



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA**  
**INGENIERÍA**  
**DISEÑO MECÁNICO**

**“DISEÑO DE UN FILTRO DE REFRIGERADORES PARA BAJA PRESION DE  
ENTRADA DE AGUA.”**

**TESIS**  
**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:**  
**MAESTRÍA EN INGENIERÍA MECÁNICA (DISEÑO MECÁNICO)**

**PRESENTA:**  
**RODRIGO SALAZAR CARRILLO, ING.**

**TUTORES PRINCIPALES:**  
**MARCELO LOPEZ PARRA, Dr.**  
**UNIDAD DE ALTA TECNOLOGÍA**

**CÉSAR DE JESÚS GUTIÉRREZ PÉREZ REGUERA, M.C.**

**JURIQUILLA, QRO. , NOVIEMBRE 2022**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**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.

CONFIDENCIAL

Jurado asignado

Presidente: Dr. Vicente Borja Ramírez

Secretario: Dr. Alejandro C. Ramírez Reivich

1er Vocal: Dr. Marcelo López Parra

2do Vocal: Dr. Roberto Zarate Espinoza

3er Vocal: M. en I. Osiris Ricardo Torres

Unidad de Alta Tecnología. Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Juriquilla; Fray Antonio de Monroy e Híjar 260, Villas del Mesón, Juriquilla. Santiago de Querétaro, Querétaro, C.P. 76230, México.

Tutor de tesis:

**MARCELO LÓPEZ PARRA, Dr.**

---

## **1 Dedicatorias, agradecimientos y patrocinios.**

Lleno de felicidad, amor y esperanza dedico este proyecto a mis seres queridos que han sido los pilares sobre los que construye mi presente.

Quiero agradecer a mi familia y a mi pareja por todo su apoyo, soporte e inspiración en este proceso. Aprecio la solidaridad, la paciencia y compañía, gracias a ustedes he podido tomar fuerza para seguir adelante frente a toda dificultad en el camino.

Agradezco a mi tutor, el Dr. Marcelo López Parra quien me acompañó a cada paso del camino, guiándome y transmitiéndome todos los conocimientos necesarios para hacer de ésta una tesis de calidad. Gracias por las horas invertidas, las revisiones y por permitirme resolver todas las incertidumbres y dudas que se fueron dando.

Agradezco a mi tutor en Mabe, Cesar de Jesús Gutiérrez Pérez, quien me apoyó con los recursos económicos para materiales y de igual manera, guiándome en las primeras fases del proyecto; enfocando mis esfuerzos para no perder de vista al usuario, para nunca olvidar entrega, calidad, costo y tampoco permitiéndome perder de vista el interés y la pasión que se transmite al verlo trabajar.

No tengo palabras que me permitan agradecer a mis compañeros y amigos, sin ellos nunca hubiera podido andar este camino, ustedes han sido mi válvula de escape del estrés y con ustedes he aprendido que la mejor forma de llevar las cosas es con una sonrisa.

Esta Tesis es fruto de todo mi esfuerzo y dedicación respecto a un tema que es, tanto de interés personal, como debería ser de interés para la sociedad y he disfrutado el camino recorrido.

## **2 Resumen y abstracto**

En esta tesis se conocerán los resultados de la evaluación de distintas etapas requeridas para el desarrollo de un filtro de agua que, de forma pasiva, remueva los componentes visibles, orgánicos, sales y minerales no deseados del agua en México en sistemas que tienen una presión de entrada de agua dentro del rango de los 1 a 3 PSI.

Es importante conocer cuáles son los límites de cada una de las etapas de filtrado ya que el agua potable apta para consumo es una de las necesidades básicas y la compra de agua embotellada en México es uno de los gastos más fuertes y menos conscientes que realizamos. Además, provocan una gran cantidad de contaminantes desde su fabricación, distribución, venta, consumo y disposición.

La siguiente investigación, presenta algunos aspectos teóricos para el diseño de un sistema de filtrado con etapas de polipropileno, carbón activado y resinas de intercambio iónico, las cuales eliminan ciertos componentes del agua para prepararla para un proceso de purificación con ozono o luz ultravioleta que permita contar al usuario con agua purificada lista para consumo.

# Contenido

1 Dedicatorias, agradecimientos y patrocinios. ....	3
2 Resumen y abstracto .....	4
3 Introducción.....	7
3.1 Origen y planteamiento del problema. ....	7
3.2 Aportación y justificación.....	9
3.3 Hipótesis. ....	9
3.4 Objetivos. ....	9
3.5 Alcances. ....	9
3.6 Proceso de diseño .....	10
4 Antecedentes. ....	11
5 Marco teórico.....	13
5.1 La metodología Seis Sigma. ....	13
5.2 El agua para el ser humano. ....	14
5.3 El agua en México, su distribución y características. ....	16
5.4 Almacenamiento de agua en México. ....	17
5.5 Presión del agua almacenada.....	19
5.6 Filtración; importancia, caracterización y métodos.....	20
5.6.1 Polipropileno. ....	22
5.6.2 Carbón activado granulado (CAG).....	23
5.6.3 Resinas de intercambio iónico. ....	26
6 Metodología de la investigación y evaluaciones.....	30
6.1 Benchmarking. ....	30
6.2 Calidad de agua de entrada. ....	34
6.3 Diseño y desarrollo del banco de pruebas .....	35
6.4 Etapas y materiales seleccionados. ....	37
6.4.1 Evaluación de polipropileno .....	38
6.4.2 Evaluación de Carbón Activado Granulado .....	40
6.4.3 Evaluación de Resinas de intercambio iónico.....	45

CONFIDENCIAL

7	Discusión.....	53
8	Conclusiones.....	55
9	Referencias .....	56
10	Figuras .....	58
11	Símbolos y acrónimos .....	60

### **3 Introducción.**

#### **3.1 Origen y planteamiento del problema.**

El crecimiento de la población, la urbanización y sobreexplotación de mantos acuíferos, la escasez de recursos naturales, el desabasto de agua y el incremento de los estándares de vida bajo los cuales debemos consumir una mayor cantidad de recursos; son algunos de los aspectos que nos exigen el desarrollo continuo de la tecnología para simplificar la vida diaria e impactar en menor medida en el medio ambiente y además, son generalmente, uno de los retos más importantes de la industria hoy en día. Lo que hacemos para purificar el agua, eliminar los componentes no deseados en ella, proteger a las personas y el ambiente, son aspectos que tienen un impacto vital e importante en todos los aspectos de la vida moderna.

El acceso al agua potable es fundamental para la supervivencia y una cuestión importante en materia de salud y desarrollo, es uno de los derechos humanos básicos y un recurso sumamente importante para cualquier país. La calidad del agua es una cuestión que preocupa en países de todo el mundo, en desarrollo y desarrollados, por su repercusión en la salud de la población. Son factores de riesgo, los agentes infecciosos, los productos químicos y la contaminación; entre otros componentes que el agua pueda llevar en un sistema de abastecimiento de agua de consumo en México.

Es por esto, que con este proyecto se busca desarrollar conocimiento en México que nos permita desarrollar la mejor forma de aprovechar nuestros recursos y generar una menor huella hídrica en nuestro planeta.

Es importante conocer algunos aspectos que pueden afectar la composición del agua en una zona para poder determinar su tratamiento desde un enfoque económico y eficiente. Algunos de estos factores pueden ser los componentes físicos, biológicos, químicos, económicos, sociales y culturales que puedan modificar la calidad del agua de suministro en una región en específico.

Es un gran reto poder desarrollar la filtración del agua de forma genérica, debido a la diversidad que existe entre la calidad de agua de entrada al sistema de filtrado. Esta calidad viene dada por los distintos sistemas de distribución a los que puede estar sujeta el agua, ya que en un mismo sitio pueden variar los componentes en el agua en gran medida respecto a su concentración en cuestión de semanas.

El problema principal, es que existen muchos elementos visibles como arena, tierra, cabello, óxido, etcétera; también componentes minerales como cloro, grasas, nitratos, detergentes y otros químicos que se utilizan para su saneamiento; además, otras partículas en suspensión que ocasionan olores y sabores en la misma; sin mencionar los microorganismos como virus y bacterias que podrían encontrarse presentes como impurezas en ciertas concentraciones y que deben ser eliminados del agua para poder consumirse como agua potable.



También, existen condiciones físicas como la presión a la que entra el agua al sistema, la temperatura y el medio de distribución o condiciones de almacenamiento. Esto conlleva un gran reto al desarrollar un sistema con los atributos de diseño más generales que puedan satisfacer las necesidades de los usuarios a un bajo costo.

La empresa Mabe, desarrolló un estudio en Latinoamérica, específicamente en México, donde descubrieron que el agua potable para consumo es un gasto hormiga, en muchos casos, inconsciente. Gran cantidad de mexicanos consume agua potable de garrafón al menos 2 veces por semana; consumir este recurso implica esfuerzos físicos, invertir tiempo, gastos económicos, contaminación plástica y horarios determinados. Del agua de garrafón, estamos acostumbrados al sabor, la seguridad de que no dañará nuestra salud y una falsa practicidad para adquirir el agua. En realidad, el consumo de agua de garrafón es una costumbre heredada que no se razona, ya que conlleva un gasto no consciente, lo que además complementado con una mala percepción de los procesos de filtración de agua y su efectividad, pesan al considerar la compra de un producto propio que permita filtrar el agua de suministro para nuestro consumo.

El desarrollo de un filtro de agua para refrigeradores que funcione adecuadamente en un mercado que obtiene el agua a través de tinaco, es una gran oportunidad. Para que los mexicanos podamos contar con agua potable de consumo en nuestro hogar junto con un producto con el que ya contamos; el refrigerador; el desarrollo de un sistema que funcione como se comentó disminuirá el impacto ecológico que la fabricación de garrafones genera, disminuirá el uso del plástico, permitirá eliminar esfuerzos físicos y daños a la salud por cargar el garrafón, permitirá contar con agua a toda hora, evitará salir a buscar agua a horas no accesibles y nos ayudará a evitar gastos adicionales.

En esta Tesis se reportará la forma de filtrar agua de la red de distribución de agua en Querétaro, se documentarán ciertas características de esta y se desarrollará cuál es la forma más adecuada de eliminar ciertos componentes que contenga. Dentro de los límites de las condiciones de presión de agua para un sector de los hogares mexicanos, como son los sistemas de presión de columna de agua, además de definir las características que debe tener un filtro de agua para funcionar adecuadamente en estas condiciones.

Los resultados que este trabajo presenta son las sugerencias de diseño para fabricación de distintas etapas en un filtro que funcione correctamente en un sistema a baja presión de entrada como en el caso de un refrigerador.

### **3.2 Aportación y justificación.**

El proyecto reportado en esta tesis busca aportar al conocimiento respecto a la selección de diseño para cada etapa en filtros de agua, adecuado para los hogares mexicanos que funcionen bajo una condición de entrada de presión de 1 a los 3 PSI y busca optimizar los recursos que se utilizarán para desarrollarlos, enfocado en la satisfacción del cliente respecto a cantidad de agua filtrada y la velocidad con la que se realiza este proceso.

Es además una motivación el aporte ecológico que este desarrollo tenga en su manufactura sobre el medio ambiente, ya que siempre es importante considerar como reducir la contaminación causada por el uso de plásticos y simplificar los esfuerzos para contar con agua potable.

### **3.3 Hipótesis.**

Se puede desarrollar un sistema de filtrado de agua, integrado por distintas etapas, que funcione con una presión de entrada de 1 a 3 PSI, proporcionando 1000 ml de agua por hora, con un nivel de TDS en 100 a 200 ppm menores al nivel de entrada. Reduciendo el mal olor, sabor y partículas suspendidas, proporcionando agua lista para purificar.

### **3.4 Objetivos.**

De forma general se considera identificar las variables que permiten filtrar agua de suministro en México a baja presión y documentar las características y materiales que se deben utilizar para filtrar el agua. En específico se desarrollará un prototipo de filtro y un banco de pruebas para probar distintas etapas que funcionen a la presión propuesta.

### **3.5 Alcances.**

Definir las etapas necesarias para filtrar el agua y desarrollar el análisis de las ecuaciones que permitan proponer el diseño de un filtro óptimo para usuarios cuya presión de agua desde el punto de almacenamiento de agua hasta la conexión del filtro, sea del rango de 1 a 3 PSI. Y cuya calidad de agua de salida en Total de Sólidos Disueltos en el agua se encuentren entre 100 y 200 PPM menor al valor de entrada, proporcionando 1000 ML de agua lista para purificar por hora.

### 3.6 Proceso de diseño

La metodología de diseño para el desarrollo de este proyecto se basa en Seis Sigma mediante el proceso DMADOV.

La primera fase es la **definición**, que consiste en identificar los clientes potenciales y el mercado objetivo, se definen las metas de calidad y funcionalidad del sistema, los límites de funcionamiento y todos los pormenores del proyecto.

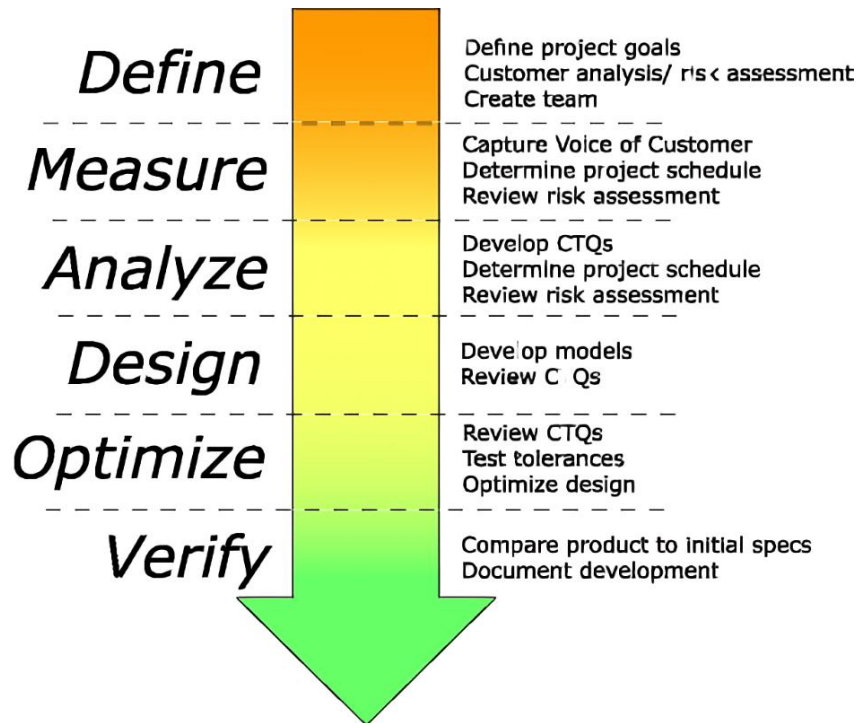
La segunda etapa consiste en realizar la **medición** de los parámetros de búsqueda y se desarrolla a través de un benchmarking de la competencia.

Los datos obtenidos de la segunda etapa se evalúan en la etapa de **análisis**, donde se desarrollan los métodos de prueba y se conceptualizan las alternativas de diseño.

Después, se procede a la parte de **diseño** donde mediante un diseño de experimentos para cada etapa, se obtiene información del comportamiento y la interacción de las variables.

Para la etapa de **optimización** se desarrollan propuestas de cambio para la solución de problemas en la remoción de elementos en cada etapa.

Por último, se desarrollan las evaluaciones de confirmación de los cambios en la etapa de **verificación**.



## 4 Antecedentes.

Como seres humanos, dependemos de la separación de las partículas presentes en los fluidos para proveernos con los aspectos esenciales de la vida, aire y agua limpios.

Además, casi toda la comida, medicina o artículos que utilizamos en nuestros hogares, trabajos o automóviles dependen de un proceso de separación de sólidos y líquidos en cierto punto de su producción. Sin esta capacidad de separar las partículas en ellos, nuestra vida no sería la misma. (Chase, 2008, p. 2)

Sabemos que el agua es uno de los productos vitales de consumo que requiere el ser humano, desde la antigüedad, se han desarrollado distintas formas para poder contar con la mejor agua para consumo. Desde el año 400 AC, Hipócrates escribió que “[El agua de lluvia] es la mejor agua, pero que requiere ser hervida y filtrada; de otro modo podría tener mal olor y en ocasiones agravar y engrosar la voz de los que la beben”. (Chase, 2008, p. 8)

Desde esa época, es claro el vínculo que existe por beber agua de mala calidad y se entendía el riesgo a la salud que esto puede contraer, sin contar los aspectos microbiológicos que no se conocían al momento.

