



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

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE RECIRCULACIÓN, ALMACENAMIENTO Y TRATAMIENTO  
PARA LOS EFLUENTES DE LOS EQUIPOS UTILIZADOS EN EL LABORATORIO DE  
OPERACIONES UNITARIAS EN LA ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA, USAC**

**Pablo César Méndez Rodas**

Asesorado por el Ing. Jorge Mario Estrada Asturias

Guatemala, agosto de 2017



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE RECIRCULACIÓN, ALMACENAMIENTO Y TRATAMIENTO  
PARA LOS EFLUENTES DE LOS EQUIPOS UTILIZADOS EN EL LABORATORIO DE  
OPERACIONES UNITARIAS EN LA ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA, USAC**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**PABLO CÉSAR MÉNDEZ RODAS**

ASESORADO POR EL ING. JORGE MARIO ESTRADA ASTURIAS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO QUÍMICO**

GUATEMALA, AGOSTO DE 2017



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Jurgen Andoni Ramírez Ramírez
VOCAL V	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. César Alfonso García Guerra
EXAMINADORA	Inga. Cinthya Patricia Ortíz Quiroa
EXAMINADOR	Ing. Jorge Mario Estrada Asturias
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:

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE RECIRCULACIÓN, ALMACENAMIENTO Y TRATAMIENTO  
PARA LOS EFLUENTES DE LOS EQUIPOS UTILIZADOS EN EL LABORATORIO DE  
OPERACIONES UNITARIAS EN LA ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA, USAC**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 29 de mayo de 2015.



**Pablo César Méndez Rodas**





Guatemala, 21 de julio de 2017

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

Estimado Ingeniero Wong:

Por este medio me dirijo a usted para informarle que he revisado el Informe Final del trabajo de graduación titulado **“Diseño de un sistema de recirculación, almacenamiento y tratamiento para los efluentes de los equipos utilizados en el Laboratorio de Operaciones Unitarias en la Escuela de Ingeniería Química, USAC”**, el cual fue elaborado por el estudiante de Ingeniería Química: **Pablo César Méndez Rodas**, identificado con el carné No. **2167 04790 0101** y registro académico No. **201113968**.

Considerando que dicho documento cumple satisfactoriamente con los requisitos exigidos, solicito sirva a darle continuidad al proceso para su aprobación.

Agradeciendo su atención, me suscribo atentamente,

  
  
Jorge Mario Estrada Asturias  
Ingeniero Químico Col. 685  
Profesor Titular  
Escuela de Ina. Química USAC

Ing. Jorge Mario Estrada Asturias  
Colegiado 685  
Asesor de Tesis





Guatemala, 28 de julio de 2017.  
Ref. EIQ.TG-IF.026.2017.

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 **027-2015** 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 el estudiante universitario: **Pablo César Méndez Rodas**.  
Identificado con número de carné: **2011-13968**.  
Previo a optar al título de **INGENIERO QUÍMICO**.

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:

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE RECIRCULACIÓN, ALMACENAMIENTO Y TRATAMIENTO PARA LOS EFLUENTES DE LOS EQUIPOS UTILIZADOS EN EL LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS EN LA ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA, USAC**

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el Ingeniero Químico: **Jorge Mario Estrada Asturias**.

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. Víctor Manuel Morzón Valdez  
COORDINADOR DE TERNA  
Tribunal de Revisión  
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo







Ref.EIQ.TG.039.2017

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 del estudiante, **PABLO CÉSAR MÉNDEZ RODAS** titulado: **"DISEÑO DE UN SISTEMA DE RECIRCULACIÓN, ALMACENAMIENTO Y TRATAMIENTO PARA LOS EFLUENTES DE LOS EQUIPOS UTILIZADOS EN EL LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS EN LA ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA, USAC."**. 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 Davila  
Director  
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, agosto 2017

Cc: Archivo  
CSWD/ale

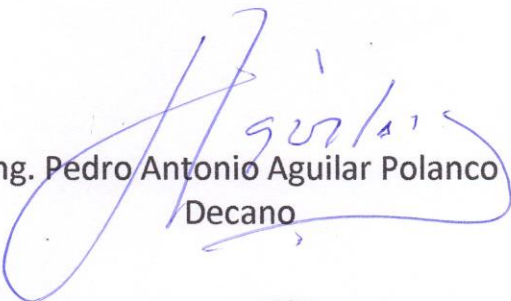




DTG. 371.2017

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: **DISEÑO DE UN SISTEMA DE RECIRCULACIÓN, ALMACENAMIENTO Y TRATAMIENTO PARA LOS EFLUENTES DE LOS EQUIPOS UTILIZADOS EN EL LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS EN LA ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA, USAC**, presentado el estudiante universitario: **Pablo César Méndez Rodas**, 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, agosto de 2017

/gdech







## **ACTO QUE DEDICO A:**

- Dios** Razón de todo lo que soy y todo lo que seré, amor puro y perfecto, mi Padre, mi escudo, mi fortaleza, mi pronto auxilio, mi proveedor, mi todo.
- Jesús** Causante de mi vida, mi Salvador, mi Rey, mi Señor, mi Maestro, mi amigo, mi camino.
- Espíritu Santo** Mi eterno acompañante, el que guía mis pasos y me da consuelo. En Su presencia reside mi esperanza, mi paz, mi fe.
- Mi papá** Carlos Méndez, mi ejemplo a seguir. A pesar de haber miles de kilómetros de por medio siempre has estado aquí. Tu amor, tus enseñanzas, tu ejemplo, tus palabras oportunas, tu apoyo trasciende la distancia y han formado mi vida. Este logro también es tuyo, te amo.
- Mi mamá** Lorena Rodas, la primera mujer de la que me enamoré. Me enseñaste a vivir y hacer todo con excelencia, sin tu amor, tu paciencia, tu lucha, tus consejos y tus regaños yo no estaría donde estoy y no sería el hombre que soy. Estamos cumpliendo un sueño más, te amo.

**Mis hermanos**

Luis y Alex, por ser mis compañeros de vida, conocen mis peores defectos, pero siempre puedo contar con ellos.

**Mis amigos**

Los que he tenido el honor y placer de conocer desde la infancia, en la adolescencia o en la iglesia, sin ustedes la vida no tendría el mismo sabor, me han acompañado en cada etapa de mi vida y quiero seguirlo teniendo en las siguientes etapas, crecer en todo sentido a su lado, gracias por tanto: Yazmín Orozco, Abel Samayoa, Raúl Molina, Adry del Cid, Cindy Loy, Sheila Godoy, Sharlín Carpio, Mynor y Marenny Morales, Kristhal, Abby y Ruby Monterroso, Gaby Pineda, Deyna de la Cruz, Rodolfo Polanco y algunos que no menciono.

**Mis amigos**

Aquellos que llegaron a lo más reciente de mi vida pero sé que permanecerán, sufrimos, aprendimos, disfrutamos y triunfamos juntos, amigos y colegas: Aldair Solórzano, Gabriel Solórzano, Karen Gatica, Danilo Ajcip, Pedro García, Eddy Payes, Mily Ola, Andrea Morales, Luis Linares, Mario Arévalo, Fernando Villagrán, Dayanne Zelada, Diana Cermeño.

## AGRADECIMIENTOS A:

<b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por ser mi <i>alma mater</i> , por darme la oportunidad de desarrollarme académicamente y enseñarme a valorar y luchar por el pueblo guatemalteco. Orgulloso de ser sancarlista.
<b>Facultad de Ingeniería</b>	Especialmente a la Escuela de Ingeniería Química, por darme las herramientas necesarias para desarrollarme profesionalmente.
<b>Mis catedráticos</b>	Por darme las bases y enseñarme acerca de lo que un verdadero ingeniero químico debe ser, especialmente al Ing. Jorge Godínez, quien fue mi coasesor y siempre estuvo dispuesto a compartir sus conocimientos sin reservas.
<b>Ing. Jorge Mario Estrada Asturias</b>	Por ser un excelente profesor y maestro, por no solo enseñar academia sino principios y valores por toda su ayuda y paciencia brindada asesorando este trabajo de graduación, por ser una gran persona y un profesional ejemplar.



# ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	V
LISTA DE SÍMBOLOS .....	VII
GLOSARIO .....	IX
RESUMEN .....	XI
OBJETIVOS .....	XIII
HIPÓTESIS .....	XV
INTRODUCCIÓN .....	XVII
1. ANTECEDENTES .....	1
2. MARCO TEÓRICO .....	3
2.1. Descripción del uso del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Escuela de Ingeniería Química, USAC .....	3
2.1.1. Equipo de bomba centrífuga .....	3
2.1.2. Equipo de medidores de flujo .....	5
2.1.3. Equipo de tuberías y accesorios .....	6
2.1.4. Equipo intercambiador de calor de concha y tubos .....	7
2.1.5. Equipo intercambiador de calor de tubos concéntricos .....	8
2.1.6. Equipo de torre de absorción .....	9
2.1.7. Equipo de torre de destilación .....	10
2.1.8. Equipo de torre de humidificación .....	11
2.1.9. Situación actual del Laboratorio de Operaciones Unitarias .....	12

2.2.	Flujo de fluidos .....	12
2.2.1.	Propiedades de los fluidos.....	13
2.2.1.1.	Peso y masa .....	13
2.2.1.2.	Temperatura .....	13
2.2.1.3.	Presión .....	14
2.2.1.4.	Densidad, peso específico y gravedad específica.....	14
2.2.1.5.	Viscosidad dinámica .....	15
2.3.	Diseño de un sistema de distribución de agua .....	15
2.3.1.	Tasa de flujo y ecuación de continuidad .....	16
2.3.2.	Velocidad de flujo recomendable en tuberías y ductos.....	16
2.3.3.	Conservación de la energía.....	18
2.3.4.	Régimen de flujo.....	19
2.3.5.	Pérdidas de energía por fricción en tuberías .....	20
2.3.5.1.	Pérdida por fricción en flujo laminar .....	20
2.3.5.2.	Pérdida por fricción en flujo turbulento.....	21
2.3.6.	Pérdidas de energía por accesorios .....	22
2.3.6.1.	Válvulas .....	22
2.3.6.2.	Acoplamientos .....	22
2.3.7.	Sistemas de tubería en serie .....	23
2.3.8.	Sistema de tuberías en paralelo .....	24
2.3.9.	Selección y aplicación de bombas .....	25
2.3.9.1.	Carga neta de succión positiva .....	26
2.4.	Calidad del agua .....	27
2.4.1.	Aguas residuales .....	27
2.4.2.	Características de las aguas residuales .....	28
2.4.3.	Parámetros físicos.....	28

2.4.3.1.	Color .....	28
2.4.3.2.	Olor .....	29
2.4.3.3.	Temperatura.....	29
2.4.3.4.	Sólidos .....	29
2.4.4.	Parámetros químicos .....	30
2.4.4.1.	pH .....	30
2.4.4.2.	Alcalinidad.....	31
2.4.4.3.	Dureza .....	32
2.4.4.4.	Demanda química de oxígeno (DQO) .....	33
2.4.5.	Tratamiento de aguas .....	33
2.4.5.1.	Coagulación .....	33
2.4.5.1.1.	Coagulantes .....	34
2.4.5.1.2.	Influencia de la mezcla.....	35
2.4.5.2.	Floculación .....	35
2.4.5.2.1.	Floculantes.....	36
2.4.5.3.	Filtración .....	37
3.	DISEÑO METODOLÓGICO .....	39
3.1.	Variables .....	39
3.2.	Delimitación del campo de estudio .....	43
3.2.1.	Campo de estudio.....	43
3.2.2.	Etapas de investigación .....	44
3.3.	Recursos humanos disponibles .....	45
3.4.	Recursos materiales disponibles .....	45
3.4.1.	Equipo .....	45
3.4.2.	Cristalería .....	46
3.4.3.	Reactivos .....	46

3.5.	Técnica cualitativa o cuantitativa .....	46
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información .....	47
3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información .....	51
3.8.	Análisis estadístico.....	51
3.8.1.	Determinación del número óptimo de mediciones ..	51
3.8.2.	Medidas de tendencia central .....	53
3.8.2.1.	Media aritmética .....	53
3.8.3.	Medidas de dispersión.....	53
3.8.3.1.	Varianza .....	53
3.8.3.2.	Desviación estándar .....	54
3.9.	Plan de análisis de los resultados .....	54
3.9.1.	Métodos y modelos de los datos según el tipo de variables .....	54
3.9.2.	Programas a utilizar para análisis de datos .....	55
4.	RESULTADOS .....	57
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS .....	67
	CONCLUSIONES .....	77
	RECOMENDACIONES .....	79
	BIBLIOGRAFÍA .....	81
	APÉNDICES .....	83
	ANEXOS .....	103



# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

## FIGURAS

1.	Equipo de bomba centrífuga .....	4
2.	Equipo de medidores de flujo .....	5
3.	Equipo de caídas de presión .....	6
4.	Equipo intercambiador de calor de concha y tubos .....	7
5.	Equipo intercambiador de calor de tubos concéntricos .....	8
6.	Equipo de torre de absorción .....	9
7.	Equipo de torre de destilación .....	10
8.	Equipo de torre de humidificación .....	11
9.	Ayuda para seleccionar el tamaño de tuberías.....	17
10.	Diagrama de procedimiento experimental para determinación de flujo volumétrico .....	50
11.	Plan de tratamiento .....	62
12.	Esquema del plan de tratamiento .....	63
13.	Sistema de recepción de agua .....	64
14.	Sistema de distribución de agua .....	65

## TABLAS

I.	Variables presentes en la caracterización de las aguas residuales finales.....	41
II.	Variables presentes en el diseño del sistema de recirculación .....	42
III.	Variables presentes en el diseño del sistema de tratamiento .....	43
IV.	Toma de datos de intercambiador de calor de tubos concéntricos .....	47

V.	Toma de datos de intercambiador de calor de concha y tubos .....	48
VI.	Toma de datos de torre absorción .....	48
VII.	Toma de datos de torre de destilación .....	48
VIII.	Toma de datos de equipos con circuito cerrado.....	49
IX.	Volumen promedio utilizado por práctica en el Laboratorio de Ingeniería Química 1 .....	57
X.	Volumen promedio utilizado por práctica en el Laboratorio de Ingeniería Química 2 .....	57
XI.	Volumen total por día para ser recirculado .....	58
XII.	Especificaciones del sistema de distribución de agua.....	58
XIII.	Especificaciones del sistema de recepción de agua .....	59
XIV.	Dimensiones de los tanques del sistema de recirculación .....	59
XV.	Especificaciones de las bombas para el sistema de recirculación de agua.....	60
XVI.	Resultados de los análisis físicos y químicos de las muestras de agua tomadas por cada equipo.....	61

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<i>z</i>	Altura
<i>A</i>	Área transversal
<b>hp</b>	Caballos de fuerza
<i>NPSH<sub>A</sub></i>	Cabeza neta de succión positiva disponible
<i>NPSH<sub>R</sub></i>	Cabeza neta de succión positiva requerida
<i>h<sub>A</sub></i>	Carga total sobre la bomba
<i>K</i>	Coefficiente de resistencia
<i>ρ</i>	Densidad
<i>D</i>	Diámetro
<i>e<sub>M</sub></i>	Eficiencia mecánica
<i>f</i>	Factor de fricción
<i>Q</i>	Flujo volumétrico
<b>gal</b>	Galones
°C	Grados Celsius
<i>g</i>	Gravedad
<i>sg</i>	Gravedad específica
<b>lb</b>	Libra
<i>L</i>	Longitud de tubería
<i>L<sub>e</sub></i>	Longitud equivalente para accesorios
<i>m</i>	Masa
<b>m</b>	Metro
<b>m<sup>2</sup></b>	Metro cuadrado
<b>m<sup>3</sup></b>	Metro cúbico

<b>mg</b>	Miligramo
<b>N</b>	Newton
$N_R$	Número de Reynolds
<b>Pa</b>	Pascal
$h_L$	Pérdida de energía por accesorios y tubería
$w$	Peso
$\gamma$	Peso específico
$P_A$	Potencia
$p$	Presión
<b>pulg</b>	Pulgada
$\varepsilon$	Rugosidad
$v$	Velocidad
$\eta$	Viscosidad dinámica
$V$	Volumen
<b>W</b>	Watts

## GLOSARIO

<b>Agua residual</b>	Agua que ha recibido uso y cuyas cualidades han sido modificadas.
<b>Bomba</b>	Máquina hidráulica que transfiere energía a la corriente de un fluido impulsándolo, desde un estado de baja presión estática a otro de mayor presión.
<b>Carga</b>	Energía que posee el fluido por unidad de peso del fluido que se mueve en el sistema, puede ser por presión, por elevación o por velocidad.
<b>Coagulante</b>	Sal metálica que reacciona con la alcalinidad del agua para producir flóculos insolubles en el agua.
<b>Efluente</b>	Aguas residuales descargadas por un ente generador.
<b>Filtro</b>	Dispositivo que sirve para remover las impurezas sólidas de un líquido.
<b>Floculante</b>	Sustancia química comúnmente orgánica que aglutina flóculos en suspensión una vez efectuada su coagulación, provocando su precipitación.

<b>Flujo volumétrico</b>	Volumen del fluido que circula en una sección por unidad de tiempo.
<b>Proceso <i>batch</i></b>	Proceso discontinuo o por lotes que se opera sobre una cantidad definida de material.
<b>Recirculación</b>	Proceso de volver a circular un fluido dentro del mismo sistema.
<b>Tanque</b>	Estructuras de diversos materiales utilizadas para guardar y/o preservar líquidos a presión atmosférica.
<b>Tratamiento</b>	Operaciones unitarias de tipo físico, químico o biológico cuyo fin es la reducción de características no deseables en el agua.
<b>Tubería</b>	Sistema formado por tubos, los cuales pueden ser de diferentes materiales, que permite el transporte de fluidos.
<b>Válvula</b>	Dispositivo que regula, permite o impide el paso de un fluido a través de una tubería.

## RESUMEN

El objetivo principal de la investigación fue diseñar un sistema de recirculación, tratamiento y almacenamiento de los efluentes provenientes de los equipos del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Escuela de Ingeniería Química, USAC, con el fin de reducir el gasto de agua que se tiene en las prácticas que en dicho laboratorio se realizan.

