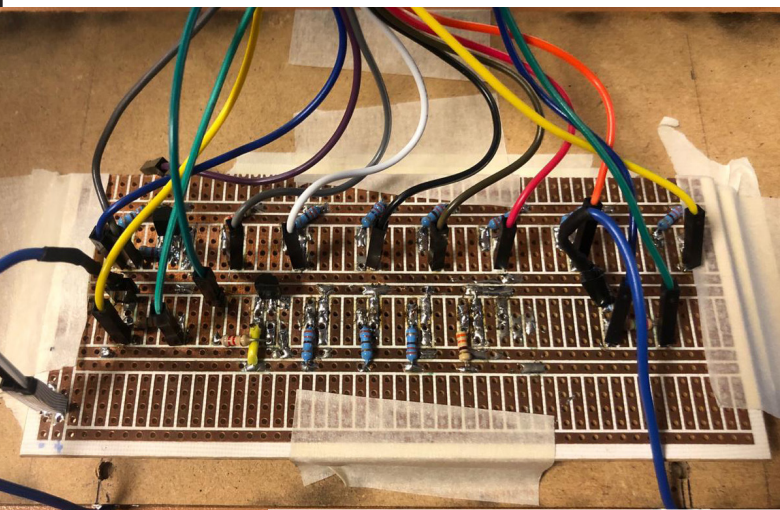


Figura 67 – Tarjeta electrónica

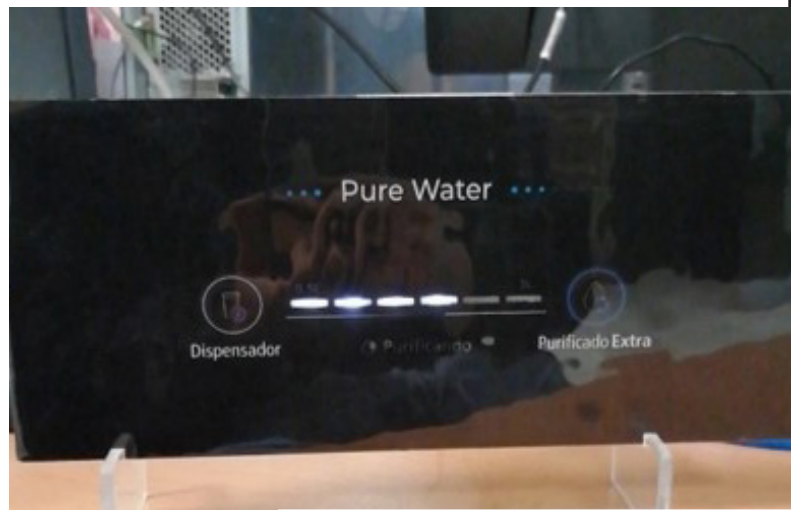


Figura 68 – Prototipo de la interfaz

Para el control de los LEDs del indicador del nivel de agua purificada, se diseñó una configuración en la que cada uno encienda y apague de manera independiente, aunque la intensidad sea la misma para todos y pueda ser controlada por una salida analógica del microcontrolador como lo es la de PWM.

En el caso de los LEDs del indicador purificando y dado que todos se prenden y apagan en conjunto, se diseñó una configuración en paralelo con una señal también PWM que controla la intensidad.

Por otro lado, los botones se conectan directamente al microcontrolador y sus correspondientes LEDs tienen una configuración señal digital - resistencia – ánodo y cátodo a tierra.

Los elementos electrónicos de la tarjeta de control fueron montados y soldados en una PCB, para después ser ensamblados en un corte de MDF diseñado con los orificios de cada LED y botón. Finalmente se añadió una máscara de acetato con los elementos gráficos de la interfaz y se procedió a la realización de pruebas de funcionamiento.

En la Figura 67, se muestra la tarjeta electrónica, mientras en la Figura 68 se presenta el prototipo de la interfaz en las pruebas de funcionamiento.



## EXPERIENCIA FINAL DE USUARIO

La experiencia comienza con el llenado del tanque con agua de la llave, lo que provoca el inicio de la filtración y su posterior desinfección con ozono. En la interfaz se podrá ver las intermitencias del indicador purificando hasta concluir el proceso.