Desde 1791 se desarrollaron dispositivos de filtración de agua para proveer de agua limpia al ejército Ingles. James Peacock, desarrollo “Un nuevo método para filtración de fluidos”. En 1852 el parlamento ingles introdujo recomendaciones de filtración de agua por arena y grava y en 1870 la compañía Southwark and Vauxhall Water Company desarrollo en Hampton la planta de tratamiento del rio Támesis. Hoy en día, a nivel mundial, la “World Health Organization” publica guías de la calidad de agua que consideran aspectos microbiológicos, desinfección, aspectos químicos, radiológicos, criterios de aceptación como sabor, olor o apariencia. (Chase, 2008, pp. 8,10)

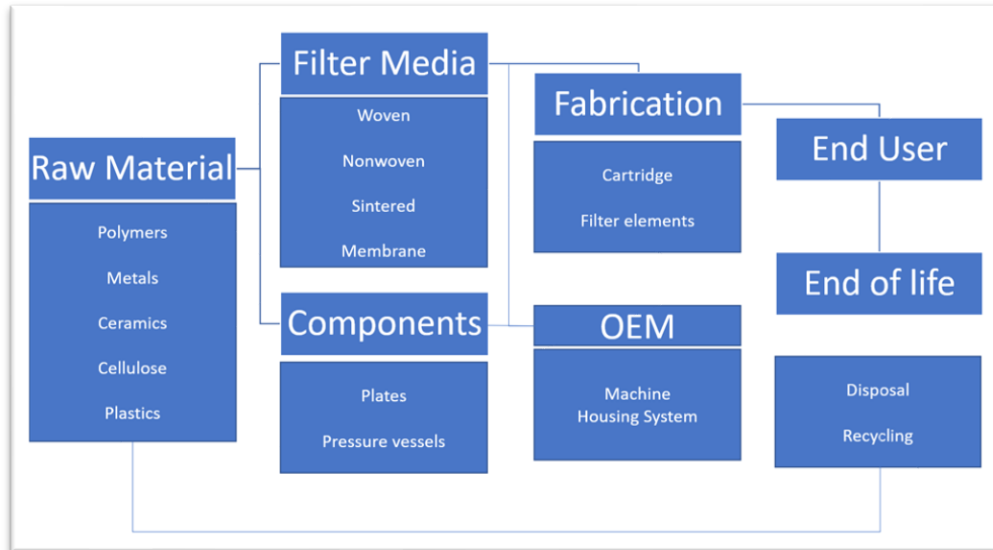
La población a nivel mundial continúa creciendo día con día y con ello también la demanda de agua limpia, utilizamos productos derivados de la industria de la filtración de forma directa cuando compramos un garrafón de agua y esta industria es muy diversa y vasta. Entrega productos, servicios y tecnologías que afectan cada aspecto de nuestras vidas.

Para contar con agua potable de consumo, desde la distribución, el agua debe ser filtrada y purificada; lo que significa que se deben remover ciertos componentes en ella. La filtración es necesaria para eliminar compuestos visibles, elementos orgánicos y sales o minerales no deseados en el agua previo a la etapa de purificación que elimina aspectos bacteriológicos por medio de distintos métodos.

Mabe, ha desarrollado productos de purificación de agua que, en su mayoría, utilizan energía eléctrica para filtrar el agua y remover los componentes en ella para proporcionar agua filtrada y purificada lista para consumo. (Morales, 2020)

La cadena de valor de la industria de la filtración va desde la materia prima, hasta la disposición de los productos y repuestos. La incineración es la opción más común de disposición. Como se ve en la siguiente Figura 1. (Chase, 2008, p. 12)

**Figura 1: Cadena de valor de la industria de la filtración. (Chase, 2008, p. 12)**



Algunos filtros o sistemas de filtración comerciales, similares a los que se buscan desarrollar con este trabajo, son los filtros de agua que funcionan mediante la gravedad y utilizan distintas etapas de filtrado, en promedio 4, para filtrar el agua.

En estos sistemas de filtración, el usuario debe colocar agua en la parte superior del dispositivo dentro de un tanque de almacenamiento y esperar a que ésta se filtre al contenedor en la parte inferior. El problema con este tipo de filtros es que dependen del usuario para contar con un suministro de agua de entrada y se debe esperar al menos 15 minutos para contar con el producto filtrado. Además, en su mayoría, este tipo de productos no reducen la cantidad total de sólidos disueltos en el agua por lo cual su sabor es igual al agua de grifo en la mayoría de las ocasiones.

Este tipo de filtros no requieren de una presión de columna de agua y en su mayoría se componen de etapas como cerámica, plata coloidal, barro, polipropileno, carbón granulado y en bloque, piedra mineral o volcánica, arcillas, piedras y arenas, entre otros. Algunos de los productos que se han investigado hasta distintos grados incluyen el purificador bioenergético mountain life, los productos de Nikken, como el Pigmag water system, filtros como el Casallini, Alkaline purificador, etc.

Estimar el tamaño de esta industria, varía mucho dependiendo del lugar al que se enfoca, de forma general en Estados Unidos, es una industria de más de \$38 billones de dólares. Los principales incentivos de la necesidad de esta industria de la filtración van desde el crecimiento de la población, con la necesidad de sanitización de agua y comida hasta el deseo de un mejor estándar de vida, como salud, medio ambiente y demanda de productos.

Algunos sistemas de filtración cuentan con las etapas de carbón activado para sistemas de gravedad que han tenido gran acogida para la remoción de sustancias orgánicas bajo flujo continuo ya que este medio permite que sea empleado en capas o columnas debido a su consistencia lo cual permite que se desarrolle una gran capacidad de adsorción (Correa, 2016).

## **5 Marco teórico.**

El estudio del agua para el ser humano es de utilidad para conocer el estado del arte de los tipos de filtros y sistemas que se han desarrollado para eliminar los componentes que en ella se encuentran. Por nuestra ubicación geográfica es indispensable conocer el sistema de distribución y las características con las que el agua llega a los usuarios y además como se almacena y distribuye. También al ser este un desarrollo que busca de forma pasiva, sin necesidad de componentes electrónicos, funcionar en sistemas de baja presión se debe dar a conocer cual es la presión al que los sistemas trabajan. Las diferentes etapas de filtración y métodos que se utilizan dentro de esta investigación se pueden encontrar más adelante dentro de este apartado, junto con la información de algunos sistemas similares que permiten obtener un diseño óptimo para un banco de pruebas que permita probar cierta calidad de entrada de agua y así permita seleccionar ciertas etapas y materiales para desarrollar el diseño del filtro como corresponda.

### **5.1 La metodología Seis Sigma.**

El diseño de experimentos o DOE por sus siglas en inglés es una de las herramientas fundamentales de Seis Sigma, una metodología que nos ayuda a entender la relación que tienen los datos con su respuesta dentro de la estructura de proyectos. Los diseños de experimentos tienen un enfoque estructurado para la identificación de los factores dentro de un proceso que permiten, a través de diferentes estructuras, conocer la contribución de los efectos particulares para lograr pruebas significativas para mejorar el proceso.

Basado en la estructura de la metodología DMADOV de Seis Sigma, se presenta una investigación que ejemplifica el uso de una serie de DOE's dentro del rigor estadístico necesario para aplicarlo. Es una alternativa accesible que es clara, consistente y hasta cierto punto mal entendida por su simplicidad que permite diseñar un sistema desde el inicio.

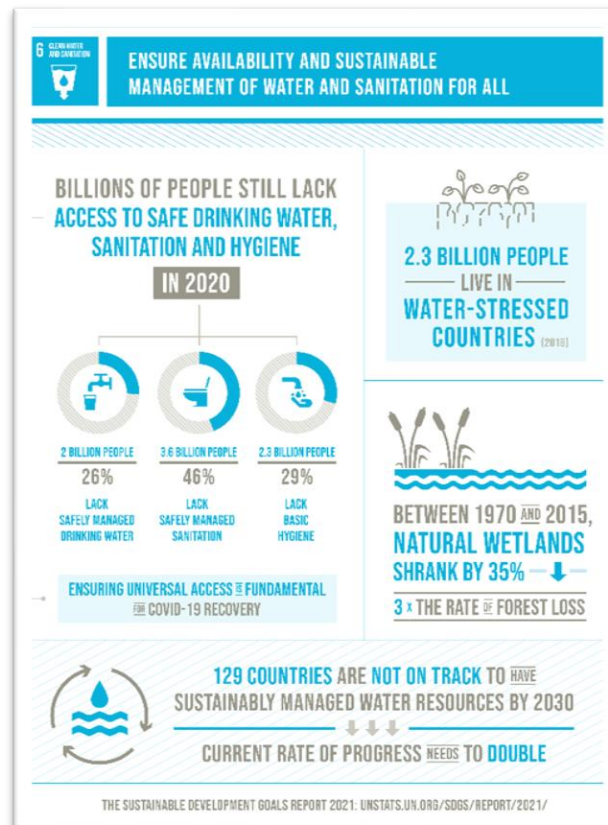
El proceso de aplicación de esta metodología consiste, como se incluyó en la sección de "Proceso de Diseño", en una serie de fases que al ser aplicadas junto con las herramientas de análisis adecuadas permiten obtener las interacciones de los factores que contribuyen a la filtración óptima de un sistema.

## 5.2 El agua para el ser humano.

El suministro de agua limpia y segura para beber para todas las personas de la tierra es uno de los mayores retos que enfrenta la humanidad, sin embargo, se ha avanzado para disminuir el número de personas que no cuentan con ella, de acuerdo con información de las Naciones Unidas “UN” por sus siglas en inglés, se estimó que, un 76% de la humanidad contaba con agua potable en 1990 contra el 89% en 2010. Sin embargo, se puede decir que todavía existen cerca de 700 millones de personas que no tienen acceso a agua tratada de ninguna forma. Hay un sinnúmero de iniciativas para proveer, al menos a baja escala, sistemas de tratamiento de agua que ayudarían a reducir el número de muertos que existen cada año por la falta de agua potable del impresionante número de 3.4 millones actual.

La Organización de las Naciones Unidas tiene como meta asegurar la disponibilidad y el manejo sustentable de agua sanitizada para todos, donde, de acuerdo con sus estudios, en 2020 billones de personas no tienen acceso a agua segura para beber, para sanitización o higiene. Como se puede observar en la Figura 2. (United Nations)

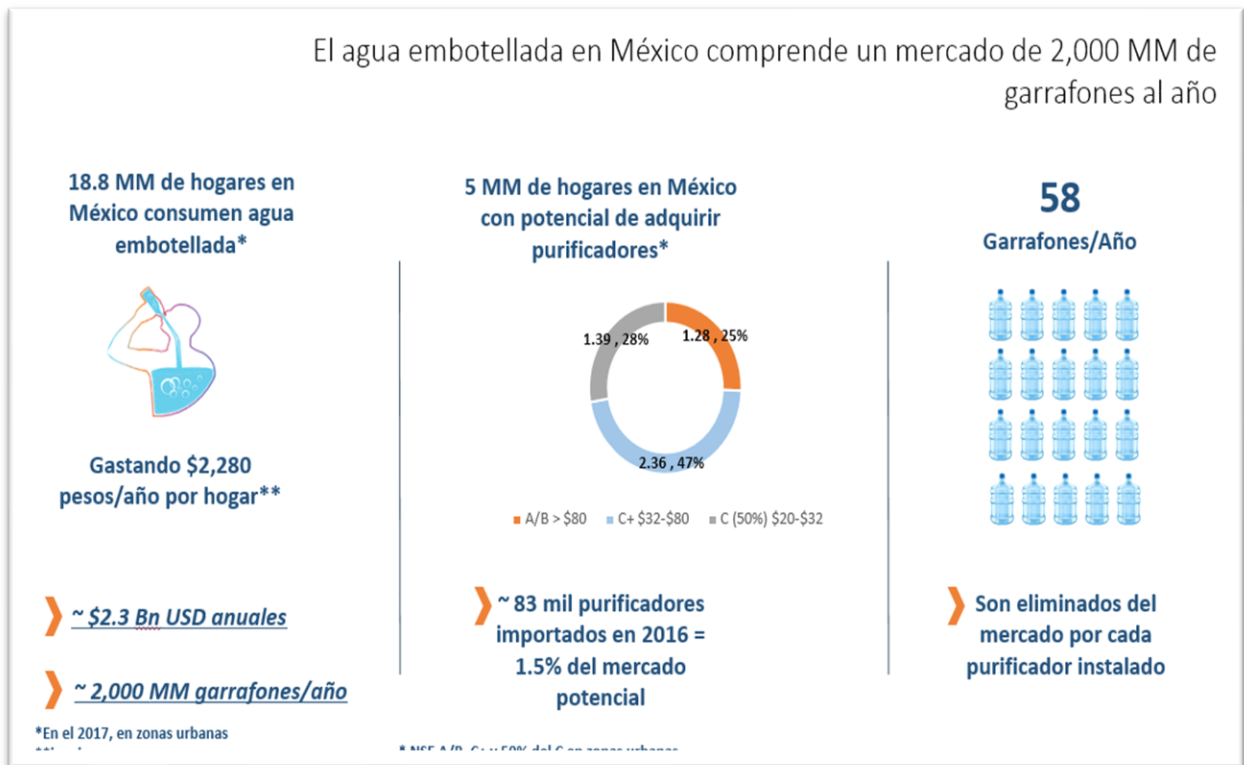
Figura 2: Goal 6 UN



De acuerdo con sus estudios, existe una disminución del 35% de mantos acuíferos desde 1970 al 2015 y que 129 países no están trabajando en el manejo sustentable de recursos hídricos. (United Nations, pág. Goal 6)

Cerca de 18.8 MM de hogares en México consumen agua embotellada de acuerdo con cifras del INEGI en 2017 para zonas urbanas. El mercado del consumo de agua embotellada en México comprende cerca de 2 MM de garrafones al año, esto es un impacto no solamente ambiental, sino también al tiempo y esfuerzo de las personas, que deben contar con un horario previamente establecido para contar con agua cuando se termina. De acuerdo con la Figura 3. (Marketing Mabe, 2020)

**Figura 3: Mercado del agua embotellada en México.**



El cambio climático y la creciente industria tecnológica son algunos de los principales factores de la generación de contaminantes para el medio ambiente y del agua. Algunos contaminantes son la producción de gases invernadero; principalmente dióxido de carbono, metano y contaminantes orgánicos. La filtración y separación tiene un importante papel a jugar para la reducción de estos efectos.



### **5.3 El agua en México, su distribución y características.**

A partir de los resultados de la encuesta nacional de la calidad e impacto gubernamental desarrollado por la ENCIG, se estima que de los 47.8 millones de personas de 18 años y más en áreas urbanas de 100,000 habitantes y más, en relación con el servicio de agua potable, 60.5% refiere que el suministro de agua es constante; mientras que 23.7% considera que el agua es potable. (Instituto Nacional de Estadística y Geografía INEGI , 2017, pág. 7)

Los sistemas de agua potable, alcantarillado y saneamiento, también conocidos como organismos operadores, se encargan conservar y administrar los sistemas de agua potable, alcantarillado y saneamiento, con el objeto de dotar estos servicios a los habitantes de un municipio o de una entidad federativa.

A estos organismos también se les puede conocer como sistemas de agua, direcciones, comisiones, juntas locales, departamentos y/o comités de acuerdo con la estructura orgánica a la que pertenezcan.

De acuerdo con datos del INEGI, el suministro de agua en la república mexicana se realiza a través de 2,356 organismos operadores, de estos, 1,567 proporcionan el servicio a poblaciones urbanas, 98 a poblaciones rurales y 691 a poblaciones de los dos tipos antes mencionados.

Cabe hacer mención que un organismo operador puede brindar el servicio a un municipio o parte de él, dos o más municipios o parte de ellos e inclusive puede brindar el servicio a municipios de dos entidades diferentes. (agua.org.mx, s.f.)

La composición del agua de distribución en México contiene principalmente de los siguientes elementos o compuestos: Partículas visibles como: larvas de insectos, cabello, arena, etc. elementos no visibles como sales o minerales, cloro, etc. Virus y bacterias, entre otros, por lo cual es de suma importancia que, para su filtrado y posterior purificación para consumo, se eliminen o reduzcan considerablemente estos contaminantes.

#### **5.4 Almacenamiento de agua en México.**

Los sistemas de suministro en México distribuyen el agua a los domicilios a través de la red de distribución pública a cierta presión de acuerdo con las condiciones topográficas locales, estos sistemas de suministro proporcionan a los usuarios una cantidad de agua de forma intermitente a lo largo de un periodo de tiempo establecido de acuerdo con la disponibilidad del recurso y a la demanda requerida en cada zona.

