



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Química

**PROPUESTA DE DISEÑO DE UN FILTRO DE CARBÓN ACTIVADO A ESCALA  
LABORATORIO, CON FINES DIDÁCTICOS PARA EL LABORATORIO DE OPERACIONES  
UNITARIAS DE LA ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA, FACULTAD DE INGENIERÍA,  
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**

**Verónica Anasheila Pérez Chilel**

Asesorado por el Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez

Guatemala, abril de 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**PROPUESTA DE DISEÑO DE UN FILTRO DE CARBÓN ACTIVADO A ESCALA  
LABORATORIO, CON FINES DIDÁCTICOS PARA EL LABORATORIO DE OPERACIONES  
UNITARIAS DE LA ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA, FACULTAD DE INGENIERIA,  
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**VERÓNICA ANASHEILA PÉREZ CHILEL**  
ASESORADO POR EL ING. VÍCTOR MANUEL MONZÓN VALDEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERA QUÍMICA**

GUATEMALA, ABRIL DE 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Ángel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Ing. José Milton De León Bran
VOCAL IV	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
VOCAL V	Br. Carlos Enrique Gómez Donis
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Jorge Emilio Godínez
EXAMINADOR	Ing. Pablo Lemus
EXAMINADOR	Ing. Otto Raúl de León de Paz
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

## HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**PROPUESTA DE DISEÑO DE UN FILTRO DE CARBÓN ACTIVADO A ESCALA LABORATORIO, CON FINES DIDÁCTICOS PARA EL LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS DE LA ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA, FACULTAD DE INGENIERIA, UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 12 de junio de 2015.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Verónica Anasheila Pérez Chilel'. The signature is stylized with large, flowing letters and includes a small checkmark on the left and a small 'u' on the right.

**Verónica Anasheila Pérez Chilel**

Guatemala, 23 de octubre del 2017

Ingeniero  
Carlos Salvador Wong Davi  
Director escuela de Ingeniería Química  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de San Carlos de Guatemala

Estimado Ing. Wong:

Por este medio me permito informarle que estoy asesorando el trabajo de graduación de la estudiante **Verónica Anasheila Pérez Chilel**, quien se identifica con el CUI 2565 50743 0101, y el registro académico 2011-23046, titulado: *“Propuesta de diseño de un filtro de carbón activado a escala laboratorio, con fines didácticos para el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.”*.

Luego de la revisión correspondiente al informe final de trabajo de graduación, extiendo la presente aprobando su contenido.

Atentamente,



**Víctor Manuel Monzón Váldez**  
**Ingeniera Química**  
**Colegiada No. 656**



Guatemala, 22 de noviembre de 2017.  
Ref. EIQ.TG-IF.052.2017.

Ingeniero  
Carlos Salvador Wong Davi  
DIRECTOR  
Escuela de Ingeniería Química  
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Wong:

Como consta en el registro de evaluación del informe final EIQ-PRO-REG-007 correlativo **036-2015** le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

**INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN**

Solicitado por la estudiante universitaria: **Verónica Anasheila Pérez Chilel**.  
Identificada con número de carné: **2011-23046**.  
Previo a optar al título de **INGENIERA QUÍMICA**.


Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

**PROPUESTA DE DISEÑO DE UN FILTRO DE CARBÓN ACTIVADO A ESCALA LABORATORIO, CON FINES DIDÁCTICOS PARA EL LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS DE LA ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA, FACULTAD DE INGENIERÍA, UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el Ingeniero Químico: **Víctor Manuel Monzón Valdez**.

Habiendo encontrado el referido informe final del trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

  
Ing. Otto Raúl De León De Paz  
COORDINADOR DE TERNA  
Tribunal de Revisión  
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo





Ref.EIQ.TG.001.2018

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación de la estudiante, **VERÓNICA ANASHEILA PÉREZ CHILEL** titulado: **“PROPUESTA DE DISEÑO DE UN FILTRO DE CARBÓN ACTIVADO A ESCALA LABORATORIO, CON FINES DIDÁCTICOS PARA EL LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS DE LA ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA, FACULTAD DE INGENIERÍA, UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA”**. Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

*“Id y Enseñad a Todos”*

Ing. Carlos Salvador Wong Davi  
Director  
Escuela de Ingeniería Química

FACULTAD DE INGENIERIA USAC  
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA  
DIRECTOR

Guatemala, marzo 2018

Cc: Archivo  
CSWD/ale

Universidad de San Carlos  
de Guatemala




Facultad de Ingeniería  
Decanato

DTG.106.2018

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al Trabajo de Graduación titulado: **PROPUESTA DE DISEÑO DE UN FILTRO DE CARBÓN ACTIVADO A ESCALA LABORATORIO, CON FINES DIDÁCTICOS PARA EL LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS DE LA ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA, FACULTAD DE INGENIERÍA, UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA,** presentado por la estudiante universitaria: **Verónica Anasheila Pérez Chilel,** y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

  
Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco  
Decano

Guatemala, abril de 2018

/gdech





## **ACTO QUE DEDICO A:**

- Dios** Por su amor incomparable y la bendición de darme la oportunidad de despertar cada día y luchar por mis metas.
- Virgen María** En la advocación de Virgen de Guadalupe, por escucharme e interceder por las causas que le he solicitado.
- Mi madre** Aracely Verónica Chilel Díaz, por ser mi inspiración y la fuerza que me motiva a seguir adelante.
- Mi hermano** Eduardo Gabriel Pérez Chilel, quien con su sonrisa y su amor me llena todos los días y me motiva a seguir siendo un ejemplo para él.
- Mis abuelos** Filomena Antonia Díaz Alvarado Q.E.P.D. y Fidel Gumercindo Chilel Pérez Q.E.P.D. por su ejemplo de trabajo y honradez.
- Janiel Coyoy Chicas** Porque su personalidad me ha inspirado a ser de un corazón más cálido y afectuoso y su apoyo incondicional.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Dios</b>	Por todas las bendiciones otorgadas y el amor que me brinda.
<b>La Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por darme la oportunidad de adquirir los conocimientos de nivel superior y empezar mi vida profesional.
<b>Facultad de Ingeniería</b>	Por los conocimientos adquiridos y las oportunidades brindadas durante la carrera.
<b>Mis padres</b>	Aracely Verónica Chilel Díaz, por su amor y ayuda incondicional en cada momento y Eduardo Gabriel Pérez Morales, por su ejemplo de trabajo y de profesionalismo.
<b>Mi hermano</b>	Eduardo Gabriel Pérez Chilel, por su motivación en todo momento y ese abrazo cada noche difícil de estudio.
<b>Mis abuelos</b>	Filomena Antonia Díaz Alvarado Q.E.P.D. y Fidel Gumercindo Chilel Pérez Q.E.P.D. por su apoyo incondicional y sus buenos deseos.

<b>Mi familia materna</b>	Por su amor y apoyo, en cada momento de mi vida.
<b>Mis amigos universitarios</b>	Eliana Carranza, Carolina Herrera, Mariela Samayoa, Herbert Castro, Gabriel Solórzano, Pedro García y todos los demás que me apoyaron para cumplir con esta meta.
<b>Escuela de Ingeniería Química</b>	Por los conocimientos y herramientas brindadas para ser una profesional.
<b>Laboratorio HECO</b>	Por permitirme la realización de la parte experimental de este trabajo de graduación.
<b>Mi asesor</b>	Ingeniero Qco. Víctor Manuel Monzón Valdez, por su ejemplo de profesionalismo, su apoyo en la realización de este trabajo de investigación y en los inicios de mi vida profesional.
<b>Embotelladora Central S.A.</b>	Por la confianza depositada para iniciar mi vida profesional y obtener mayores conocimientos durante este período laboral.



3.1.1.	Variables independientes .....	13
3.1.1.1.	Variables del proceso .....	13
3.1.1.2.	Variables de diseño .....	13
3.1.2.	Variables dependientes intermedias .....	13
3.1.2.1.	Variables de proceso .....	13
3.1.2.2.	Variables de diseño .....	14
3.1.3.	Variables finales .....	14
3.1.3.1.	Variables del proceso .....	14
3.1.3.2.	Variables del diseño .....	14
3.1.3.3.	Variables dependientes .....	14
3.2.	Delimitación del área de estudio .....	15
3.3.	Recursos disponibles .....	15
3.3.1.	Recursos humanos disponibles .....	15
3.3.2.	Recursos materiales disponibles .....	15
3.4.	Técnica cuantitativa.....	17
3.5.	Recolección y ordenamiento de datos.....	17
3.5.1.	Recolección de datos .....	17
3.5.2.	Ordenamiento de datos .....	18
3.5.3.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información.....	19
4.	RESULTADOS .....	21
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS .....	33
	CONCLUSIONES .....	39
	RECOMENDACIONES .....	41
	BIBLIOGRAFÍA .....	43
	APÉNDICES .....	45

ANEXOS .....56



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Isoterma de freundlich.....	4
2.	Curvas de caída de presión de diferentes granulometrías de carbón activado .....	9
3.	Isoterma de freundlich del carbón activado 12x40 de CLARIMEX.....	21
4.	Condiciones actuales del área en la que se propone instalar el filtro de carbón activado. ....	22
5.	Croquis del laboratorio de operaciones unitarias. Área propuesta para la instalación de filtro de carbón activado. ....	23

### TABLAS

I.	Características fisicoquímicas del carbón activado CLARIMEX 12X40. ....	21
II.	Dimensiones del área de posicionamiento del filtro de carbón activado. ....	22
III.	Dimensiones del filtro de carbón activado. ....	24
IV.	Accesorios, equipos e instrumentaciones para el sistema de filtración. ....	24





## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>A<sub>x</sub></b>	Área de X
<b>C<sub>x</sub></b>	Concentración de X
<b>Cl<sup>-</sup></b>	Iones de cloro
<b>fe</b>	Factor de expansión
<b>g</b>	Gramo
<b>H<sub>x</sub></b>	Altura total de x
<b>hp</b>	Caballos de fuerza
<b>I<sub>2</sub></b>	Yodo
<b>Kg</b>	Kilogramo
<b>m</b>	metro
<b>mg</b>	miligramo
<b>mL</b>	mililitro
<b>m<sub>x</sub></b>	Masa de x
<b>M<sub>x</sub></b>	Masa total de x
<b>ppm</b>	Partes por millón
<b>Q</b>	Caudal
<b>V<sub>x</sub></b>	Volumen total de x
<b>°</b>	Grado
<b>%</b>	Porcentaje
<b>ρ<sub>x</sub></b>	Densidad de x
<b>π</b>	Número Pi
<b>∅</b>	Diámetro



## GLOSARIO

<b>Adsorción</b>	Fenómeno por el cual un sólido o un líquido atraen y retiene en su superficie gases, vapores, líquidos o cuerpos disueltos.
<b>Carbón activado</b>	Carbón poroso que atrapa compuestos, principalmente orgánicos, presentes en un gas o en un líquido.
<b>Colector</b>	Estructura que recoge las aguas procedentes de un sistema.
<b>Densidad aparente</b>	Relación entre el volumen y el peso seco de un material.
<b>Diseño</b>	Realización de un plan detallado para la ejecución de una acción o una idea.
<b>Filtración</b>	Método de separación física utilizado para separar sólidos a partir de fluidos (líquidos o gases) mediante la interposición de un medio.
<b>Granulometría</b>	Es la distribución de los tamaños de las partículas de un agregado, tal como se determina por análisis de tamices.