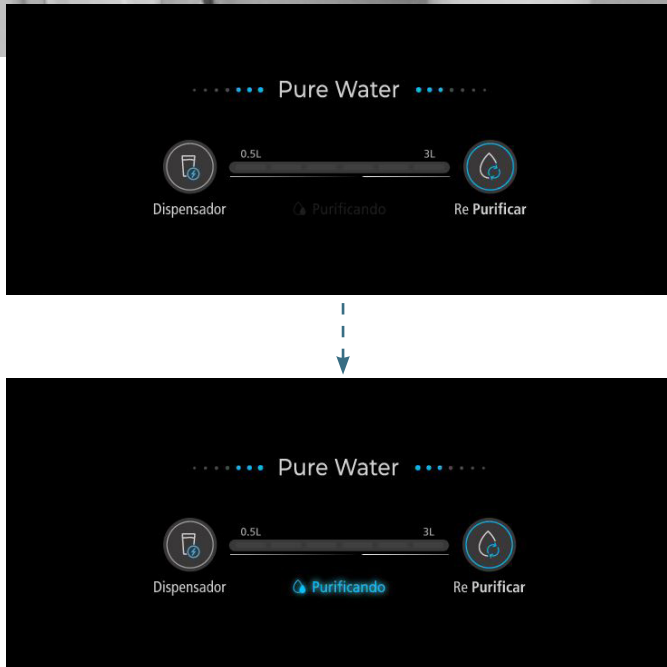
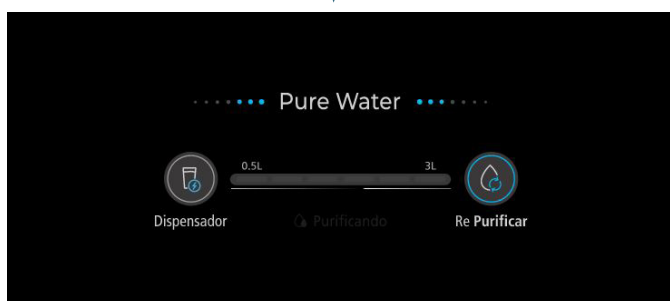
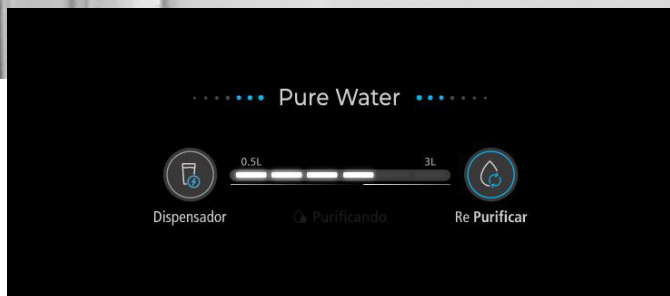


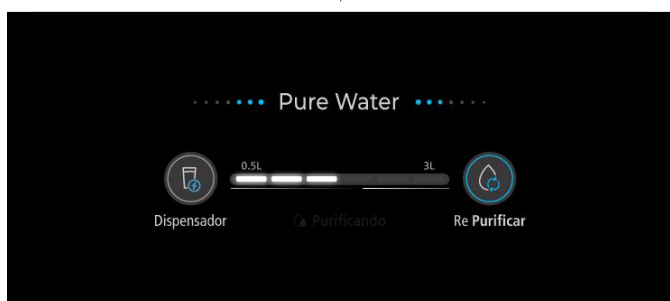
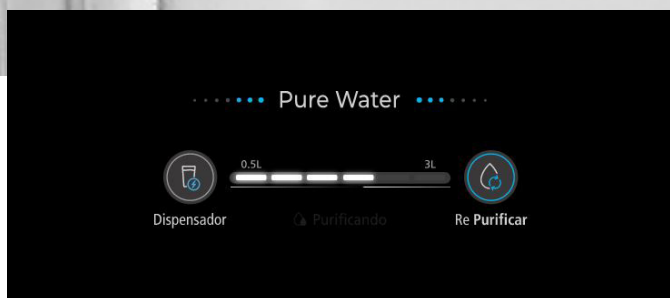
Figura 69 – Proceso de purificación



## CONFIRMACIÓN DEL NIVEL DE AGUA

Cuando el proceso de purificación termine, el indicador de nivel parpadeará 3 veces y mostrará el volumen actual de agua purificada.