El agua es almacenada en contenedores llamados cisternas o tinacos dependiendo del tipo de domicilio; de acuerdo con el tipo de vivienda con el que se cuenta, el agua, se almacena y el usuario dispone de la cantidad necesaria para su consumo. Es importante diferenciar los hogares y la presión con la que cuentan con agua. (Comisión Nacional del Agua, 2007)

Para el caso de los usuarios que viven en torres de departamentos, comúnmente cuentan con una cisterna común por torre o edificio que distribuye el agua a los departamentos a través de bombas; si estos departamentos no cuentan con un sistema de tinacos individuales, de forma simplificada, se puede decir que el agua que llega a cada domicilio tendrá la presión a la que se almacena el agua con la bomba.

Sin embargo, en los domicilios que cuentan con un tinaco, estos deben ser colocados de 1 a 1.5 m sobre la superficie del techo de la vivienda. Dependiendo de los niveles o pisos que tenga la vivienda y de la diferencia de altura del espejo de agua en el tinaco a la salida, la presión podrá ser menor o mayor al rango de 1 a 3 psi con la que se trabajará en los siguientes ejercicios.


CONFIDENCIAL

A nivel mundial la Organización Mundial de la Salud es el organismo que regula la calidad del agua y basado en los lineamientos que ahí se imponen, en México, nos basamos en las siguientes normas y regulaciones nacionales para el agua de consumo purificada.

NOM-127-SSA1 vigente. NORMA OFICIAL MEXICANA 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"

De acuerdo la NOM 127 SSA1 vigente se establecen los limites permisibles de calidad y tratamientos de potabilización del agua para uso y consumo humano, en ella se puede conocer toda la información necesaria para que un sistema de purificación de agua pueda ser diseñado y cumpla con todos los aspectos normativos del país.

Figura 4: Ficha de calidad del agua CEA.




**Ficha de Calidad del Agua**

Dirección: Dirección Divisional de Evaluación y Control y Titular de la Unidad de Transparencia Atención: MAFP, José Luis de la Vega Villegas Municipio: Querétaro, Qro. Fecha de Emisión: 2 de julio de 2021.						Admon: Zona Metropolitana Localidad: Querétaro Municipio: Querétaro Tipo: Agua de grana.	
---	--	--	--	--	--	---	--

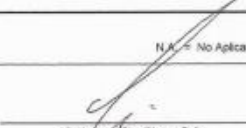
Valores de Calidad del Agua								
Garza de Agua para Pipas (Pozo Capilla No. IV)								
1. Bacteriológicos y Cloro Residual.	Coliformes Totales (UFC/100 mL)	Coliformes Fecales (UFC/100 mL)	Cloro Residual (UFC/100 mL)					
	L.P. = Ausencia	L.P. = Ausencia	L.P. = 0.2 a 1.5					
	0	0	1.0 a 1.5					
2. Fisicos.	Color (Unidad Co-Pl)	Turbiedad (UNT)	Sol. Disueltos Totales (mg/L)	Temperatura (°C)	Cond. Eléctrica (µs/cm)	pH (Unidades)	Olor (Unidades)	
	L.P. = 20.0	L.P. = 5.0	L.P. = 1000	L.P. = N.A.	L.P. = N.A.	L.P. = 6.5 - 8.5	L.P. = Agradable	
	2.50	0.05	352	23.0	567.0	7.87	Agradable	
3. Minerales.	Cloruros (mg/L)	Dureza Total (mg/L)	Fluoruros (mg/L)	Nitratos (mg/L)	Nitritos (mg/L)	Sulfatos (mg/L)		
	L.P. = 250.0	L.P. = 500.0	L.P. = 1.5	L.P. = 10.0	L.P. = 1.0	L.P. = 400.0		
	33.5	195.8	0.590	6.740	< 0.01	56.220		
4. Metales.	Aluminio (mg/L)	Arsénico (mg/L)	Bario (mg/L)	Cadmio (mg/L)	Cobre (mg/L)	Cromo (mg/L)	Fierro (mg/L)	Manganeso (mg/L)
	L.P. = 0.20	L.P. = 0.025	L.P. = 0.70	L.P. = 0.005	L.P. = 2.00	L.P. = 0.05	L.P. = 0.30	L.P. = 0.15
	< 0.10	< 0.005	< 0.10	< 0.0025	< 0.0125	< 0.005	< 0.050	< 0.0075
	Mercurio (mg/L)	Plomo (mg/L)	Sodio (mg/L)	Zinc (mg/L)				
	L.P. = 0.001	L.P. = 0.01	L.P. = 200.0	L.P. = 5.00				
< 0.001	< 0.0025	81.00	< 0.010					

**Simbología:**  
 L.P. = Límite permisible establecido en la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994.



Q. en A. José Alfredo Quintanar Hernández  
Supervisor de Laboratorio de Agua Potable

N.A. = No Aplica.



Q.M. Juan Ciro Rivera Sola  
Subgerente de Calidad del Agua

Fecha de Emisión: 2021/JUL/02

No. de Control: 08 - 2021

### 5.5 Presión del agua almacenada.

Como se comentó anteriormente, el agua en los hogares mexicanos es almacenada a través de distintos métodos a pesar de que llega de fuentes comunes; cada hogar, tiene una forma distinta de distribución como pueden ser los tinacos en el techo de las casas que dependen de la presión de suministro del agua para llenarse, las cisternas en la parte inferior que utilizan bombas para la distribución de agua a un tinaco o las bombas que distribuyen el agua por demanda directa.

Además, existen diferentes tipos de viviendas como casas de una, dos o más plantas, conjuntos habitacionales como departamentos, torres, etc. Cada una de estas viviendas tiene métodos de almacenamiento con distintas características de presión de agua. En este documento, nos centraremos en los hogares que son de una planta y cuentan con un tinaco en la parte superior de la misma ya que suelen ser las más comunes y las que cuentan con una menor presión de agua previo a su uso.

La presión de columna de agua provocada por el tinaco a cierta altura es la aplicación que tiene un índice de uso mayor en la población mexicana; una casa en México debe medir al menos 2.4 m de altura y el tinaco debe colocarse a al menos 1 m sobre la superficie del techo; y máxima de 1.5 m. Figura 5. Cualquier variación mayor o menor a este rango, podría evitar que el agua de la toma de calle no suba al tinaco y dejarte sin suministro al usuario. (MN del Golfo, s.f.)

**Figura 5: Capacidades de tinacos Rotoplas**

Capacidad	Diámetro	Altura
450 L	0.85 m	0.99 m
600 L	0.97 m	1.12 m
750 L	1.10 m	1.02 m
1 100 L	1.10 m	1.40 m
2 500 L	1.55 m	1.60 m

De acuerdo con el cuadro de capacidades anterior, obtenemos la altura promedio de un tinaco y calculamos donde quedaría la superficie del espejo de agua dentro de él, considerando la altura a la que el tinaco debe colocarse y la altura de una casa de una planta en México y hasta el punto de entrada propuesto por diseño, se calcula que la presión de trabajo para este sistema debe ser entre los 0.704 m a los 2.112 m. En PSI se propone trabajar con un sistema de presión de entrada de dos niveles, 1 y 3 PSI como nivel bajo y alto respectivamente. (Rotoplas, s.f.)

## **5.6 Filtración; importancia, caracterización y métodos.**

El proceso de filtrado de agua inicia cuando se quieren eliminar ciertos componentes de una fuente de agua, dichos componentes que se encuentran en ella pueden hacer que la mezcla se encuentre subsaturada, saturada o sobre saturada y se deberán determinar las condiciones a las que esta mezcla entra al proceso de filtrado y las condiciones deseadas de salida.

Para seleccionar de forma adecuada un filtro, se debe definir cuál será el requerimiento de tamaño de partículas que se requieren filtrar, caída de presión máxima a la que se trabajará y adicionalmente se deben de considerar parámetros como las etapas y el flujo requerido por unidad de tiempo proporcionado por el sistema.

Además, se deben de considerar los objetivos financieros que la solución puede proporcionar en términos de costos y tiempo de vida del producto para operar con una cierta confiabilidad.

Como se ha mencionado anteriormente, la filtración de agua para consumo ha sido de suma importancia en el pasado como lo es hoy en día y es uno de los procesos de generación de agua potable para consumo más utilizados en la vida del hombre por generaciones, existen métodos de filtración artesanales que captan agua de lluvia y la hacen pasar por varias etapas gracias a la gravedad para finalmente ser almacenada en contenedores donde se utilizará posteriormente.

De acuerdo con los materiales que se quieren remover de la mezcla liquido-sólido, se deben seleccionar los medios, distintos filtros o etapas que funcionan correctamente bajo ciertas condiciones de operación para retener los componentes no deseados en distintos puntos del proceso, los materiales de los cuales se fabrican los filtros pueden ser muy variados y tener distintas configuraciones para lograr la separación de ciertos componentes de acuerdo a su principio de funcionamiento y estructura física.

El desarrollo del filtrado a baja presión depende de los contaminantes que se encuentren en la mezcla que se desea filtrar, el tamaño de la partícula y del elemento filtrante. Es importante considerar que para poder filtrar un componente de forma efectiva también se tiene que tomar en cuenta el tiempo de vida o de uso del elemento filtrante, ya que pueden encontrarse depósitos superficiales o internos en el filtro.

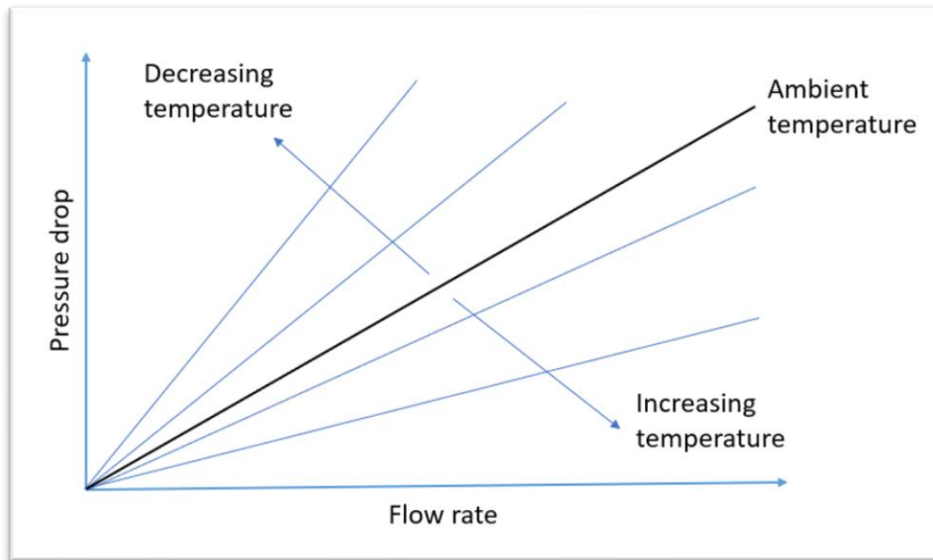
Hay que tomar en cuenta que los filtros pueden ser reutilizables hasta cierto extremo, ya que hay partículas que pueden incrustarse o entrelazarse en el tejido del filtro y que no será posible remover en la mayoría de los casos. El filtrado a baja presión en muchos casos se llega a conocer como filtración por gravedad y algunas etapas de filtración comúnmente utilizadas en este tipo de filtración son las que veremos más adelante. (Chase, 2008, p. 53).

Sin importar el tipo de filtro, su material o método de funcionamiento, es importante conocer el comportamiento de los filtros con su elemento filtrante.

La caracterización de las curvas de flujo de los filtros contra la caída de presión que estos generan en condiciones laminares nos permite conocer como es el cambio en su desempeño a distintas temperaturas.

En la siguiente imagen, Figura 6, podemos ver como a medida de la deseabilidad de una caída de presión baja, el flujo se verá castigado y además dependiendo de la temperatura del líquido, se tendrá una respuesta específica esperada dependiendo de la etapa de filtración. (Chase, 2008, p. 47)

**Figura 6: Efecto de la temperatura en el desempeño de filtros.**



Se consideró incluir el cambio a la viscosidad ocasionado por los cambios de la temperatura para el agua. El agua disminuye su viscosidad conforme la temperatura incrementa; por lo tanto, es conveniente que la temperatura sea alta para que la viscosidad de la mezcla disminuya y los componentes se separen más fácilmente. Pero, ya que los cambios de viscosidad considerables se desarrollan a diferenciales de temperatura en el orden de una diferencia de 80 grados, no se toma en cuenta el cambio en viscosidad o su valor en este estudio.

También se consideran los efectos de un flujo parcial o interrumpido contra un flujo continuo a la entrada, este es uno de los parámetros que permiten probar el desempeño de un filtro, ya que las partículas se depositan continuamente si el flujo es constante sin embargo en la situación de flujo interrumpido sucede un efecto interesante donde existe una mayor cantidad de depósito de partículas.

El flujo interrumpido es el comportamiento que se utiliza para la realización de los experimentos debido a la simplicidad que existe en aplicar un flujo interrumpido para el desarrollo de las evaluaciones de los distintos diseños de experimentos.

Algunos de los filtros que más se utilizan hoy en día son los de fibras naturales como lana, algodón, papel, mallas sintéticas tejidas, etcétera. Éstos, pueden tener una formación porosa, suave y con uniones tejidas, los filamentos suelen estar tan separados como para permitir el paso de arenas o arcillas finas, pero filtrar partículas visibles para el ojo humano como cabello, arena, tierra o insectos. (Chase, 2008, pp. 30-46).

### 5.6.1 Polipropileno.

La sedimentación es un tipo de filtración por separación que puede apartar hasta el 40% de los componentes de una mezcla de líquido-sólidos. Para nuestro caso en específico, dependiendo la composición del agua y las partículas suspendidas en ella, este proceso aprovecha la gravedad como método para que las partículas visibles se asienten en el filtro y el agua pase con una menor cantidad de contaminantes. En algunos casos se utiliza la sedimentación acelerada que, mediante ciclones de agua o centrifugadoras de decantación separan los componentes de mayor tamaño y densidad, pero estos procesos de filtración son menos económicos a pesar de ser más eficientes.

Este tipo de filtros son una de las etapas más utilizadas en los productos de filtración hoy en día, ya que su fabricación se ha vuelto sumamente económica en los últimos años, el polipropileno es un material que se puede fabricar en hebras que se entrelazan para crear mallas de distintos tamaños y que pueden remover componentes desde los 5 a los 50 micrómetros.

La teoría de la filtración convencional se deriva de los estudios de la mecánica de fluidos en medios porosos. La ecuación que describe el movimiento de fluidos newtonianos a través de medios porosos fue formulada en 1856 por el geólogo Frances D'Arcy. (Ochoa, s.f., pág. 4). La aplicación de esta ecuación al caso particular donde se desprecian los efectos gravitacionales (lechos cortos), puede ser descrita como:

(Ecuación 1).

$$v = \frac{k\Delta P}{\mu l}$$

Donde la velocidad superficial del líquido es igual a la división de la permeabilidad del lecho multiplicada por la diferencia de presión a través del lecho, entre la multiplicación de la profundidad del lecho filtrante y la viscosidad del fluido. (Ochoa, s.f., pág. 4)

### **5.6.2 Carbón activado granulado (CAG).**

El carbón activado es uno de los materiales más utilizados hoy en día para el filtrado de agua, el carbón activado granulado es un material altamente poroso que adsorbe compuestos orgánicos y que se produce bajo condiciones controladas a través de la activación con vapor a alta temperatura, lo cual le permite desarrollar una elevada superficie específica que facilita la adsorción física de líquidos, gases y vapores de distintas mezclas o sustancias dispersas. El carbón activado granulado se aprovecha para distintas funciones debido a las características de fabricación con las que puede contar, como pueden ser el número de yodo, el tamaño de malla, porosidad, tipo de material, aplicación, etc.

Estas características, junto con la naturaleza química de los átomos de carbono que lo conforman, le dan la propiedad de atraer y atrapar de manera preferencial ciertas moléculas del fluido que lo rodea, en su mayoría compuestos orgánicos con afinidad covalente a enlaces de carbono e hidrógeno.

El CAG, es un compuesto covalente que muestra preferencia por moléculas de su mismo tipo, que tienden a ser no iónicas y poco polares. Como compuestos orgánicos, algas, detergentes, pesticidas y otros. Estos compuestos causan olor y sabor en aguas de abastecimiento y cuentan con estructura química similar al CAG, los carbones tienen electrones desapareados y valencias insaturadas de mayor energía potencial que buscan enlaces con los compuestos que adsorbe.

El CAG es utilizado para el tratamiento de aguas, sustituyendo o complementando a los filtros de arena como segunda etapa de filtración ya sea como filtro mecánico y adsorbente o como una etapa adsorbente con mayor eficiencia de retención.