Para cumplir el objetivo se determinó el volumen total de agua que se utiliza en cada equipo para una práctica de Laboratorio de Ingeniería Química 1 y una práctica de Laboratorio de Ingeniería Química 2, y de esta manera calcular el volumen total de agua que se debe ser recirculado. Además, se realizaron análisis de agua para determinar la calidad con la que se encuentran los efluentes de los equipos; se evaluaron parámetros físicos, como la temperatura y sólidos disueltos totales, y parámetros químicos como el pH, la dureza, la alcalinidad y la demanda química de oxígeno.

A partir de esto se encontró que son necesarios dos tanques en el sistema, uno como receptor de agua usada, que a su vez será utilizado como reactor tipo *batch*, y el otro tanque para el almacenamiento del agua tratada. Será necesario un aproximado de 29 metros de tubería y diversos accesorios en el sistema. Para hacer funcionar el sistema serán necesarias tres bombas centrífugas, una para el sistema de distribución, otra para el sistema de recepción y la última para el tratamiento de agua. Se propuso que el tratamiento se lleve a cabo por coagulación, floculación, sedimentación y filtración, esta última por medio de un filtro de cartucho.





## **OBJETIVOS**

### **General**

Diseñar un sistema de recirculación, almacenamiento y tratamiento para las aguas residuales provenientes de los equipos utilizados en el Laboratorio de Operaciones Unitarias en la Escuela de Ingeniería Química, USAC.

### **Específicos**

1. Determinar el flujo volumétrico promedio de agua residual en los equipos del Laboratorio de Operaciones Unitarias en una práctica de los cursos de Laboratorio de Ingeniería Química 1 y 2.
2. Determinar el flujo volumétrico total de agua que será recirculado y almacenado para prácticas posteriores.
3. Establecer el diámetro de la tubería, la longitud de tubería recta y los accesorios necesarios para el sistema de recirculación del agua.
4. Dimensionar los tanques de recepción de agua usada y de almacenamiento del agua destinada a recirculación.
5. Seleccionar el tipo y la potencia de la bomba utilizada en el sistema de recirculación.

6. Determinar la calidad de las aguas residuales por medio de la medición de siete parámetros: temperatura, demanda química de oxígeno (DQO), potencial de hidrógeno (pH), sólidos sedimentables, sólidos disueltos, alcalinidad y dureza.
7. Diseñar el plano de ubicación del sistema de tratamiento de agua en el Laboratorio de Operaciones Unitarias.
8. Proponer un plan de tratamiento de agua residual de los equipos.

## **Hipótesis**

### **Hipótesis nula:**

El agua a reutilizar cumple con las características necesarias para su uso en cada equipo del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Escuela de Ingeniería Química, USAC.

### **Hipótesis alternativa:**

El agua a reutilizar no cumple con las características necesarias para su uso en cada equipo del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Escuela de Ingeniería Química, USAC.



## INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso imprescindible para todo tipo actividad en este planeta, desde el funcionamiento del organismo y los ciclos naturales de la Tierra, hasta el funcionamiento de las industrias en todo el mundo. Sin embargo, el crecimiento de la población, la contaminación o destrucción de fuentes naturales de agua limpia y el mal uso que se le ha dado a este recurso, están poniendo en peligro la provisión de agua del planeta.

Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura (FAO, por sus siglas en inglés), a partir de 1950 se ha triplicado el consumo de agua en todo el mundo y Guatemala no es una excepción. Más allá de cubrir las necesidades básicas del ser humano, el abastecimiento de agua y los servicios de saneamiento, así como el uso que se hace de los recursos hídricos, son factores determinantes para un desarrollo sostenible. En algunas partes del mundo, el agua constituye la principal fuente de energía, mientras que en otras se desaprovecha casi totalmente su potencial energético. También resulta indispensable para la agricultura y forma parte de numerosos procesos industriales.

Muchas de las industrias utilizan y desechan el agua indiscriminadamente, preocupándose únicamente de maximizar utilidades y rebajar costos, por lo que un plan de gestión de los residuos es considerado como no viable, debido a que afecta las ganancias totales de la empresa. Este problema se debe a la falta de diseño de sistemas y producciones sostenibles y amigables con el medio ambiente, tal como el tratamiento y recirculación de los efluentes de la industria, el cual puede considerarse como un aprovechamiento y optimización de los

recursos, y si el empresario observa la posibilidad de disminuir costos utilizando este sistema, es entonces factible la reducción del impacto ambiental y preservación de los recursos naturales. Por lo que un desarrollo sostenible es, sin duda, la mejor solución para preservar la herencia ecológica del mañana.

## 1. ANTECEDENTES

Los siguientes trabajos de graduación se realizaron en la Universidad de San Carlos de Guatemala, para la Escuela de Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería.

En 1996 se llevó a cabo un trabajo de graduación con el tema *Propuesta de diseño para un beneficio húmedo integrado de café, de bajo impacto ambiental, campamento Chichoj, Alta Verapaz*, por el investigador Paúl Menchú Vásquez. En este trabajo se presentan conceptos básicos acerca de la contaminación de las aguas debido a los beneficios húmedos del café, por lo que resalta la importancia que tiene el correcto diseño de un beneficio húmedo de bajo impacto ambiental aprovechando y tratando los desechos sólidos y la reutilización del agua en el proceso. El investigador concluye proponiendo un sistema caracterizado por la recirculación del agua, la separación óptima del café y el remojo para obtener una tasa de alta calidad. Sin embargo, el investigador no presenta el diseño del sistema de recirculación sino solo propone que debe haber un sistema de este tipo.

En 2003 se realizó un trabajo de investigación, por el investigador Francisco Javier Lemus Godoy, con el tema *Optimización del manejo de residuos químicos de los laboratorios de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos*. En el trabajo se presentan los procedimientos realizados para llevar a cabo la optimización de los residuos químicos, habiendo hecho primero una clasificación y cuantificación de todos los reactivos que se desechan y su clasificación según su naturaleza.

El investigador concluyó definiendo cuál es el método más adecuado para cada grupo de desecho químico, estandarizó dicho método y definió los recipientes utilizados para los residuos. Sin embargo, en los cursos de Laboratorio de Ingeniería Química los efluentes de desecho son grandes en comparación con los demás laboratorios de la Escuela de Ingeniería Química, por lo que los métodos utilizados en este trabajo de graduación no son factibles, ya que se necesitarían toneles para contener los desechos y tratarlos.



## **2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1. Descripción del uso del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Escuela de Ingeniería Química, USAC**

Como parte del *pensum* de estudios de Ingeniería Química se tienen dos cursos profesionales: Laboratorio de Ingeniería Química 1 y 2. Ambos cursos se llevan a cabo en el Laboratorio de Operaciones Unitarias, el cual cuenta con diversos equipos a escala laboratorio para simular situaciones reales que se llevan a cabo en la industria.

Los equipos del laboratorio, en su mayoría, funcionan haciéndoles pasar un flujo constante de agua que se desecha al alcantarillado público. En este trabajo se propone la recirculación de la misma en los equipos de torre de humidificación, torre de absorción, torre de destilación, bomba centrífuga, medidores de flujo, caídas de presión, intercambiador de calor de tubos concéntricos e intercambiador de calor de concha y tubos. Estos equipos se describen a continuación.

#### **2.1.1. Equipo de bomba centrífuga**

El equipo de bomba centrífuga permite calcular las variables necesarias para dibujar sus curvas de rendimiento. Se dispone de un rectificador CA-CD que acciona un motor de velocidad variable regulado por un reóstato. La bomba centrífuga está montada sobre una armadura móvil que permite medir el torque mediante un brazo y un dinamómetro. Un voltímetro, un amperímetro, un manómetro y un tacómetro proporcionan la información requerida. El agua se

suministra en circuito cerrado y se almacena en un tanque que tiene un nivel de operación más alto que la entrada axial de la bomba.

Figura 1. **Equipo de bomba centrífuga**



Fuente: Laboratorio de Operaciones Unitarias.

### 2.1.2. Equipo de medidores de flujo

La unidad de medidores de flujo de agua integra varios instrumentos de medición para flujo de agua. El sistema hidráulico funciona con un flujo que circula en circuito cerrado. Dos ramales separados permiten evaluar los medidores que funcionan con el mismo principio. En la rutina de trabajo se calibran los medidores haciendo referencia a un patrón seleccionado. Un sistema de manómetros diferenciales con mercurio proporciona la información de las presiones que se desarrollan en los puntos seleccionados.

Figura 2. Equipo de medidores de flujo



Fuente: Laboratorio de Operaciones Unitarias.

### 2.1.3. Equipo de tuberías y accesorios

Este equipo permite calcular caídas de presión en tuberías y accesorios cuando circula agua en su interior. Es un sistema integrado de diez ramales, uno de tubería recta y nueve con diferentes accesorios de metal, tales como codos, “tees” y válvulas de dos tipos, globo y compuerta. Una bomba centrífuga impulsa el agua desde un tanque al equipo en circuito cerrado. Un rotámetro permite medir diferentes rangos de flujo másico. Las medidas de presión se obtienen de lecturas directas de manómetros tipo Bourdon.

Figura 3. Equipo de caídas de presión



Fuente: Laboratorio de Operaciones Unitarias.

#### **2.1.4. Equipo intercambiador de calor de concha y tubos**

El intercambiador de calor de concha y tubos del laboratorio es un sistema de 5 intercambiadores de calor de cobre tipo K, conectados en paralelo. Para poder integrar el esquema agua-agua, un condensador de vapor permite calentar el agua de ingreso. Un medidor de orificio permite contabilizar el caudal de agua que ingresa y un juego de termómetros mide las temperaturas de entrada y salida de cada intercambiador. Un contador de agua mide el paso de metros cúbicos utilizados. El agua se desecha al alcantarillado público.

Figura 4. **Equipo intercambiador de calor de concha y tubos**



Fuente: Laboratorio de Operaciones Unitarias.

### 2.1.5. Equipo intercambiador de calor de tubos concéntricos

El intercambiador de calor de tubos concéntricos es un equipo que integra ocho unidades de intercambiadores de cobre tipo K, conectados en serie. En tres de los intercambiadores se transfiere calor entre el vapor de la caldera y aceite que circula en el tubo interno (sistema vapor-aceite); en los cinco restantes, se transfiere calor entre el aceite calentado con el vapor y agua fría que circula en el ánulo (sistema aceite-agua). La dirección de los flujos puede ser en paralelo o en contracorriente. Para la medición de los flujos de aceite y agua se cuenta con dos rotámetros independientes. El flujo de aceite es un circuito cerrado, impulsado por una bomba desde un tanque. El flujo de agua es constante y se desecha en el alcantarillado público.

Figura 5. **Equipo intercambiador de calor de tubos concéntricos**



Fuente: Laboratorio de Operaciones Unitarias.

### 2.1.6. Equipo de torre de absorción

Este equipo permite determinar los puntos de carga e inundación en una columna empacada y determinar experimentalmente la altura de una unidad de transferencia de masa en la torre. Consta de una columna empacada de anillos Rashing distribuidos al azar. Para la medición de los flujos de agua y aire se utilizan rotámetros, un ventilador para el aire y un manómetro diferencial en la torre. Cuenta también con una torre de saturación de agua. El flujo de agua es constante y se desecha al alcantarillado público.

Figura 6. Equipo de torre de absorción



Fuente: Laboratorio de Operaciones Unitarias.

### 2.1.7. Equipo de torre de destilación

La torre de destilación del laboratorio permite determinar la eficiencia de los platos y la eficiencia global de la torre en función de la velocidad del vapor en la torre con un reflujo total. Cuenta con seis platos con campanas de burbujeo y se opera únicamente en la sección de rectificación. Posee un condensador enfriado con un flujo constante de agua que se desecha al alcantarillado público y un calderín calentado con resistencias eléctricas.

Figura 7. **Equipo de torre de destilación**



Fuente: Laboratorio de Operaciones Unitarias.



### 2.1.8. Equipo de torre de humidificación

Este equipo permite calcular las variables necesarias para determinar una correlación entre el coeficiente global de transferencia de masa y la razón de flujos de agua y aire en una torre con empaque de madera. El agua se suministra en circuito cerrado y se almacena en una pileta que permite el flujo hacia la torre por medio de una bomba centrífuga que alimenta los aspersores ubicados en la parte más alta de la torre.

Figura 8. Equipo de torre de humidificación



Fuente: Laboratorio de Operaciones Unitarias.

### **2.1.9. Situación actual del Laboratorio de Operaciones Unitarias**

Actualmente el laboratorio cuenta con un sistema de recirculación de agua construido pensando en la disposición de los efluentes de los intercambiadores de calor y la torre de destilación. La recirculación para estos equipos consiste en una tubería que conecta la salida de agua a la pileta de la torre de humidificación. Dicha pileta conecta una bomba centrífuga que abastece del flujo de agua necesario para el funcionamiento de estos equipos mencionados. Por lo tanto, se trata de un circuito cerrado para la torre de humidificación, intercambiador de calor de tubos concéntricos, intercambiador de calor de concha y tubos y torre de destilación, en el cual únicamente se necesita llenar la pileta y hacer funcionar la bomba centrífuga. La recirculación de esta agua no cuenta con un tratamiento intermedio.

## **2.2. Flujo de fluidos**

Un fluido es una sustancia que sufre una deformación continua cuando se le aplica un esfuerzo cortante muy pequeño. Los fluidos pueden ser líquidos o gases, de los cuales las fuerzas intermoleculares son mayores en los primeros, por lo que, al variar la presión o temperatura, los gases cambian fácilmente su volumen. Este concepto puede usarse para diferenciar entre un líquido o un gas, ya que los gases son mucho más compresibles que los líquidos.<sup>1</sup>

Desde el punto de vista de la dinámica, no importa si el fluido es líquido o gas, ya que las leyes que se aplican son las mismas. Frecuentemente, líquidos tales como el agua pueden considerarse incompresibles. El flujo de fluidos es

---

<sup>1</sup> McCABE, Warren L.; SMITH, Julian C.; HARRIOTT, Peter. *Operaciones unitarias en ingeniería química*. P. 41

entonces el estudio del movimiento de un fluido, involucrando las leyes del movimiento de la física, las propiedades del fluido y características del medio ambiente y conducto por el cual fluyen.

### **2.2.1. Propiedades de los fluidos**

Para el estudio del flujo de fluidos es necesario entender las propiedades de los fluidos, las cuales se describen a continuación.

#### **2.2.1.1. Peso y masa**

Es importante hacer una distinción entre la masa de un fluido y su peso. La masa de un fluido es la medida de la cantidad que hay de este. El peso es la fuerza con la que el fluido es atraído hacia la Tierra por la atracción de la gravedad. Estos se relacionan sabiendo que la gravedad es la aceleración con que se atraen cuerpos a la Tierra. Por lo tanto, el peso es igual a la masa multiplicada por la gravedad.

#### **2.2.1.2. Temperatura**

La temperatura puede definirse como un escalar que representa la actividad interna de una sustancia a escala microscópica. Puede interpretarse como la medida indirecta de un equilibrio térmico que se establece en la ley cero de la termodinámica. Un cambio en la temperatura de un fluido puede hacer que todas las demás propiedades cambien, por lo que es necesario prestarle especial atención.

### **2.2.1.3. Presión**

Esta se define como la cantidad de fuerza que se ejerce sobre una unidad de área de una sustancia o sobre una superficie. Todos los fluidos están sujetos a variaciones de presión y el conocimiento de esta es de vital importancia en el flujo de fluidos.

### **2.2.1.4. Densidad, peso específico y gravedad específica**

Es conveniente que se relacionen la masa y el peso del fluido con un volumen dado de este, ya que el estudio de la mecánica de fluidos, por lo general, tiene que ver con los fluidos que circulan en forma continua. La densidad se define como la cantidad de masa por unidad de volumen de una sustancia y está dada por la siguiente ecuación:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \text{[Ecuación 1]}$$

El peso específico es la cantidad de peso por unidad de volumen de una sustancia y está dada por la siguiente ecuación:

$$\gamma = \frac{m \cdot g}{V} \quad \text{[Ecuación 2]}$$

Para poder relacionar la densidad o el peso específico de una sustancia con la densidad o peso específico de un fluido común con propiedades conocidas, se tiene la gravedad específica. Generalmente se utiliza como fluido común al agua pura a 4°C. Matemáticamente se expresa como:

$$\gamma = \frac{\rho_s}{\rho_w@4^{\circ}\text{C}} = \frac{\gamma_s}{\gamma_w@4^{\circ}\text{C}} \quad [\text{Ecuación 3}]$$

Donde los subíndices  $s$  y  $w$  se refieren a la sustancia evaluada y al agua, respectivamente.

### **2.2.1.5. Viscosidad dinámica**

La viscosidad es una magnitud que expresa la deformación que sufre un fluido cuando se le aplican fuerzas externas, produciendo pérdidas energéticas por fricción o choques entre las distintas moléculas que forman el seno del mismo. Por lo tanto, si se aplica un esfuerzo cortante en el fluido, se producirá un movimiento de las distintas capas del líquido, creando un perfil de velocidades respecto a un eje vertical. La viscosidad es entonces la relación entre el esfuerzo cortante y dicho perfil de velocidades.<sup>2</sup> Una relación que es importante destacar es la variación de la viscosidad con la temperatura en los líquidos, ya que la viscosidad disminuye conforme aumenta la temperatura.

## **2.3. Diseño de un sistema de distribución de agua**

Para realizar el diseño de un sistema de distribución de agua se requiere tomar en cuenta el flujo volumétrico del sistema, el diámetro de la tubería, la cantidad de tubería que se utilizará, la cantidad de accesorios, las caídas de presión, pérdidas de energía, potencia de la bomba, entre otras. Estos criterios se describieron a continuación.

---

<sup>2</sup> MOTT, Robert L. *Mecánica de fluidos*. P. 27

### 2.3.1. Tasa de flujo y ecuación de continuidad

La cantidad del fluido que pasa por un sistema por unidad de tiempo puede expresarse por medio de tres términos distintos: flujo volumétrico, flujo en peso y flujo másico.

“El flujo volumétrico es el volumen de fluido que circula en una sección por unidad de tiempo. El flujo en peso es el peso del fluido que circula en una sección por unidad de tiempo. El flujo másico es la masa del fluido que circula en una sección de tiempo.”<sup>3</sup> El más utilizado es el flujo volumétrico, que se expresa de la siguiente forma:

$$Q = Av \quad \text{[Ecuación 4]}$$

Para poder determinar la velocidad de flujo en un sistema de ductos cerrados, se utiliza el principio de la continuidad. Este principio dice que la cantidad de fluido que circula a través de cualquier sección en cierta cantidad de tiempo es constante. Si se toman dos secciones, no se agrega ni retira fluido, entonces la masa del primer punto es la misma que la del segundo. Si se aplica únicamente a líquidos, la ecuación de continuidad queda como el flujo volumétrico en la primera sección es igual al flujo volumétrico de la segunda sección.