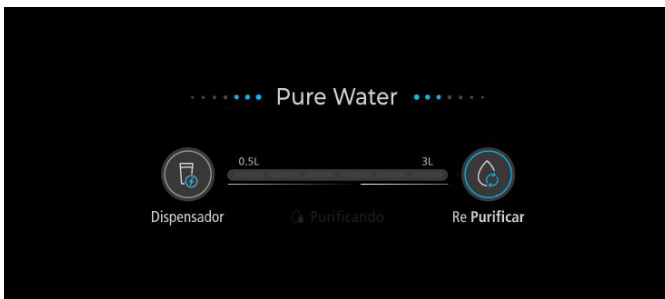
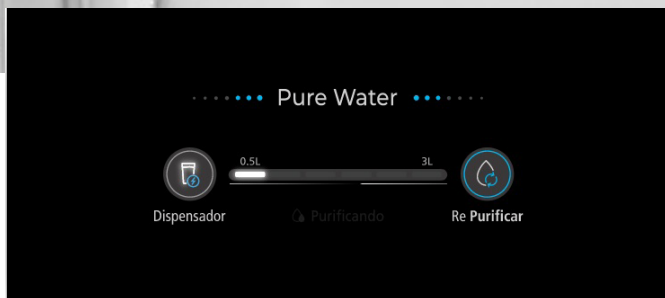
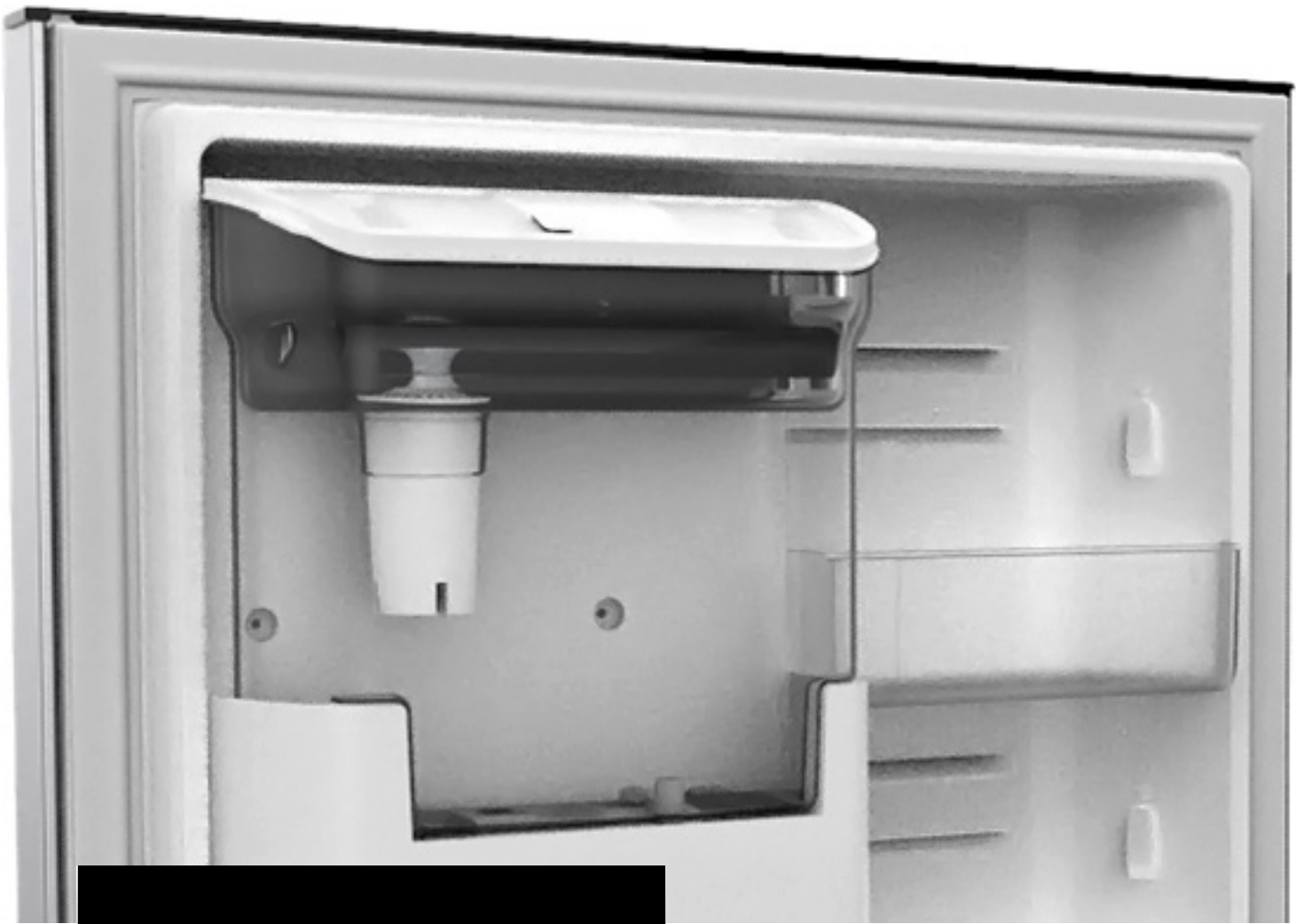
Figura 70 – Confirmación del nivel de agua