De acuerdo con Edward Arana, el tamaño efectivo de la partícula del carbón activado granulado menores a 0.9mm y coeficientes de uniformidad de 1.9 de CAG se obtienen efectividades de remoción de sólidos totales iguales o superiores a la arena o medios bicapa de antracita y arena. (Correa, 2016, pág. 15)



Una de las principales funciones del CAG es la de cloración o eliminación del cloro libre del agua. Este agente es un componente químico que se agrega al agua de suministro para desinfectarla y en ocasiones controlar olores, el crecimiento biológico y eliminar el amoníaco. La adición de cloro en el agua presenta cloro disuelto en forma de ácido hipocloroso (HOCL) en el agua. (Carbotecnia, 2021)

Comúnmente en los centros de tratamiento de agua se realiza una etapa de eliminación del cloro residual ya que es tóxico para el ser humano en grandes cantidades y agrega un mal sabor y olor al agua. Este compuesto se utiliza en la mayoría de los procesos industriales, ataca la mayoría de las resinas de intercambio iónico y daña las membranas en equipos de osmosis inversa.

**Figura 7: Carbón activado granulado.**



carbón activado granulado - Bing images

El CAG en un lecho fijo, es el agente reductor de cloro más comúnmente utilizado y mediante una compleja reacción química actúa como adsorbente eliminando materia orgánica y cloro residual.

## CONFIDENCIAL

Se puede utilizar a nivel industrial debido a la gran variedad de beneficios que ofrece en los procesos que utilizan agua; algunos beneficios son la eliminación de sustancias coloridas o decoloración, eliminación de olores, eliminación de sustancias que interfieren con la cristalización, recuperación de solventes, purificación de ácidos orgánicos y aminoácidos de procesos de fermentación, eliminar cloro y ozono, purificación de dióxido de carbono, descafeinar bebidas, eliminar el sabor amargo y aromas determinados de productos alimenticios, etc. (H<sub>2</sub>O, s.f.)

El número de yodo se utilizará como variable para evaluar la capacidad operativa del CAG. Esta es una de las variables fisicoquímicas más sencillas de medir y que refleja la capacidad operativa del carbón. También se encuentran la capacidad de adsorción de fenol, azul de metileno, melazas, tetracloruro de carbono, butano y otras.

Esta es la variable que ha resultado más aceptada comercialmente y corresponde a los miligramos de yodo que adsorbe un gramo de carbón (en base seca), cuando la concentración residual de yodo en la solución es 0.02N. (Carbotecnia, s.f.).

### 5.6.3 Resinas de intercambio iónico.

Las resinas de intercambio iónico son polímeros en forma de pequeñas esferas de gel capaces de intercambiar iones (cationes o aniones) del polímero con iones en una solución que se pasa a través de ellos. Las resinas se usan principalmente para purificar agua, pero también para varias otras aplicaciones, incluida la separación de algunos elementos. Las resinas en forma de perla suelen ser de ácido sulfónico o carboxílico o sales de amonio cuaternario. Estos polímeros contienen grupos ácidos y se clasifican como intercambiadores ácidos o de catión, cuando intercambian iones positivos, como iones de hidrógeno y iones metálicos; Los grupos de amonio se consideran intercambiadores de bases o aniones y a los polímeros que intercambian iones negativos se les conoce como iones de hidróxido ordinarios o iones de haluro.

En aplicaciones industriales, las resinas de intercambio de iónico se utilizan para eliminar el calcio, magnesio, hierro y manganeso o suavizar el agua, para desmineralización y para retener concentraciones de elementos valiosos, como el oro, la plata y el uranio de los minerales.

Hay dos tipos diferentes de polímeros que usualmente se clasifican como resinas de intercambio iónico que pueden ser del tipo aniónico y catiónico. (Carbotecnia, s.f.)

Las resinas aniónicas se dividen en dos: de base fuerte y de base débil. Las de base fuerte derivan su funcionalidad de los sitios de intercambio de amonio cuaternario mientras que las de base débil contienen el grupo funcional de poliamina que actúa absorbiendo ácido, eliminando ácidos fuertes. (Carbotecnia, s.f.)

**Figura 8: tipo de resinas y capacidad**

Tipo de resina*	Capacidad total	Capacidad útil
WAC (cat. débil)	3,7 a 4,5 [4,2]	1,0a 3,5
SAC (cat. fuerte)	1,7 a 2,2 [2,0]	0,6 a 1,7
WBA (an. débil)	1,1 a 1,7 [1,3]	0,8 a 1,3
SBA (an. fuerte)	0,9 a 1,4 [1,2]	0,4 a 0,9

De acuerdo con los estudios de la calidad del agua de entrada para las pruebas, se definió que se requiere una resina catiónica de ácido fuerte y una resina aniónica de base fuerte.

**Figura 9 resina de intercambio iónica de base fuerte.**

# Resinex™ AW-4

## Strong base anion exchange resin

Resinex™ AW-4 is a high purity, premium grade, strongly basic gel-type anion exchange resin type 1, specially designed for demineralisation applications in the food industry. The product is a prewashed, bead type, crosslinked polystyrene-divinylbenzene copolymer resin that offers a good resistance to physical and mechanical breakage and organic fouling. The selected bead distribution of Resinex™ AW-4 is especially adapted for all modern counter-current systems (i.e. Schwebebett, UPCORE,..).

<b>Typical Properties</b>		<b>Key Features and Benefits</b>	
Type	Crosslinked polystyrene divinylbenzene	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>High Integrity Beads</b> Excellent resistance to mechanical degradation ensures low pressure drop</li> <li>• <b>Low Silica Leakage</b></li> <li>• <b>Optimized Caustic Soda Consumption</b> Economical advantage</li> <li>• <b>Resistance To Osmotic Shock</b> Extended lifetime and very low number of broken beads</li> <li>• <b>Low Extractables</b> Specially treated to eliminate leaching of organic matter</li> </ul>	
Form	gel-type, white, spherical beads		
Functional group	Quaternary Ammonium, Type 1		
Whole bead count	95% min.		
Ionic form, as shipped	Cl		
Bead size	0.42 - 1.25 mm		
Uniformity coefficient	1.60 max.		
Bulk density, as shipped	670 kg/m <sup>3</sup>		
Real density	1.06 g/cm <sup>3</sup>		
Water retention	50 - 56%		
Total capacity (Cl form)	1.30 eq/l min.		
Volume change Cl <sup>-</sup> -> OH <sup>-</sup>	30% max.		
Stability, temperature	60°C max.		
Stability, pH	0 - 14		
<b>Standard Design Conditions</b>		<b>Typical Applications</b>	
		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Demineralisation in water treatment systems together with Resinex™ KW-8</li> <li>• Polishing mixed-bed when used in combination with Resinex™ KW-8</li> </ul>	

De acuerdo con la investigación desarrollada se encontraron del proveedor Carbotecina las resinas comerciales siguiente, Figura 10, y antes mencionada, Figura 9, para su evaluación de acuerdo con la capacidad iónica total requerida que se verá más adelante.

**Figura 10: Resina de intercambio catiónica de ácido fuerte.**

## Resinex™ K-8 FG

### Strong acid cation softening resin

Resinex™ K-8 FG is a high purity, premium grade, pretreated, strongly acidic gel-type cation exchange resin specially designed for residential drinking water treatment. The K-8 FG is a bead type, crosslinked, polystyrene divinylbenzene resin that offers excellent bead integrity and very low extractables. The product is highly suitable for a wide variety of drinking water treatment applications. Resinex™ K-8 FG has a light amber color and is specially pretreated to remove taste, odor and color throw.

Typical Properties		Key Features and Benefits
Type	Crosslinked polystyrene divinylbenzene	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Pretreated and Rinsed</b> Guarantees minimal color throw and eliminates taste and odor</li> <li>• <b>High Integrity Beads</b> Excellent resistance to mechanical degradation ensures low pressure drop</li> <li>• <b>Low Extractables</b> Specially treated to eliminate leaching of organic matter</li> </ul>
Form	Gel-type, amber, spherical beads	
Functional group	Sulfonic acid	
Whole bead count	95% min.	
Ionic form, as shipped	Na <sup>+</sup>	
Bead size	(0.42 - 1.25 mm) 16x40 US mesh	
Uniformity coefficient	1.60 max.	
Bulk density, as shipped	51 lb/ft <sup>3</sup>	
Real density	1.28 g/cm <sup>3</sup>	
Water retention	45 - 48%	
Total capacity (Na <sup>+</sup> form)	2.00 eq/l min.	
Volume change Ca <sup>2+</sup> → Na <sup>+</sup>	2% max.	
Stability, temperature	248°F max.	
Stability, pH	0 - 14	
Color throw	25 APHA max.	
		<b>Typical Applications</b>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Residential Softening</li> <li>• Industrial Softening</li> <li>• Municipal Softening</li> </ul>

## CONFIDENCIAL

Uno de los índices de determinación de la calidad del agua tratada con resinas de intercambio iónico es el nivel de TDS o total de sólidos disueltos por sus siglas en inglés, es un indicador sencillo de utilizar que permite recibir una característica del agua de forma inmediata, sin embargo, es solo una de las pruebas de análisis fisicoquímico biológico del agua.

Este indicador es un porcentaje de los componentes disueltos en el agua, como sales y minerales principalmente calcio, magnesio, potasio, sodio, bicarbonatos, cloros y sulfatos junto con algunos compuestos orgánicos.

Se mide por unidad de volumen de agua o partes por millón en mg/L o ppm. La disminución o cambio de este indicador en 250 ppm respecto al valor de entrada permiten al usuario tener una percepción del cambio de sabor del agua.

De forma general el agua con un nivel de TDS menor a 300 ppm es de excelente calidad, menor a 600 indica un nivel bueno, menor a 900 es regular, menor a 1200 es pobre y no recomendable para consumo y mayor de 1200 es inaceptable. Como podemos ver en la Figura 11.

**Figura 11: Nivel de TDS aceptable en el agua.**

0 – 300 – Excelente calidad de agua potable
300 – 600 – Nivel Bueno
600 – 900 – Nivel Regular
900 – 1,200 – Nivel Pobre (no recomendable)
1,200 a más – Inaceptable

(Agua, s.f.)

Este indicador cambia conforme el agua pasa a través de una resina de intercambio iónico y es por ello por lo que se desarrolla el método de prueba que veremos más adelante.

## 6 Metodología de la investigación y evaluaciones

El proceso de diseño, como se mencionó anteriormente, consta de distintas etapas; la primera de ellas es la etapa de definición, donde se identifican las metas de calidad y funcionalidad del sistema como la definición de los objetivos de presión y caudal. Con el benchmarking de productos similares a lo que se busca se miden los parámetros definidos previamente en sistemas comerciales y se prueban distintas variables en ellos; se diseña un sistema similar y para definir el diseño óptimo de un filtro con las etapas antes definidas se desarrollan los DOE's correspondientes para obtener ecuaciones que pueden optimizar las respuestas para alcanzar las metas y se puede verificar el cambio confirmando con pruebas adicionales.

### 6.1 Benchmarking.

En esta primera etapa del proceso de diseño se realiza un benchmarking de los productos comerciales actuales en el mercado para filtración de agua. Este es un estudio que nos permitirá definir cuáles son los elementos que se medirán y los materiales que se deben analizar en las siguientes etapas del proceso.

El primero de los productos de los cuales se desarrolla la investigación es el filtro de agua de refrigeradores de productos General Electric que cuenta con un filtro de carbón activado en bloque que se conecta directamente a la red de distribución y requiere de una presión mínima de operación en un rango de los. 40 a 120 psi. (Amazon, s.f.)

Figura 12: Filtro MWF de GE



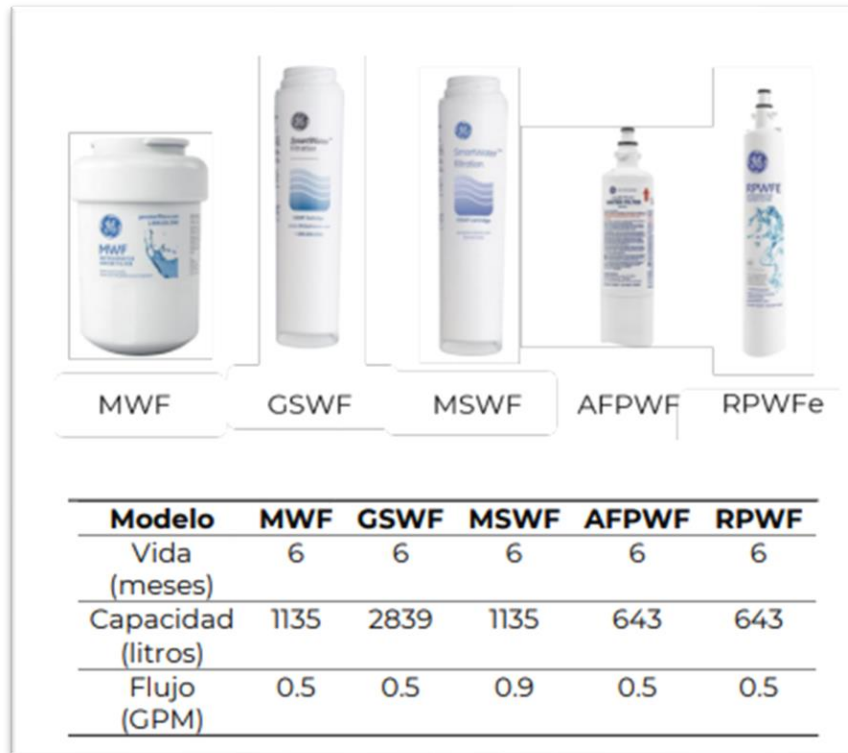
Este producto tiene un tiempo de vida de 6 meses, lo que equivale a 300 galones de agua. Al ser un producto principalmente para Estados Unidos, solamente presenta la etapa de carbón activado.

**Figura 13: Tiempo de vida filtro MWF de GE.**



Algunos filtros similares a lo que se mencionó en el primer benchmarking son los filtros de refrigerador que se utilizan en productos de Generar Electric cuyas especificaciones son las siguientes, además las presiones de trabajo requeridas son mayores a 5 psi.

**Figura 14: Filtros de refrigeradores GE**





El segundo grupo de filtros que se probaron también de carbón activado, en este caso granulado y con resinas de intercambio iónico fueron el filtro Brita Pitcher Filter y el filtro Aqua Optima.

Estos filtros se utilizan en sistemas de filtración de agua para Estados Unidos y Europa.

**Figura 15: Filtros Brita**



Reduce los contaminantes del agua de la llave y producen agua de buen sabor reduciendo el cloro, mercurio, cobre y cadmio, estos filtros duran aproximadamente 2 meses o 40 galones de uso en promedio. (Brita, 2021)

**Figura 16: Como trabaja el filtro Brita.**



El filtro Aqua Optima es un sistema de filtración desarrollado para agua de la llave en Estados Unidos, que reduce cloro, metales pesados, herbicidas y pesticidas y permite que el agua retenga elementos benéficos como flúor y potasio en el agua.

**Figura 17: Filtro de 5 etapas, Aqua Optima**



Es un sistema de filtración de cinco etapas: la primera de ellas es un filtro de polipropileno que remueve partículas grandes, sedimentos y óxido. Después se tiene una mezcla de carbón activado y resina de intercambio iónico, una malla fina y un diseño que asegura un flujo constante.

Este filtro dura 4 meses filtrando 170 litros . (Aqua Optima, s.f.)

**6.2 Calidad de agua de entrada.**

De acuerdo con la norma mexicana NOM-127-SSA1-1994 respecto a la calidad de agua potable, los límites permisibles establecidos para los distintos parámetros son los marcados con la leyenda L.P. en la siguiente tabla.