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 \quad \text{[Ecuación 5]}$$

### 2.3.2. Velocidad de flujo recomendable en tuberías y ductos

Para determinar una velocidad de flujo satisfactoria hay muchos factores a tomar en cuenta. Los más importantes son el tipo de fluido, la longitud del

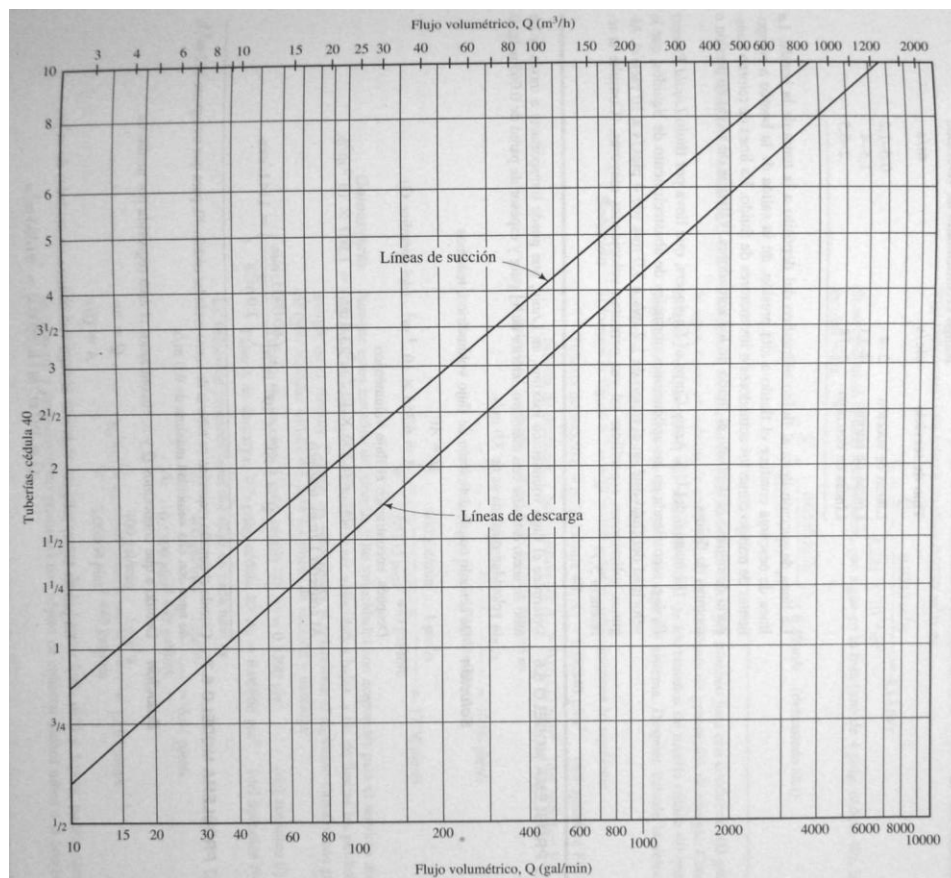
---

<sup>3</sup> MOTT, Robert L. *Mecánica de fluidos*. P. 154.

sistema, el tipo de tubería, caídas de presión, dispositivos conectados y temperatura.

Al analizar la ecuación 5 se puede observar que una disminución de área conlleva un aumento de la velocidad de flujo, por lo tanto, los tubos más pequeños generarán las velocidades mayores y los tubos más grandes generarán las velocidades menores. En la figura 1 se muestra una ayuda muy útil para la selección de tamaños de tubería en función del flujo volumétrico que se desee en el sistema.

Figura 9. Ayuda para seleccionar el tamaño de tuberías



Fuente: MOTT, Robert L. *Mecánica de fluidos*. P. 163

### 2.3.3. Conservación de la energía

El análisis de la tubería y los accesorios toma en cuenta toda la energía dentro del sistema. “Partiendo de la ley de la conservación de la energía, la cual dice que la energía no se crea ni se destruye, sino que solo se transforma, y sabiendo que existen tres tipos de energía que puede haber dentro de un sistema.”<sup>4</sup>

Energía cinética:

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{wv^2}{2g} \quad \text{[Ecuación 6]}$$

Energía potencial:

$$E_p = mgz = wz \quad \text{[Ecuación 7]}$$

Energía de flujo:

$$E_f = \frac{wp}{\gamma} \quad \text{[Ecuación 8]}$$

Entonces, la energía total es la suma de estas tres energías:

$$E = E_k + E_p + E_f$$

Si se analizan dos puntos dentro del sistema, y asumiendo que no hay pérdidas, se tiene la ecuación:

$$E_1 = E_2$$

$$E_{k,1} + E_{p,1} + E_{f,1} = E_{k,2} + E_{p,2} + E_{f,2}$$

---

<sup>4</sup> MOTT, Robert L. *Mecánica de fluidos*. P. 166.



$$\frac{wv_1^2}{2g} + wz_1 + \frac{wp_1}{\gamma} = \frac{wv_2^2}{2g} + wz_2 + \frac{wp_2}{\gamma}$$

Ecuación de Bernoulli<sup>5</sup>:

$$\frac{v_1^2}{2g} + z_1 + \frac{p_1}{\gamma} = \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + \frac{p_2}{\gamma} \quad \text{[Ecuación 9]}$$

Se adapta a un sistema real agregando energía suministrada, energía retirada y energía perdida por fricción y accesorios, obteniendo la ecuación general de la energía:

$$\frac{v_1^2}{2g} + z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + h_A - h_R - h_L = \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + \frac{p_2}{\gamma} \quad \text{[Ecuación 10]}$$

#### 2.3.4. Régimen de flujo

Para determinar el régimen de flujo con el que se está trabajando, se utiliza un número adimensional conocido como número de Reynolds, el cual está en función de las propiedades del fluido y del sistema:

$$N_R = \frac{vD\rho}{\eta} \quad \text{[Ecuación 11]}$$

En donde:

Si  $N_R < 2000$ , se trata de un flujo laminar

Si  $N_R > 4000$ , se trata de un flujo turbulento

<sup>5</sup> CRANE. División de Ingeniería. *Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías*. P. 1-6

### 2.3.5. Pérdidas de energía por fricción en tuberías

“Partiendo de la ecuación general de la energía, se tiene la pérdida de energía en el sistema, y una componente de dicha pérdida es la fricción en el fluido que circula. Dicha fricción está en función de las variables del sistema de tubería. Esta ecuación se le conoce como ecuación de Darcy.”<sup>6</sup>

$$h_{L,t} = f * \frac{L}{D} * \frac{v^2}{2g} \quad \text{[Ecuación 12]}$$

La ecuación 12 se utiliza para calcular la pérdida de energía ocasionada por la fricción en la tubería, debido al movimiento del fluido, tanto para flujos laminares como turbulentos. La diferencia principal entre estos dos tipos de flujo es el factor de fricción  $f$ , el cual se explica a continuación.

#### 2.3.5.1. Pérdida por fricción en flujo laminar

Para determinar la pérdida de energía en un flujo laminar, se tiene la ecuación de Hagen-Poiseuille<sup>7</sup>:

$$h_{L,t} = \frac{32\eta Lv}{\gamma D^2} \quad \text{[Ecuación 13]}$$

Teniendo esta ecuación junto con la ecuación de Darcy para la pérdida de energía debido a la fricción, se pueden igualar y despejar para el factor de fricción:

$$f * \frac{L}{D} * \frac{v^2}{2g} = \frac{32\eta Lv}{\gamma D^2}$$

<sup>6</sup> MOTT, Robert L. *Mecánica de fluidos*. P. 233.

<sup>7</sup> CRANE. División de Ingeniería. *Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías*. P. 2-13

Se realizan los despejes necesarios para encontrar el factor de fricción:

$$f = \frac{32\eta Lv}{\gamma D^2} * \frac{2g}{v^2} * \frac{D}{L} = \frac{64\eta}{Dv} * \frac{g}{\gamma}$$
$$f = \frac{64\eta}{Dv\rho}$$

Despejando la ecuación 11 para el número de Reynolds, se obtiene la ecuación que determina el factor para flujo laminar.

$$f = \frac{64}{N_R} \quad \text{[Ecuación 14]}$$

### 2.3.5.2. Pérdida por fricción en flujo turbulento

Para determinar las pérdidas en un flujo turbulento, se utiliza la ecuación de Darcy, en la cual el coeficiente de fricción depende de otras dos variables adimensionales, el número de Reynolds y la rugosidad relativa de la tubería. La rugosidad relativa es la relación del diámetro de la tubería con la rugosidad promedio de la pared, la cual puede encontrarse en la sección de apéndices para distintos tipos de material de tubería.

Para determinar el factor de fricción se puede utilizar el diagrama de Moody, el cual muestra resultados del factor de fricción para números de Reynolds de flujo laminar y turbulento en función del valor de la rugosidad relativa. El diagrama de Moody se encuentra en la sección de apéndices.

Aunque el diagrama de Moody es un método bastante exacto para determinar el factor de fricción, también puede determinarse con la siguiente ecuación, desarrollada por P. K. Swamee y A. K. Jain:

$$f = \frac{0.25}{\left[ \log \left( \frac{1}{3.7 \left( \frac{D}{\varepsilon} \right) + \frac{5.74}{N_R^{0.9}}} \right) \right]^2} \quad \text{[Ecuación 15]}$$

### 2.3.6. Pérdidas de energía por accesorios

Un sistema completo de distribución de agua está compuesto por una variedad de accesorios y acoplamiento, por lo que es necesario describir los más utilizados.

#### 2.3.6.1. Válvulas

El fin principal de las válvulas es detener o disminuir el flujo de un fluido. Para esto hay muchos tipos de válvulas según el propósito que quisiera dársele, ya que algunas funcionan cerrando o abriendo totalmente el paso, hay otras que regulan el paso y otras que dejan pasar el flujo en una sola dirección. Estas pueden ser de bola, de mariposa, de compuerta, válvulas de verificación y muchas más.<sup>8</sup>

#### 2.3.6.2. Acoplamientos

La función principal de estos es dirigir la trayectoria del flujo, o bien hacer que cambie el tamaño de la tubería. En estos se pueden mencionar los codos, “tees”, reductores, boquillas, orificios, entre otros.

---

<sup>8</sup> CRANE. División de Ingeniería. *Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías*. P. 2-2

Las pérdidas de energía son proporcionales a la carga de velocidad del fluido cuando pasan por alguno de los accesorios de la tubería. Dichas pérdidas se determinan en función de un coeficiente de resistencia K:

$$h_{L,a} = K \left( \frac{v^2}{2g} \right) \text{[Ecuación 16]}$$

El coeficiente de resistencia es diferente para cada accesorio o acoplamiento y se determina de la siguiente forma:

$$K = \left( \frac{L_e}{D} \right) f_T \text{[Ecuación 17]}$$

La longitud equivalente en diámetro de tubería ( $L_e/D$ ) puede encontrarse para diversos accesorios en la sección de apéndices, cuando se trata de flujo turbulento. Para obtener el factor de fricción es necesario determinar la rugosidad relativa ( $D/\epsilon$ ) y después usar el diagrama de Moody para determinar el factor de fricción en la zona de turbulencia completa.

### 2.3.7. Sistemas de tubería en serie

Para describir los sistemas de tubería en serie se parte de la ecuación general de la energía que se describió anteriormente.<sup>9</sup>

$$\frac{v_1^2}{2g} + z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + h_A - h_R - h_L = \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + \frac{p_2}{\gamma} \text{[Ecuación 18]}$$

El lado izquierdo de la ecuación denota las características del sistema en el punto uno, el cual generalmente se toma como la superficie de un tanque de

<sup>9</sup> MOTT, Robert L. *Mecánica de fluidos*. P. 321

donde proviene el agua. Los primeros tres elementos representan la energía del sistema en ese punto, en forma de carga de presión, carga de elevación y carga de velocidad. El lado derecho de la ecuación describe la energía del sistema en el punto donde se quiere transportar el fluido.

El término  $h_A$  es la energía que una bomba agrega al sistema, comúnmente se le denomina carga total sobre la bomba y es uno de los parámetros principales a tomar en cuenta a la hora de seleccionar la bomba para el sistema. El término  $h_L$  es el total de la energía que se pierde entre el punto uno y el punto dos, esto es, la energía perdida por fricción, acoplamientos y accesorios. En general esto se puede expresar de la forma:

$$h_L = h_1 + h_2 + h_3 + h_4 + \dots + h_n \quad \text{[Ecuación 19]}$$

### **2.3.8. Sistema de tuberías en paralelo**

Estos sistemas son aquellos en los que el fluido tiene más de una trayectoria por recorrer desde el punto de origen hasta el destino. El principio más importante de estos sistemas es el de continuidad, ya que la cantidad de fluido que sale del origen es la que se subdivide en las diferentes trayectorias del sistema. Matemáticamente se puede expresar así:

$$Q = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n \quad \text{[Ecuación 20]}$$

Los demás aspectos se toman de la misma forma que como se han descrito anteriormente.

### 2.3.9. Selección y aplicación de bombas

Las bombas son dispositivos que se utilizan para impulsar líquidos a través de sistemas de tuberías. Estas se encargan de generar el flujo volumétrico deseado al mismo tiempo que desarrollan la carga dinámica total  $h_A$  que se forma por los cambios de elevación, diferencias de cargas de presión y velocidad, y todas las pérdidas de energía antes mencionadas.<sup>10</sup> La carga total sobre la bomba  $h_A$  también denominada carga dinámica total se determina a través de la ecuación general de la energía:

$$h_A = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} + z_2 - z_1 + \frac{p_2 - p_1}{\gamma} + h_L \quad \text{[Ecuación 21]}$$

A partir de la determinación de la carga total de la bomba, se puede encontrar la potencia que una bomba transmite al fluido. La potencia en mecánica de fluidos se puede denominar como la rapidez con la que se transfiere la energía al sistema y se puede calcular de la siguiente manera:

$$P_A = h_A \gamma Q \quad \text{[Ecuación 22]}$$

La eficiencia en una bomba puede definirse como la relación de la potencia transmitida al fluido con la potencia que se suministra a la bomba. Generalmente, para las bombas comercialmente disponibles, el valor de la eficiencia se publica como parte de los datos de rendimiento. Para las bombas centrífugas, utilizadas para transferir o hacer circular líquidos, la eficiencia va de 50 % a 85 %.<sup>11</sup>

---

<sup>10</sup> McCABE, Warren L.; SMITH, Julian C.; HARRIOTT, Peter. *Operaciones unitarias en ingeniería química*. p. 197

<sup>11</sup> MOTT, Robert L. *Mecánica de fluidos*. p. 208

Si se conoce el valor de la eficiencia y la potencia que suministra la bomba al sistema, entonces se puede determinar la potencia de entrada a la bomba, la cual será la que impone la bomba. Matemáticamente se calcula de la siguiente forma:

$$P_I = P_A/e_M \quad \text{[Ecuación 23]}$$

Conociendo el valor de la potencia de entrada, se puede escoger la bomba que se requiere para hacer funcionar el sistema requerido.

### 2.3.9.1. Carga neta de succión positiva

Los fabricantes de bombas hacen pruebas con el diseño para la succión que se requiere con el fin de evitar la cavitación, dicho valor lo reportan como carga neta de succión positiva requerida a condiciones de operación y carga total del sistema. Cuando se diseña se debe considerar que la carga neta positiva disponible esté muy arriba de la requerida. Para calcular la carga neta de succión positiva disponible se recurre a la siguiente ecuación:

$$NPSH_A = h_{sp} \pm h_s - h_f - h_{vp}$$
$$NPSH_A = \frac{p_{sp}}{\gamma} \pm h_s - h_f - \frac{p_{vp}}{\gamma} \quad \text{[Ecuación 24]}$$

Es común que los fabricantes de bombas reporten resultados de la carga de succión positiva neta requerida  $NPSH_R$  para fijar un límite de condiciones para que trabaje la bomba, y es responsabilidad del diseñador cerciorarse que la carga de succión positiva neta disponible  $NPSH_A$  esté por encima de ese



valor. Generalmente se adopta un margen del 10 % para la  $NPSH_A$  sobre la  $NPSH_R$  y se expresa de la siguiente forma:<sup>12</sup>

$$NPSH_A > 1.10 NPSH_R \quad \text{[Ecuación 25]}$$

Tomando en cuenta todos estos aspectos es posible seleccionar la bomba que mejor se adecúe al sistema diseñado.

## **2.4. Calidad del agua**

Es complejo definir la calidad del agua, ya que hay muchos factores y variables que determinan la misma, pero en general puede decirse que se refiere a las condiciones en las que se encuentra el agua respecto a características físicas, químicas y biológicas, las cuales se comparan con una muestra de agua con unas directrices de calidad o estándares.<sup>13</sup>

La calidad del agua se asocia al uso final que se le da, así pues, la calidad del agua para consumo humano posee características diferentes que para el uso en la industria, por ejemplo. Este informe se enfocará en las aguas residuales de los equipos del Laboratorio de Operaciones Unitarias, USAC.

### **2.4.1. Aguas residuales**

Las aguas residuales son aquellas que han sido utilizadas en cualquier uso benéfico. El conocimiento de la naturaleza del agua residual es fundamental para el diseño, operación y control de los sistemas de aguas residuales, tales como recolección y tratamiento.

---

<sup>12</sup> MOTT, Robert L. *Mecánica de fluidos*. p. 413

<sup>13</sup> SIERRA RAMÍREZ, Carlos Alberto. *Calidad del agua: evaluación y diagnóstico*. P. 47.

## **2.4.2. Características de las aguas residuales**

Es importante que todo ingeniero que se especialice en ramas afines a lo ambiental entienda la naturaleza física, química y biológica del agua. Realmente el agua nunca se encontrará netamente pura en la naturaleza, ya que por diversos factores como el suelo y la atmósfera adquiere elementos o sustancias que alteran su composición original. El agua químicamente pura se obtiene únicamente en el laboratorio.

Es necesario medir ciertos parámetros de las aguas residuales para conocer el estado de pureza o contaminación en el que se encuentran. Estos parámetros de calidad del agua están clasificados en físicos, químicos y microbiológicos. Hay muchos parámetros que se pueden analizar, pero en este informe se le dará enfoque específicamente a los parámetros de interés de las aguas residuales del Laboratorio de Operaciones Unitarias, USAC.