<b>Humedad</b>	Cantidad de agua, vapor de agua o cualquier otro líquido que está presente en la superficie o el interior de un cuerpo o en el aire.
<b>Isoterma</b>	Línea que sobre un diagrama representa los valores sucesivos de las diversas variables de un sistema.
<b>Número de yodo</b>	Escala utilizada para definir un grado de insaturación de un compuesto orgánico.

## RESUMEN

En el siguiente trabajo de graduación se presenta una propuesta de diseño de un filtro de carbón activado con fines didácticos para el estudio de adsorción del cloro en agua, para el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad San Carlos de Guatemala.

Se recopiló información teórica y experimental acerca del dimensionamiento del filtro de carbón activado; se establecieron las variables específicas para el diseño en función de las instalaciones del Laboratorio de Operaciones Unitarias; se dimensionó el filtro; se seleccionaron los equipos y accesorios complementarios; se realizaron los planos del equipo propuesto; se realizó el análisis económico para la construcción del filtro y se propone la práctica de laboratorio para cumplir con sus objetivos didácticos.

Para la experimentación se realizaron varias corridas de equilibrio líquido-sólido para evaluar el proceso de adsorción cloro-carbón activado en el Laboratorio HECO; se tomaron medidas y se evaluaron las instalaciones en piso del Laboratorio de Operaciones Unitarias; el dimensionamiento, planos de equipo y análisis económico se realizaron con software para cada uno y para la propuesta de la práctica se toma como referencia la literatura del libro de Robert E. Treybal: *Operaciones de transferencia de masa*.

Se propone un filtro de carbón activado con fines didácticos para el Laboratorio de Operaciones Unitarias y se recomienda su construcción y evaluación del diseño.



## **OBJETIVOS**

### **General**

Realizar una propuesta de diseño de un filtro de carbón activado con fines didácticos para el estudio de adsorción del cloro en agua, para el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

### **Específicos**

1. Recopilar información teórica y/o experimental acerca del dimensionamiento de un filtro de carbón activado a escala laboratorio.
2. Establecer las variables específicas del filtro de carbón activado a diseñar en función de las condiciones del Laboratorio de Operaciones Unitarias.
3. Dimensionar el filtro de carbón activado con base en la información recopilada.
4. Seleccionar los equipos y accesorios complementarios del diseño del filtro de carbón activado.
5. Realizar los planos del equipo diseñado, con las especificaciones de las dimensiones.



6. Realizar el análisis económico para la construcción del equipo diseñado.
7. Proponer la práctica de laboratorio que permita cumplir con los objetivos didácticos del tema.

## INTRODUCCIÓN

Diseñar es el proceso previo de configuración mental de búsqueda de una solución en cualquier campo. Del proceso de diseño depende en gran parte el grado de confiabilidad y eficiencia que se obtiene del equipo al final. Dicho proceso no puede hacerse de manera improvisada, sino que debe realizarse mediante un método genérico, lógico y completo, que permita observar el problema de una manera global y finalmente llegar a elegir la mejor opción.

“El proceso genérico para el diseño de equipos industriales incluye etapas sucesivas de macroanálisis, microanálisis, búsqueda de alternativas, selección preliminar, desarrollo de modelo, evaluación económica y presentación técnica final. Este proceso implica tomar en cuenta aspectos operativos, funcionales y económicos a fin de que se pueda construir el equipo con el menor costo y con la mayor seguridad y operabilidad.”<sup>1</sup>

En el siguiente trabajo de graduación se presenta una propuesta de diseño de un filtro de carbón activado con fines didácticos para el estudio de adsorción del cloro en agua, para el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Escuela de Ingeniería Química USAC, planos del equipo, análisis económico y propuesta de una práctica de laboratorio para el cumplimiento de los objetivos didácticos del filtro.

<sup>1</sup> POSADAS, Orlando. *Elegancia en el diseño*. p. 1



## 1. ANTECEDENTES

Para que el agua se considere con características aceptables para el consumo humano, especialmente para beber o preparar alimentos, existen varios métodos para obtener agua pura, los filtros de carbón activado los cuales son utilizados frecuentemente en sistemas de tratamiento de agua; en la actualidad, varias de las industrias utilizan plantas para que el agua de su proceso cumpla con las especificaciones que han definido.

Los filtros de carbón activado en una planta de tratamiento de agua, generalmente, son muy importantes. En el área de fisicoquímica se estudia el fenómeno de adsorción a través de una práctica de laboratorio de fisicoquímica 1; este proceso también se vuelve a mencionar, pero ya no como un fenómeno sino como una operación unitaria en el curso de Transferencia de Masa (IQ-4); sin embargo, no se lleva a cabo una parte experimental en la que se pueda conocer una torre de adsorción.



## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Adsorción

La adsorción es un proceso mediante el cual se extrae materia de una fase y se concentra sobre la superficie de otra fase (generalmente sólida). Por ello se considera como un fenómeno subsuperficial. La sustancia que se concentra en la superficie o se adsorbe se llama adsorbato y la fase sólida se llama adsorbente.

#### 2.1.1. Operaciones de adsorción

Las técnicas utilizadas incluyen tanto los métodos por etapas como los de contacto continuo; estos se aplican en operaciones por lotes, continuas o semicontinuas.

#### 2.1.2. Isotermas de Freundlich

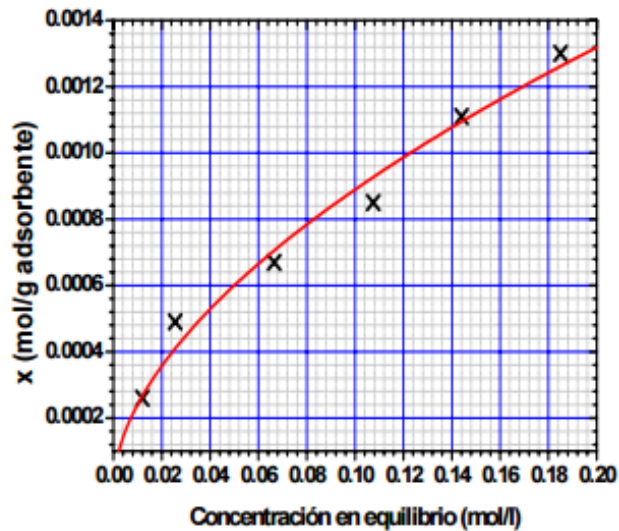
Una isoterma empírica aplicable a la adsorción de solutos en disolución (adsorbatos) por sólidos (adsorbentes) es la isoterma propuesta por Freundlich, cuya expresión matemática es:

$$x = kc^n$$

Siendo  $x$  el número de moles de cloro adsorbido por unidad de masa de carbón activo;  $c$  la concentración de cloro en la disolución en equilibrio;

finalmente,  $k$  y  $n$  las constantes empíricas (parámetros) características de las sustancias que intervienen en la adsorción.

Figura 1. **Isoterma de Freundlich**



Fuente: *Isoterma de adsorción*

[activado.http://www.ugr.es/~focana/dfar/aplica/isoTOxali/isoTOxaliCarbt.pdf](http://www.ugr.es/~focana/dfar/aplica/isoTOxali/isoTOxaliCarbt.pdf) Consulta: 3 de abril de 2015.

## 2.2. Filtración

El elemento filtrante sirve para separar las partículas suspendidas o disueltas en un medio fluido por intercepción y retención de las partículas sobre una superficie o en el seno de una masa porosa a través de las cuales se hace circular el fluido. Esta definición abarca una gran variedad de equipos.

### **2.2.1. Filtración en medio granular**

La retención de las partículas puede tener lugar sobre la capa más externa del medio granular (arena, antracita, etc.), sobre la cual incide el agua o profundamente en el seno de la masa porosa. Los mecanismos de actuación son distintos.

En la filtración en profundidad actúan distintos tipos de fuerzas que provocan la retención de las partículas. Además de la simple intercepción, actúan fuerzas moleculares, químicas y superficiales.

La velocidad de paso del agua es directamente proporcional a la fuerza impulsora e inversamente proporcional a la resistencia conjunta del medio filtrante y los sólidos retenidos. Al irse acumulando los sólidos retenidos, la pérdida de carga a través del filtro aumenta. Si la carga disponible es constante, va disminuyendo la velocidad de filtración. Si existe un dispositivo para variar la carga disponible se puede mantener una velocidad de filtración constante. Ambas formas de trabajar tienen sus ventajas específicas.

#### **2.2.1.1. Columnas de carbón activado**

En las aplicaciones de fase líquida, el carbón activado es utilizado para remover impurezas para agua potable, agua residual, purificación de químicos, comida y fármacos.

El primer paso a realizar es correr isotermas simples para determinar la viabilidad del carbón activado. Con dichas isotermas se puede determinar si el tratamiento se puede alcanzar.



La construcción de la isoterma consiste en dosificar distintas cantidades de carbón activado en una solución objetivo. Las impurezas serán adsorbidas en la superficie del carbón activado hasta alcanzar el equilibrio. Esta prueba es un indicador de la capacidad de remover una impureza utilizando el carbón activado, esto no puede dar definitivamente un escalamiento para una columna debido a un par de factores:

En una columna de carbón granular, la dinámica de adsorción ocurre debido a que la concentración de la impureza va cambiando a través de la zona de transferencia de masa en la cama de carbón activado. Esta condición no existe en la prueba de la isoterma. Los efectos de la regeneración en ciclos múltiples no pueden ser estudiados debido a que en la prueba de la isoterma el carbón se utiliza en un ciclo único.