**Figura 18: Valores de calidad del agua.**

Valores de Calidad del Agua								
Garza de Agua para Pipas (Pozo Capilla No. IV)								
Parámetros								
1. Bacteriológicos y Cloro Residual.	Coliformes Totales (UFC/100 mL)	Coliformes Fecales (UFC/100 mL)	Cloro Residual (UFC/100 mL)					
	L.P. = Ausencia	L.P. = Ausencia	L.P. = 0.2 a 1.5					
	0	0	1.0 a 1.5					
2. Físicos.	Color (Unidad Co-Pt)	Turbiedad (UNT)	SoL. Disueltos Totales (mg/L)	Temperatura (°C)	Cond. Eléctrica (µs/cm)	pH (Unidades)	Olor (Unidades)	
	L.P. = 20.0	L.P. = 5.0	L.P. = 1000	L.P. = N.A.	L.P. = N.A.	L.P. = 6.5 - 8.5	L.P. = Agradable	
	2.50	0.05	352	29.0	667.0	7.87	Agradable	
3. Minerales.	Cloruros (mg/L)	Dureza Total (mg/L)	Fluoruros (mg/L)	Nitratos (mg/L)	Nitritos (mg/L)	Sulfatos (mg/L)		
	L.P. = 250.0	L.P. = 500.0	L.P. = 1.5	L.P. = 10.0	L.P. = 1.0	L.P. = 400.0		
	33.6	196.8	0.590	6.740	< 0.01	56.220		
4. Metales.	Aluminio (mg/L)	Arsénico (mg/L)	Bario (mg/L)	Cadmio (mg/L)	Cobre (mg/L)	Cromo (mg/L)	Fierro (mg/L)	Manganeso (mg/L)
	L.P. = 0.20	L.P. = 0.025	L.P. = 0.70	L.P. = 0.005	L.P. = 2.00	L.P. = 0.05	L.P. = 0.30	L.P. = 0.15
	< 0.10	< 0.005	< 0.10	< 0.0025	< 0.0125	< 0.005	< 0.050	< 0.0075
	Mercurio (mg/L)	Plomo (mg/L)	Sodio (mg/L)	Zinc (mg/L)				
	L.P. = 0.001	L.P. = 0.01	L.P. = 200.0	L.P. = 5.00				
	< 0.001	< 0.0025	61.00	< 0.010				

**Simbología:**  
L.P. = Límite permisible establecido en la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994.

N.A. = No Aplica.

Dependiendo de la etapa de filtración del agua en el filtro que se estará probando, se eliminarán distintos componentes en el agua.

De acuerdo con la información obtenida en el benchmarking y en el estudio de la calidad de agua de entrada se medirán los parámetros más significativos y que se pueden medir con distintos aparatos comunes.

Se calculará la permeabilidad del lecho de los distintos filtros para el caso del polipropileno.

Se medirá el cambio en la concentración del colorante orgánico Azul de Metileno en un espectrofotómetro en el caso del carbón activado.

Y se utilizará la medición del total de sólidos disueltos residuales para el caso de las resinas de intercambio iónico.

### 6.3 Diseño y desarrollo del banco de pruebas

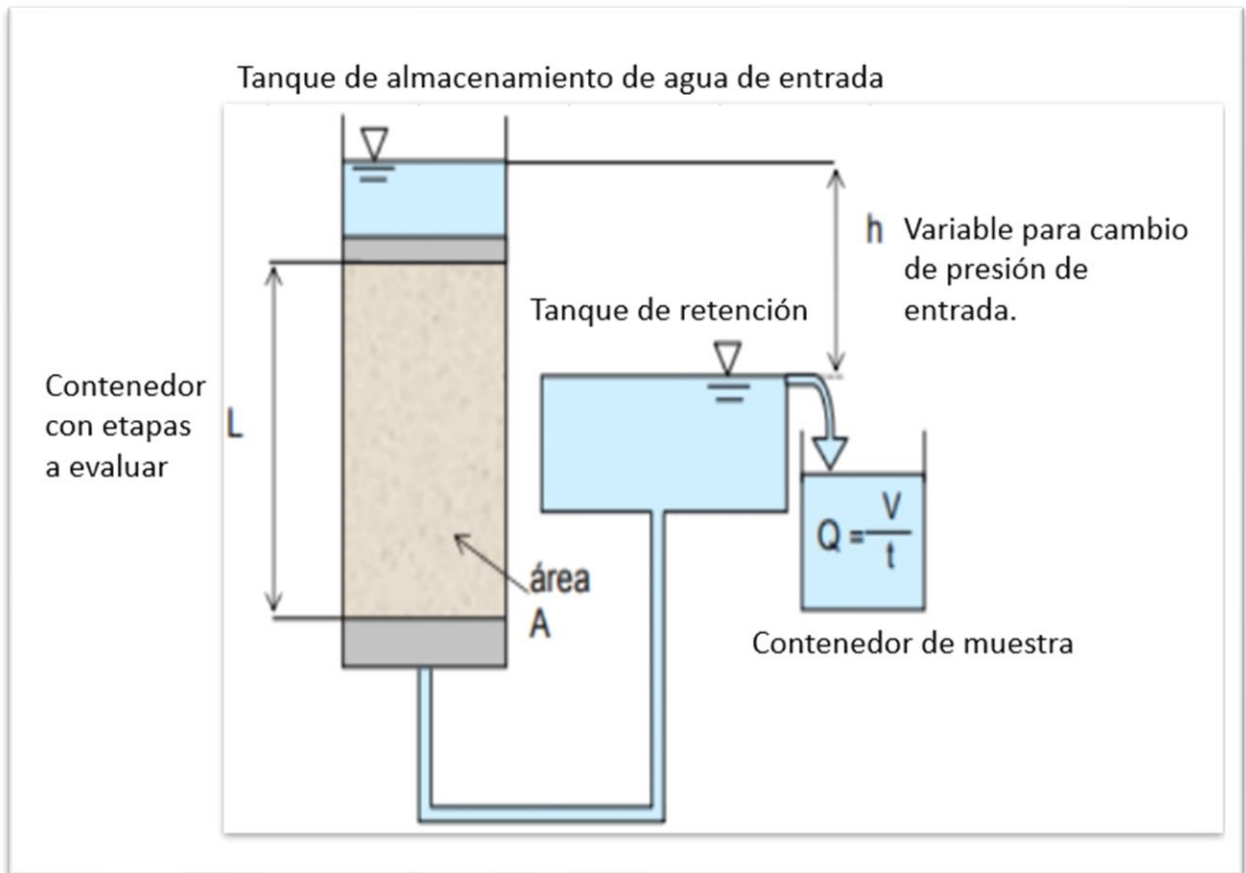
Para efectuar las evaluaciones de cada una de las etapas fue necesario desarrollar un dispositivo para poder probar cada una de las variables de los distintos diseños de experimentos que se desarrollan para cada etapa.

Esto con el objetivo de simular, en condiciones controladas el entorno de trabajo más común de condiciones de calidad de agua, presión y flujo de entrada al sistema para conocer la calidad de agua de salida y su flujo.

Es de suma importancia controlar el tipo de agua que entra al sistema y que la presión en el sistema de forma estática se encuentre dentro de los parámetros establecidos como límites superior e inferior, además, en ciertos casos, es necesario también controlar la calidad del agua de entrada para su posterior evaluación y además ingresar una mezcla controlada de agua para su posterior evaluación.

Es por esto por lo que se diseñó el siguiente banco de pruebas que en medida de las situaciones de salud actuales y la disponibilidad de materiales y espacios de trabajo. Este modelo se fue ajustando para su uso en cada una de las etapas.

**Figura 19: Diagrama de funcionamiento general del banco de pruebas**



## CONFIDENCIAL

Se coloca un tanque de almacenamiento de agua de entrada fijo a una distancia de 2.5 m del punto de ubicación del contenedor de muestra variable. Este tanque se encuentra abierto a la atmósfera y permite el cambio de agua de entrada dependiendo de los requisitos de la prueba.

La salida del tanque de almacenamiento de agua de entrada es conectada mediante tuberías de polipropileno de 1/4" al contenedor con etapas a evaluar donde se colocará cada material o componente que será evaluado en el DOE. Dependiendo de la evaluación que se está desarrollando, el área A será ocupada por un material distinto. Ya sea polipropileno, carbón activado o resinas de intercambio iónico en ciertas proporciones. Este contenedor tiene una capacidad de 0 hasta 200 gramos de producto para los tamaños de materiales seleccionados y será utilizado de acuerdo con los requisitos de cada repetición de pruebas.

El tanque de retención se conecta mediante otra tubería de polipropileno a la salida del contenedor y éste puede colocarse a una distancia distinta en referencia al espejo de agua del tanque de almacenamiento o altura variable. Esto permite desarrollar distintas evaluaciones con un cambio de la presión de entrada en función de la posición de salida del tanque de retención en la parte inferior.

Al cambiar distancia  $h$  entre el espejo de agua del tanque de almacenamiento de agua de entrada y el tanque de retención entre 0.6 m y 2.2 m el banco de pruebas permite obtener una presión de trabajo entre 1 y 3 psi estáticos en el sistema.

Para tomar la medición de flujo en cada evaluación, se utiliza el Contenedor de muestra, donde se toma un registro del tiempo en llegar a un volumen de 250 ml de agua en cada evaluación y así calcular el flujo  $Q$  en cada medición.

Dependiendo de la etapa en evaluación se utilizan también los distintos instrumentos de medición de la variable a registrar.

Como software, se desarrollarán en Excel los cálculos de permeabilidad del lecho en el caso del polipropileno.

Se utilizará papel de aluminio para cubrir los contenedores y el espectrofotómetro en el caso del carbón activado granulado.

Y también se utilizarán los medidores del nivel de TDS para el caso de las resinas de intercambio iónico.

#### **6.4 Etapas y materiales seleccionados.**

Como se mencionó anteriormente, en este estudio se evaluarán 3 etapas de filtrado distintas, de acuerdo con la información que obtuvimos del benchmarking presentado previamente y del análisis de las observaciones obtenidas de los distintos filtros comerciales además de la información obtenida en el estudio de la calidad de agua de entrada.

Se tomó en consideración que se busca un sistema económico, por lo tanto, se evaluarán las etapas de polipropileno, carbón activado granular y resinas de intercambio iónico para mantener el funcionamiento con gravedad. Se propone incluir una etapa adicional de carbón activado al final, de acuerdo con las observaciones de sistemas de purificación con varias etapas, para refinar el sabor, color y olor del agua previo a su purificación.

Y además se recomienda también posteriormente al proceso de purificación, agregar una etapa de alcalinización con un filtro adicional para recuperar minerales adecuados y necesarios para el uso diario.

Se desarrollará una filtración pasiva utilizando solamente la presión de entrada como método de separación.

Para la primera prueba, se evalúan dos cilindros de polipropileno de las mismas dimensiones para el DOE. Con un radio de 2.2 cm y una altura de 1.7 cm. Se calcula el promedio de la viscosidad del agua de prueba por medio de la temperatura registrada en todos los días de prueba siendo este valor para 28 grados de 0.000833 kg/ms.

En la segunda evaluación se seleccionan dos carbones activados distintos. El primero de ellos es un carbón de concha de coco del tipo granular, llamado "Micro K", es un material micro poroso e indicado para la potabilización del agua, es activado térmicamente en una atmosfera con características altamente reductoras, es de origen vegetal y adsorbe componentes orgánicos de bajo peso molecular; tiene un tamaño de partícula de 8x30. El segundo es un carbón llamado "Micro LF" para tamaños de partícula de 4x20.

Para la tercera evaluación se utilizarán dos proporciones de resinas de intercambio iónico distintas que se evaluarán en un diseño de experimentos adicional al que se le medirá el nivel de TDS y el flujo para obtener la muestra de agua.

### 6.4.1 Evaluación de polipropileno

La primera etapa evaluada, será la filtración de componentes visibles a través de un filtro de polipropileno. Se desarrolla una evaluación mediante el comparativo de dos compuestos similares de dimensiones iguales en un filtro del cual se obtendrá la permeabilidad del lecho mediante la Ecuación 1. (<http://sgpwe.izt.uam.mx/files/users/uami/sho/Filtracion>, s.f.)

(Ecuación 1). 
$$v = \frac{k\Delta P}{\mu l}$$

La aplicación de esta ecuación al caso particular permite conocer cuál es la permeabilidad de lecho las condiciones del experimento; mediante una evaluación en un diseño de experimentos en la que se mide el tiempo para calcular el flujo de un área de filtración constante para dos filtros distintos y la caída de presión

El segundo parámetro para este proceso de evaluación consiste en la prueba a dos presiones de entrada distintos; un nivel bajo de 1 psi y el nivel alto de 3 psi de presión estática como se definió anteriormente.

Se evalúan dos tipos de filtros de polipropileno a la entrada de agua en el filtro y se realiza una medición a la salida de agua tomando muestras junto con el tiempo de salida para determinar el flujo para filtrar 250 ml de agua.

**Figura 20 DOE de Polipropileno.**

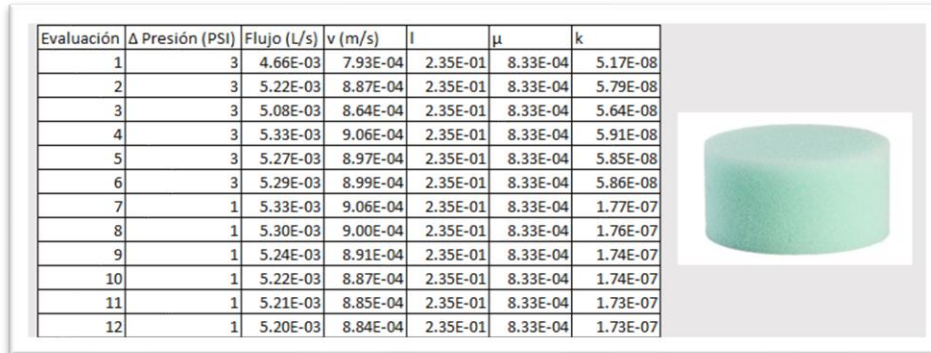
Filtro de polipropileno poroso A		
Filtro de polipropileno Avera B		
Área de filtración	Filtro A	Filtro B
0.23499113	0.23499113	0.23499113
Delta P (PSI)	Bajo	Alto
1	1	3
3		
Flujo volumetrico	Filtro A	Filtro B
Permeabilidad	Filtro A	Filtro B

CONFIDENCIAL

Se desarrollan seis repeticiones a los distintos niveles de presión con cada uno de los dos filtros formando un diseño de  $2^1 \times 6 = 12$  evaluaciones para cada filtro. De acuerdo con las mediciones desarrolladas se obtuvo la siguiente información para cada uno de los filtros de polipropileno.

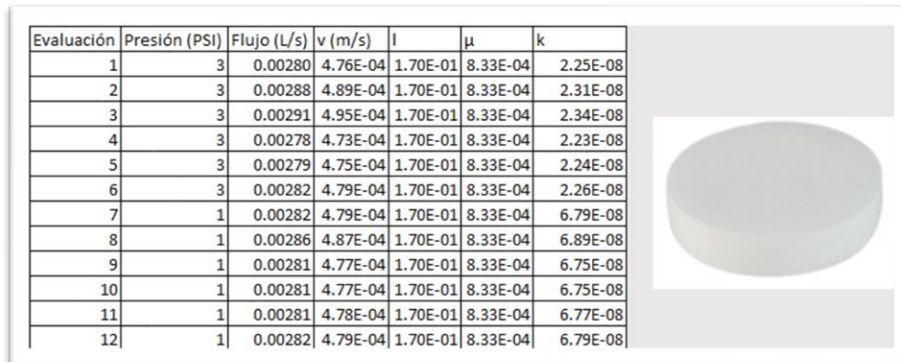
En el primer conjunto de evaluaciones se probó un filtro de polipropileno poroso. Esta información nos permite calcular la permeabilidad del lecho, en este caso encontramos dos grupos en el orden de los nanómetros; en promedio se obtiene una permeabilidad del lecho del orden de los .5 nanómetros y .174 nanómetros para las condiciones de alta y baja presión respectivamente.

**Figura 21: Resultados DOE del PP 1.**



Comparando contra el segundo grupo de evaluaciones; donde se probó un filtro de polipropileno con baja porosidad de marca Avera. Obtenemos que la permeabilidad del lecho también se encuentra en el orden de los nanómetros, pero a diferencia de la prueba anterior podemos observar que en promedio la permeabilidad de lecho es sumamente distinta que el ejercicio previo obteniendo cerca de .2 nanómetros para alta presión y .6 nanómetros en el caso de baja presión.

**Figura 22: Resultados DOE del PP 2.**



De acuerdo con esta información se puede concluir que un filtro de mayor porosidad tendrá una mayor permeabilidad de lecho a baja presión y que un filtro con menor porosidad contará con mayor permeabilidad a alta presión. Esto se analizará a mayor detalle en la siguiente sección de análisis de resultados y conclusiones.



### 6.4.2 Evaluación de Carbón Activado Granulado

La segunda etapa evaluada es el Carbón Activado Granulado, en la cual se calcula la reducción del azul de metileno mediante una medición en un espectrofotómetro de la absorbancia. Para el carbón activado granulado los componentes se retienen por medio del método de adsorción y son principalmente materiales orgánicos que en algunos casos dan color y olor al agua.

Este Diseño de Experimentos cuenta con dos niveles de masa a 64 y 128 gramos respectivamente como niveles bajo y alto de cada carbón.

Al igual que en la evaluación anterior, el segundo parámetro en esta evaluación es el factor de la presión de entrada al sistema cuyos niveles de presión son, igual que en la prueba previa, de 1 psi en su nivel bajo y de 3 psi en su nivel alto mientras el sistema se encuentra estático.