## **2.4.3. Parámetros físicos**

Los parámetros físicos son aquellas sustancias que pueden no ser tóxicas, pero cambian el aspecto del agua y sus condiciones estéticas.

### **2.4.3.1. Color**

Es la capacidad que tiene el material disuelto y los coloides para obstaculizar el paso de luz. El color es producido por la descomposición natural de materia vegetal o por la disolución de ciertos minerales como hierro y manganeso. El color se expresa en unidades de color (UC), el cual se obtiene agregando 1 mg de cloroplatinato de potasio en 1 litro de agua destilada.

#### **2.4.3.2. Olor**

Es una propiedad organoléptica y de determinación subjetiva, ya que no existen instrumentos de observación ni unidades de medida, por lo que se reportan como presente o no presente. Generalmente se menciona en conjunto con el sabor, ya que están íntimamente ligadas. Específicamente la sustancia que produce olores es el sulfuro de hidrógeno.

#### **2.4.3.3. Temperatura**

Es uno de los parámetros físicos más importantes en el agua, pues por lo general influye en la densidad, viscosidad, velocidad de reacciones químicas, el retardo o aceleración de la actividad biológica, la absorción de oxígeno, la precipitación de compuestos, la formación de depósitos, desinfección y los procesos de mezcla, floculación, sedimentación y filtración. Múltiples factores, principalmente ambientales, pueden hacer que la temperatura del agua varíe continuamente.

#### **2.4.3.4. Sólidos**

Los sólidos son todos los residuos que se obtienen como materia remanente luego de evaporar y secar una muestra de agua a una temperatura dada. Estos pueden encontrarse suspendidos o disueltos, según el tipo de asociación con el agua. En primera instancia se encuentran los sólidos totales, estos corresponden al residuo remanente después de secar una muestra de agua. Estos equivalen a la suma del residuo disuelto y suspendido y se determinan entre 103°C-105°C.

Además del contenido en sólidos totales, conviene conocer qué parte de estos sólidos se encuentra disuelta y qué otra es sedimentable. Los sólidos sedimentables se determinan por decantación a partir de un volumen de muestra de un litro dejado en reposo en un recipiente cónico (cono Imhoff) durante una hora, expresándose el volumen sedimentado en el fondo del cono en ml/L. Estos dan una idea de la cantidad de lodos que se producirán en la decantación primaria.

Los sólidos disueltos se determinan gravimétricamente mediante filtración, a vacío o presión, con filtros de fibra de vidrio de borosilicato de diámetro de poro de 0,45  $\mu\text{m}$ , de un volumen conocido de agua bruta, denominándose sólidos en suspensión el residuo seco retenido en los mismos expresado como mg/L. Al residuo del filtrado secado a 105°C se le denomina sólidos disueltos y se expresa en mg/L.

#### **2.4.4. Parámetros químicos**

El agua, por ser considerada como solvente universal, tiene la posibilidad de que gran cantidad de elementos y compuestos químicos estén presentes en ella. Sin embargo, pocos son los elementos significativos en la calidad del agua.

Por conveniencia, en este informe solo se discuten las sustancias que a criterio del autor tienen relevancia en la calidad del agua para los equipos del Laboratorio de Operaciones Unitarias, USAC.

##### **2.4.4.1. pH**

El pH es una medida indirecta de la concentración de iones hidronio, indicando la naturaleza ácida o alcalina del agua. Este influye en algunos

fenómenos que ocurren en el agua, como la corrosión y las incrustaciones en las redes de distribución. Aunque podría decirse que no tiene efectos directos sobre la salud, sí puede influir en los procesos de tratamiento del agua, como la coagulación y la desinfección.

Cuando se tratan aguas ácidas, es común la adición de un álcali (por lo general, cal) para optimizar los procesos de coagulación. En algunos casos, se requerirá volver a ajustar el pH del agua tratada hasta un valor que no le confiera efectos corrosivos ni incrustantes.

#### **2.4.4.2. Alcalinidad**

La alcalinidad es una medida de neutralizar ácidos. Esta se considera como la presencia de sustancias básicas en el agua, y contribuyen, principalmente, a la alcalinidad de una solución acuosa los iones bicarbonato  $[\text{HCO}_3^-]$ , carbonato  $[\text{CO}_3^{2-}]$ , y oxidrilo  $[\text{OH}^-]$ , pero también las sales del fósforo, ácido silícico u otros ácidos de carácter débil. Su presencia en el agua puede producir  $\text{CO}_2$  en el vapor de calderas que es muy corrosivo y también puede producir espumas, arrastre de sólidos con el vapor de calderas, etc. Se corrige por descarbonatación con cal, tratamiento ácido o desmineralización por intercambio iónico.<sup>14</sup>

La alcalinidad es importante en la calidad del agua por diferentes razones:

- En altas concentraciones le comunica un sabor desagradable al agua.
- En presencia de iones de Ca o Mg (dureza) forma precipitados que ocasionan problemas de taponamiento y obstaculizan el flujo en las tuberías.

---

<sup>14</sup>SIERRA RAMÍREZ, Carlos Alberto. *Calidad del agua: evaluación y diagnóstico*. P. 61.

- Tal vez la más importante razón es que la alcalinidad controla el proceso de coagulación en el tratamiento de agua potable.

#### **2.4.4.3. Dureza**

Correspondiente a la suma de los cationes polivalentes expresados como la cantidad equivalente de carbonato de calcio, de los cuales los más comunes son los de calcio y los de magnesio. La dureza está relacionada con el pH y la alcalinidad; depende de ambos.

Un agua dura puede formar depósitos en las tuberías y hasta obstruirlas completamente. Esta característica física es nociva, particularmente en aguas de alimentación de calderas, en las cuales la alta temperatura favorece la formación de sedimentos. La remoción de la dureza en el tratamiento se lleva a cabo mediante la precipitación con cal o mediante el proceso combinado cal-carbonato, conocido como ablandamiento cal-soda.

En términos generales, puede considerarse que un agua es blanda cuando tiene dureza menor de 100 mg/L; medianamente dura, cuando tiene de 100 a 200 mg/L, y dura, cuando tiene de 200 a 300 mg/L (en todos los casos, como  $\text{CaCO}_3$ ).<sup>15</sup>

---

<sup>15</sup>SIERRA RAMÍREZ, Carlos Alberto. *Calidad del agua: evaluación y diagnóstico*. P. 64.

#### **2.4.4.4. Demanda química de oxígeno (DQO)**

Equivale a la cantidad de oxígeno consumido por los cuerpos reductores presentes en un agua sin la intervención de los organismos vivos. La eliminación de la materia orgánica se lleva a cabo mediante la coagulación-floculación, la sedimentación y la filtración. Sin embargo, cuando la fuente de agua cruda tiene una carga orgánica y bacteriana muy grande, será necesaria una precloración que debe constituirse en un proceso adecuadamente controlado.

Lo deseable es que las fuentes de agua cruda no presenten una carga orgánica elevada. Por la naturaleza de estos parámetros, las normas de calidad de agua establecen que los causantes de la contaminación orgánica deben estar ausentes en las aguas para consumo humano.

#### **2.4.5. Tratamiento de aguas**

En las diferentes ramas de la ingeniería se le conoce como tratamiento de aguas al conjunto de operaciones unitarias de tipo físico, químico, fisicoquímico y biológico, con el fin de reducir las características del agua no deseables para su utilización. Como se puede suponer, hay muchos tipos de tratamiento enfocados en los diferentes usos que se le puede dar al agua. Para fines de este informe, se enfocará en las etapas necesarias únicamente para las aguas residuales del Laboratorio de Operaciones Unitarias, USAC.

##### **2.4.5.1. Coagulación**

La coagulación es un proceso de desestabilización química de las partículas coloidales que se producen al neutralizar las fuerzas que los

mantienen separados, por medio de la adición de los coagulantes químicos y la aplicación de la energía de mezclado.<sup>16</sup> El objetivo principal de la coagulación es desestabilizar las partículas coloidales que se encuentran en suspensión para favorecer su aglomeración, en consecuencia, se eliminan las materias en suspensión estables.

La coagulación es el tratamiento más eficaz pero también es el que representa un gasto elevado cuando no está bien realizado. Es igualmente el método universal porque elimina una gran cantidad de sustancias de diversas naturalezas y de peso de materia que son eliminados al menor costo, en comparación con otros métodos.

#### **2.4.5.1.1. Coagulantes**

Los coagulantes son productos químicos que, al adicionarlos al agua, son capaces de producir una reacción química con los componentes químicos del agua, especialmente con la alcalinidad de esta, para formar un precipitado voluminoso, muy absorbente, constituido generalmente por el hidróxido metálico del coagulante que se está utilizando. Los principales coagulantes utilizados para desestabilizar las partículas y producir el *floc* son:<sup>17</sup>

- Sulfato de aluminio
- Aluminato de sodio
- Cloruro de aluminio
- Cloruro férrico
- Sulfato férrico
- Poli electrolitos (como ayudantes de floculación)

---

<sup>16</sup>CÁRDENAS, Yolanda Andía. *Tratamiento de agua: coagulación y floculación*. P. 9.

<sup>17</sup>CÁRDENAS, op. cit., p. 16.



Los más utilizados son las sales de aluminio y hierro. Cuando se adiciona estas sales al agua se produce una serie de reacciones muy complejas donde los productos de hidrólisis son más eficaces que los iones mismos. Estas sales reaccionan con la alcalinidad del agua y producen los hidróxidos de aluminio o hierro que son insolubles y forman los precipitados.

#### **2.4.5.1.2. Influencia de la mezcla**

El grado de agitación que se da a la masa de agua durante la adición del coagulante determina si la coagulación es completa. Turbulencias desiguales hacen que cierta porción de agua tenga mayor concentración de coagulantes y la otra parte tenga poco o casi nada. La agitación debe ser uniforme e intensa en toda la masa de agua, para asegurar que haya producido la reacción química de neutralización de cargas correspondiente.

En el transcurso de la coagulación y floculación se procede a la mezcla de productos químicos en dos etapas. En la primera etapa, la mezcla es enérgica y de corta duración (60 seg. máx.), llamado mezcla rápida. Esta mezcla tiene por objeto dispersar la totalidad del coagulante dentro del volumen del agua a tratar. Y en la segunda etapa la mezcla es lenta y tiene por objeto desarrollar los microfloculos.

#### **2.4.5.2. Floculación**

La floculación es el proceso que sigue a la coagulación, que consiste en la agitación de la masa coagulada que sirve para permitir el crecimiento y aglomeración de los floculos recién formados, con la finalidad de aumentar el tamaño y peso necesarios para sedimentar con facilidad. Estos floculos inicialmente pequeños crean, al juntarse, aglomerados mayores que son

capaces de sedimentar.<sup>18</sup> La segunda etapa de la mezcla, que corresponde a una mezcla lenta, tiene por objeto permitir los contactos entre los flóculos, la turbiedad y el color. La mezcla debe ser lo suficiente para crear diferencias de velocidad del agua dentro de la unidad, pero de manera que no sea turbulento, ya que los flóculos corren el riesgo de romperse, aún si el tiempo es no más del tiempo óptimo de floculación.

#### **2.4.5.2.1. Floculantes**

Los floculantes son polímeros o polielectrolitos con pesos moleculares muy elevados. Moléculas orgánicas solubles en agua formadas por bloques denominados monómeros, repetidos en cadenas largas. Estos floculantes pueden ser de naturaleza:

- Mineral
- Orgánico natural
- Orgánico de síntesis

Estos últimos son los más utilizados y son macromoléculas de una gran cadena, obtenidos por asociación de monómeros sintéticos con masa molecular elevada de 10<sup>6</sup> a 10<sup>7</sup> g/mol. Estos se clasifican de acuerdo a la ionicidad de los polímeros:

- Aniónicos (generalmente copolímeros de la acrilamida y del ácido acrílico).
- Neutros o no iónicos (poliacrilamidas).
- Catiónicos (copolímero de acrilamidas + un monómero catiónico).

---

<sup>18</sup>CÁRDENAS, Yolanda Andía. *Tratamiento de agua: coagulación y floculación*. p. 30.

### **2.4.5.3. Filtración**

Los sistemas de filtración tratan el agua pasándola a través de lechos de materiales granulares que retiran y retienen los contaminantes. Los sistemas de filtrado convencionales, directos, lentos de arena y de tierra diatomácea hacen todos un buen trabajo, al eliminar la mayoría de protozoos, bacterias y virus (si se usa la coagulación). Usualmente, los filtros de bolsa y cartucho no eliminan los virus y muy pocas bacterias.

Los filtros de bolsa y cartucho son sistemas sencillos y fáciles de usar que utilizan una bolsa tejida o un cartucho de filamento enrollado o un filtro fruncido para filtrar físicamente algunos microbios y sedimento de agua fuente.



### 3. DISEÑO METODOLÓGICO

#### 3.1. Variables

Para el desarrollo del sistema de recirculación y tratamiento del agua residual proveniente de los equipos, es necesaria la definición de las variables y parámetros de estudio utilizados. El proyecto comprende las siguientes etapas de caracterización:

- Recopilación de los datos del flujo volumétrico de los efluentes de los equipos del laboratorio.
- Recopilación de datos de las propiedades físicas y químicas:
  - Temperatura
  - Sólidos en suspensión
  - Sólidos disueltos
  - Potencial de hidrógeno (pH)
  - Demanda química de oxígeno (DQO)
  - Alcalinidad
  - Dureza
- Diseño del sistema de recirculación:
  - Diámetro de tubería
  - Longitud de tubería recta
  - Potencia de la bomba
  - Dimensiones del tanque de almacenamiento
  - Material de tuberías y el tanque

- Diseño del sistema de tratamiento
  - Concentración de coagulante
  - Tiempo de agitación rápida
  - Tiempo de agitación lenta
  - Tiempo de sedimentación
  - Tipo de filtro

A continuación se muestra el análisis de las variables y parámetros presentes:

Tabla I. **Variables presentes en la caracterización de las aguas residuales finales**

Nombre	Unidad	Factor potencial de diseño		Característica	Descripción
		Constante	Variable		
Flujo volumétrico de los efluentes	Litros/hora		X	No Controlable	Flujo de las aguas residuales finales
Temperatura	°C		X	No controlable	Temperatura de las aguas residuales
Sólidos en suspensión	mg/L		X	No controlable	Sólidos en suspensión de las aguas residuales
Sólidos disueltos	mg/L		X	No controlable	Sólidos disueltos las aguas residuales
pH	Adimensional		X	No Controlable	Potencial de hidrógeno de las aguas residuales
DQO	mg/L		X	No controlable	Cantidad de materia orgánica contenida en las aguas residuales

Fuente: elaboración propia.

Tabla II. **Variables presentes en el diseño del sistema de recirculación**

		Factor potencial de diseño			
Nombre	Unidad	Constante	Variable	Característica	Descripción
Presión	Pa		X	No Controlable	Presión que soportará la tubería del sistema
Velocidad	m/s		X	No controlable	Velocidad lineal del flujo volumétrico
Altura	M	X		Controlable	Altura a colocar el tanque de almacenamiento
Área transversal de tubería	m <sup>2</sup>	X		Controlable	Área transversal de la tubería del sistema
Diámetro de tubería	pulg	X		Controlable	Diámetro de la tubería del sistema
Longitud de tubería	M	X		Controlable	Longitud de tubería recta del sistema
Cargas totales	N*m/N		X	No controlable	Cargas totales que soportará la bomba
Potencia	W	X		No Controlable	Potencia disponible de la bomba

Fuente: elaboración propia.



Tabla III. **Variables presentes en el diseño del sistema de tratamiento**

Nombre	Unidad	Factor potencial de diseño		Característica	Descripción
		Constante	Variable		
Concentración	mg/L		X	Controlable	Cantidad del coagulante que se agrega
Agitación rápida	Min		X	Controlable	Tiempo para mezclar el coagulante
Agitación lenta	Min		x	Controlable	Tiempo para formación de <i>flocs</i>
Sedimentación	Min		x	Controlable	Tiempo para sedimentar sólidos formados
Tamaño del tanque	m <sup>3</sup>	x		No controlable	Capacidad de almacenamiento del tanque

Fuente: elaboración propia.

### 3.2. Delimitación del campo de estudio

#### 3.2.1. Campo de estudio

Operaciones unitarias de transferencia de momento, desechos líquidos, diseño de equipo.

### **3.2.2. Etapas de investigación**

- Listado y caracterización de cada equipo que utiliza agua en el Laboratorio de Operaciones Unitarias, USAC.
  - Determinación del flujo volumétrico de aguas residuales efluentes del equipo del Laboratorio de Operaciones Unitarias, USAC.
  
- Recopilación de datos de las propiedades físicas y químicas:
  - Temperatura
  - Sólidos en suspensión
  - Sólidos disueltos
  - Potencial de hidrógeno (pH)
  - Demanda química de oxígeno (DQO)
  - Alcalinidad
  - Dureza
  
- Propuesta de un plan de tratamiento para las aguas residuales
  - Prueba de jarras
  - Tipo de filtro
  
- Diseño del sistema de recirculación
  - Diámetro de tubería
  - Longitud de tubería recta
  - Potencia de la bomba
  - Dimensiones del tanque de almacenamiento
  - Material de tubería y tanque
  
- Diseño del sistema de tratamiento
  - Dimensiones del tanque de recepción

- Agitador
- Concentración de coagulante
- Tiempo de agitación rápida
- Tiempo de agitación lenta
- Tiempo de sedimentación
- Tipo de filtro

### **3.3. Recursos humanos disponibles**

Investigador: Pablo César Méndez Rodas

Asesor: ingeniero químico Jorge Mario Estrada Asturias. Colegiado No. 685

Coasesor: ingeniero químico Jorge Emilio Godínez Lemus. Colegiado No. 874

### **3.4. Recursos materiales disponibles**

A continuación se detalla el equipo necesario para la determinación de los efluentes finales, la planificación del diseño del sistema de recirculación de agua y el sistema de tratamiento de agua:

#### **3.4.1. Equipo**

- Bomba
- Balanza
- Cubeta
- Cronómetro
- Flexómetro
- Planchas de agitación
- Balanza analítica

### **3.4.2. Cristalería**

- *Beackers*
- Pipeta serológica
- Balón aforado
- Espátula
- Probeta
- Embudo

### **3.4.3. Reactivos**

- Sulfato de aluminio

Debido a que el análisis de las muestras de agua se realizó en el Laboratorio de Química y Microbiología Sanitaria “Dra. Alba Tabarini Molina”, solo se necesitaron los recipientes para la toma de las muestras, los cuales también fueron del laboratorio.