## PROCESO DISPENSADO

Para dispensar agua purificada solo basta con oprimir el botón. Durante el proceso de purificación dicha función está inactiva.

Figura 71 – Proceso dispensado



## NIVEL BAJO DE AGUA PURIFICADA

Cada vez que el nivel de agua purificada sea menor a medio litro dicho indicador se mantendrá intermitente.

Figura 72 – Indicador del nivel bajo de agua



## RE - PURIFICAR

Este botón inicia nuevamente el tratamiento con ozono, lo que proporciona al usuario la posibilidad de desinfectar nuevamente el agua si así lo desea.

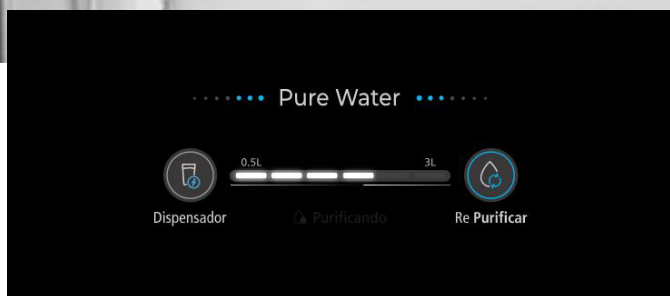


Figura 73 – Re - purificar

# CONCLUSIONES

Con relación al proyecto reportado en este trabajo de tesis, puedo decir que se cumplió con el objetivo de diseñar un sistema de purificación de agua para ser implementado en el refrigerador.

Se realizó una amplia investigación, que ayudó a fundamentar los conceptos de solución que fueron probados con prototipos funcionales. Se validó la tecnología de desinfección con ozono a través de pruebas de laboratorio. Se propusieron, diseñaron y detallaron elementos fundamentales para el sistema. Concluyendo con el diseño de la experiencia de usuario, integrado por la interfaz y el prototipo funcional y de apariencia, dando una primera impresión del producto y sus características.

Por otro lado, me parece importante señalar que mi visión a futuro del producto es la de un módulo que pueda ser parte de la personalización del refrigerador y esté basado en los gustos del usuario final. En este momento se desarrollan otros proyectos, que en mi opinión pueden formar parte de los módulos adicionales del refrigerador.

En lo que respecta al desarrollo académico y laboral puedo decir que la vinculación entre empresa y la universidad me ha dado una perspectiva más amplia del diseño y lo relacionado con ello. He colaborado con ingenieros, diseñadores industriales, químicos, proveedores, maquetistas y directivos, que me han permitido entender cada uno de los pasos que llevan al desarrollo de nuevos productos con el propósito de solucionar problemas reales y necesidades latentes.