Debido a estos factores, las pruebas piloto deben ser realizadas utilizando el carbón más adecuado para el proceso que se requiera realizar a escala mayor, tomando como referencia las isotermas. Esto puede dar una mejor comparación entre los carbones y provee una mejor información para el escalamiento para los sistemas de diseño comercial.

El sistema de prueba de una columna piloto de carbón activado debe incluir por lo menos cuatro columnas operando en serie, para determinar la velocidad de movimiento y el tamaño de la zona de transferencia de masa a través de la cama de carbón.

Los sistemas de columnas piloto pueden ser comprados o ensamblados utilizando componentes básicos. Pueden ser construidas de vidrio, plástico, fibra de vidrio reforzada o tubería metálica dependiendo del fluido a procesar.

Las columnas deben ser diseñadas para que la carga de carbón activado sea desde la parte superior.

Las columnas piloto son típicamente diseñadas para que operen en flujo descendente. Esto es usualmente realizado para disimular un propósito comercial.

El flujo descendente permite que el filtro sea alimentado por gravedad. Esto también asegura que la cama de carbón se mantendrá compacta y estable durante el ciclo de servicio, resultando el máximo contacto entre el carbón y la corriente de alimentación. Sin embargo, se debe tener cuidado para que las columnas se mantengan llenas con el fluido todo el tiempo y no se permita drenarlas durante se encuentren en operación.

En algunas situaciones es recomendable que el flujo sea ascendente. Una ventaja es la alta caída de presión que se crea al tener los sólidos suspendidos en la alimentación. Se sugiere que estos sean removidos previamente a la sanitización con vapor. Sin embargo, este no es un diseño que se pueda proponer comercialmente; por lo consiguiente, el efecto de los sólidos suspendidos debe tomarse en cuenta en las pruebas piloto.

Es recomendable que antes de iniciar una prueba piloto la columna se retrolave y también cuando se observe una caída de presión significativa, el retrolavado suele llevarse a cabo cuando la caída de presión alcanza 0,5 a 0,7 Kg/cm<sup>2</sup>. Esto se refiere a que la alimentación del agua se debe bombear en contraflujo con el caudal suficiente para expandir la cama, el flujo de retrolavado suele ser 4 a 15 veces mayor que el del ciclo de adsorción, dependiendo de la densidad aparente y del tamaño de partícula del medio granular. El espacio de expansión durante el retrolavado de la cama de carbón activado debe ser entre

el 30 % y 50 % de la altura de la misma. La expansión también se puede determinar visualmente en una columna de vidrio.

La cama de carbón debe de tener como mínimo 24 pulgadas (61 cm) de profundidad y 1,5 pulgadas (aproximadamente 4 cm) de diámetro.

La cama puede ser soportada por fibra de vidrio o un tamiz. Una pantalla típica es de mesh 60 o 0,008" de apertura.

#### **2.2.1.2. Diseño de un filtro de carbón activado**

- El tamaño del medio y la altura del lecho
- La velocidad de filtración
- La presión disponible
- El modo de filtrar

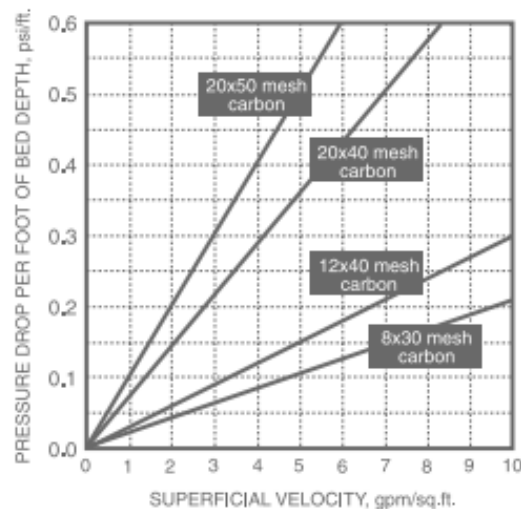
En los filtros con un medio granular, la forma en que varía la pérdida de carga a lo largo del tiempo es característica del modo de operar del filtro. Una variación casi lineal de la pérdida de carga frente al tiempo o el volumen total de agua filtrada indica una filtración en profundidad. Las aguas que presentan una filtración superficial dan una curva correspondiente de tipo exponencial. En el equilibrio entre unos ciclos de duración lo mayor posible y una buena calidad del agua, se busca un tamaño del medio filtrante que se acerque a las condiciones óptimas.

### 2.2.1.3. Selección de la granulometría del carbón activado

En el diseño de una columna a mayor escala, la granulometría del carbón activado es muy importante. Inicialmente, el carbón más fino tiene mayor capacidad de adsorción que los mayores, ya que se tiene una mayor velocidad de transferencia de masa. Sin embargo, ambos son capaces de alcanzar el mismo equilibrio con el tiempo respectivo para cada uno.

El carbón activado de menor granulometría presenta una mayor caída de presión al contrario del de mayor granulometría, por ejemplo el diferencial de un carbón de 12x40 mesh es el doble que de uno de 12x20 mesh. El mejor tamaño de carbón activado depende de las dimensiones de la columna, la velocidad de alimentación, la viscosidad, y la concentración de los sólidos suspendidos.

Figura 2. **Curvas de caída de presión de diferentes granulometrías de carbón activado**



Fuente: Norit activated carbon. *Granular activated carbon evaluation*. Consulta: 28 de enero de 2017.

#### **2.2.1.4. Carga de la columna**

El carbón que se utilizará en la columna de primero se debe humedecer. Esto se realiza para remover el aire atrapado por los poros del carbón, de lo contrario, esto impediría el contacto completo del fluido en alimentación con la superficie completa del carbón.

En pequeñas escalas de laboratorio, el carbón es típicamente humedecido con agua en contenedor. Esto se debe realizar por lo menos durante 30 minutos a una hora para permitir que todo el aire sea desplazado hasta del último poro. En los filtros de operación comercial, el carbón activado se deja humedecer una noche previa al retrolavado para colocarlo en servicio.

Una vez el carbón se ha humedecido, los finos deben ser removidos. Estos están presentes en todas las granulometrías, no solo se generan en los procesos de manufactura, también en el transporte, y manejo. De no ser removidos causan un exceso de caída de presión y acortan el tiempo de vida del filtro de carbón activado.

Cuando son pequeñas columnas, los finos de carbón pueden ser removidos por decantación adicionando agua fresca y permitiendo que el carbón se deposite, y se vuelve a decantar nuevamente. Este procedimiento se puede repetir hasta que el agua se observe clara usualmente tomará unas 3 o 4 veces. En los filtros comerciales los finos de carbón se retiran retrolavando.

### **2.2.1.5. Control de velocidad de alimentación**

El rango recomendado de contacto de flujo es 0,1 a 3,0 volúmenes de cama por hora (Bv/h), dependiendo del grado de purificación que se desee, el tipo y la concentración de la impureza, la naturaleza del proceso y la caída de presión.

Generalmente, altos niveles de impurezas en el carbón activado, niveles de concentraciones de impurezas mayores en el fluido y viscosidades grandes requerirán una velocidad de alimentación inferior.

El carbón dará mejores resultados a un flujo menor (mayor tiempo de contacto), pero dificulta el proceso productivo.

La bomba de alimentación al sistema debe ser de acuerdo a las necesidades del sistema y de flujo continuo ya que la velocidad de flujo y el volumen total del fluido son variables de control que sirven para el diseño del sistema.



### **3. DISEÑO METODOLÓGICO**

#### **3.1. Variables**

##### **3.1.1. Variables independientes**

###### **3.1.1.1. Variables del proceso**

- Flujo de entrada de agua ( $\text{m}^3/\text{min}$ )
- Concentración de cloro de entrada (ppm)

###### **3.1.1.2. Variables de diseño**

- Capacidad de adsorción del carbón activado (mg de  $\text{Cl}^-$  / mg de carbón activado).
- Presión en la entrada del filtro de carbón (psi).

##### **3.1.2. Variables dependientes intermedias**

###### **3.1.2.1. Variables de proceso**

- Tiempo de retención del agua en el filtro de carbón activado(min)



### **3.1.2.2. Variables de diseño**

- Velocidad de flujo de agua a través del lecho filtrante ( $\text{m}^3/\text{min}$ )
- Capacidad de adsorción del carbón activado (mg de  $\text{Cl}^-$  / mg de carbón activado).

### **3.1.3. Variables finales**

#### **3.1.3.1. Variables del proceso**

- Flujo de salida del agua ( $\text{m}^3/\text{min}$ )
- Concentración de salida del cloro (ppm)
- Presión de salida (psi)

#### **3.1.3.2. Variables del diseño**

- Altura del filtro de carbón activado (m)
- Diámetro del filtro de carbón activado (m)
- Altura de la cama de lecho filtrante (m)
- Altura libre para expansión del lecho filtrante (m)
- Diámetro de tubería de entrada y salida del agua (m)
- Potencia de bomba (hp)
- Dosificación de cloro a la entrada (l/min)
- Tubería de recolección de agua filtrada

#### **3.1.3.3. Variables dependientes**

- Capacidad de adsorción del cloro del filtro a 5 ppm

- Costo estimado (Q.)

### **3.2. Delimitación del área de estudio**

- Área de la carrera: operaciones unitarias
- Tipo de operación unitaria: transferencia de masa
- Nombre de operación unitaria: adsorción del carbón activado
- Equipo: filtro de carbón activado
- Alternativa evaluada: adsorción de cloro como hipoclorito de sodio
- 

### **3.3. Recursos disponibles**

#### **3.3.1. Recursos humanos disponibles**

- Investigador: Verónica Anasheila Pérez Chilel
- Asesor: Ing. Qco. Víctor Manuel Monzón Váldez
- Bachiller en dibujo técnico: Andrea del Carmen Rosmundo Díaz

#### **3.3.2. Recursos materiales disponibles**

- Instalaciones del Laboratorio de Operaciones Unitarias.
- Instalaciones del Laboratorio de HECO.
  
- Cristalería
  - Earlenmeyer de 200 mL
  - Pipeta de 1 mL
  - Tips para pipeta de 1 mL
  - Beacker de 100 mL

- Probeta de 100 mL
- Frascos de plástico
  
- Reactivos
  - Carbón activado CLARIMEX 12X40
  - Hipoclorito de sodio
  - Solución de DPD al 0,1 %
  - Medidor de cloro HACH
  
- Equipo
  - Balanza analítica
  - Agitador magnético
  - Plancha para agitación
  - Sistema de filtración al vacío
  - Equipo HACH para medición de cloro
  
- Herramientas de medición
  - Cinta métrica
  - Regla
  - Cronometro
  
- Recursos tecnológicos
  - Microsoft Windows 2010
  - Autocad 2013
  - Internet

### **3.4. Técnica cuantitativa**

Se hizo uso de la técnica cuantitativa, ya que se tomaron mediciones y con base en estas, se establecieron las especificaciones de variables de entrada y se determinó con cálculos matemáticos las variables finales de diseño.