## **3.5. Técnica cualitativa o cuantitativa**

El diseño del sistema de recirculación, almacenamiento y tratamiento de los efluentes de los equipos del Laboratorio de Operaciones Unitarias se realizará utilizando técnicas combinadas.

Los datos cuantitativos son la estimación de flujos volumétricos por parte de los equipos [litro/hora], la temperatura [°C], sólidos en suspensión y disueltos [mg/L], pH, y DQO [mg/L]. Para el diseño del sistema de recirculación se tienen datos cuantitativos como el diámetro de la tubería [pulg], la longitud de tubería recta [m], la altura a la que estará el tanque de almacenamiento [m] y la

potencia de la bomba [W]. El diseño en sí es netamente cualitativo, así como la propuesta del plan de tratamiento de las aguas residuales.

### 3.6. Recolección y ordenamiento de la información

Para la recolección y ordenamiento de la información se procedió a medir los flujos volumétricos que salen de cada equipo. En estos mismos flujos se tomó la muestra para su posterior análisis físico y químico, ya que es necesario que el agua que vaya a recircularse esté libre de sustancias que puedan afectar el equipo en su posterior uso. Se midió la longitud del largo y ancho del laboratorio, así como el espacio que ocupa cada equipo dentro del mismo.

Tabla IV. **Toma de datos de intercambiador de calor de tubos concéntricos**

Corrida	Masa (lb)	Tiempo (seg)
1		
2		
3		
4		
5		

Fuente: elaboración propia.

Tabla V. **Toma de datos de intercambiador de calor de concha y tubos**

Corrida	Masa (lb)	Tiempo (seg)
1		
2		
3		
4		
5		

Fuente: elaboración propia.

Tabla VI. **Toma de datos de torre absorción**

Corrida	Masa (lb)	Tiempo (seg)
1		
2		
3		
4		
5		

Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. **Toma de datos de torre de destilación**

Corrida	Masa (lb)	Tiempo (seg)
1		
2		
3		
4		
5		

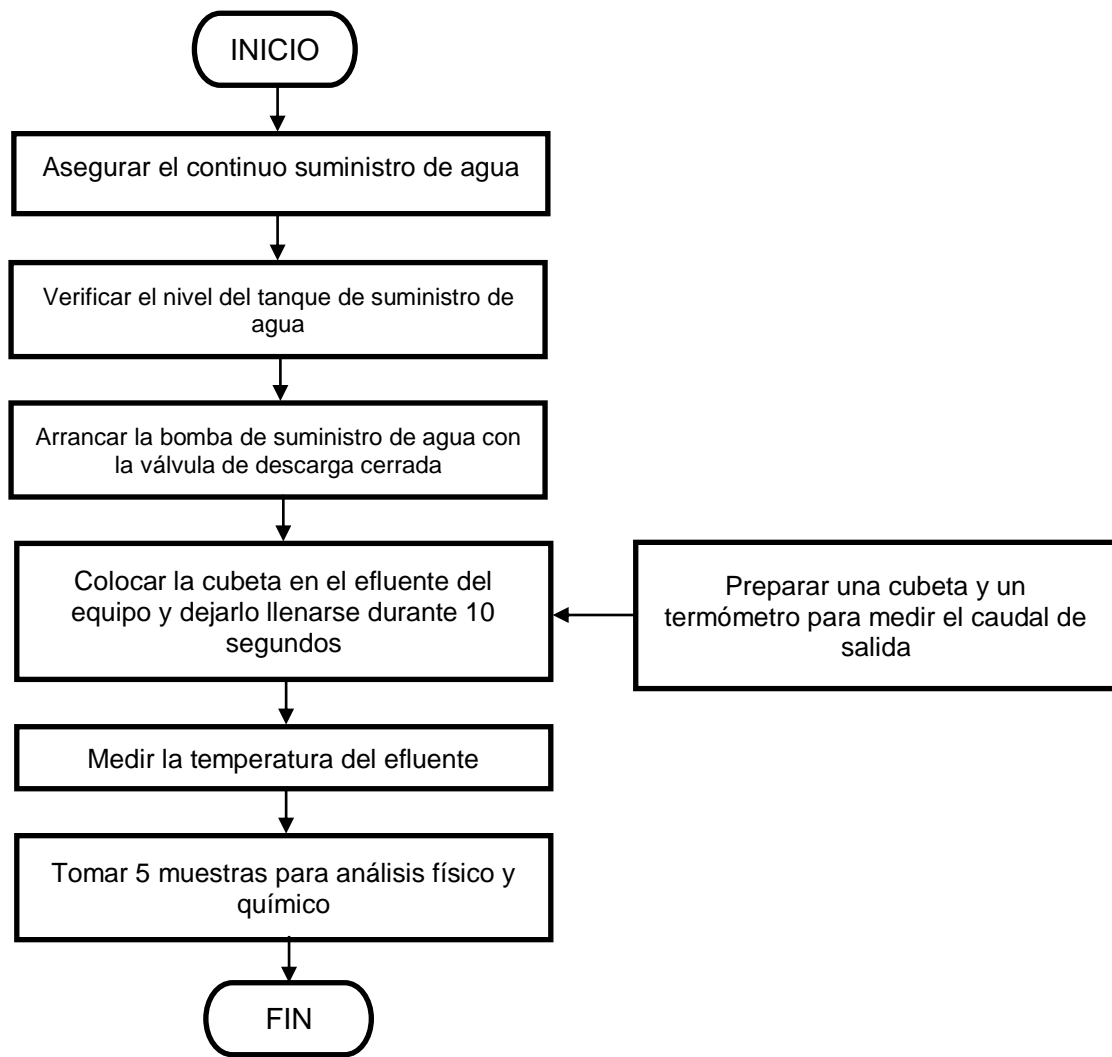
Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. **Toma de datos de equipos con circuito cerrado**

Equipo	Ancho (m)	Largo (m)	Altura (m)
Torre de humidificación			
Medidores de flujo			
Bomba centrífuga			
Tubería y accesorios			

Fuente: elaboración propia.

Figura 10. Diagrama de procedimiento experimental para determinación de flujo volumétrico



Fuente: elaboración propia.



Las muestras fueron analizadas en el Laboratorio de Química y Microbiología Sanitaria “Dra. Alba Tabarini Molina”. Dicho laboratorio utilizó una metodología validada para determinar los parámetros solicitados. En la sección de anexos se presentan los diagramas de flujo donde se detallan las metodologías tanto del laboratorio como de la determinación del flujo volumétrico.

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

Para el diseño del sistema de recirculación y almacenamiento de los efluentes de los equipos del Laboratorio de Operaciones Unitarias, se procedió a determinar el volumen total de agua que se utiliza por cada equipo en una práctica normal de laboratorio a partir del flujo volumétrico de cada uno. Con este volumen y las dimensiones del laboratorio se determinó la capacidad del tanque de almacenamiento, tamaño de tubería y potencia de la bomba. Los resultados de los parámetros evaluados de las muestras tomadas de cada equipo se presentan en informes proporcionados por el laboratorio que realizó los análisis. Estos resultados se utilizaron para evaluar la necesidad del plan de tratamiento de agua previo a recircularse.

### **3.8. Análisis estadístico**

#### **3.8.1. Determinación del número óptimo de mediciones**

El número de repeticiones en las mediciones experimentales se realiza con el objetivo de disminuir los errores aleatorios y empíricos. Esto permite que las mediciones sean más precisas. Para determinar el número de corridas se tomará un valor de confiabilidad del 90 %, con una probabilidad de fracaso del

10 %, que implica un valor de  $\alpha=0,1$ . El valor  $Z_{\alpha/2} = 1,3722$  se obtiene de la distribución normal. El error estimado para las mediciones es de 0,20.<sup>19</sup>

$$n = \frac{Z_{\alpha/2}^2 * p * q}{e^2} \quad \text{[Ecuación 26]}$$

Donde:

$n$  = Número de corridas experimentales

$Z_{\alpha/2}$  = Nivel de confianza deseado en las mediciones

$p$  = Probabilidad de éxito

$q$  = Probabilidad de fracaso

$e$  = Error experimental estimado

Sustituyendo los valores en la ecuación:

$$n = \frac{(1,3722)^2 * 0,90 * 0,1}{(0,20)^2}$$

$$n = 4,2366 \approx 5$$

El número de repeticiones es de  $n = 4,2366$  indicando que se deben realizar 5 corridas, para poder cumplir con una confiabilidad de 90 % y estimando un error del 0,20, lo que conlleva a que los resultados del experimento sean precisos. Por lo tanto, para este trabajo de investigación se realizará la toma de 5 muestras para la determinación del flujo volumétrico y 5 muestras para el análisis físico y químico de los efluentes.

---

<sup>19</sup> WARPOLE, Ronald. *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*. P. 186.

### 3.8.2. Medidas de tendencia central

#### 3.8.2.1. Media aritmética

La media aritmética de un conjunto de valores  $\{x_1, x_2, \dots, x_i\}$  de una variable  $x$  viene determinada por la suma de dichos valores, dividida por el número de la muestra ( $n$ ), representada matemáticamente de la siguiente forma:<sup>20</sup>

$$x_p = \frac{\sum x_i}{n} \quad \text{[Ecuación 27]}$$

### 3.8.3. Medidas de dispersión

Describen la cantidad de dispersión o variabilidad que se encuentra entre los datos. El agrupamiento entre los datos indica una dispersión baja y viceversa.

#### 3.8.3.1. Varianza

Es la media de las desviaciones ( $x$ ) al cuadrado respecto a la media aritmética ( $x_p$ ) de una distribución estadística.<sup>21</sup>

$$S^2 = \frac{\sum (x - x_p)^2}{n - 1} \quad \text{[Ecuación 28]}$$

Donde  $n$  es el tamaño de la muestra.

---

<sup>20</sup>JOHNSON, Robert. *Estadística elemental*. P. 64

<sup>21</sup>JOHNSON, op. cit., p.66.

### 3.8.3.2. Desviación estándar

La desviación estándar es la raíz cuadrada positiva de la varianza. Es decir, la raíz cuadrada de la media de los cuadrados de las puntuaciones de desviación.<sup>22</sup>

$$S = \sqrt{S^2} \quad \text{[Ecuación 29]}$$

## 3.9. Plan de análisis de los resultados

### 3.9.1. Métodos y modelos de los datos según el tipo de variables

Los datos obtenidos no están sujetos a modelaciones matemáticas debido a que no es un estudio de tipo experimental. Los datos del análisis de agua por obtener serán interpretados de forma cualitativa para proponer un plan de tratamiento de aguas residuales.

Los datos que se obtendrán del flujo volumétrico total se analizarán de forma cualitativa y cuantitativa, para determinar el diámetro de la tubería que se utilizará en el sistema de recirculación, así como la longitud de la tubería, la potencia disponible de la bomba, la altura a la que se encontrará el tanque y los accesorios necesarios para el sistema.

Habiendo obtenido todos los datos mencionados anteriormente, se proseguirá a diseñar el sistema completo de recirculación, tratamiento y almacenamiento de los efluentes de aguas residuales totales obtenidos en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Escuela de Ingeniería Química.

---

<sup>22</sup>JOHNSON, Robert. *Estadística elemental*. P. 67.

### **3.9.2. Programas a utilizar para análisis de datos**

Para el desarrollo de la investigación se requieren, además del sistema operativo Windows 8, los siguientes programas:

- Microsoft Word: permitirá crear y editar documentos profesionales.
- Microsoft Excel: permitirá procesar, graficar y analizar la información obtenida.
- AutoCAD 2014: permitirá crear planos profesionales para el diseño del sistema de recirculación.



## 4. RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados obtenidos para el diseño del sistema de recirculación de agua.

Tabla IX. **Volumen promedio utilizado por práctica en el Laboratorio de Ingeniería Química 1**

Equipo	Volumen total [m <sup>3</sup> ]
Medidores de flujo	0,100
Bomba centrífuga	0,100
Caídas de presión	0,100
Intercambiador de calor tubos concéntricos	2,372
Intercambiador de calor de concha y tubos	2,799

Fuente: elaboración propia, con base en el anexo 3.

Tabla X. **Volumen promedio utilizado por práctica en el Laboratorio de Ingeniería Química 2**

Equipo	Volumen total [m <sup>3</sup> ]
Torre de humidificación	1,418
Torre de absorción	0,508
Torre de destilación	0,738

Fuente: elaboración propia, con base en el anexo 3.

Tabla XI. **Volumen total por día para ser recirculado**

Concepto	Volumen total [m <sup>3</sup> ]
Laboratorio de Ingeniería Química 1	1,718
Laboratorio de Ingeniería Química 2	1,418
Total	3,136

Fuente: elaboración propia, con base en el anexo 3.

Tabla XII. **Especificaciones del sistema de distribución de agua**

<b>Tubería</b>			
Concepto	Diámetro	Largo [m]	Material
Succión	1 ½ “	0,3	PVC
Descarga	1 ¼ “	0,3	PVC
Descarga	1”	13,7	PVC
Descarga	¾ “	14,5	PVC
<b>Accesorios</b>			
Concepto	Diámetro	Cantidad	Tipo
Codo	1”	5	Estándar a 90°
Codo	¾”	2	Estándar a 90°
Tee	1 ½“	1	Estándar
Tee	1 ¼”	1	Estándar
Tee	1”	1	Estándar
Válvula	1 ½”	1	Compuerta
Válvula	1 ¼”	1	Compuerta
Válvula	1”	2	Compuerta
Válvula	1”	1	Verificación

Fuente: elaboración propia, con base en el anexo 3.



Tabla XIII. **Especificaciones del sistema de recepción de agua**

<b>Tubería</b>			
<b>Concepto</b>	<b>Diámetro</b>	<b>Largo [m]</b>	<b>Material</b>
Succión	1 ¼ "	1,3	PVC
Descarga	1 "	1,1	PVC
<b>Accesorios</b>			
<b>Concepto</b>	<b>Diámetro</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Tipo</b>
Codo	1 ¼ "	1	Estándar a 90°
Codo	1 "	2	Estándar a 90°
Tee	1 ¼ "	1	Estándar
Válvula	1 ¼ "	1	Compuerta
Válvula	1 "	1	Compuerta

Fuente: elaboración propia, con base en el anexo 3.

Tabla XIV. **Dimensiones de los tanques del sistema de recirculación**

<b>Concepto</b>	<b>Capacidad [m<sup>3</sup>]</b>	<b>Largo [m]</b>	<b>Diámetro [m]</b>
Tanque receptor	3,20	2,06	1,49
Tanque de almacenamiento	3,20	2,06	1,49

Fuente: elaboración propia, con base en el anexo 3.

Tabla XV. **Especificaciones de las bombas para el sistema de recirculación de agua**

<b>Sistema de distribución de agua</b>	
<b>Tipo</b>	<b>Centrífuga vertical</b>
Capacidad	50 gal/min
Potencia que transmite al fluido	0,596 hp
Potencia de entrada	0,918 hp
Potencia de salida	1,000 hp
NPSH <sub>R</sub>	<9,335 m
<b>Sistema de recepción de agua</b>	
<b>Tipo</b>	<b>Centrífuga vertical</b>
Capacidad	20 gal/min
Potencia que transmite al fluido	0,038 hp
Potencia de entrada	0,059 hp
Potencia de salida	0,100 hp
NPSH <sub>R</sub>	<7,857 m

Fuente: elaboración propia, con base en el anexo 3.

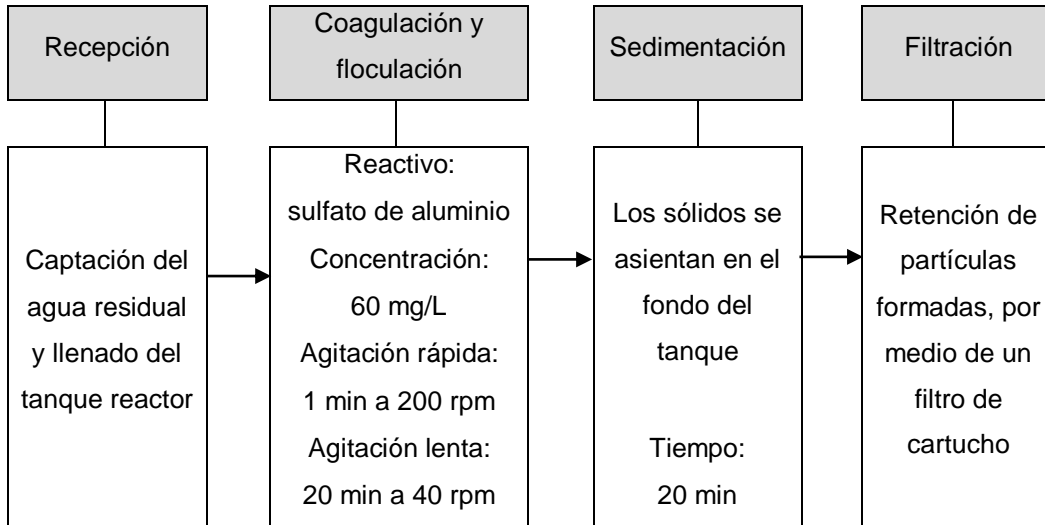
Tabla XVI. **Resultados de los análisis físicos y químicos de las muestras de agua tomadas por cada equipo**

Parámetro	Unidades	Medidores de flujo	Bomba centrífuga	Caídas de presión	Intercambiador de calor de tubos concéntricos	Intercambiador de calor de concha y tubos	LMP
<b>Características físicas</b>							
Color	Unidades de PtCo	19,00	13,00	30,00	18,00	18,00	35,00
Sólidos suspendidos	mg/L	38,00	01,00	28,00	00,04	12,00	200,0
Sólidos disueltos totales	mg/L	233,0	255,0	232,0	234,0	230,0	1000,0
Temperatura	°C	26,00	26,00	26,00	26,00	26,00	<40
<b>Determinaciones químicas</b>							
DQO	mg/L	<5	<5	<5	<5	<5	200,0
pH	-	07,83	07,60	08,15	07,65	07,58	6,5-8,5
Alcalinidad	mg/L	182,00	160,0	162,00	166,00	164,00	300,0
Dureza	mg/L	164,00	162,0	164,00	174,00	164,00	500,0

\*LMP: Límite máximo permisible

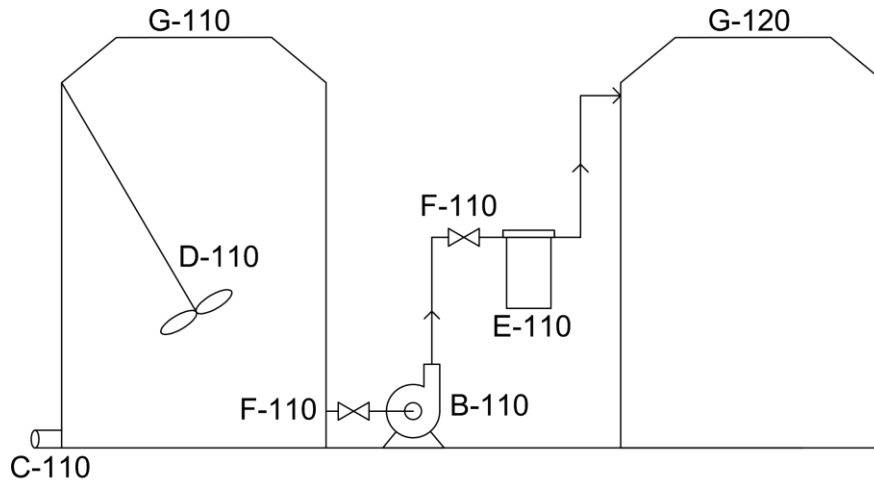
Fuente: elaboración propia, con base en el anexo 7, norma COGUANOR NTG 29001 y Acuerdo Gubernativo 236-2006.