# TRABAJO A FUTURO

Primeramente, debo comentar que como consecuencia de la crisis sanitaria ocasionada por el COVID – 19, el desarrollo del proyecto se vio afectada con el aplazamiento del montaje del prototipo en el refrigerador y la validación de la experiencia final con usuarios. Siendo una de las actividades más importantes del trabajo a futuro que se presentará en la siguiente sección del documento.

Las actividades propuestas a desarrollar en el futuro son en principio, las pruebas de validación con usuarios de la experiencia final del sistema de purificación de agua para refrigeradores. Principalmente con el tema del sabor, olor, tiempos de purificación, así como evaluación de los elementos de la interfaz.

Como se describió anteriormente, se ha validado la tecnología con ozono. Sin embargo, se han acercado al proyecto dos proveedores de tecnología con LED ultravioleta. El primero ha proporcionado los componentes de electrónica y se ha fabricado un primer prototipo, al cual no se le han podido realizar las pruebas de la evaluación de la desinfección. El segundo ha proporcionado un módulo para evaluación, no obstante, no se ha probado.

Es importante realizar una comparación entre ambos métodos de desinfección y determinar, si la tecnología ultravioleta puede tener mayores beneficios para el proyecto.

Finalmente, en otra etapa del proyecto es importante revisar el tema de filtración, la optimización del subsistema de mezclado, la compatibilidad con los materiales y las posibles certificaciones.



# REFERENCIAS

[1] foursquare. (2012). Mabe TyP. Marzo 13, 2020, de - Sitio web: <https://es.foursquare.com/v/mabe-typ/4ba199acf964a5202dc337e3>

[2] PNT. (2003). Grande Industrial. Marzo 15, 2020, de Premio nacional de tecnología Sitio web: [https://pnt.org.mx/wp-content/uploads/docs/V/2003\\_Mabe.pdf](https://pnt.org.mx/wp-content/uploads/docs/V/2003_Mabe.pdf)

[3] Huato, J & Martínez, I. (2017). Zlup: diseño de un sistema para el diagnóstico de apnea del sueño (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.

[4] Jiménez, A. (2005, Octubre 24). El cólera en México. Situación epidemiológica actual. Academia Nacional de Medicina de México. [https://www.anmm.org.mx/bgmm/1864\\_2007/1995-131-3-363-366.pdf](https://www.anmm.org.mx/bgmm/1864_2007/1995-131-3-363-366.pdf)

[5] Bottled water. (2017). U.S. and international developments & statistics. Octubre 23, 2018, de Bottled water association sitio web: [https://www.bottledwater.org/public/BMC2017\\_BWR\\_StatsArticle.pdf](https://www.bottledwater.org/public/BMC2017_BWR_StatsArticle.pdf)

[6] INEGI México. (2017). Estudio de módulos de hogares y medio ambiente. Agosto 30, 2018, de INEGI Sitio web: <https://www.inegi.org.mx>

[7] Pérez, S. (2019). Las ganancias Millonarias del agua embotellada en México. Enero 20, 2019. De Fortune, sitio web: <https://www.fortuneenespanol.com/destacado/ganancias-millonarias-agua-embotellada-mexico/>

[8] Moreno, D. (2019). Comunidades operan habitantes de Cupareo su propia planta purificadora de agua. Marzo 20, 2020, de Periódico Correo Sitio web: <https://periodicocorreo.com.mx/operan-habitantes-de-cupareo-su-propia-planta-purificadora-de-agua/>

[9] Monteros, D. (2017). Purificadoras de agua y consumo masivo: el

agua de los pobres. Abril 1, 2020, de Agua.org.mx Sitio web: <https://agua.org.mx/purificadoras-agua-consumo-masivo-agua-los-pobres/>

[10] Monteros, D. (2019). Instituciones y actores Un enfoque alternativo para entender el consumo de agua embotellada en México. México: Tirant.