### **3.5. Recolección y ordenamiento de datos**

#### **3.5.1. Recolección de datos**

- Se recopiló información técnica del carbón activado (lecho filtrante).
- Se tomaron las mediciones de concentración de cloro para la construcción de la isoterma de Freundlich del carbón activado.
- Se recopiló información del diseño de un filtro de carbón activado.
- Se recibió una asesoría del dimensionamiento de un filtro a escala industrial.
- Se tomaron las medidas de las posibles áreas en las que se podrá instalar el filtro de carbón activado dentro del Laboratorio de Operaciones Unitarias.
- Se realizó el dimensionamiento del filtro de carbón activado.

### **3.5.2. Ordenamiento de datos**

- Se definieron las características principales del carbón activado en existencia.
- Se tomaron datos y se construyó la isoterma de Freundlich del carbón activado.
- Se tomaron medidas de las posibles áreas en las que se puede ubicar el filtro de carbón activado.
- Se determinó la fuente de agua (tanque, pileta, cisterna, etc.) ideal para la alimentación al equipo.
- Se evaluó la mejor alternativa para el posicionamiento del filtro de carbón activado.
- Se dimensionó el filtro de carbón activado.
- Se seleccionaron los materiales para la construcción del filtro de carbón activado.
- Se realizaron los planos del filtro con sus dimensiones y materiales.
- Se seleccionaron los accesorios y equipo auxiliar para el filtro de carbón activado.
- Se realizó el diagrama de equipo (filtro y equipo adjunto).

- Se calcularon los costos de la construcción del filtro de carbón activado.
- Se redactó el manual de uso y mantenimiento del equipo.

### **3.5.3. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información**

Las características interesadas a conocer del carbón activado fueron el número de yodo, humedad, densidad aparente y granulometría.

Los datos que se necesitaron para la construcción de la isoterma de Freundlich fueron la concentración de cloro al inicio, masa del carbón activado y concentración de cloro al equilibrio; dicha isoterma se realizó utilizando Microsoft Excel para el tratamiento de los datos y Qtiplot para trazar la gráfica.

Se determinaron tres alternativas para la propuesta de instalación del equipo en función de altura, ancho y largo. También, se determinó la fuente de agua más cercana que alimentaría el equipo y con base en ello se evaluó cuál era la mejor opción.

Utilizando la información antes mencionada y las variables de diseño que ya se conocían, se propuso la altura de área recta y el diámetro del filtro de carbón activado, con base en los materiales que ya se tienen en el Laboratorio de Operaciones Unitarias.

Posteriormente se seleccionaron los mejores materiales de construcción en función del cumplimiento de la resistencia a la corrosión, plasticidad, tenacidad, fragilidad, soldabilidad y el costo.

Se realizaron los planos del filtro utilizando AutoCAD 2013 y el diagrama de equipo con el programa Microsoft Visio 2013. Los costos totales para la construcción del equipo, se determinaron utilizando Microsoft Project 2013.

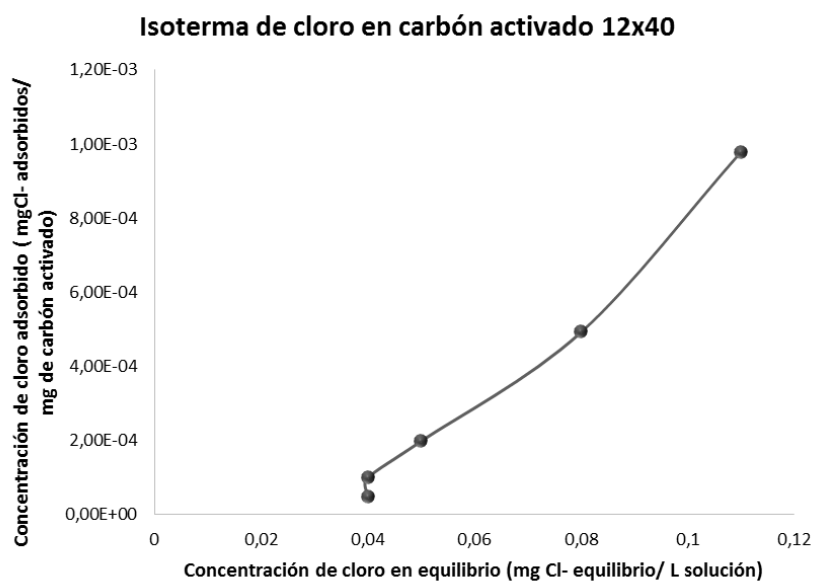
## 4. RESULTADOS

Tabla I. **Características fisicoquímicas del carbón activado Clarimex 12x40**

Parámetro	Especificación
Número de yodo (mg I <sub>2</sub> / g)	950
Humedad (%)	3 máx
Densidad aparente (g / mL)	0,46
Granulometría	12x40

Fuente: elaboración propia.

Figura 3. **Isoterma de Freundlich del carbón activado 12x40 de Clarimex**



Fuente: elaboración propia.



Tabla II. **Dimensiones del área de posicionamiento del filtro de carbón activado**

<b>Parámetro</b>	<b>Medida</b>
Ancho	1,20 m
Alto	1,80 m

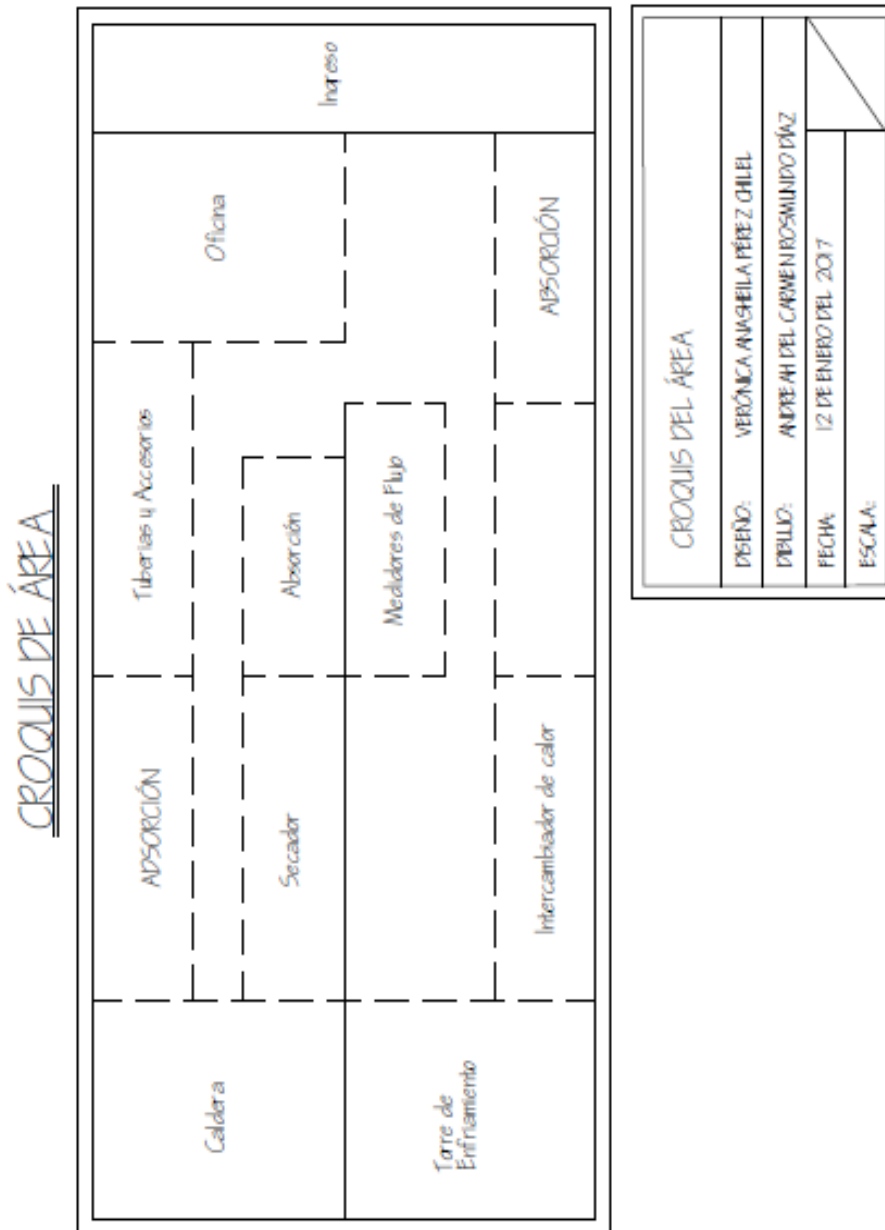
Fuente: elaboración propia.

Figura 4. **Condiciones actuales del área donde se propone instalar el filtro de carbón activado**



Fuente: elaboración propia.

Figura 5. Croquis del Laboratorio de Operaciones Unitarias, área propuesta para la instalación de filtro de carbón activado



Fuente: elaboración propia.