Figura 11. **Plan de tratamiento**



Fuente: elaboración propia.

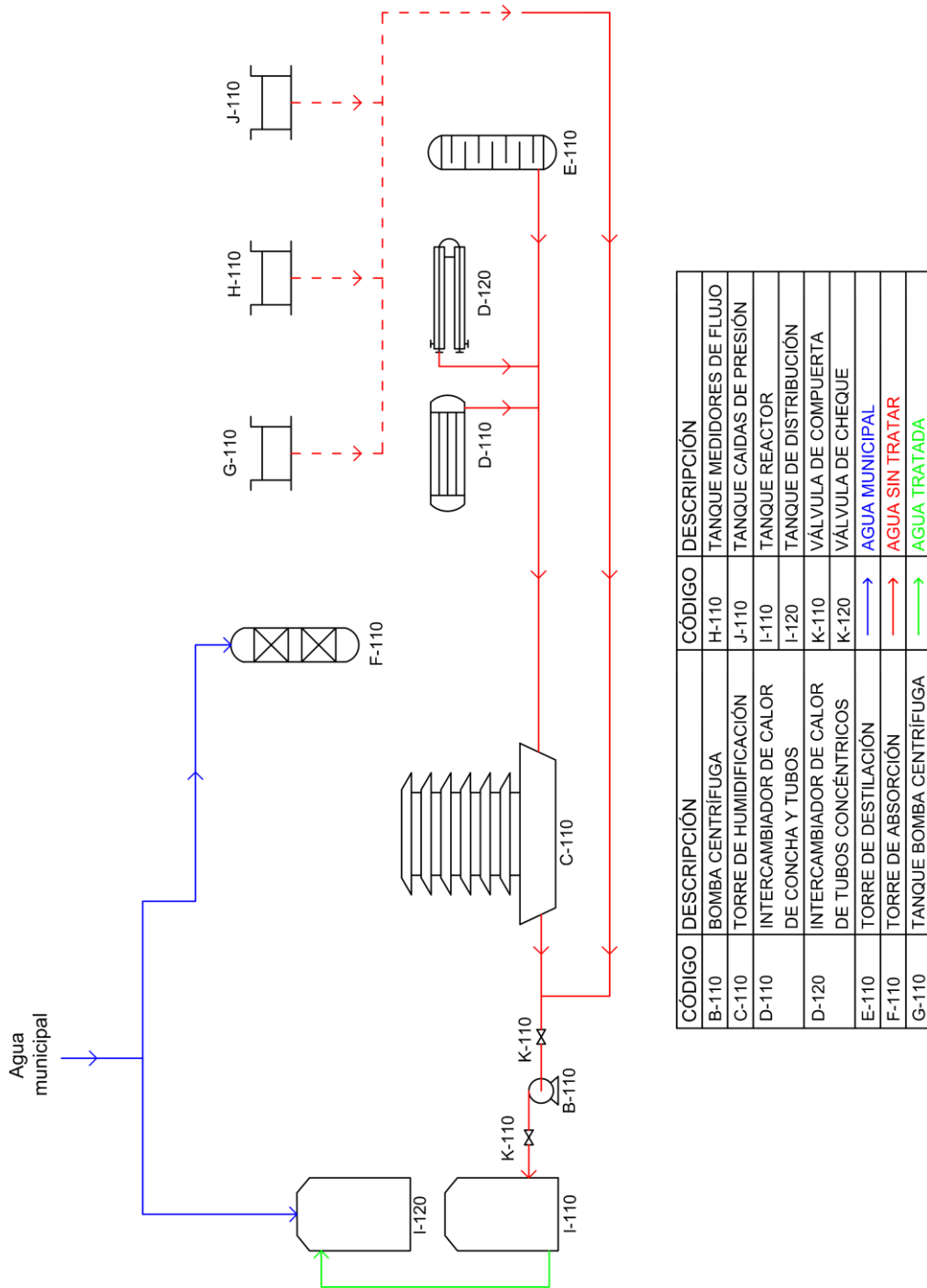
Figura 12. Esquema del plan de tratamiento



CÓDIGO	DESCRIPCIÓN
B-110	BOMBA CENTRÍFUGA
C-110	DRENAJE DE LODOS
D-110	MEZCLADOR
E-110	FILTRO DE CARTUCHO
F-110	VÁLVULA DE COMPUERTA
G-110	TANQUE REACTOR
F-110	TANQUE DE ALMACENAMIENTO
—→	AGUA PARA TRATAMIENTO

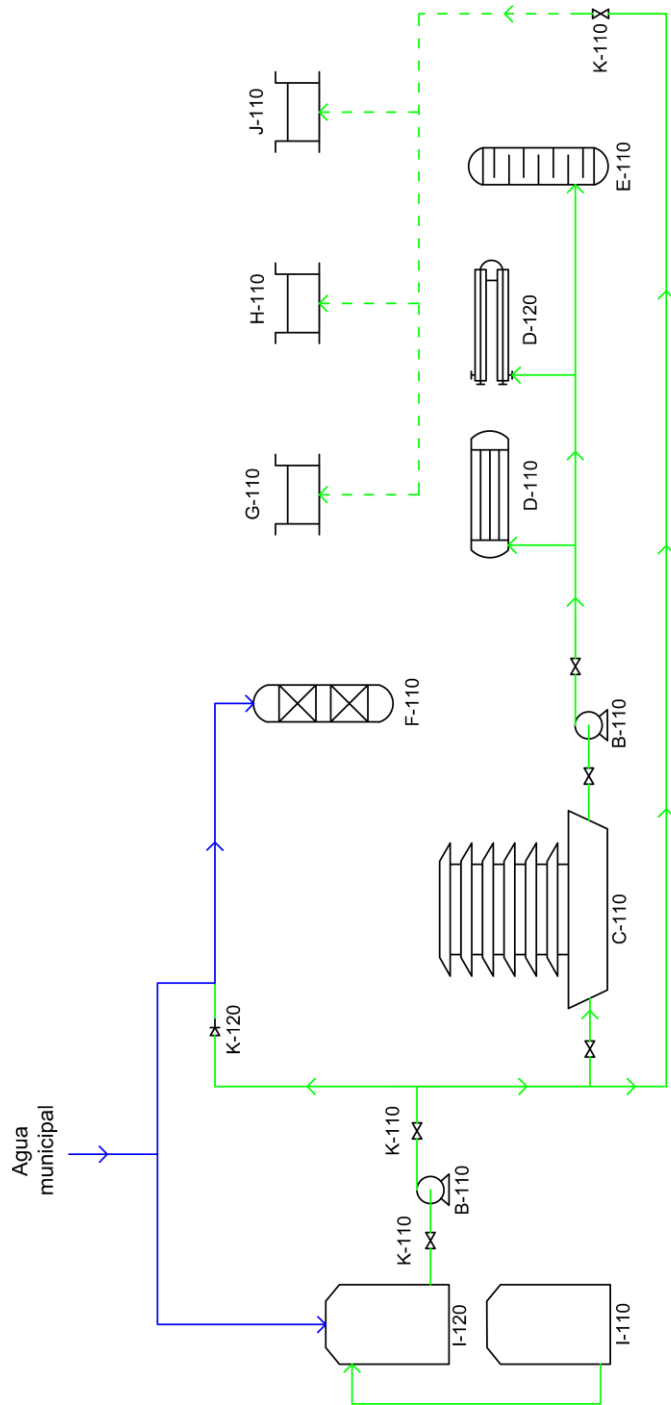
Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

Figura 13. Sistema de recepción de agua



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

Figura 14. Sistema de distribución de agua



CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	CÓDIGO	DESCRIPCIÓN
B-110	BOMBA CENTRÍFUGA	H-110	TANQUE MEDIDORES DE FLUJO
C-110	TORRE DE HUMIDIFICACIÓN	J-110	TANQUE CAIDAS DE PRESIÓN
D-110	INTERCAMBIADOR DE CALOR DE CONCHA Y TUBOS	I-110	TANQUE REACTOR
D-120	INTERCAMBIADOR DE CALOR DE TUBOS CONCÉNTRICOS	I-120	TANQUE DE DISTRIBUCIÓN
E-110	TORRE DE DESTILACIÓN	K-110	VÁLVULA DE COMPUERTA
F-110	TORRE DE ABSORCIÓN	K-120	VÁLVULA DE CHEQUE
G-110	TANQUE BOMBA CENTRÍFUGA		AGUA MUNICIPAL
			AGUA SIN TRATAR
			AGUA TRATADA

Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD





## 5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Realizar un sistema de recirculación de agua en el Laboratorio de Operaciones Unitarias es importante, debido a que, además de disminuir el volumen total de agua consumida, garantiza también tener un suministro continuo de agua para reducir el riesgo de un paro de actividades en el laboratorio por falta de la misma.

En las tablas IX y X se encuentran los resultados de la medición del volumen total de agua que aproximadamente se utiliza en cada equipo por cada práctica, tanto del Laboratorio de Ingeniería Química 1 (LIQ1) como del Laboratorio de Ingeniería Química 2 (LIQ2). Esto es importante conocerlo debido a que provee una pauta para estimar un flujo de recirculación. Para poder medir este volumen se utilizaron dos métodos, dependiendo del tipo de equipo con que se trabajaba. Estos dos tipos de equipo pueden ser de circuito cerrado o de flujo continuo.

Para los equipos de circuito cerrado únicamente se midió la capacidad del tanque que almacena el agua para determinar la cantidad total de agua que necesita para su correcto funcionamiento. Para los equipos de flujo continuo se midió el flujo másico de agua y se midió la cantidad de tiempo que el equipo permanece funcionando. Operando estas variables se obtiene un aproximado del volumen que se utiliza por práctica de laboratorio.

Los equipos que mayor cantidad de agua consumen son los dos intercambiadores de calor seguidos por la torre de humidificación, por lo que se le debe prestar especial atención. Esto lleva al análisis de la tabla XI, la cual

presenta el volumen total que deber ser recirculado, y esta es la premisa para determinar las dimensiones del tanque de almacenamiento que posteriormente se expondrá en esta sección.

Como se puede observar, la cantidad de agua destinada a recirculación es menor que el volumen estimado en las dos tablas anteriores. Eso se debe a que tanto los dos intercambiadores de calor como la torre de destilación forman parte de un pequeño sistema de recirculación de agua que conecta con la pileta de la torre de humidificación. Cabe mencionar que dicho sistema de recirculación no cuenta con ningún tipo de tratamiento de agua, por lo que al finalizar cada práctica debe desecharse al alcantarillado público, y vuelve a hacerse necesario el propósito del presente informe.

En la tabla XII se muestran las especificaciones del sistema de distribución de agua propuesto, esto incluye diámetro de la tubería, longitud de la tubería, material de la tubería y accesorios, tipos de accesorios y la cantidad que se utilizará de cada uno. El material escogido para el sistema de distribución de agua es el coluro de polivinilo (PVC), debido a su bajo costo, facilidad de instalación, peso ligero y características de flujo muy buenas, por lo que cumple con los requerimientos básicos para el sistema.

La razón principal de por qué hay diferentes diámetros de tubería es que se debe al flujo que se maneja. La tubería de succión de la bomba es la que posee el mayor diámetro, esto es debido a que se sabe que, para un flujo volumétrico, a medida que aumenta el área transversal disminuye la velocidad de dicho flujo. Esto es útil debido a que, si la velocidad de entrada en la bomba es muy grande, se corre el riesgo de formar burbujas provocando así el fenómeno de cavitación y disminuyendo el tiempo de vida de la bomba.

La tubería de descarga tiene diferentes diámetros debido a que el flujo volumétrico varía según la dirección que tome. Se sabe del principio de continuidad para sistemas de tuberías en paralelo que la suma de los flujos volumétricos que se subdividen es igual al flujo volumétrico inicial, por lo tanto, cada vez que el flujo se divide, este es menor en cada tramo y por lo tanto requiere una tubería de menor diámetro. Determinar el diámetro tanto de la tubería de succión como de los diferentes diámetros de descarga, se hace con base a la figura 9, la cual describe el tamaño óptimo de tubería para un flujo volumétrico dado.

En el caso de las válvulas, cada una tiene un propósito específico por el cual se agregó al sistema. En total se requieren cuatro válvulas, de las cuales tres son de compuerta y una es de verificación (de retención o comúnmente denominada “cheque”). Se escogió colocar válvulas de compuerta debido a que estas son las que tienen una menor resistencia al paso del fluido, esto se ve reflejado en que este tipo de válvulas poseen la razón de longitud equivalente  $Le/D$  más pequeña de todas (esto puede encontrarse en la sección de anexos). Se coloca una válvula de compuerta en la entrada de la bomba, ya que de esta forma no será necesario drenar el tanque de almacenamiento para darle mantenimiento. Se coloca una válvula de compuerta en la salida de la bomba para controlar el flujo de salida. Y se coloca la última válvula de compuerta en la salida de la tubería hacia la pileta de la torre de humidificación.

La función principal de una válvula de verificación es dejar pasar el flujo en una sola dirección. El sistema propuesto se conecta con la tubería que provee de agua municipal al laboratorio. Es debido a esto que se requiere una válvula de verificación, ya que la presión de agua municipal es fluctuante y en algún momento esta puede rebalsar de agua el tanque de almacenamiento.

Adicional a las válvulas mencionadas, es necesario agregar una válvula de mariposa en el extremo de la tubería para poder abastecer de agua los tanques de los equipos que funcionan con circuito cerrado. La tabla XIV muestra las dimensiones de los tanques que se utilizarán en el sistema de recirculación, las cuales están basadas en los resultados que se encuentran en la tabla XI. Son necesarios dos tanques, uno de recepción de agua utilizada y el otro de almacenamiento de agua tratada, esto para facilitar el tratamiento intermedio que se le dará al agua. Los tanques están diseñados con una capacidad volumétrica para suplir la necesidad de flujo de agua para una práctica de LIQ1 y LIQ2 en un mismo día usando todos los equipos que lo requieran. Transcurridas ambas prácticas será necesario hacer recircular el agua hacia el tanque de recepción y, posteriormente, al tanque de almacenamiento para un nuevo ciclo. Todo esto debiera de proveer al Laboratorio de Operaciones Unitarias un funcionamiento autosustentable para todos los equipos.

El determinar la energía del sistema por medio de la carga de presión, carga de elevación y carga de velocidad, además de las pérdidas de energía por accesorios y acoplamientos, tiene como objetivo final el calcular la carga total que se necesita agregar al sistema para que este funcione. Dicha carga total deber ser suministrada por una bomba que cumpla las características necesarias. A partir de esta carga y del flujo volumétrico que se trabaje se determina la potencia que debe transmitir al fluido. Teniendo la potencia que se transmite, se debe determinar la potencia de entrada a la bomba, ya que dentro de esta también hay pérdidas de energía y las bombas poseen una eficiencia bajo la cual trabajan. Tomando en cuenta que las bombas centrífugas trabajan bajo una eficiencia entre el 50 % y 85 %, para usos de este informe se asume una eficiencia de 65 %.

La tabla XV muestra la información de las especificaciones de las dos bombas que se utilizarían en el sistema de recirculación de agua, una para el sistema de distribución y otra para el sistema de recepción. El sistema de distribución de agua parte del tanque de almacenamiento, del cual se requiere un flujo volumétrico máximo de 50 gal/min, esto basado en el flujo promedio que se maneja en los equipos del laboratorio.

A partir de todos los cálculos realizados en la sección de apéndices, se obtiene que esta bomba debe suministrar 0,596 hp de potencia al fluido, por lo tanto, asumiendo una eficiencia del 65 %, la potencia de entrada de la bomba debe ser de al menos 0,918 hp. Además de esto es necesario determinar la cabeza neta de succión positiva requerida ( $NPSH_R$ ) para asegurar que la bomba no presente cavitación. Finalmente se elige una bomba centrífuga vertical de un hp, esto por conveniencia de espacio, por el tipo de fluido, por el flujo requerido y cuya  $NPSH_R$  sea menos que 9,335 m de carga.

Un análisis similar se realiza para la bomba del sistema de recepción de agua. Este sistema tiene como finalidad reabastecer el tanque receptor para su posterior tratamiento. El flujo requerido para esta bomba es un máximo de 20 gal/min, debe suministrar 0,038 hp de potencia al fluido, la potencia de entrada debe ser al menos de 0,059 hp, por lo que se escoge una bomba centrífuga vertical de 0,100 hp con una  $NPSH_R$  menor que 7,857 m de carga. Puede observarse que esta bomba posee una potencia diez veces menor que la bomba del sistema de distribución, esto es lógico debido a que el único trabajo que realizará es de elevar el fluido hasta la entrada del tanque receptor.

La tabla XVI es una transcripción de los resultados de las muestras analizadas en el Laboratorio de Química y Microbiología “Dra. Alba Tabarini Molina”, estos resultados se encuentran en la sección de anexos. Aquí se muestran los aspectos físicos y químicos de mayor relevancia en cuanto a la calidad del agua que se busca recircular en el laboratorio. Los parámetros evaluados son temperatura, alcalinidad, dureza, sólidos suspendidos, sólidos disueltos, demanda química de oxígeno y pH.