La característica distintiva que se utiliza como variable en el DOE se identifica mediante el número de yodo que tiene un valor de 400 y 600 respectivamente de cada carbón activado marcados en la siguiente tabla.

**Figura 23: Parámetros CAG**

Carbon activado tipo Micro 4 LF		
Carbón activado tipo Micro K		
Masa	Bajo	Alto
64	64	128
128		
Presión	Bajo	Alto
1	1	3
3		
Numero de yodo	Micro 4 Lf	Micro K
400	400	3
600		

Una característica adicional para diferenciar los carbones utilizados en esta evaluación son los distintos tipos de malla o tamaño de gránulos que son función del número de yodo.

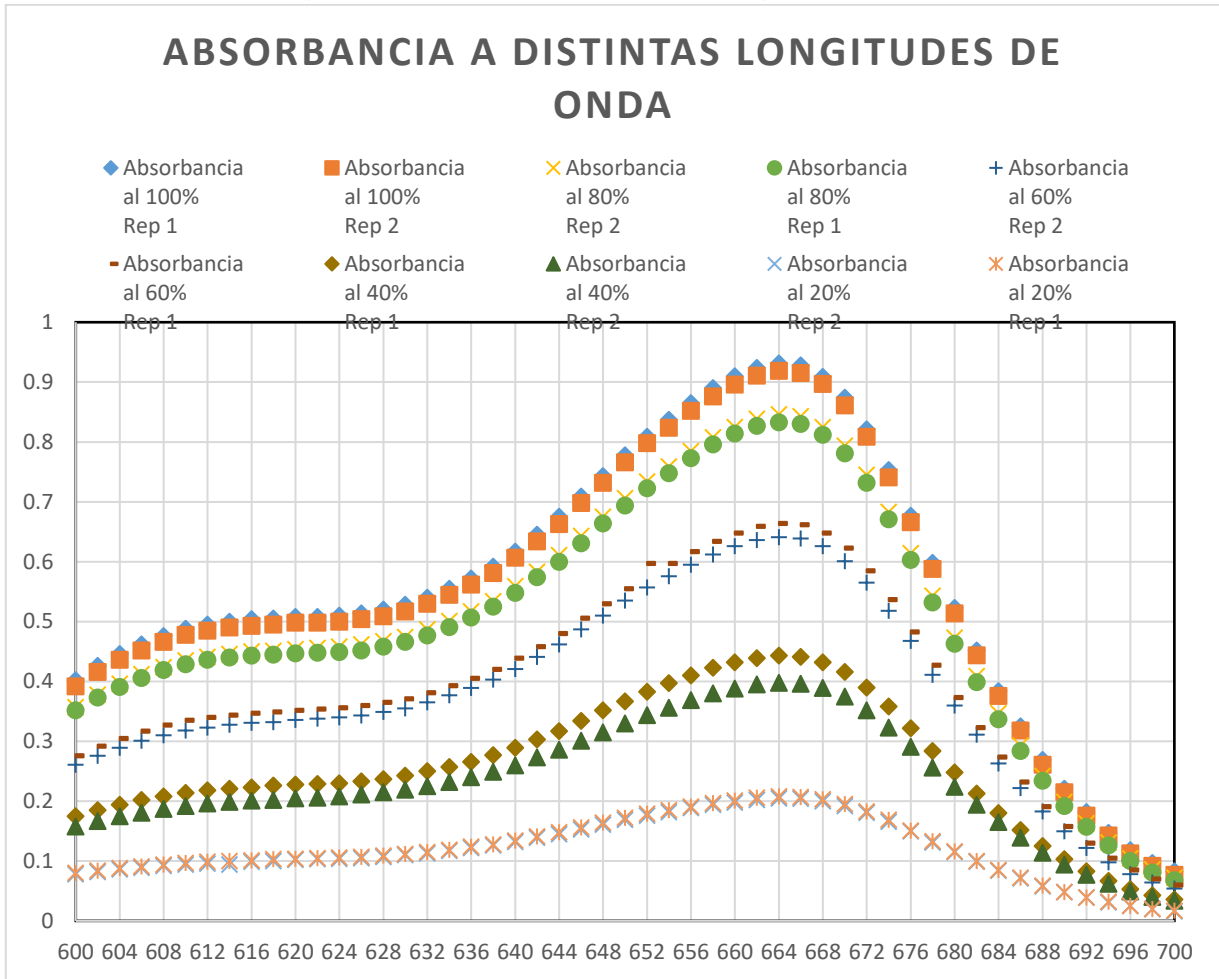
## CONFIDENCIAL

Para medir los resultados de las evaluaciones desarrolladas con estos dos carbones y reducir la variabilidad, se propone y desarrolla el método de prueba siguiente para la preparación de muestras y poder así medir la reducción de azul de metileno.

1. Preparar una muestra con concentración al cien por ciento de 20 litros de agua destilada filtrada y sin contaminantes con una concentración de azul de metileno de 2 mg por litro. Cubrir contra los rayos UV.
2. Preparar para cada experimento las diluciones de la muestra previa a las siguientes concentraciones: 100%, 80%, 60%, 40%, 20% y 0% de azul de metileno en 2L de agua correspondientemente a la evaluación a desarrollar.
3. Desarrollar las mediciones de la absorbancia para desarrollar la curva de calibración y así conocer la concentración máxima de azul de metileno en el espectrofotómetro a 664 nanómetros.
4. Desarrollar el diseño de experimentos probando los distintos puntos de forma aleatoria y cambiando cada una de las variables: masa, número de yodo y presión.
5. Medir la absorbancia de cada experimento de las muestras a distintas concentraciones en un espectrofotómetro calibrado a 664 nanómetros y registrar.
6. Analizar los resultados de cada muestra de agua de salida para conocer la reducción de azul de metileno con cada uno de ellos.
7. Medir el tiempo para llenar 250 ml de agua en un contenedor graduado para cada evaluación.

De acuerdo con el método previo se desarrollaron las mezclas de agua controlada mezclada con azul de metileno en distintas concentraciones y se obtuvo la siguiente grafica. En la siguiente figura se ve la gráfica a distintas longitudes de onda y la absorbancia del agua con distintas concentraciones de azul de metileno. Esta figura servirá más adelante para saber la frecuencia de máxima absorbancia.

**Figura 24: Absorbancia a distintas longitudes de onda.**



En la tabla anterior podemos observar que a distintas concentraciones se tiene un máximo para una frecuencia de 664 nanómetros en cualquier concentración. Por lo cual el máximo de la medición de la concentración de azul de metileno se obtiene en esa longitud de onda para cada prueba.

**Figura 25: Concentración a 664 nanómetros.**

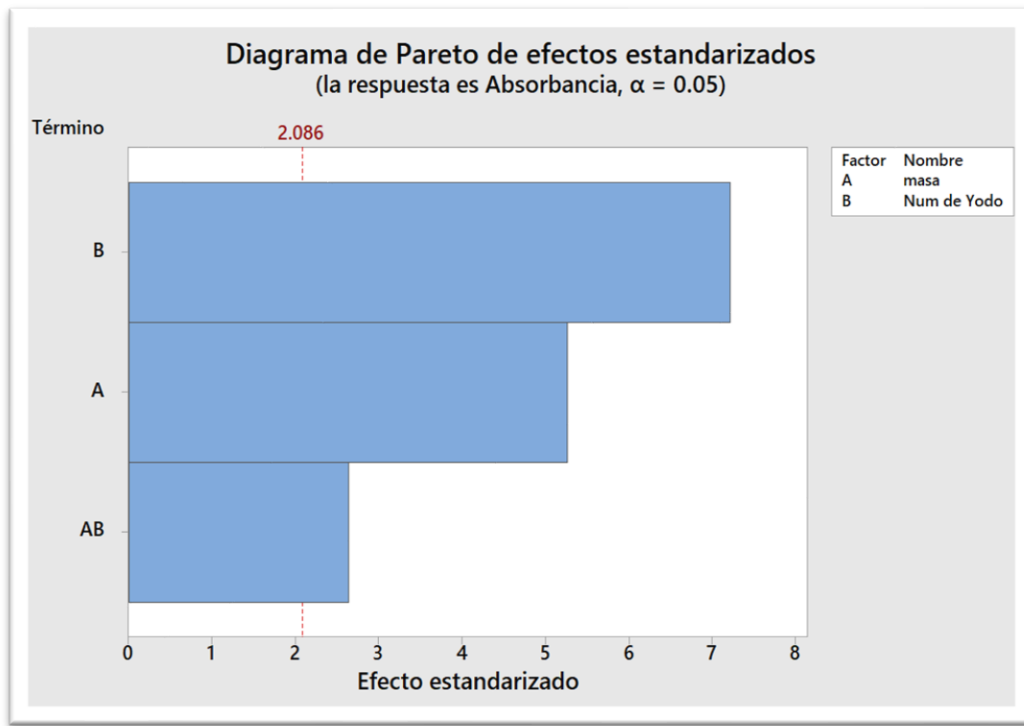
662	0.924	0.911	0.827	0.839	0.659	0.636	0.439	0.395	0.206	0.202
664	0.931	0.919	0.833	0.846	0.664	0.641	0.443	0.398	0.208	0.205
666	0.928	0.915	0.83	0.843	0.662	0.639	0.441	0.396	0.207	0.204

CONFIDENCIAL

Se desarrolla el diseño de experimentos de dos niveles y 3 variables con 3 repeticiones, lo que nos da  $2^3 \cdot 3 = 24$  corridas. Estas se desarrollan de forma aleatoria cambiando el tipo de carbón activado y por lo tanto el número de yodo, su masa, y la presión en cada prueba para obtener una muestra de 250 ml de mezcla y registrando el tiempo que toma cada evaluación en llenar ese volumen. Con lo que se logrará obtener la interacción entre la masa, presión y número de yodo de distintos CAG.

De acuerdo con el diagrama de Pareto de las interacciones entre las variables, masa (A) y número de yodo (B), podemos descartar la contribución de la presión (C) en sus dos niveles por lo cual, para simplificar la ecuación vamos a considerar solo las interacciones de los factores de masa y número de yodo corespondientes al carbón en sí.

Figura 26: Pareto del CAG



Se puede así obtener de la hoja de datos del análisis desarrollado la ecuación de regresión lineal en unidades no codificadas de absorbancia que nos permite calcular la absorbancia teórica que se obtendrá en cada experimento, en este caso sin contar la interacción de la presión.

Figura 27: Ecuación de Absorbancia.

**Ecuación de regresión en unidades no codificadas**

$$\text{Absorbancia} = 2.087 - 0.01159 \text{ masa} - 0.003041 \text{ Num de Yodo} + 0.000017 \text{ masa} \cdot \text{Num de Yodo}$$

## CONFIDENCIAL

De acuerdo con la R-cuad podemos decir que con un nivel de confianza del 81.26% se puede decir que la ecuación puede predecir el valor medido real para cada prueba.

**Figura 28: Ajuste del modelo de CAG.**

Resumen del modelo			
S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0.0984221	81.26%	78.45%	73.02%

Se desarrollan los experimentos en el banco de pruebas tomando una muestra de 250 ml de agua para cada repetición y se cubren de los rayos UV para medir en el espectrofotómetro y obtener el valor de la absorbancia para cada prueba. Se registra cada valor y se compara con el valor predicho con la ecuación previa. Se puede observar por medio de un análisis de los datos de absorbancia que la relación entre su valor real y calculado se ajustan al modelo.

**Figura 29: Datos de Absorbancia evaluaciones.**

Masa	Num de yodo	Presión	Absorbancia	Predicha 2
64	400	3	0.546	0.564
64	400	3	0.530	0.564
64	400	3	0.503	0.564
64	400	1	0.501	0.564
64	400	1	0.592	0.564
64	400	1	0.644	0.564
64	600	3	0.144	0.173
64	600	3	0.144	0.173
64	600	3	0.107	0.173
64	600	1	0.371	0.173
64	600	1	0.090	0.173
64	600	1	0.082	0.173
128	400	3	0.400	0.257
128	400	3	0.097	0.257
128	400	3	0.102	0.257
128	400	1	0.354	0.257
128	400	1	0.109	0.257
128	400	1	0.348	0.257
128	600	3	0.027	0.084
128	600	3	0.028	0.084
128	600	3	0.033	0.084
128	600	1	0.034	0.084
128	600	1	0.151	0.084
128	600	1	0.034	0.084

### 6.4.3 Evaluación de Resinas de intercambio iónico

La tercera y última de las evaluaciones se desarrollará probando las dos resinas de intercambio iónico de afinidad iónica y catiónica respectivamente seleccionadas previamente.

Estas resinas, dependiendo de su afinidad electrónica a los distintos compuestos en el agua, atraen en sus partículas a algunos de los distintos elementos, en su mayoría metales y minerales no deseados en el agua.

Como se mencionó anteriormente, la calidad del agua de entrada está definida previo a la realización de los experimentos y la dureza del agua de entrada se encuentra dentro del rango de nivel de TDS descrito en la norma NOM 127 como límites permisibles.

Se han desarrollado distintos paneles con consumidores y profesionales entrenados para desarrollar pruebas de gusto de la calidad del agua para discriminar entre muestras con distintos niveles de TDS, lo cual indica que una diferencia de 150 mg/l de TDS entre las muestras es necesario para percibir un cambio en el sabor de la misma. (R. Devesa, 2018)

En este caso el nivel de TDS es de 311 ppm. Se realiza la conversión de las unidades de concentración a miliequivalentes por litro, como lo vemos en la siguiente Figura 30 de correspondencias este es un parámetro utilizado por el proveedor elegido para proporcionar las resinas.

De acuerdo con una simple conversión de unidades de concentración de sólidos en el agua de partes por millón a miliequivalentes por litro se puede obtener la relación del total de sólidos disueltos de 311 partes por millón a 6.2 miliequivalentes por litro como dureza de agua de entrada.

**Figura 30: Conversión de concentración de sólidos en el agua.**

<i>Units of concentration (per volume of water)</i>		
Name	Abbreviation	meq/L
ppm as calcium carbonate	1 ppm as CaCO <sub>3</sub>	= 0.02
French degree	1 °f	= 0.2
German hardness degree	1 °dH	= 0.357
Grain as CaCO <sub>3</sub> per US gallon	1 gr as CaCO <sub>3</sub> /gal	= 0.342

CONFIDENCIAL



Estas pruebas se realizarán a través de un Diseño de Experimentos cuya primera variable será la masa que cuenta con dos niveles a 64 y 128 gramos.

Se realiza el siguiente cálculo para confirmar que la cantidad de resinas utilizada nos permita eliminar los componentes del agua de prueba en la cantidad mínima necesaria y adecuada para realizar las evaluaciones. Además, se considera la capacidad máxima del contenedor que se utilizará en el banco de pruebas que es de 150 gramos.



La calidad de entrada del agua en el sistema se evalúa dentro de los 300 a 350 PPM de TDS que corresponde a un miliequivalente por litro de 6.2 como dureza del agua de entrada, parámetro que se convierte mediante la siguiente tabla de conversiones.

**Figura 31: Agua tratable por las resinas.**

**Cantidad de agua mínima tratable por la resina aniónica.**

TDS	311 ppm		6.2 meq/L	Dureza agua de entrada				
TEC	1.3 meq/ml			1300 meq/L				
Cada litro de resina puede tratar			1300 /	6.2 =	209.003	Litros		
64 g	Pueden tratar		13.38	L				
128 g	Pueden tratar		26.75	L				

**Cantidad de agua mínima tratable por la resina catiónica.**

TDS	311 ppm		6.2 meq/L	Dureza agua de entrada				
TEC	2 meq/ml			2000 meq/L				
Cada litro de resina puede tratar			2000 /	6.2 =	321.543	Litros		
64 g	Pueden tratar		20.58	L				
128 g	Pueden tratar		41.16	L				

## CONFIDENCIAL

De acuerdo con los experimentos desarrollados anteriormente y en el mismo caso para este diseño de experimentos, la segunda variable a evaluar es la presión.

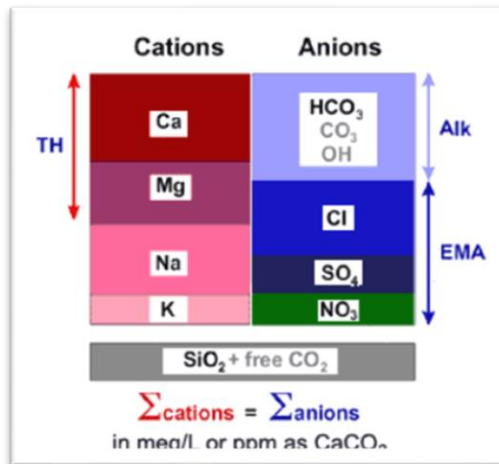
Conforme a los estatutos y recomendaciones de la instalación de un tinaco en México para hogares de interés social, se aconseja colocar los tinacos en una superficie plana ubicada aproximadamente a 2 metros desde la base de la salida del tinaco hasta la regadera o salida de agua más alta en el interior del domicilio.