Tabla III. **Dimensiones del filtro de carbón activado**

<b>Variable de diseño</b>	<b>Valor</b>
Altura total del filtro (m)	1,00
Diámetro total del filtro (m)	0,15
Altura a la que se encuentra el deflector (m)	0,03
Altura de la cama de carbón activado (m)	0,80
Distancia entre válvulas toma muestra para mediciones (m)	0,15
Masa de carbón activado (kg)	5,98

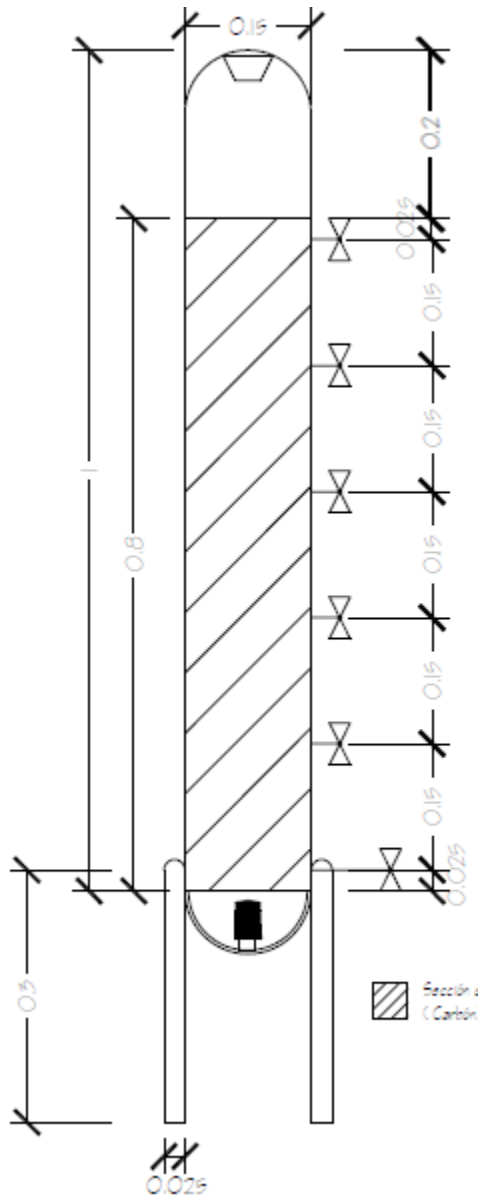
Fuente: elaboración propia.

Tabla IV. **Accesorios, equipos e instrumentaciones para el sistema de filtración**

<b>Accesorio / equipo/ instrumentación</b>	<b>Especificaciones</b>
Válvulas	De 3 vías, de ½" de PVC De paso, de ½" de PVC
Toma muestras	Simple
Bombas	Centrífuga 1/4 hp Dosificadora 24GPD 20PSI
Manómetros	Diferenciales de rosca de ½" 0 a 80 psi
Tanque para preparación de solución clorada	15 galones, plástico
Tanque para captación de agua	15 galones, plástico
Codos	90°, PVC
Reductor de tubería	De ¾" a ½" de PVC
Tubería	1/2", PVC

Fuente: elaboración propia.

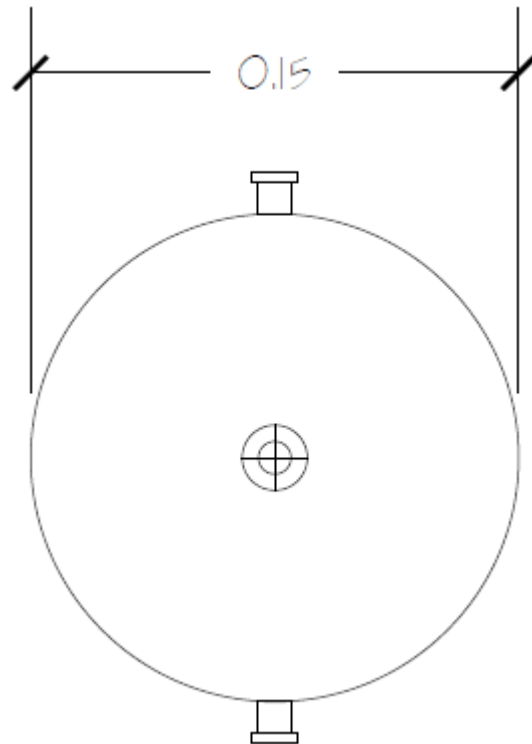
Figura 6. Vista frontal del filtro de carbón activado propuesto



FILTRO DE CARBÓN ACTIVADO	
DISÑO:	VERÓNICA ANAGHELA PÉREZ CHILEL
DIBUJO:	ANDREA H DEL CARMEN ROSMUNDO DÍAZ
FECHA:	12 DE ENERO DEL 2017
ESCALA:	1:20
	1 / 4

Fuente: elaboración propia.

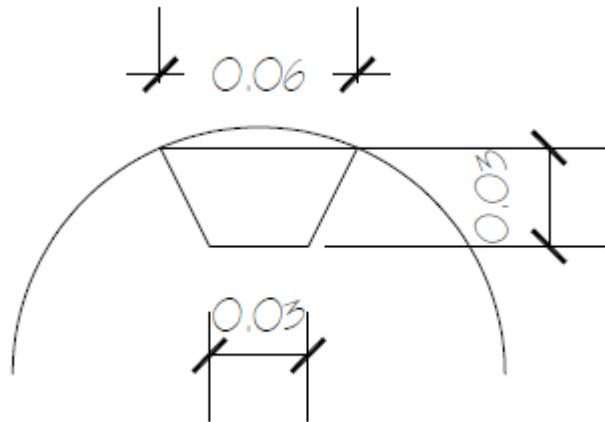
Figura 7. Vista de planta del filtro de carbón activado



PLANTA FILTRO DE CARBÓN ACTIVADO	
DISEÑO:	VERÓNICA ANASHEILA PÉREZ CHILEL
DIBUJO:	ANDREA H DEL CARMEN ROSMUNDO DÍAZ
FECHA:	12 DE ENERO DEL 2017
ESCALA:	1:20
	2
	4

Fuente: elaboración propia.

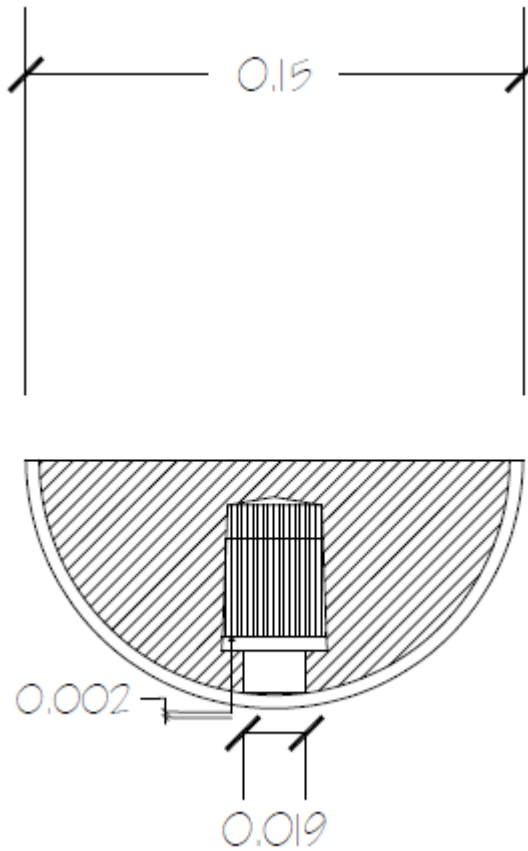
Figura 8. **Vista frontal del deflector interno del filtro de carbón activado**



DEFLECTOR INTERNO	
DISEÑO:	VERÓNICA ANASHEILA PÉREZ CHILEL
DIBUJO:	ANDREA DEL CARMEN ROSMUNDO DÍAZ
FECHA:	12 DE ENERO DEL 2017
ESCALA:	1:20
2 5	

Fuente: elaboración propia.

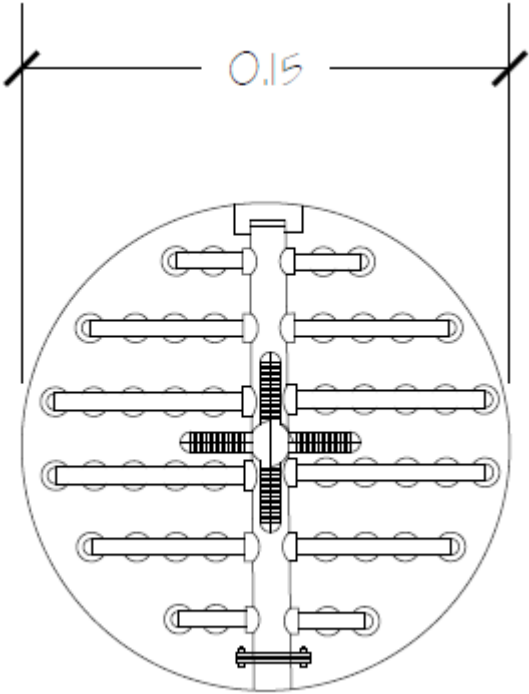
Figura 9. Vista del colector interno del filtro de carbón activado



COLECTOR INTERNO		
DISEÑO:	VERÓNICA ANASHEILA PÉREZ CHILEL	
DBUJ.D:	ANDREA H DEL CARMEN ROSMUNDO DÍAZ	
FECHA:	12 DE ENERO DEL 2017	4
ESCALA:	1:20	4