En esta tabla se encuentran también valores de referencia para comparar los datos obtenidos y verificar que el estado del agua es el adecuado. Los valores de referencia fueron tomados de la Norma COGUANOR NTG 29001 para agua potable y Acuerdo Gubernativo 236-2006 para la disposición de aguas residuales.

Basado en los datos, el agua en todos los equipos del laboratorio se encuentra en condiciones relativamente aceptables, ya que ninguno de los parámetros sobrepasa los valores de referencia. La temperatura es constante en todos los equipos, por lo tanto, este puede dejar de ser un factor preocupante ya que al no haber variaciones se puede asumir que esa es la temperatura de operación en todo el laboratorio. Esto es importante porque una variación en la temperatura puede afectar los procesos del tratamiento que se le dará al agua.

El pH y la alcalinidad están estrechamente relacionados, esto es, valores elevados de pH equivaldrían a valores más altos de alcalinidad. En este caso el pH del agua está entre valores de 7,5 a 8,5, ligeramente básica, y se ve reflejado con los valores promedio de alcalinidad de aproximadamente 166 mg/L.

La dureza en el agua puede afectar directamente en tuberías de calderas debido a las altas temperaturas con las que se trabaja, esto produce incrustaciones que afectan la eficiencia de la transferencia de calor. Los valores que se encontraron en las aguas residuales de los equipos no presentan alguna amenaza significativa al sistema de recirculación. La demanda química de oxígeno es menor que 5 mg/L, por lo que no requiere ningún tratamiento para la reducción del mismo.

Los sólidos disueltos totales presentan valores que, si bien no son mayores a los valores de referencia para la calidad del agua, es necesario tratarlos antes de recircular el agua utilizada. Esto es importante, ya que se puede ocasionar daños en la bomba por hacerse circular agua con residuos sólidos. El tratamiento propuesto se expone en la figura 11, el cual se compone de una etapa de recepción, coagulación, floculación, sedimentación y, por último, filtración, llevándose a cabo en el tanque receptor, siendo este un reactor del tipo *batch*.

La primera etapa es la recepción, se capta toda el agua residual proveniente de los equipos en el tanque reactor hasta llenarlo, debido a que el tratamiento del agua será por lotes. La segunda etapa es de coagulación y floculación. La coagulación se encarga de desestabilizar las partículas coloidales que están en suspensión y así favorecer la aglomeración; con eso se eliminan las materias en suspensión estables. En la floculación ocurre la aglomeración de las partículas desestabilizadas primero en microflóculos y más tarde en aglomerados voluminosos llamados flóculos. Esto sucede por la agitación constante de la masa coagulada para sedimentar con facilidad

El coagulante propuesto para esta etapa es el sulfato de aluminio, ya que cuando el agua es ligeramente alcalina, el aluminio precipita arrastrando las

partículas en suspensión. Este coagulante es el más utilizado por su alto grado de eficiencia y su economía. Se propone una concentración del coagulante de 60 mg/L según los resultados de la Prueba de Jarras, en la cual se evaluaron 6 concentraciones distintas y, como puede observarse en el anexo 12, a la concentración propuesta presentó a simple vista una mayor cantidad de partículas suspendidas sedimentables en comparación con las otras.

En esta etapa de coagulación y floculación se presentan dos tipos de agitación: la agitación rápida, cuyo propósito es distribuir el reactivo en todo el tanque y que se realiza por un minuto a una velocidad de 200 rpm. Luego sigue la agitación lenta, cuyo propósito es promover la aglomeración de partículas desestabilizadas y formar los flóculos; se lleva a cabo durante 20 minutos a una velocidad de 40 rpm según la Prueba de Jarras.

La tercera etapa es la sedimentación, esta consiste únicamente en dejar que los flóculos formados desciendan por gravedad al fondo del tanque y de esta manera poder drenar estos desechos sólidos. Para esta etapa se requieren 20 minutos para que la mayoría de partículas se sedimenten. El resto se remueven en la última etapa.

Finalizando el proceso, se tiene la etapa de filtración que, como su nombre lo indica, consiste en hacer pasar el agua tratada a través de un filtro de cartucho por medio de una bomba hacia el tanque de almacenamiento, la bomba generará la presión necesaria para que cualquier partícula remanente quede atrapada en el filtro, y de esta manera se dará por terminado el tratamiento de las aguas residuales para este caso específico.

La figura 12 muestra un esquema general del tratamiento, el cual consta de los dos tanques, uno de recepción que funciona como reactor tipo *batch* y el



otro de almacenamiento de agua ya tratada. Se propone un mezclador para las etapas de coagulación y floculación, compuesto por un compresor de aire y un tubo que ingrese en el tanque, de esta manera la mezcla se realizará por el aire del compresor al mismo tiempo que se oxigena el agua. Es necesaria una bomba centrífuga de al menos  $\frac{1}{4}$  hp para hacer pasar el agua a través del filtro y posteriormente almacenarla. El coagulante se verterá por lotes en el tanque receptor.

Por último, se tienen las figuras 13 y 14, las cuales muestran un esquema general del sistema de recirculación, almacenamiento y tratamiento de los efluentes de los equipos del Laboratorio de Operaciones Unitarias. El sistema de recepción (línea roja) en la figura 13 tiene como objetivo captar toda el agua proveniente de los equipos en una sola tubería que conecte con la bomba centrífuga para luego dirigirla hacia el tanque reactor. Para esto se necesita conectar una tubería que sale de la torre de humidificación y otra tubería que se utilizará para recibir los efluentes de los equipos que funcionan con tanques.

Para vaciar los tanques de los equipos que funcionan con circuito cerrado se requiere una bomba de caña, esta tiene como función extraer el agua desde el fondo del tanque y expulsarla por el otro extremo. Esto permitirá conectar una manguera para trasladar el agua hacia la tubería mencionada anteriormente y mejorar considerablemente los métodos que se utilizan actualmente para vaciar dichos tanques.

La figura 14 corresponde al sistema de distribución de agua (línea verde). Este parte del tanque de almacenamiento y se divide en dos: una hacia la torre de absorción y otra hacia la torre de humidificación. La tubería que va hacia la torre de absorción se une a la tubería de agua municipal (azul), la cual alimenta dicha torre; en esta parte se coloca una válvula de verificación para que no

retorne el agua hacia el tanque, debido a la presión que el agua municipal pueda tener.

La tubería que se dirige a la torre de humidificación también se divide en dos: una que se dirige hacia la pileta de la torre y la otra que se extiende hasta aproximadamente el centro del laboratorio, para llenar los tanques de los equipos con circuito cerrado, esto con ayuda de una manguera que se une al extremo de la tubería.

La tubería de agua municipal se conecta también con el tanque de almacenamiento, debido a que en el caso de que no se recircule la totalidad del agua de los equipos, este tanque pueda llenarse con agua municipal y así operar de manera efectiva el sistema completo.

## CONCLUSIONES

1. No es necesario conectar el sistema de recirculación de agua con cada equipo del laboratorio, basta con aprovechar la disposición actual de los equipos cuyos efluentes están interconectados, tales como los intercambiadores de calor, la torre de destilación y la torre de humidificación, y de esta manera reducir considerablemente el gasto de agua total.
2. Se requiere un aproximado de 29 m de tubería recta PVC, distribuidos en diámetros de 1 ½ " (0,3 m), 1 ¼ " (0,3 m), 1 " (13,7 m) y ¾ " (14,5 m); además de 7 codos estándar a 90°, 3 "te" estándar, 4 válvulas de compuerta y 1 válvula de retención para el sistema de distribución de agua.
3. La capacidad de los tanques debe ser de 3200 L cada uno, de forma cilíndrica, con radio 0,75 m y altura 2,06 m, para cubrir el gasto volumétrico de todos los equipos en una práctica de los cursos de Laboratorio de Ingeniería Química 1 y 2 en un mismo día.
4. Se requiere un total de 3 bombas centrífugas para hacer funcionar el sistema completo, una para el sistema de recepción de agua, otra para el sistema de tratamiento de agua y otra para el sistema de distribución de agua, con potencia 0,1 hp, 0,25 hp y 1,0 hp, respectivamente.

5. Se determinó que la calidad del agua residual de los equipos del laboratorio no sobrepasa los límites permisibles establecidos en la Norma COGUANOR 29001 y el Acuerdo Gubernativo 236-2006, pero para la reducción de los sólidos disueltos totales se necesita un tratamiento previo a la recirculación.
  
6. Se determinó, por medio de la Prueba de Jarras, que el plan de tratamiento de las aguas residuales es de tipo *batch* y debe incluir las etapas de coagulación-floculación, sedimentación y filtración, junto con un sistema de mezclado en el tanque.

## RECOMENDACIONES

1. Evaluar la posibilidad de realizar la recirculación de agua por cada práctica en lugar de hacerla por cada día, para de esta manera reducir las dimensiones de los tanques de recepción y de almacenamiento.
2. Establecer una bomba con potencia de 0,25 hp para el sistema de recepción de agua en el caso de que en Guatemala no se encuentren bombas de 0,1 hp.
3. Realizar un análisis de costos para verificar la factibilidad de la implementación del sistema de recirculación, almacenamiento y tratamiento de aguas residuales en el Laboratorio de Operaciones Unitarias.
4. Realizar análisis de calidad del agua en el tanque de almacenamiento al menos una vez por semestre, para verificar que el plan de tratamiento propuesto sea el adecuado y cumpla con su objetivo.



## BIBLIOGRAFÍA

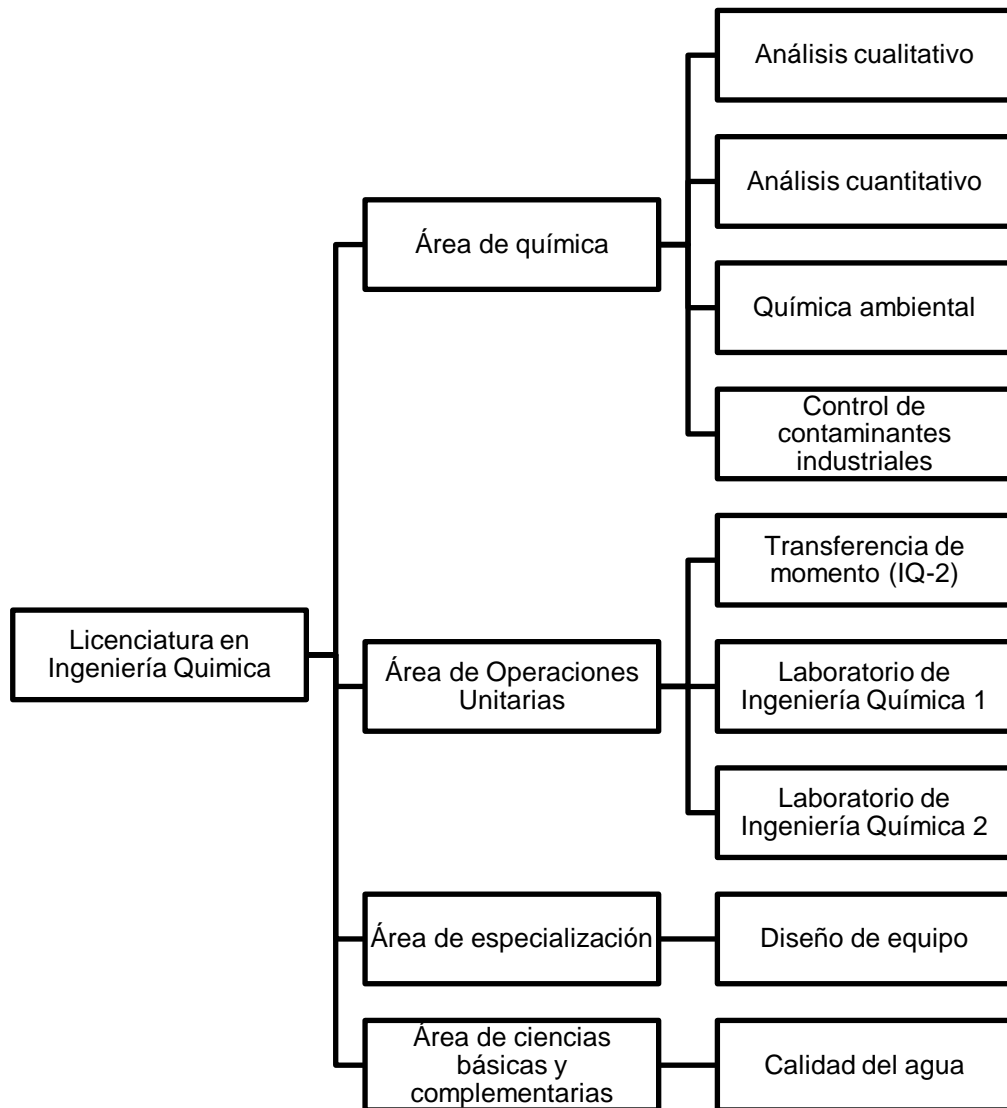
1. ASTM International. *Standard Specification for Poly (Vinyl Chloride) (PVC) Plastic Pipe, Schedules 40, 80 and 120.D 1785 – 15*. USA: American National Standard, 2015. 11 p.
2. AZNAR JIMÉNEZ, Antonio. *Determinación de los parámetros físico-químicos de calidad de las aguas*. España: Instituto Tecnológico de Química y Materiales “Álvaro Alonso Barba”, Universidad Carlos III, 2000. 12 p.
3. CÁRDENAS, Yolanda Andía. *Tratamiento de agua: coagulación y floculación*. Perú: Evaluación de Plantas y Desarrollo Tecnológico, SEDAPAL, 2000. 44 p.
4. CRANE. División de Ingeniería. *Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías*. VALFISA, S.A. (trad). México: McGraw Hill, 1992. 198 p.
5. JOHNSON, Robert. *Estadística elemental*. 11<sup>a</sup> ed. México: Cengage Learning, 2012. 809 p.
6. McCABE, Warren L.; SMITH, Julian C.; HARRIOTT, Peter. *Operaciones unitarias en ingeniería química*. 4<sup>a</sup> ed. España: McGraw-Hill, 1991. 1112 p. ISBN: 84-481-1918-5.

7. METCALF & EDDY. *Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización*. Tomo I. México: McGraw-Hill, 1996. 752 p.
8. MOTT, Robert L. *Mecánica de fluidos*. León Cárdenas, Javier (rev. tec.); Enríquez Brito, Javier (trad.). 6ª. ed. México: Pearson Educación, 2006. 644 p. ISBN: 970-26-0805-8.
9. SIERRA RAMÍREZ, Carlos Alberto. *Calidad del agua: evaluación y diagnóstico*. Colombia: Universidad de Medellín, 2011. 457 p. ISBN: 978-958-8692-06-7.
10. WARPOLE, Ronald. *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*. 8ª ed. México: Prentice Hall, 2007. 840 p.



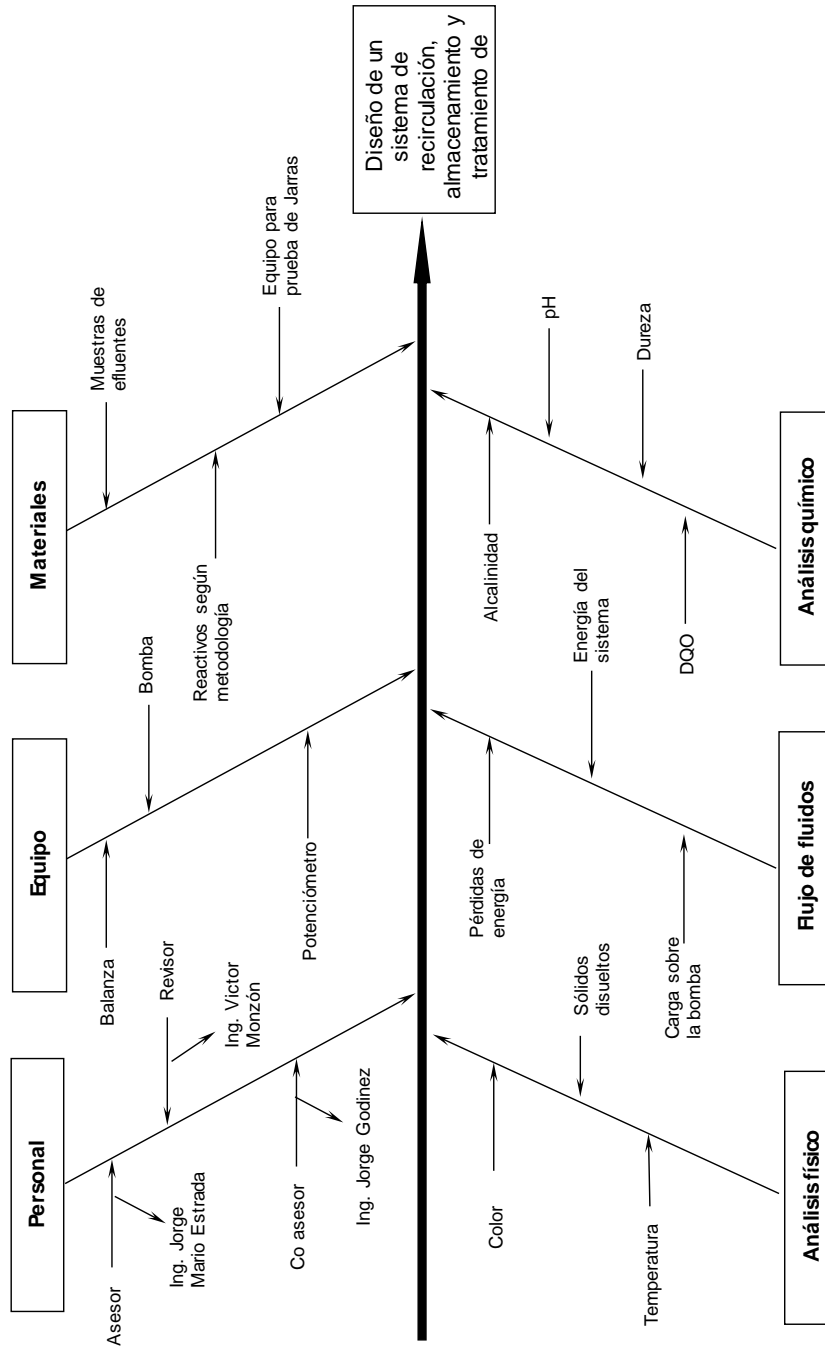
# APÉNDICES

Apéndice 1. **Tabla de requisitos académicos**



Fuente: elaboración propia.