Esto nos permite realizar una equivalencia de los metros columna de agua mínimos recomendados a PSI que será la unidad que se utiliza en este ejercicio para la presión y que se encuentra en el rango de 1 a 3 psi como nivel mínimo y máximo respectivamente. Sabemos que un metro columna de agua corresponde a 1.422 PSI y de acuerdo con esa conversión, se toma como equivalencia una presión de 1 psi o 0.704 m, a 3 psi o 2.10 m como niveles mínimo y máximo respectivamente.

La selección de la mezcla de las resinas para cada evaluación está dada por los componentes que se requiere remover del agua de la prueba.

En este caso, ya que la mayor proporción de componentes se encuentra en la categoría de componentes removibles por la resina catiónica, se propone realizar una mezcla 1 a 1 de resina aniónica y catiónica respectivamente y una segunda mezcla con proporciones 1 a 4 de resinas de intercambio iónico aniónica y catiónica respectivamente para validar la hipótesis de que una mayor cantidad de resina aniónica permite reducir el nivel de TDS del agua de entrada en una mejor proporción que una mezcla 1 a 1.

**Figura 32: proporción de componentes aniónicos y catiónicos en el agua.**



Las proporciones aquí seleccionadas se eligieron con base en la literatura del proveedor en las hojas de datos de cada resina, que indica que para la remoción adecuada de los componentes en el agua que se tiene disponible es más eficaz una concentración alta de resina catiónica.



CONFIDENCIAL

El ultimo parámetro intrínseco de cada una de las resinas es la capacidad total de intercambio o TEC por sus siglas en ingles que se calcula de acuerdo con los valores entregados por el proveedor para cada una de las resinas y tomados en proporción a la cantidad de material que se utiliza en cada prueba, quedando como niveles bajo el valor de 1.6 y alto el valor de 1.8. Esta unidad se mide en equivalentes por litro.

Figura 33: TEC en cada resina.

Resina Aniónica Resinex AW-4 (1.3)	Resina Catiónica Resinex K-8 (2)																																																										
<p><b>Typical Properties</b></p> <table border="1"> <tr><td>Type</td><td>Crosslinked polystyrene divinylbenzene</td></tr> <tr><td>Form</td><td>gel-type, white, spherical beads</td></tr> <tr><td>Functional group</td><td>Quaternary Ammonium, Type 1</td></tr> <tr><td>Whole bead count</td><td>95% min.</td></tr> <tr><td>Ionic form, as shipped</td><td>Cl<sup>-</sup></td></tr> <tr><td>Bead size</td><td>0.42 - 1.25 mm</td></tr> <tr><td>Uniformity coefficient</td><td>1.60 max.</td></tr> <tr><td>Bulk density, as shipped</td><td>670 kg/m<sup>3</sup></td></tr> <tr><td>Real density</td><td>1.06 g/cm<sup>3</sup></td></tr> <tr><td>Water retention</td><td>50 - 56%</td></tr> <tr><td>Total capacity (Cl<sup>-</sup> form)</td><td>1.30 eq/l min.</td></tr> <tr><td>Volume change Cl<sup>-</sup> -&gt; OH<sup>-</sup></td><td>30% max.</td></tr> <tr><td>Stability, temperature</td><td>60°C max.</td></tr> <tr><td>Stability, pH</td><td>0 - 14</td></tr> </table>	Type	Crosslinked polystyrene divinylbenzene	Form	gel-type, white, spherical beads	Functional group	Quaternary Ammonium, Type 1	Whole bead count	95% min.	Ionic form, as shipped	Cl <sup>-</sup>	Bead size	0.42 - 1.25 mm	Uniformity coefficient	1.60 max.	Bulk density, as shipped	670 kg/m <sup>3</sup>	Real density	1.06 g/cm <sup>3</sup>	Water retention	50 - 56%	Total capacity (Cl <sup>-</sup> form)	1.30 eq/l min.	Volume change Cl <sup>-</sup> -> OH <sup>-</sup>	30% max.	Stability, temperature	60°C max.	Stability, pH	0 - 14	<p><b>Typical Properties</b></p> <table border="1"> <tr><td>Type</td><td>Crosslinked polystyrene divinylbenzene</td></tr> <tr><td>Form</td><td>Gel-type, amber, spherical beads</td></tr> <tr><td>Functional group</td><td>Sulfonic acid</td></tr> <tr><td>Whole bead count</td><td>95% min.</td></tr> <tr><td>Ionic form, as shipped</td><td>Na<sup>+</sup></td></tr> <tr><td>Bead size</td><td>(0.42 - 1.25 mm) 16x40 US mesh</td></tr> <tr><td>Uniformity coefficient</td><td>1.60 max.</td></tr> <tr><td>Bulk density, as shipped</td><td>51 lb/ft<sup>3</sup></td></tr> <tr><td>Real density</td><td>1.28 g/cm<sup>3</sup></td></tr> <tr><td>Water retention</td><td>45 - 48%</td></tr> <tr><td>Total capacity (Na<sup>+</sup> form)</td><td>2.00 eq/l min.</td></tr> <tr><td>Volume change Ca<sup>2+</sup> -&gt; Na<sup>+</sup></td><td>2% max.</td></tr> <tr><td>Stability, temperature</td><td>248°F max.</td></tr> <tr><td>Stability, pH</td><td>0 - 14</td></tr> <tr><td>Color throw</td><td>25 APHA max.</td></tr> </table>	Type	Crosslinked polystyrene divinylbenzene	Form	Gel-type, amber, spherical beads	Functional group	Sulfonic acid	Whole bead count	95% min.	Ionic form, as shipped	Na <sup>+</sup>	Bead size	(0.42 - 1.25 mm) 16x40 US mesh	Uniformity coefficient	1.60 max.	Bulk density, as shipped	51 lb/ft <sup>3</sup>	Real density	1.28 g/cm <sup>3</sup>	Water retention	45 - 48%	Total capacity (Na <sup>+</sup> form)	2.00 eq/l min.	Volume change Ca <sup>2+</sup> -> Na <sup>+</sup>	2% max.	Stability, temperature	248°F max.	Stability, pH	0 - 14	Color throw	25 APHA max.
Type	Crosslinked polystyrene divinylbenzene																																																										
Form	gel-type, white, spherical beads																																																										
Functional group	Quaternary Ammonium, Type 1																																																										
Whole bead count	95% min.																																																										
Ionic form, as shipped	Cl <sup>-</sup>																																																										
Bead size	0.42 - 1.25 mm																																																										
Uniformity coefficient	1.60 max.																																																										
Bulk density, as shipped	670 kg/m <sup>3</sup>																																																										
Real density	1.06 g/cm <sup>3</sup>																																																										
Water retention	50 - 56%																																																										
Total capacity (Cl <sup>-</sup> form)	1.30 eq/l min.																																																										
Volume change Cl <sup>-</sup> -> OH <sup>-</sup>	30% max.																																																										
Stability, temperature	60°C max.																																																										
Stability, pH	0 - 14																																																										
Type	Crosslinked polystyrene divinylbenzene																																																										
Form	Gel-type, amber, spherical beads																																																										
Functional group	Sulfonic acid																																																										
Whole bead count	95% min.																																																										
Ionic form, as shipped	Na <sup>+</sup>																																																										
Bead size	(0.42 - 1.25 mm) 16x40 US mesh																																																										
Uniformity coefficient	1.60 max.																																																										
Bulk density, as shipped	51 lb/ft <sup>3</sup>																																																										
Real density	1.28 g/cm <sup>3</sup>																																																										
Water retention	45 - 48%																																																										
Total capacity (Na <sup>+</sup> form)	2.00 eq/l min.																																																										
Volume change Ca <sup>2+</sup> -> Na <sup>+</sup>	2% max.																																																										
Stability, temperature	248°F max.																																																										
Stability, pH	0 - 14																																																										
Color throw	25 APHA max.																																																										

A manera de resumen para este experimento, podemos observar los parámetros de cada variable y sus niveles en la siguiente tabla.

Figura 34: Tabla del DOE de resinas.

Resina aniónica Resinex AW-4 (1.2)		Resina catiónica Resinex k-8 (2)			
Masa (g)		01:01		01:04	
		R1	R2	R1	R2
	64	32	32	16	48
	128	64	64	32	96
Presión (PSI)		Bajo		Alto	
		1		3	
	3	1		3	
TEC Total exchange capacity (Eq/L)		01:01		01:04	
		R1	R2	R1	R2
	1.2	1	1	0.30	1.5
	2	1	1	0.30	1.5
TEC min, max		1.6		1.8	

CONFIDENCIAL

De acuerdo con la información anterior se desarrollan las pruebas para el diseño de experimentos de dos niveles y 3 variables con 3 repeticiones, lo que nos da  $2^3 \cdot 3 = 24$  corridas.

Estas se desarrollan de forma aleatoria cambiando el tipo de resina y su proporción y por lo tanto su capacidad total de intercambio, su masa, y la presión en cada prueba para obtener una muestra de 250 ml, se desarrolla la lectura del nivel de TDS a la salida de cada experimento y se tabula la información.

Podemos ver los resultados en la siguiente tabla.

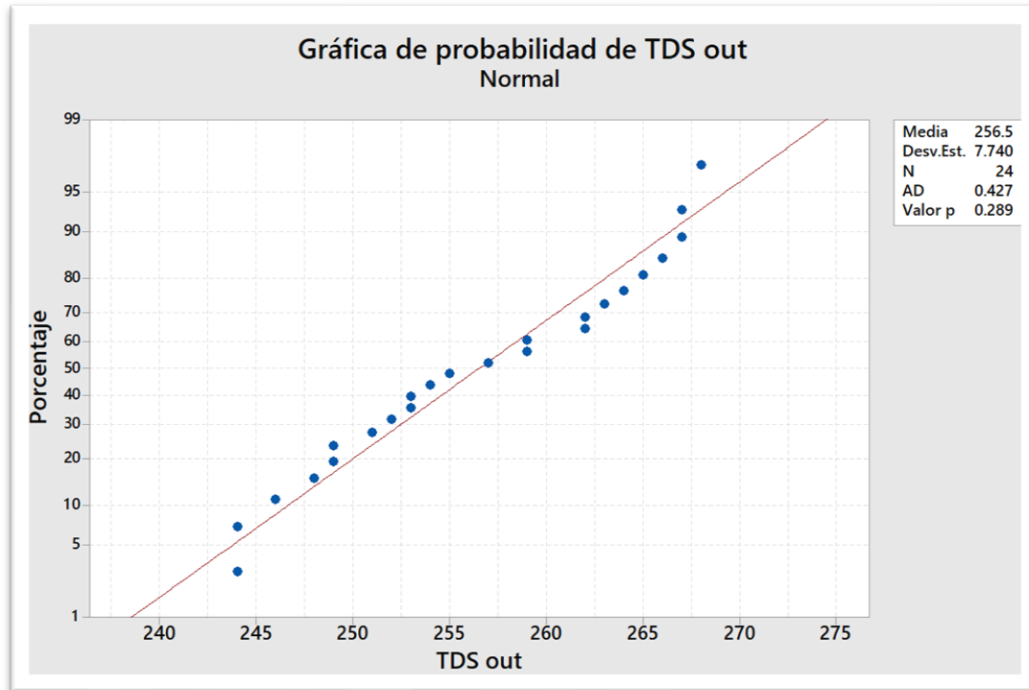
**Figura 35: Resultados DOE de resinas.**

OrdenEst	OrdenCorrida	PtCentral	Bloques	masa	presión	TEC	TDSin	TDS out	t @ 250 ml
12	1	1	1	128	2	1.65	311	253	29.61
24	2	1	1	128	2	1.83	311	252	35.47
14	3	1	1	128	1	1.83	311	244	36.18
11	4	1	1	64	2	1.65	311	265	35.07
1	5	1	1	64	1	1.65	311	268	46.01
23	6	1	1	64	2	1.83	311	262	33.74
15	7	1	1	64	2	1.83	311	262	37.73
22	8	1	1	128	1	1.83	311	244	36.38
7	9	1	1	64	2	1.83	311	263	33.48
20	10	1	1	128	2	1.65	311	254	29.07
2	11	1	1	128	1	1.65	311	249	31.81
4	12	1	1	128	2	1.65	311	259	28.98
16	13	1	1	128	2	1.83	311	251	35.19
18	14	1	1	128	1	1.65	311	248	30.02
17	15	1	1	64	1	1.65	311	266	46.45
8	16	1	1	128	2	1.83	311	253	36.01
10	17	1	1	128	1	1.65	311	249	30.3
13	18	1	1	64	1	1.83	311	257	45.49
5	19	1	1	64	1	1.83	311	255	45.81
21	20	1	1	64	1	1.83	311	259	44.92
3	21	1	1	64	2	1.65	311	267	33.85
9	22	1	1	64	1	1.65	311	264	44.92
19	23	1	1	64	2	1.65	311	267	32.59
6	24	1	1	128	1	1.83	311	246	35.99

En el programa Matlab, utilizado para capturar la información obtenida del diseño de experimentos nos permite también generar las gráficas de prueba de normalidad del experimento.

Obteniendo la siguiente información.

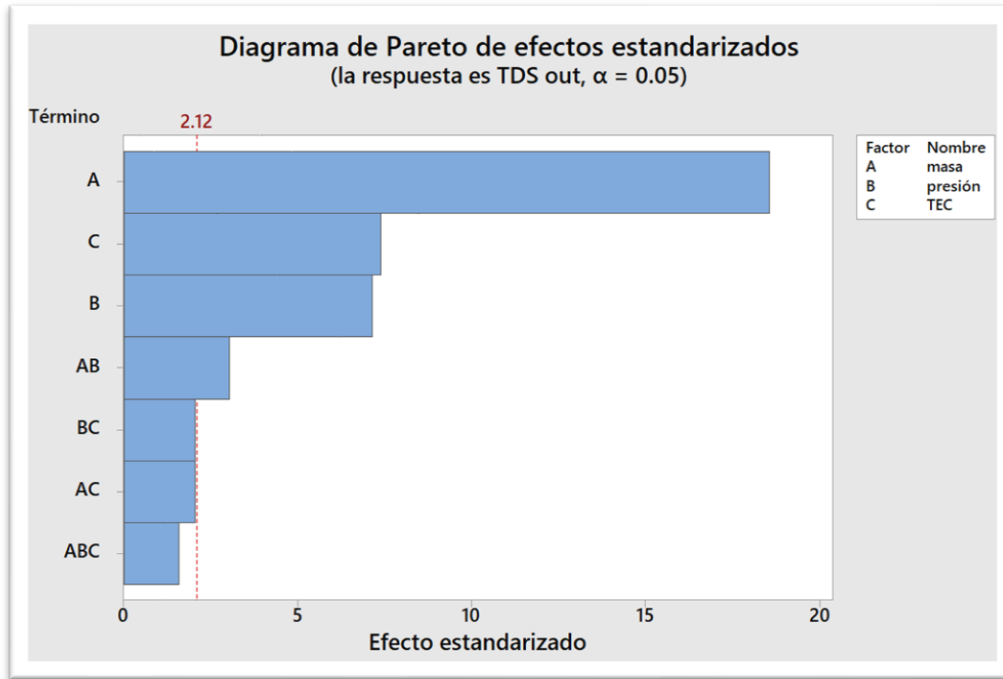
**Figura 36: Grafica de probabilidad de TDS de salida.**



Esta gráfica de probabilidad del nivel de TDS de salida de cada prueba nos indica que debido al “Valor p” que obtenemos en esta Figura 36, nuestro experimento arroja datos normales. Ya que tiene un valor menor a 0.5

Esto nos permite desarrollar el siguiente análisis de forma adecuada.

**Figura 37: Diagrama de Pareto de RII.**



**Figura 38: Ecuación de TDS para RII**

**Ecuación de regresión en unidades no codificadas**

$$\text{TDS out} = 503.2 - 1.707 \text{ masa} - 91.6 \text{ presión} - 129.6 \text{ TEC} + 0.720 \text{ masa} \cdot \text{presión} + 0.810 \text{ masa} \cdot \text{TEC} + 51.9 \text{ presión} \cdot \text{TEC} - 0.376 \text{ masa} \cdot \text{presión} \cdot \text{TEC}$$

Podemos ver en el análisis del diagrama de Pareto de efectos estandarizados que existen diferentes proporciones para la contribución de cada término o factores de las variables y su contribución combinada en distintas interacciones y analizar esto nos permite concluir que la contribución de los términos de la presión y el TEC juntos y la masa con el TEC o ambos con el TEC no son términos que considerablemente afecten en la respuesta. Por lo tanto, la ecuación se puede simplificar y no considerar en ella los efectos de estas combinaciones.