Fuente: elaboración propia

Figura 10. Vista de planta del colector interno del filtro de carbón activado

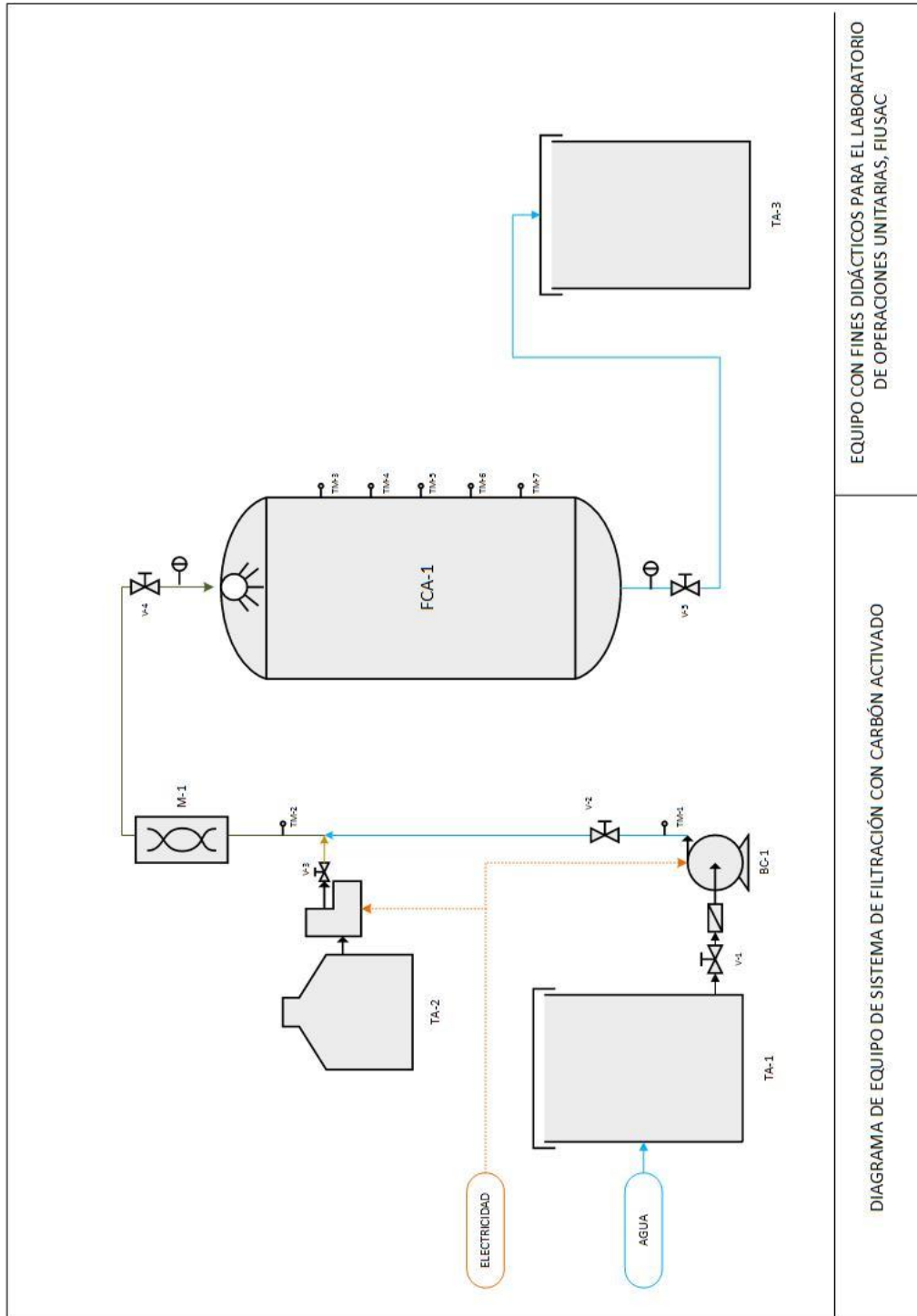


COLECTOR INTERNO	
DISEÑO:	VERÓNICA ANASHIELA PÉREZ CHILEL
DIBUJO:	ANDREA DEL CARMEN ROSMUNDO DÍAZ
FECHA:	12 DE ENERO DEL 2017
ESCALA:	1:20
	4 4

Fuente: elaboración propia.



Figura 11. Diagrama del sistema de filtración



EQUIPO CON FINES DIDÁCTICOS PARA EL LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS, FIUSAC

DIAGRAMA DE EQUIPO DE SISTEMA DE FILTRACIÓN CON CARBÓN ACTIVADO

Fuente: elaboración propia

Tabla V. **Costos del filtro de carbón activado**

<b>Material</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Especificaciones</b>	<b>Precio unitario</b>	<b>Total</b>
Cuerpo del filtro de carbón activado	1 m	Vidrio	NA	NA
Deflector	1 un	Metal	NA	NA
Distribuidor inferior *	1 un	Plástico Modelo 1213	Q.457,82	Q.457,82
Tubería	7 m	pvc	Q2,25	Q15,75
Reductor de tubería	1 un	De ¾" a ½", pvc	Q.18,25	Q.18,25
Codos	9 un	45° pvc	Q0,95	Q8,55
Manómetros	2 un	Diferenciales de 0 a 80 psi	Q31,00	Q62,00
Bomba Centrífuga	1 un	5-msp littlegiant	Q1 095,00	Q1 095,00
Bomba dosificadora	1 un	24gpd 110 psi	Q. 3652,81	Q.3 652,81
Mezclador estático *	1 un	De 20 mm de diámetro y flujo de 0,6 ton / h marca Global ozone	Q. 219,07	Q 219,07
Toma muestras	8 un	Llave d/chorro cromado c/palanca 1/2 arco	Q40,50	Q324,00
Válvulas de 3 vías	3 un	Genebre de 1/2" pvc	Q279,73	Q839,19
Tanque de 15 galones	2 un	Plástico	Q228,00	Q114,00
Carbón activado	6 kg	12x40 Clarimex	Q472,50	Q.2 835,00
Mano de obra	Por proyecto			
<b>TOTAL</b>				<b>Q.9704,19</b>

\*No incluye gastos de importación

Fuente: elaboración propia

Tabla VI. **Propuesta de práctica de laboratorio**

<b>Título</b>	<b>Objetivos</b>
<p style="text-align: center;"> <b>ADSORCIÓN DE CLORO EN UN            FILTRO DE CARBÓN ACTIVADO Y            DIMENSIONAMIENTO A ESCALA            PLANTA PILOTO</b> </p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Determinar la zona de transferencia de materia en el filtro de carbón activado.</li> <li>2. Determinar las curvas de ruptura en el lecho del filtro de carbón activado.</li> <li>3. Determinar el punto de ruptura de la filtración.</li> <li>4. Realizar el escalamiento a planta piloto, con la información de la zona de transferencia y las curvas de ruptura.</li> </ol>

Fuente: elaboración propia.

## 5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

En la tabla I se establecen las características más importantes del carbón activado para esta investigación. El número de yodo es un índice de área superficial de un carbón activado, para el carbón de Clarimex 12x40 su valor es de 950 mg de yodo/g de carbón activado, este valor es para el carbón virgen y con base en él se puede determinar el tiempo de vida útil del carbón activado, ya que este disminuye en proporción al grado de saturación del carbón activado.

El siguiente parámetro es el porcentaje de humedad, 3% máximo, el cual indica la cantidad de peso de una muestra de carbón correspondiente al agua presente en la muestra en forma de humedad.

La densidad aparente del carbón activado virgen es 0,46 g/mL, este parámetro es importante para calcular el dimensionamiento de los filtros y conocer la carga que debe soportar el sistema de filtración. Con fines de cambio de carbón activado se puede utilizar dicho valor para compararlo con la densidad aparente real luego de varios ciclos de filtración; la diferencia permite conocer cuánta materia ha captado el carbón, debida a la cantidad de adsorbatos que están ligados al material cuando se comienza a utilizar.

Por último, la granulometría del carbón a utilizar es de 12x40, lo que indica que no tiene partículas mayores a una malla 12 y menores a un mesh 40. Este valor se toma como referencia también para realizar el cambio de carbón

activado, debido a que con el paso del tiempo este se va pulverizando, indicando una mayor cantidad de finos.

En la figura 3 se muestra la isoterma de Freundlich del carbón activado Clarimex12x40 presenta un comportamiento ascendente de la concentración de cloro adsorbido en función de la concentración del cloro en equilibrio. Esto demuestra que el carbón activado se encuentra en condiciones óptimas para realizar el proceso de adsorción de cloro.

En la tabla II se establecen las dimensiones del área donde se propone instalar el filtro de carbón activado; esta tiene de longitud 1,80 m y ancho de 1,20 m. En esta área se evaluó que se tiene suministro de energía eléctrica y agua, drenaje para el vaciado del filtro cuando sea necesario, y adicional una mesa para que el estudiante pueda realizar sus anotaciones durante la práctica.

En la figura 4 se muestra un croquis del Laboratorio de Operaciones Unitarias, con los equipos que están actualmente trabajando y se indica en dónde se encontrará el área para la práctica de adsorción, la cual estará ubicada entre el área de tuberías y accesorios y calderas.

En la fotografía de la figura 5 se observa un equipo que puede ser reemplazado para la instalación del filtro de carbón activado como se mencionó anteriormente.

En la tabla III se dan las dimensiones del filtro de carbón activado; este tendrá una altura total de 1,0 m (dato propuesto), diámetro de 0,15m, siendo este el de la tubería que ya fue donada al laboratorio; la altura a la que se debe instalar el deflector interno es 0,03m para que el agua a su ingreso tenga una correcta distribución; la altura de la cama de carbón activado de 0,8 m, dejando

así 20% de expansión para los retrolavados del filtro, y la distancia entre válvulas para toma de muestras de 0,015m; con esto el estudiante podrá tomar muestras a distintas alturas y determinar curvas de ruptura y establecer la zona de transferencia de masa dentro de la cama de lecho.

Para utilizar el filtro de carbón activado se necesita de varios accesorios y equipo adicional para realizar un sistema de filtración, estos se enlistan en la tabla IV; para optimizar el espacio y tuberías se propone utilizar válvulas de 3 vías de PVC, toma muestras simples, bomba centrífuga de ¼ hp debido a que es la de menor potencia en el mercado y suficiente para dar el caudal necesario al sistema, un tanque de 15 galones, una bomba dosificadora de cloro, un mezclador estático para garantizar la homogenización de la solución, manómetros diferenciales de rosca para poder medir las presiones en la entrada y salida del sistema, un tanque de 5 galones para contener el hipoclorito de sodio durante la práctica, un tanque de 15 galones para captar el agua filtrada, codos de 45° para realizar las distintas uniones y tubería de ½" de PVC porque es un material resistente a la corrosión, económico y de accesible para adquirir.

La figura 6 muestra el plano del filtro de carbón activado con vista frontal; se puede observar la altura a la que estarán colocadas las tomas muestras, la configuración del colector de agua en el fondo; el área que se encuentra con textura es la que ocuparía la cama de lecho de carbón activado. Se propone que la tapa del filtro sea cóncava al igual que el fondo y que este soportado en cuatro bases rectangulares metálicas para la estabilidad, como también se puede observar en la vista de planta en la figura 7.

La figura 8 muestra el plano del deflector interno del filtro de carbón activado, el cual se propone instalar a una altura de 0,03 m, por el cual el agua

clorada ingresaría y se distribuiría en toda el área superficial evitando formar el efecto de canales a través del lecho.

La figura 9 muestra el sistema de colector inferior del filtro que contiene una tobera o distribuidor inferior de canasta de  $\frac{3}{4}$ ", plástico con abertura de ranura de 0,20 mm; se seleccionó este tipo de tobera porque se puede utilizar en filtros hasta de 10" de diámetro y no necesitan camas de grava como soporte. La microranura es continua y no constituye una restricción al flujo. En la figura 10 se observa la distribución de las toberas en el filtro, las cuales están distribuidas en el área del mismo para recolectar el agua filtrada.

En el diagrama de equipo del sistema de filtración, figura 10, se muestra cómo se propone armar el sistema de filtración, utilizando las válvulas de 3 vías para operar el sistema con flujo en sentido descendente (proceso de filtración) y en contraflujo (para el proceso de retrolavado), utilizando la misma bomba para flujos. También, el tanque donde se puede preparar la solución clorada, el mezclador estático para garantizar la homogenización del cloro en solución y la fuente de energía y de agua.