[11] Evans (2019). Purificadores de agua. [Figura 14] recuperado de <https://www.evans.com.mx/purificadores.html>

[12] LG water purifying system (2018). Agosto 30, 2018, de Sitio web: <https://www.youtube.com/watch?v=zl2v1U18kmg>

[13] Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud Ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización, (publicada en el Diario Oficial de la Federación en noviembre de 2000). (En todos los casos en los que se menciona la NOM-127-SSA1-1994 se estará haciendo referencia a la MODIFICACIÓN a la NOM-127-SSA1-1994).

[14] CONAGUA. (2007). Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento Diseño de Plantas Potabilizadoras de Tecnología Simplificada. CONAGUA, 2, 365.

[15] Fair G. M. y Geyer C.J. (2001). Purificación de aguas y tratamiento y remoción de aguas residuales. México: Editorial Limusa.

[16] American Water Works Association (AWWA). (2005). Microfiltration and Ultrafiltration. Manual of Water Supply Practices. Denver, Estados Unidos: Water Research Foundation.

[17] Jimenez, B. E. (1995). Filtracion de agua. Series del Instituto de Ingenieria de la UNAM 572. Octubre de 1995. Universidad Nacional Autonoma de Mexico.

[18] GWC (2020). Resina Catiónica Fuerte 001X8 MB [figura 20] recuperado de <https://gwc.com.ar/tienda/resina-cationica-suqing-001x8-mb/>

[19] Donnell, C & Tiwari, B.K. (2012). Status and Trends of Ozone in Food Processing. En Ozone in Food Processing(308). UK: Blackwell.

[20] Dohan, J.M. and Masschelein, W.J. (1987) The photochemical generation of ozone: present state of art of technology, Ozone Science & Engineering, 9: 325.

[21] DuRon, B. (1982) Ozone generation with ultraviolet radiation, in Rice R.G. and Netzer A. (eds) Handbook of Ozone Technology and Applications, Ann Arbor, MI: Ann Arbor Science Publishers, Inc.

[22] Sander. (2000). Redoxpotential and Degermination Octubre 20, 2018, de Sitio web: <https://www.aqua-sander.de/en/service/faq/redoxpotential.html>

[23] Trevor, V. (2004). Oxidation-Reduction Potential (ORP) for Water Disinfection Monitoring, Control, and Documentation. University of California Agriculture and Natural Resources Communication Services, 8149, 5.

[24] Trevor, V. (2004). Ozone application for postharvest disinfection of edible horticultural crops. University of California Agriculture and Natural Resources Communication Services, 8133, 8.

[25] Howe, K. (2012). Adsorption and ion exchange. En Principles of Water Treatment (674). UK: Wiley

[26] Medidores TDS (2019). Sensor de solidos disueltos totales . [Figura 27] recuperado de <http://soloelectronicos.com/2013/09/11/uso-de-los-conductimetros-o-medidores-tds/>

[27] García, A. (2015). Inyectores de fertilizante tipo Venturi. Revista Iberoamericana de Ciencias, ISSN 2334-2501, 9.

[28] Reader, M. (2015). Venturi Tube Design. En Orifice Plates and Venturi Tubes(406). UK: Springer.

[29] INEGI. (2017, Abril 1). Módulo de hogares y medio ambiente. <https://Www.Inegi.Org.Mx/Temas/Practicas/>. <https://www.inegi.org.mx/temas/practicas/>

[30] Monteros, D. (2018, Enero 5). PEQUEÑAS EMPRESAS PURIFICADORAS PROVEEN MÁS DE 50% DEL AGUA EMBOTELLADA EN MÉXICO. Boletines UAM. <http://www.comunicacionsocial.uam.mx/boletinesuam/012-18.html>

[31] Tepsuttinun, W. (2020, Agosto 1). Carbón activado granular [Fotografía]. Carbón Activado Granular Para Filtro de Agua En El Fondo Blanco. [https://es.123rf.com/photo\\_36862276\\_carb%C3%B3n-activado-granular-para-filtro-de-agua-en-el-fondo-blanco.html](https://es.123rf.com/photo_36862276_carb%C3%B3n-activado-granular-para-filtro-de-agua-en-el-fondo-blanco.html)