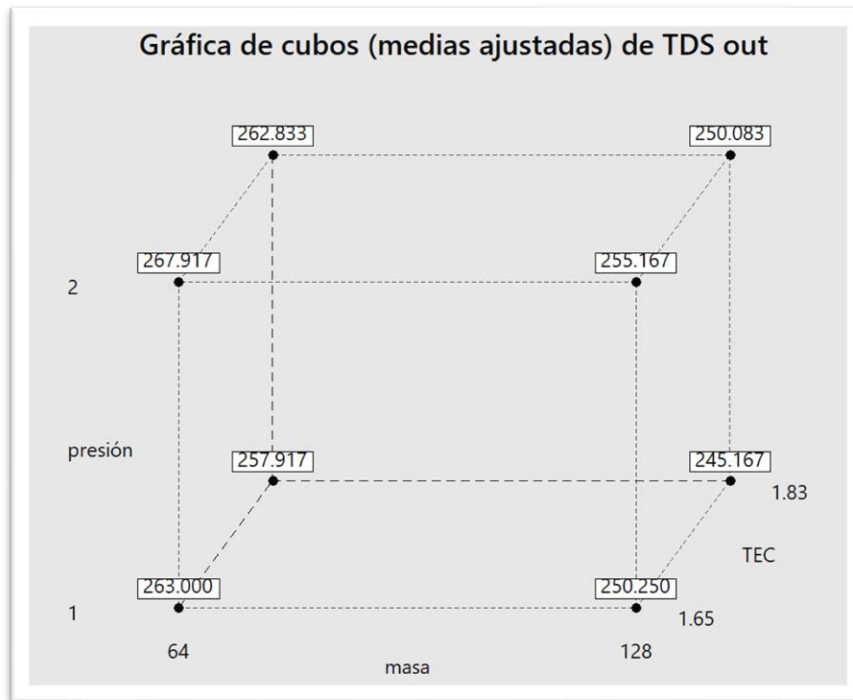
Además, de acuerdo con la siguiente información podemos concluir que el ajuste de la respuesta es de un 96.71% de acuerdo con el resumen del modelo en R-cuad por lo que los valores arrojados en este experimento comparado con los experimentos previos nos dicen que con un 95.71% de confianza los resultados serán cercanos a la realidad.

**Figura 39: Ajuste para RII**

Resumen del modelo			
S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
1.68325	96.71%	95.27%	92.60%

En Minitab se puede desarrollar un análisis de la interacción de los dos niveles de las tres variables y su influencia en la respuesta, análisis que podemos ver en la siguiente gráfica de cubo.

**Figura 40: Gráfica de medias ajustadas de TDS para RII.**



De acuerdo con esta información podemos decir que el menor índice de TDS o la mayor reducción de este indicador se encuentra cuando se utiliza una mayor cantidad de resinas y su proporción de TEC es mayor en la mezcla 1 a 4 de resinas y con una baja presión.

## 7 Discusión

Se definió en el objetivo de esta investigación la opción de proporcionar un sistema de filtrado de agua a baja presión para refrigeradores y con el paso del tiempo y el desarrollo de este trabajo, se fue descubriendo que para desarrollar un sistema de filtración de agua se deben de considerar muchísimas variables para poder cubrir con las necesidades de consumo en la república.

Este estudio nos llevó hacia la investigación de los distintos tipos de filtros, los métodos y alternativas con los que se desarrollan hoy en día las distintas etapas de filtrado y también nos llevó a conocer la calidad del agua de distribución en diferentes ciudades de la república.

De la evaluación de polipropileno podemos concluir que es una etapa sumamente necesaria para que proteger las etapas posteriores y que estas, puedan desarrollar su labor de filtrado de una mejor manera y que, sin importar la presión de entrada, una pequeña cantidad de este filtro

La información del diseño de experimentos desarrollado en esta etapa nos permite concluir que un filtro de mayor permeabilidad es adecuado para filtrar componentes visibles y que permite tener un mayor flujo de salida, lo que se refleja en una menor caída de presión a través del sistema.

De acuerdo con ese estudio en particular podemos observar que un filtro de polipropileno cuya permeabilidad se encuentre dentro del rango de los nanómetros es suficiente para separar los componentes en el agua o contaminantes que se encuentran en el rango de tamaño catalogado como visibles. Y que es importante de alguna forma evitar que el filtro se sature o se tape de estos componentes. Se propone un sistema de gravedad que permita en cierto momento desarrollar un contraflujo para limpiar el filtro y así alargar la vida útil del mismo.

Pudimos observar en la evaluación de carbón activado granulado que hay una gran variabilidad entre los experimentos con las mismas repeticiones; esto se debe al desarrollo del banco de pruebas y a la disponibilidad del instrumento de medición por espectrofotometría. No se pudieron controlar algunas situaciones que afectaron los experimentos. Como la conservación de la mezcla de azul de metileno a la salida de cada evaluación, este componente, al ser un compuesto orgánico; tiende a reducirse en presencia de luz ultravioleta y al encontrarse el banco de pruebas a una distancia considerable del espectrofotómetro se puede decir que la concentración cambió en algunas pruebas.

También considero que de forma general podemos ver un grupo de experimentos con una reducción de azul de metileno mayor al 50% lo que me permite concluir que el tiempo de exposición es un factor determinante para permitirle al CAG adsorber en mayor medida el componente orgánico.

## CONFIDENCIAL

De la investigación bibliográfica que desarrollamos, se sabe que entre mayor sea el área superficial del carbón activado, su adsorción es más eficiente y en este experimento donde el carbón se utiliza sin conocer esa superficie, no se puede conocer el índice máximo de adsorción que podría tener.

La recomendación para el diseño de un filtro de agua con carbón activado granulado, es desarrollarlo con el doble de carbón activado y que funcione en sistemas a una baja presión de entrada; permitiendo así que el agua tenga contacto con una mayor superficie del compuesto y por un mayor tiempo para reducir la cantidad de componentes orgánicos en el agua en una mayor medida.

Respecto al experimento de resina de intercambio iónico observamos que la reducción del nivel de TDS depende en gran medida del tiempo de contacto del agua con las resinas, además del tipo de resina que se encuentra en el filtro; se puede observar que una mezcla de uno a cuatro de resina aniónica con catiónica es de mayor eficacia para el tipo de agua a la entrada de nuestro sistema debido la composición química de la misma.

Es de suma importancia hacer notar que el flujo de agua en este experimento disminuye conforme se incrementa la cantidad de resinas; por lo cual, es importante llegar a un punto intermedio entre la cantidad de agua deseada a la salida del sistema y el nivel de reducción de TDS a la que se quiere llegar en función al tiempo que requiere que las resinas se encuentren en contacto el agua.

## 8 Conclusiones

El montaje de los filtros para cada evaluación se desarrolló de acuerdo con la intención de diseño donde el filtro debe funcionar con gravedad para arrastrar los componentes de manera vertical de arriba abajo en cada una de las etapas. Como se mencionó en la imagen donde se muestra el banco de pruebas. Esto nos permitió tener un sistema de conexión rápida donde se puede monitorear una evaluación mientras se prepara la muestra de materiales para la siguiente. Permitiendo así que cada evaluación tomara cerca de 25 minutos cada repetición. De acuerdo con la información presentada algunas evaluaciones llevan tiempo adicional de análisis para su posterior documentación.

En la evaluación de polipropileno podemos observar que los resultados a mayor porosidad son considerablemente más lentos que en el caso de un filtro de polipropileno de menor porosidad; sin embargo se puede desarrollar una evaluación a largo plazo, fuera de este trabajo, para concluir de manera más acertada si la sedimentación de compuestos filtrados por esta etapa puede disminuir de manera considerable el flujo de esta etapa y sea requerido cambiar o retro lavar la misma dentro de un periodo de tiempo corto.

En el experimento de carbón activado granulado se utilizó un espectrofotómetro para calcular la absorbancia de las muestras de la mezcla y medir la concentración de agua con componentes orgánicos. En la etapa de filtrado con polipropileno simplemente se desarrolló el cálculo mediante la ecuación mostrada en la sección de polipropileno y en el caso de las resinas de intercambio iónico se utilizaron medidores de TDS con una resolución de 1 ppm para poder obtener la calidad del agua de salida en la evaluación.

La propuesta de diseño considera cada una de las etapas evaluadas, respectivamente, se propone un filtro compuesto por una etapa de PP con baja porosidad pero con suficiente diámetro de poro para eliminar compuestos visibles en el orden de los 5 micrómetros, un material delgado bastará para cumplir esta función de filtrado sin embargo el flujo se verá disminuido conforme el uso del filtro incrementa, dependiendo de los contaminantes en el agua. Para la etapa de CAG se recomienda un material con alta superficie de poro y pequeño tamaño de grano para optimizar la remoción de componentes orgánicos y en la etapa de RII se sugiere una combinación 1:4 de resinas aniónicas y catiónicas respectivamente; con la mayor cantidad de resinas para incrementar su tiempo de contacto con el agua.



## 9 Referencias

- Agua, E. (s.f.). Obtenido de <https://www.edenagua.com/como-funciona-el-tds-del-agua-y-que-significa/>
- agua.org.mx. (s.f.). *Organismos operadores*. Obtenido de <https://agua.org.mx/organismos-operadores/>
- Amazon. (s.f.). Obtenido de <https://www.amazon.com.mx/General-Electric-MWF-Refrigerator-Filter/dp/B000AST3AK?th=1>
- Aqua Optima. (s.f.). Obtenido de <https://aqua-optima.com/wp-content/uploads/2022/01/universal-filter-instructions.pdf>
- Brita. (2021). *brita*. Obtenido de brita: <https://www.brita.com/performance-data/>
- Carbotecnia. (s.f.). Obtenido de <https://www.carbotecnia.info/categoria-producto/resinas-de-intercambio-ionico-anionicas-y-cationicas/>
- Carbotecnia. (s.f.). Obtenido de <https://www.carbotecnia.info/categoria-producto/resinas-de-intercambio-ionico-anionicas-y-cationicas/resinas-anionicas/>
- Carbotecnia. (s.f.). Obtenido de <https://www.carbotecnia.info/?s=numero+de+yodo>
- Carbotecnia. (2021). *Carbotecnia*. Obtenido de Carbotecnia: <https://www.carbotecnia.info/aprendizaje/carbon-activado/>
- Chase, T. S. (2008). *Filters and filtration Handbook*. Oxford UK: Elsevier Ltd.
- Comisión Nacional del Agua. (diciembre de 2007). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento*. Obtenido de <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/Libros/43RedesDeDistribucion.pdf>
- Correa, J. E. (2016). Proyecto de trabajo de grado presentado como requisito para optar por el título de Ingeniero Sanitario y Ambiental. *Universidad del Valle*, 2.
- H2O, F. (s.f.). Obtenido de <http://www.filtrah2oltda.com/carbon-activado/>
- <http://sgpwe.izt.uam.mx/files/users/uami/sho/Filtracion>. (s.f.).
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía INEGI . (2017). *RESULTADOS DE LA ENCUESTA NACIONAL DE CALIDAD E IMPACTO GUBERNAMENTAL (ENCIG)*. Obtenido de [https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2018/EstSegPub/encig2018\\_03.pdf#:~:text=Agua%20potable%20A%20partir%20de%20la%20ENCIG%20se,agua%20es%20potable1.%201Bebible%2C%20sin%20temor%20a%20enfermarse](https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2018/EstSegPub/encig2018_03.pdf#:~:text=Agua%20potable%20A%20partir%20de%20la%20ENCIG%20se,agua%20es%20potable1.%201Bebible%2C%20sin%20temor%20a%20enfermarse).

CONFIDENCIAL

MN del Golfo. (s.f.). Obtenido de <https://www.mndelgolfo.com/blog/tip/importancia-de-la-base-para-tinaco/>

Morales, G. (15 de octubre de 2020). Marketing Mabe. (R. Salazar, Entrevistador)

Ochoa, S. H. (s.f.). *UNAM Iztapalapa*. Obtenido de <http://sgpwe.izt.uam.mx/files/users/uami/sho/Filtracion>

Rotoplas. (s.f.). *Rotoplas.com*. Obtenido de <https://rotoplas.com.mx/capacidades-de-tinacos-rotoplas/>

United Nations. (s.f.). *United Nation Department of Economic and Social Affairs Sustainable Development*. Obtenido de <https://unstats.un.org/sdgs/report/2021/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2021.pdf>

## 10 Figuras

Figura 1: Cadena de valor de la industria de la filtración.....	12
Figura 2: Goal 6 UN .....	14
Figura 3: Mercado del agua embotellada en México.....	15
Figura 4: Ficha de calidad del agua CEA.....	18
Figura 5: Capacidades de tinacos Rotoplas.....	19
Figura 6: Efecto de la temperatura en el desempeño de filtros.....	21
Figura 7: Carbón activado granulado.....	24
Figura 8: tipo de resinas y capacidad.....	26
Figura 9 resina de intercambio iónica de base fuerte.....	27
Figura 10: Resina de intercambio catiónica de ácido fuerte.....	28
Figura 11: Nivel de TDS aceptable en el agua.....	29
Figura 12: Filtro MWF de GE.....	30
Figura 13: Tiempo de vida filtro MWF de GE.....	31
Figura 14: Filtros de refrigeradores GE.....	31
Figura 15: Filtros Brita.....	32
Figura 16: Como trabaja el filtro Brita.....	32
Figura 17: Filtro de 5 etapas, Aqua Optima.....	33
Figura 18: Valores de calidad del agua.....	34
Figura 19: Diagrama de funcionamiento general del banco de pruebas.....	35
Figura 20 DOE de Polipropileno.....	38
Figura 21: Resultados DOE de PP 1.....	39
Figura 22: Resultados DOE de PP 2.....	39
Figura 23: Parámetros CAG.....	40
Figura 24: Absorbancia a distintas longitudes de onda.....	42
Figura 25: Concentración a 664 nanómetros.....	42
Figura 26: Pareto del CAG.....	43
Figura 27: Ecuación de Absorbancia.....	43
Figura 28: Ajuste del modelo de CAG.....	44
Figura 29: Datos de Absorbancia evaluaciones.....	44

CONFIDENCIAL

Figura 30: Conversión de concentración de solidos en el agua. ....	45
Figura 31: Agua tratable por las resinas.....	46
Cantidad de agua mínima tratable por la resina aniónica. ....	46
Cantidad de agua mínima tratable por la resina catiónica.....	46
Figura 32: proporción de componentes aniónicos y catiónicos en el agua. ....	47
Figura 33: TEC en cada resina.....	48
Figura 34: Tabla del DOE de resinas. ....	48
Figura 35: Resultados DOE de resinas. ....	49
Figura 36: Grafica de probabilidad de TDS de salida.....	50
Figura 37: Diagrama de Pareto de RII.....	51
Figura 38: Ecuación de TDS para RII.....	51
Figura 39: Ajuste para RII .....	52
Figura 40: Gráfica de medias ajustadas de TDS para RII. ....	52

## 11 Símbolos y acrónimos

ING. - ingeniero

Dr. - doctor

M.C. – maestro en ciencias

M. en I. – maestro en ingeniería

PSI – pounds square inch

MI - mililitros

TDS – total diluted solids

Ppm – parts per million

DMADOV – define, measure, analyze, desifn, optimize, verify

AC – antes de cristo

DOE- diseño de experimentos

UN united nations

MM – mil millones

INEGI – Instituto Nacional de Estadística y Geografía

ENCIG – Encuesta Nacional de Calidad e Impacto Gubernamental

NOM – Norma Oficial Mexicana

CEA - -Comision Estatal de Aguas

M – metros

CAG - Carbón Activado Granular

PP – Polipropileno

RII – Resinas de intercambio iónico

Mm – milímetros

HOCL – Ácido hipocloroso

N – Normalidad

WAC: resina de intercambio catiónico de ácido débil

SAC: resina de intercambio catiónico de ácido fuerte

WBA: resina de intercambio de aniones base débil

## CONFIDENCIAL

SBA: resina de intercambio aniónico base fuerte

Mg/L – Miligramos por litro

MWF – Mild Water Filter

I.p. – Limite permisible

h – height

Q – Flujo

Cm - centímetros

Kg/ms – kilogramo / metro \* segundo

UV – Ultravioleta

L – Litros

TEC – Total Exchange Capacity