El costo del proyecto se estima en Q.9 704,19 con base en las cotizaciones que se realizaron, (anexos 1, 2,3 y 4), y las referencias 2 y 7 sin considerar la mano de obra y gastos de importación del difusor inferior y el mezclador estático.

El nombre de la práctica que se propone para cumplir con los fines didácticos del filtro se titula: *Adsorción de cloro en un filtro de carbón activado y dimensionamiento a escala planta piloto*. Los objetivos están planteados en función de los datos que se pueden obtener a través de la toma de muestras a

las diversas alturas de la cama del lecho de carbón activado, ya que con estos se pueden construir las curvas de ruptura y determinar la zona de transferencia y el punto de ruptura.

Así mismo, con esta información y las medidas de la altura, el diámetro y el caudal se puede realizar el escalamiento a planta piloto.





## CONCLUSIONES

1. Se establecieron las características fisicoquímicas y la isoterma de Freundlich experimental del carbón activado propuesto para el filtro.
2. La tendencia de la isoterma de Freundlich determinó que el carbón activado Clarimex 12x40 se encuentra en condiciones óptimas para realizar el proceso de adsorción de cloro.
3. El área adecuada propuesta para la instalación del filtro de carbón activado se determinó entre el área de calderas y la de tuberías y accesorios.
4. Se determinaron las dimensiones de altura y diámetro total del filtro, altura de la cama de carbón activado, altura del deflector interno y la distancia entre válvulas para la toma de muestras.
5. Los equipos y accesorios seleccionados fueron: válvulas de 3 vías y de paso, toma muestras, manómetros diferenciales, tanques para captación de agua tratada y solución clorada, codos de 45° y tuberías.
6. Se realizaron los planos de vista frontal del filtro y del deflector interno, vista de planta del filtro y del sistema de colector inferior.

7. Con el análisis económico se determinó que la construcción del equipo y el sistema de filtración tiene un costo Q.9704, 19. Sin considerar la mano de obra y gastos de importación del mezclador estático y difusor inferior.
  
8. Se propone la práctica de laboratorio con nombre *Adsorción de cloro en un filtro de carbón activado y dimensionamiento a escala planta piloto*, con la que el alumno puede estudiar el fenómeno de adsorción.

## RECOMENDACIONES

1. Construir el filtro de carbón activado y el sistema de filtración.
2. Realizar el manual de operación y mantenimiento del filtro de carbón activado y del sistema de filtración.
3. Determinar si es posible trabajar con más filtros de carbón activado en serie para determinar valores más precisos de adsorción.
4. Diseñar un sistema integrado de tratamiento de agua con los equipos ya existentes en el Laboratorio de Operaciones Unitarias.



## BIBLIOGRAFÍA

1. BIRD B, y otros. *Fenómenos de transporte*. 2a ed. España: Reverté, 1992. 800 p.
2. CARBOTECNIA. *Distribuidor inferior* 1213. [En línea]. <<https://www.carbotecnia.info/producto/distribuidor-inferior-1213-carbotecnia/>> [Consulta: 17 de septiembre de 2017].
3. \_\_\_\_\_. *Purificación de agua*. [En línea]. <<https://www.carbotecnia.info/categoria-producto/equipo-para-tratamiento-de-aguas/>> [Consulta: 5 de abril de 2015].
4. \_\_\_\_\_. *Retrolavados*. [En línea]. <https://www.carbotecnia.info/encyclopedia/retrolavados/> [Consulta: 16 de septiembre de 2017].
5. CLARIMEX S.A. C.V. *Clarimex Carboactive*. Ficha técnica, p.1. [En línea]. <http://activatedcarbon.com.mx/es/informacion-tenica/fichas-tecnicas/> [Consulta: 18 de septiembre de 2017].
6. FERNÁNDEZ- CREHUET NAVAJAS, M. *Determinación de cloro residual* DPD. [En línea]. [http://lingüística.ingenieria.usac.edu.gt/docs/manual\\_rapido\\_ISO690.pdf](http://lingüística.ingenieria.usac.edu.gt/docs/manual_rapido_ISO690.pdf) [Consulta: 12 de abril de 2015].

7. GLOBALOZONE. *Mezclador estático con PVC y SS304/316*. [En línea]. <<https://spanish.alibaba.com/product-detail/static-mixer-with-pvc-and-ss304-316-60533842288.html>> [Consulta: 17 de septiembre de 2017].
8. HI PRO ECOLÓGICOS. *Fórmulas y cálculos para purificadores de carbón activado*. P. 1 [En línea] <http://www.micromedia.com.mx/agua-potable.html> [Consulta: 17 de septiembre de 2017].
9. NORIT INC. *Granular Activated Carbon Evaluation*. P. 3-7. [En línea] <<https://us.anygator.com/search/?src=ga1&Campname=us80&Network=Search&camptype=sh&ad=123&SiteTarget=&campaign=JSRU&q=norit%20activated%20carbon>> [Consulta: 20 de septiembre de 2017].
10. PERRY, Robert H.; *Manual del ingeniero químico*. Tomo III. 8a ed. Estados Unidos: Mc Graw Hill, 1997. p. 100
11. RWL WATER UNITEK GROUP. *Carbón activado*. [En línea]. <<http://www.unitek.com.ar/productos-suavizadores-carbon.php>>. [Consulta: 13 de abril de 2015].
12. SINNOT, Ray. *Diseño en ingeniería química*. 5ª ed. España: Reverté, 2012. 1 255 p.
13. TREYBAL, Robert. *Operaciones de transferencia de masa*. 2ª ed. México: Mc Graw Hill, 1980. 845 p.

## APÉNDICES








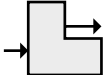




### Apéndice 1. **Procedimiento de muestreo para realización de Isoterma de Freundlich**

- Pesar 0,5, 1,0, 2,5, 5,0 y 10,0 gramos de carbón activado y colocarlos en Erlenmeyers identificados.
- Preparar 500 mL de solución de hipoclorito de sodio a 5,0 ppm.
- Medir la temperatura de la solución de hipoclorito de sodio a 5,0 ppm.
- Añadir 100 mL de la solución de hipoclorito de sodio a 5,0 ppm a cada uno de los Erlenmeyers.
- Agitar vigorosamente cada 15 min cada uno de los Erlenmeyer, durante 2 horas.
- Al cumplir las 2 horas, filtrar la solución de cada uno de los Erlenmeyer.
- Agregar 10 mL de solución en la celda del medidor de flujo HACH.
- Agregar el contenido del sobre de DPD cloro total al 0,1%.
- Medir la concentración del cloro total en la solución con el medidor HACH.
- Anotar sus resultados.

Fuente: elaboración propia.



Apéndice 2. **Simbología diagrama equipo de la figura 10**

Símbolo	Descripción	Código
	Tanque de captación	TA 1 a TA 3
	Válvula de paso	V-1 a V-4
	Bomba centrífuga	BC-1
	Válvula de 3 vías	VA-1 a VA-2
	Toma muestras	TM-1 a TM-7
	Filtro de carbón activado	FCA-1
	Manómetro diferencial	P-1 a P-2
	Bomba dosificadora	BD-1
	Agua	
	Cloro	
	Agua clorada	
	Electricidad	

Fuente: elaboración propia.

### Apéndice 3. Muestra de cálculo

- Ecuación 1. Concentración de cloro en equilibrio

$$C_{Cl\ eq} = \frac{(m_{Cl\ inicial} - m_{Cl\ residual}) * 0.1}{m_{CA} * 1000}$$

Donde:

- $C_{Cl\ eq}$  = relación de equilibrio del cloro (mg cloro equilibrio / mg carbón activado).
  - $m_{Cl\ inicial}$  = masa de cloro al inicio. (mg)
  - $m_{Cl\ residual}$  = masa de cloro residual (mg)
  - $m_{CA}$  = masa de carbón activado (mg)
- Ecuación 2. Área del filtro de carbón activado

$$A = \frac{\emptyset^2 * \pi}{4}$$

Donde:

- $A$  = área transversal del filtro de carbón activado (m<sup>2</sup>)
  - $\emptyset$  = diámetro propuesto (m<sup>2</sup>)
  - $\pi$  = número pi
- Ecuación 3. Volumen total del filtro de carbón activado

$$Vt = A * H$$

### Continuación del apéndice 3.

Donde:

- $V_t$  = volumen total de la sección recta del filtro de carbón activado ( $m^3$ )
- $A$  = área transversal del filtro de carbón activado ( $m^2$ )
- $H$  = altura del área recta del filtro de carbón activado (m)

- Ecuación 4. Altura de cama de carbón activado

$$H_c = H / (1 + f_e)$$

Donde:

- $H_c$  = altura de cama de carbón activado (m)
- $H$  = altura total del área recta del filtro (m)
- $f_e$  = factor de expansión

- Ecuación 5. Volumen de cama de carbón activado.

$$V_c = A * H_c$$

Donde:

- $V_c$  = volumen de cama de carbón activado. ( $m^3$ )
- Continuación del apéndice 3
- $A$  = área del filtro de carbón activado ( $m^2$ )
- $H_c$  = altura de la cama de carbón activado (m)

Continuación del apéndice 3.

- Ecuación 6. Caudal de operación

$$Q = \frac{H * A}{t}$$

Donde:

- $Q$  = caudal de operación ( $m^3/min$ )
  - $t$  = tiempo de contacto (min)
  - $H$  = altura del filtro de carbón activado (m)
  - $A$  = área del filtro de carbón activado ( $m^2$ )
- Ecuación 7. Cantidad de carbón activado.

$$M_c = V_c * \rho_c$$

Donde:

- $M_c$  = masa de carbón activado (kg)
- $V_c$  = volumen de cama de carbón activado ( $m^3$ )
- $\rho_c$  = densidad del carbón activado ( $kg/m^3$ )

Fuente: elaboración propia

**Apéndice 4. Tabla de valores del equilibrio líquido-sólido**

No. De muestra	Tiempo de contacto (h)	Temperatura (°C)	Concentración de hipoclorito de sodio (ppm)	Volumen de solución (mL)	Masa de carbón activado (g)	Concentración de cloro al residual (ppm)	Relación q (mg cloro /mg carbón activado)
1	2 horas	23 °C	5.00	100	0,50	0,11	9,78E-04
2					1,00	0,08	4,92E-04
3					2,50	0,05	1,98E-04
4					5,00	0,04	9,92E-05
5					10,00	0,04	4,96E-05

Fuente: elaboración propia.

**Apéndice 5. Tabla de criterios de diseño**

Variable	Valor
Tipo de dirección del flujo	Descendente
Capacidad de tanque que contendrá el agua a filtrar	15,00 gal
Dosificación de cloro mínima	1,00 ppm
Dosificación de cloro máxima	5,00 ppm
Porcentaje de expansión del lecho filtrante para retrolavado.	20%
Porcentaje de adsorción deseado	98%
Tiempo de contacto	30 min
Diámetro de tubería	0,15 m
Altura de filtro	1,00 m

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 6. **Tabla de dimensiones del filtro de carbón activado**

Variable de diseño	Valor
Altura total del filtro (m)	1
Diámetro total del filtro (m)	0,15
Altura a la que se encuentra el deflector (m)	0,03
Altura de la cama de carbón activado (m)	0,80
Distancia entre válvulas toma muestra para mediciones (m)	0,15

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 7. **Tabla de materiales propuestos para el filtro de carbón activado**

Propiedades a evaluar	Vidrio		PVC		Acrílico	
Resistencia a corrosión <sup>a</sup>	Excelente		Regular		Malo	
Plasticidad (kg/cm <sup>2</sup> )	Malo		Muy bueno	700/1100	Muy bueno	800/1100
Rigidez	Excelente		Bueno		Regular	
Fragilidad	Depende del grosor		Regular		Bueno	
Moldeabilidad	Malo		Regular		Bueno	
Transparencia	Muy bueno	84%	Bueno	82%	Excelente	92 %
Costo	Material disponible					

Fuente: elaboración propia.

### Apéndice 8. Tabla de equipos y accesorios complementarios

<b>Accesorio / Equipo</b>	<b>Especificaciones</b>	<b>Cantidad</b>
Válvulas	3 vías, de PVC	3
Toma muestras	Simple	8
Bombas	Centrífuga 1/4 hp	1
	Dosificadora	1
Manómetros	Diferenciales	2
Tanque para solución de cloro	5 galones	1
Tanque para captación de agua	20 galones	2
Codos	45°, PVC	9
Tubería	1/2", PVC	7 m

Fuente: elaboración propia.

### Apéndice 9. Metodología del desarrollo del diseño del filtro de carbón activado

- Definición del problema:
- Macroanálisis: se realiza un análisis global del problema, fuente, características y variables iniciales.
- Microanálisis: se definen las variables de entrada y salida, restricciones del proceso.
- Búsqueda de alternativas: se enlistan las alternativas que se pueden utilizar para solucionar el problema.

Continuación del apéndice 9.

- Selección preliminar: se elige la mejor alternativa que cumpla con todas las especificaciones.
- Desarrollo del modelo: se lleva a cabo el dibujo, esquema, prototipo o lo que se pueda realizar según sea el proyecto.
- Análisis económico: se realiza un análisis de costos para evaluar la factibilidad de la construcción del modelo.
- Presentación final del diseño: se da a conocer de manera técnica el resultado final.
- Solución del problema

Fuente: elaboración propia.

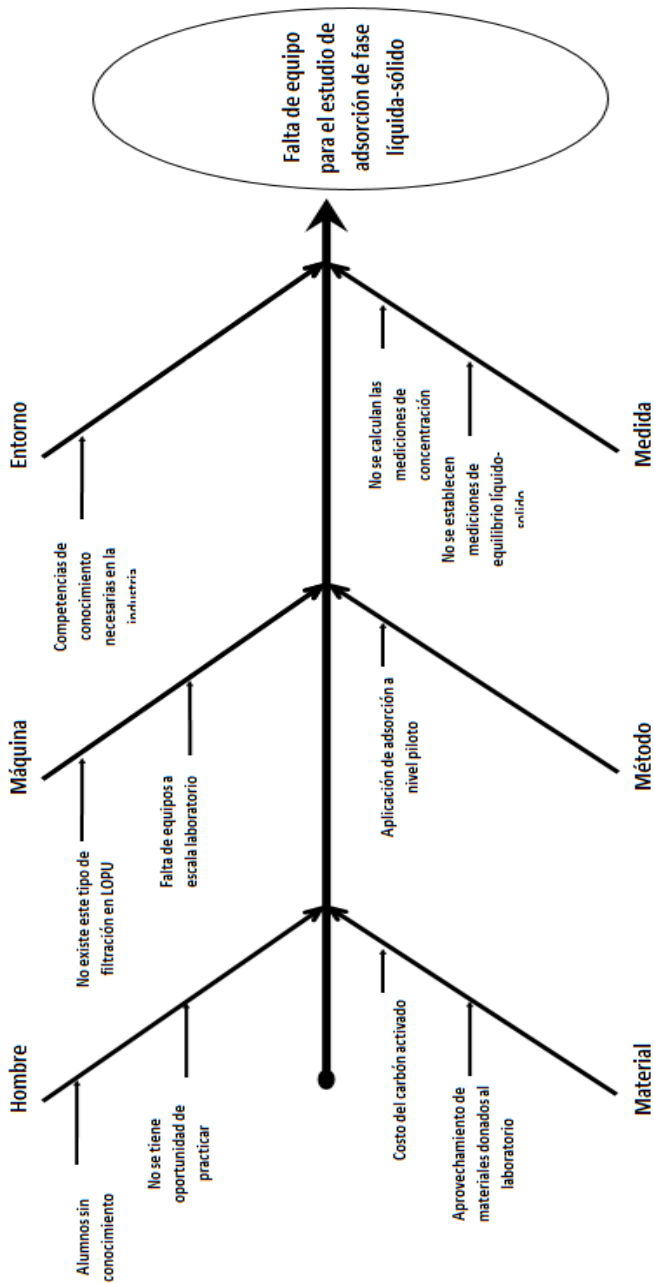


Apéndice 10. **Tabla de requisitos académicos**

Campos de conocimiento	Disciplina	Subdisciplina	Tema genérico	Aplicación en el diseño
Ingeniería	Química	Química 3	Expresiones de concentración	Determinación de cloro libre
		Análisis cuantitativo	Determinaciones por gravimetría	
	Ciencias básicas y complementarias	Programación de computadoras 1	Microsoft Office 2010	Realización de isoterma de adsorción
		Técnica Complementaria 1	Autocad 2013	Realización de planos del filtro de carbón activado diseñado
		Ingeniería económica 1	Costos	Costos de consumo del CA
	Fisicoquímica	Fisicoquímica 2	Molaridad, molalidad, concentraciones al equilibrio	Cálculo de concentraciones al equilibrio
		Laboratorio de fisicoquímica 1	Adsorción	Adsorción de carbón activado
	Operaciones unitarias	Flujo de fluidos (IQ2)	Transferencia de momentum	Tuberías, bombas, inyectores
		Transferencia de masa (IQ-4)	Adsorción en torre	Adsorción en torre de carbón activado
		Laboratorio de Ingeniería Química 1	Escalamiento	Escalamiento planta piloto
	Especialización	Ingeniería económica 3	Costos en equipos químicos	Cálculo de costos de equipo
		Diseño de equipo	Metodología del diseño	Aplicación de metodología
		Proceso químicos industriales	Tratamiento de agua	Filtración en carbón activado
		Ciencia de los materiales	Propiedades de los materiales	Propiedades físicas de los materiales
	Prácticas finales	Prácticas finales	Informe final	Esquema general del equipo para un filtro de carbón activado

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 11. Diagrama de Ishikawa



Fuente: elaboración propia.

# ANEXOS

## Anexo 1. Ficha de datos técnicos del carbón activado Clarimex 12x40



### CLARIMEX CARBOACTIV

### FICHA TÉCNICA

CARBÓN ACTIVADO GRANULAR

El carbón activado CLARIMEX CARBOACTIV es un producto de alta calidad, fabricado a partir de hulla bituminosa, por medio de un proceso de activación con vapor.

PARÁMETRO	ESPECIFICACIONES	PROPIEDADES TÍPICAS
pH	Alcalino	6-8
Humedad al empaquetar, %	3 máx.	2
Decoloración de melazas		85
Número de yodo, mg l / g	950 mín.	
Cenizas, %		12
Densidad aparente, g/cc	0.43-0.48	0.46
Número de abrasión, %		75
<b>GRANULOMETRÍA DISPONIBLE</b>		
4x10 Pasa malla 10, %	5 máx.	
8x30 Pasa malla 30, %	5 máx.	
12x40 Pasa malla 40, %	5 máx.	
PELETIZADO		

EPT-19 G  
R04 07-15

CARBÓN ACTIVADO GRANULAR - CLARIMEX CARBOACTIV

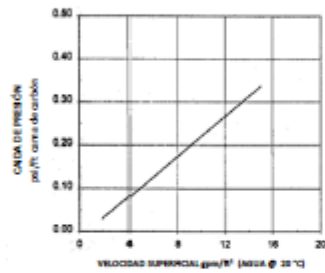


## CLARIMEX CARBOACTIV

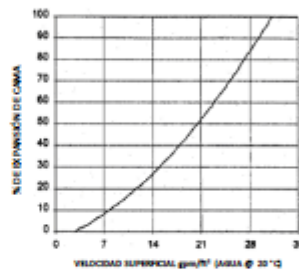
CARBON ACTIVADO GRANULAR

## FICHA TÉCNICA

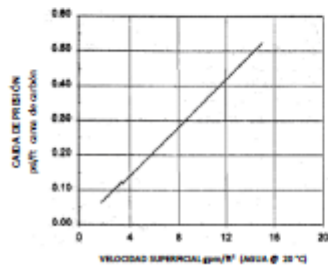
CURVA DE CAIDA DE PRESIÓN  
CARBOACTIV 6X30



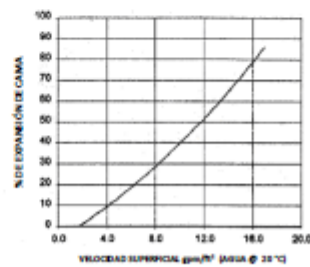
CURVA DE EXPANSIÓN DE CAMA  
CARBOACTIV 6X30



CURVA DE CAIDA DE PRESIÓN  
CARBOACTIV 12X40



CURVA DE EXPANSIÓN DE CAMA  
CARBOACTIV 12X40



CARBON ACTIVADO GRANULAR - CLARIMEX CARBOACTIV

CLARIMEX, S.A. DE C.V.  
TEL: (+52 55) 5390 8711 www.clarimex.com • ventasmex@clarimex.com • ventasexport@clarimex.com

Fuente: *Carbón Activado* <http://activatedcarbon.com.mx/es/informacion-tenica/fichas-tecnicas/>.

Consulta en línea 21 de diciembre 2017.