## Apéndice 2. Diagrama de causa y efecto

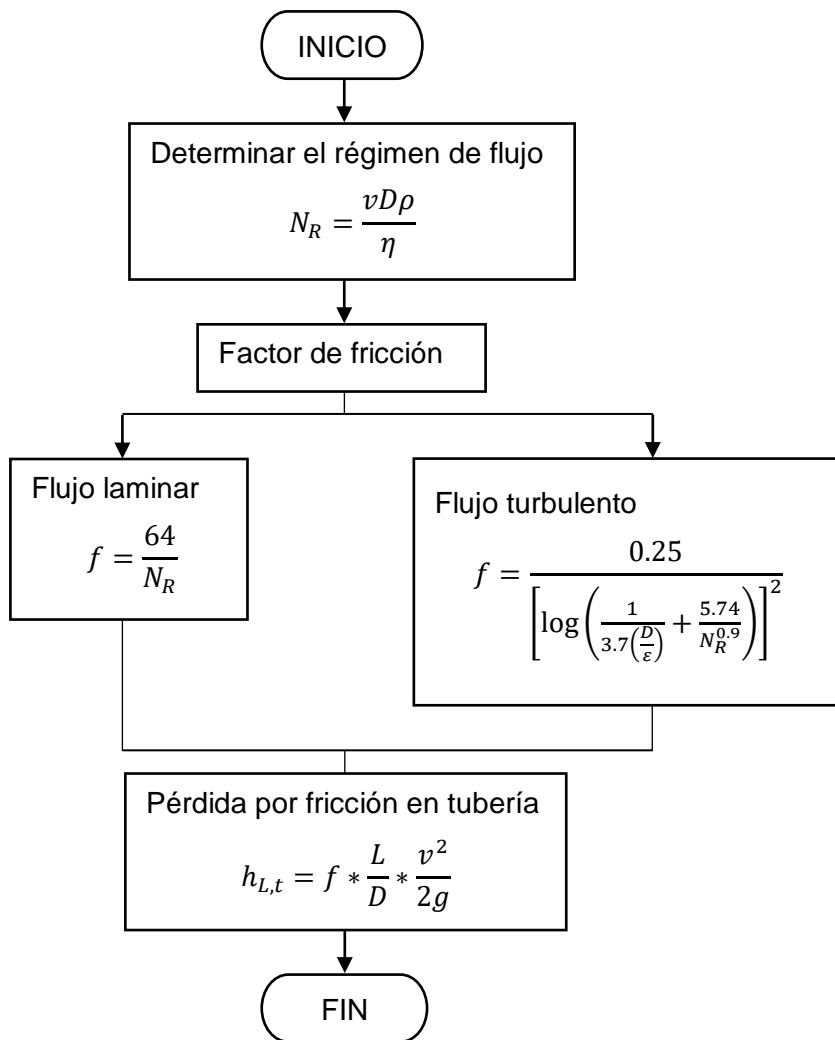


Fuente: elaboración propia.

### Apéndice 3. Procedimiento de cálculo

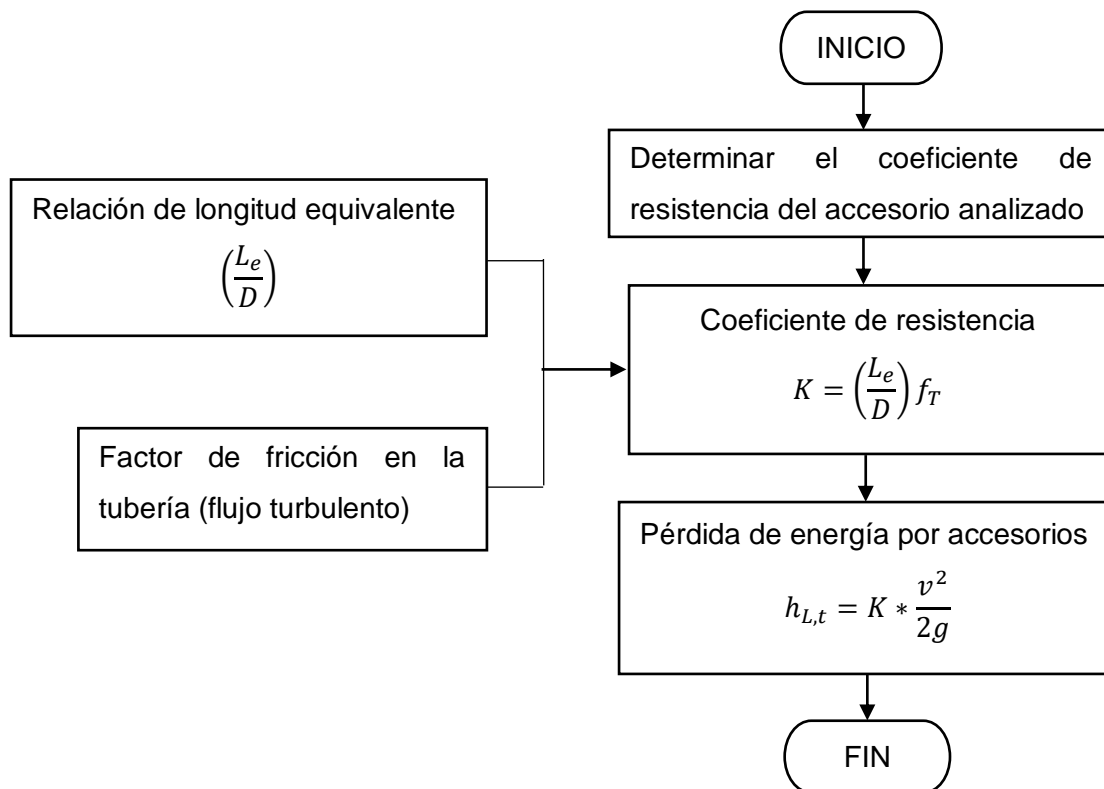
A continuación se muestran los diagramas del procedimiento de los cálculos realizados:

#### Apéndice 3i. Diagrama de metodología de cálculo para la pérdida de energía por fricción en tubería



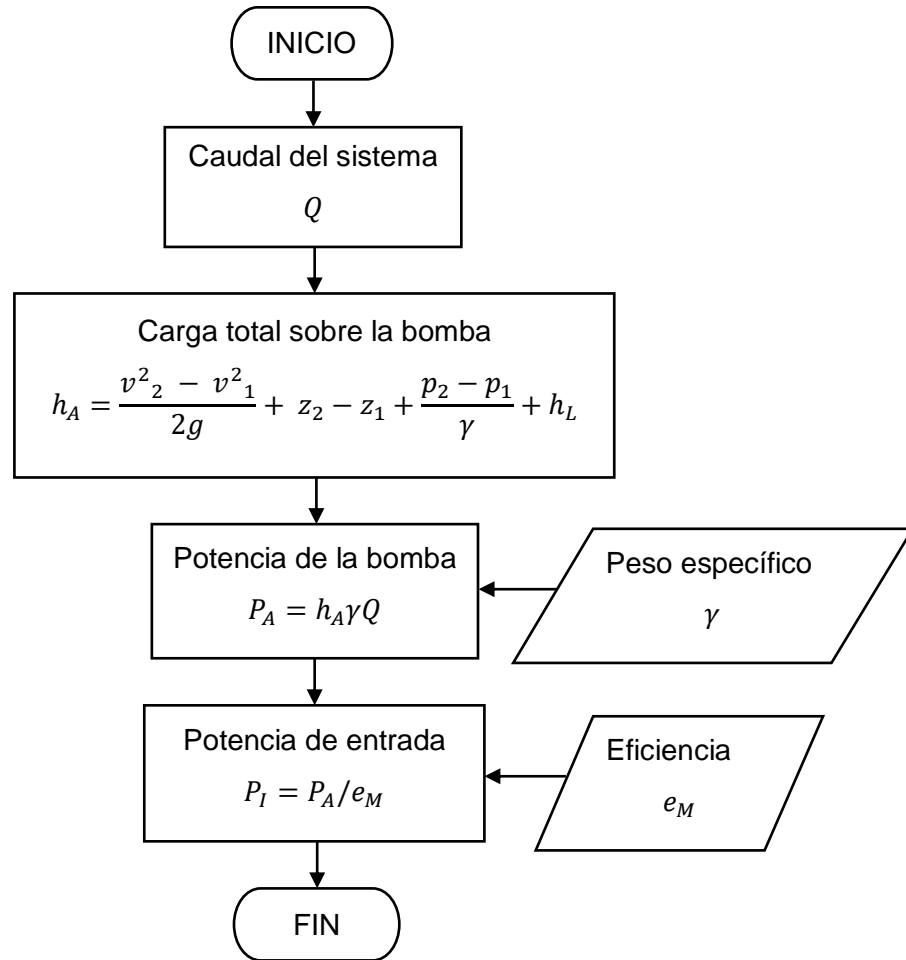
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3ii. **Diagrama de metodología de cálculo para determinar la pérdida de energía por accesorios**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3iii. **Diagrama de metodología de cálculo para determinar la potencia de la bomba**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. **Datos calculados**

A continuación se muestran las tablas de los datos que fueron calculados para llegar a los resultados presentados.

Apéndice 4i. **Flujo de agua en el intercambiador de calor de tubos concéntricos**

Tiempo [s]	Masa total [lb]	Masa agua [lb]	Flujo másico [kg/s]	Flujo volumétrico [m <sup>3</sup> /s]	Flujo vol. Promedio [m <sup>3</sup> /s]
10	9,5	8,5	0,3856	0,0004	0,0004
10	3,5	2,5	0,1134	0,0001	
15	7,0	6,0	0,1814	0,0002	
15	7,0	6,0	0,1814	0,0002	
15	8,5	7,5	0,2268	0,0002	
10	12,0	11,0	0,4990	0,0005	
10	12,5	11,5	0,5216	0,0005	
10	8,5	7,5	0,3402	0,0003	

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4ii. **Volumen de agua utilizado en el intercambiador de calor de tubos concéntricos**

Flujo volumétrico promedio	0,0004	m <sup>3</sup> /s
Tiempo de uso	100	min
Volumen utilizado	2,372	m <sup>3</sup>

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4iii. **Flujo de agua en el intercambiador de calor de concha y tubos**

Tiempo [s]	Masa total [lb]	Masa agua [lb]	Flujo másico [kg/s]	Flujo volumétrico [m <sup>3</sup> /s]	Flujo vol. Promedio [m <sup>3</sup> /s]
10	4,7	3,7	0,3735	0,0004	0,0005
15	7,4	6,4	0,4275	0,0004	
10	6,0	5,0	0,4995	0,0005	
10	7,1	6,1	0,6075	0,0006	
12	9,2	8,2	0,6795	0,0007	

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4iv. **Volumen de agua utilizado en el intercambiador de calor de concha y tubos**

Flujo volumétrico promedio	0,0005	m <sup>3</sup> /s
Tiempo de uso	90	min
Volumen utilizado	2,799	m <sup>3</sup>

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4v. **Medidas de tanques de equipos con circuito cerrado**

Equipo	Ancho [m]	Largo [m]	Altura [m]	Volumen [m <sup>3</sup> ]
Medidores de flujo	0,41	0,41	0,60	0,100
Bomba centrífuga	0,41	0,41	0,60	0,100
Tubería y accesorios	0,41	0,41	0,60	0,100

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4vi. **Flujo de agua en la torre de absorción**

Tiempo [s]	Masa total [lb]	Masa agua [lb]	Flujo másico [kg/s]	Flujo volumétrico [m <sup>3</sup> /s]	Flujo vol. Promedio [m <sup>3</sup> /s]
13	2,9	2,5	0,1923	1,925E-04	1,411E-04
18	3,1	2,7	0,1500	1,502E-04	
20	3,3	2,9	0,1450	1,452E-04	
17	2,8	2,4	0,1412	1,413E-04	
24	3,1	2,7	0,1125	1,126E-04	
21	2,6	2,2	0,1048	1,049E-04	

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4vii. **Volumen de agua utilizado en la torre de absorción**

Flujo volumétrico promedio	1,411E-04	m <sup>3</sup> /s
Tiempo de uso	60	min
Volumen utilizado	0,508	m <sup>3</sup>

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4viii. **Flujo de agua en la torre de destilación**

Tiempo [s]	Masa total [lb]	Masa agua [lb]	Flujo másico [kg/s]	Flujo vol [m <sup>3</sup> /s]	Flujo vol. Prom. [m <sup>3</sup> /s]
11	2,3	1,9	0,1727	1,729E-04	1,538E-04
13	2,4	2,0	0,1538	1,540E-04	
12	2,2	1,8	0,1500	1,502E-04	
10	1,9	1,5	0,1500	1,502E-04	
12	2,1	1,7	0,1417	1,418E-04	
15	2,7	2,3	0,1533	1,535E-04	

Fuente: elaboración propia.



Apéndice 4ix. **Volumen de agua utilizado en la torre de destilación**

Flujo volumétrico promedio	1,538E-04	m <sup>3</sup> /s
Tiempo de uso	80	min
Volumen utilizado	0,738	m <sup>3</sup>

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4x. **Medidas de la pileta de torre de humidificación**

Concepto	Ancho [m]	Largo [m]	Altura [m]	Volumen [m <sup>3</sup> ]
Pileta central	1,69	1,69	0,35	0,999
Orilla 1	2,11	0,30	0,35	0,222
Orilla 2	0,30	1,88	0,35	0,197
Total	-	-	-	1,418

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4xi. **Datos útiles para el agua**

Concepto	Valor	Unidades
Temperatura	25,00	°C
Peso específico	9,78	kN/m <sup>3</sup>
Densidad	997,00	kg/m <sup>3</sup>
Viscosidad dinámica	8,91E-04	Pa.s
Viscosidad cinemática	8,91E-07	m <sup>2</sup> /s

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4xii. **Número de Reynolds para los diferentes flujos y diámetros del sistema**

Tubería	$D$ [pulg]	$D_i$ [pulg]	Área [m <sup>2</sup> ]	$Q$ [gal/min]	$Q$ [m <sup>3</sup> /s]	Velocidad [m/s]	$N_R$
Succión	1 ½	1,610	0,0013	50	0,00315	2,402	102392
Descarga 1	1 ¼	1,380	0,0010	50	0,00315	3,269	116139
Descarga 2	1	1,049	0,0006	20	0,00126	2,263	64318
Descarga 3	2	2,067	0,0022	20	0,00126	0,582	33084
Descarga 4	1	1,049	0,0006	30	0,00189	3,394	96477
Descarga 5	1	1,049	0,0006	200	0,00126	2,263	64318
Descarga 6	3/4	0,824	0,0003	10	0,00063	1,834	39090

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4xiii. **Pérdida de energía por fricción en la tubería**

Tubería	$D$ [pulg]	$D_i$ [pulg]	Rugosidad [m]	$\epsilon/D$	$f$	Longitud [m]	$h_L$ [N.m/N]
Succión	1 ½	1,610	3,00E-07	136313	0,018	0,3	0,038
Descarga 1	1 ¼	1,380	3,00E-07	116840	0,017	0,3	0,080
Descarga 2	1	1,049	3,00E-07	88815	0,020	5,0	0,956
Descarga 3	2	2,067	4,06E-04	114	0,039	10,7	0,139
Descarga 4	1	1,049	3,00E-07	88815	0,018	7,2	2,844
Descarga 5	1	1,049	3,00E-07	88815	0,020	1,5	0,287
Descarga 6	3/4	0,824	3,00E-07	88815	0,022	14,5	2,590

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4xiv. **Pérdidas de energía por accesorios, punto 0**

Accesorio	$D$ [pulg]	$D_i$ [pulg]	$\epsilon$ [m]	$\epsilon/D$	$f$	$\frac{Le}{D}$	$K$	$v$ [m/s]	$h_L$ [N.m/N]
Entrada	-	-	-	-	-	-	0,500	2,402	0,147
Válvula	1 ½	1,610	3,00E-07	136313	0,0085	8	0,068	2,402	0,020
Válvula	1 ¼	1,380	3,00E-07	116840	0,0090	8	0,072	3,269	0,039
T estándar	1 ¼	1,380	3,0E-07	116840	0,0090	60	0,540	3,269	0,294

Fuente: elaboración propia, con base en anexo 2.

Apéndice 4xv. **Pérdidas de energía por accesorios, punto 1**

Accesorio	$D$ [pulg]	$D_i$ [pulg]	$\epsilon$ [m]	$\epsilon/D$	$f$	$\frac{Le}{D}$	$K$	$v$ [m/s]	$h_L$ [N.m/N]
2 codos	1	1,049	3,00E-07	88815	0,0100	30	0,300	2,263	0,157
Expansión	-	-	-	-	-	-	0,510	2,263	0,133
T estándar	2	2,067	3,00E-07	175006	0,0085	60	0,510	0,582	0,009
Válvula compuerta	1	1,049	3,0E-07	88815	0,0100	8	0,080	2,263	0,021
Válvula retención	1	1,049	3,00E-07	88815	0,0100	100	1,000	2,263	0,261

Fuente: elaboración propia, con base en anexo 2.

Apéndice 4xvi. **Pérdidas de energía por accesorios, punto 2**

Accesorio	$D$ [pulg]	$D_i$ [pulg]	$\epsilon$ [m]	$\epsilon/D$	$f$	$\frac{Le}{D}$	$K$	$v$ [m/s]	$h_L$ [N.m/N]
1 codo	1	1,049	3,00E-07	88815	0,010	30	0,30	3,394	0,176
2 codos	1	1,049	3,00E-07	88815	0,010	30	0,30	2,263	0,157
Válvula	1	1,049	3,00E-07	88815	0,010	60	0,60	3,394	0,352
T estándar	1	1,049	3,0E-07	88815	0,010	8	0,08	2,263	0,021

Fuente: elaboración propia, con base en anexo 2.

Apéndice 4xvii. **Pérdidas de energía por accesorios, punto 3**

Accesorio	$D$ [pulg]	$D_i$ [pulg]	$\epsilon$ [m]	$\epsilon/D$	$f$	$\frac{Le}{D}$	$K$	$v$ [m/s]	$h_L$ [N.m/N]
2 codos	3/4	0,824	3,00E-07	69765	0,010	30	0,30	1,834	0,103

Fuente: elaboración propia, con base en anexo 2.

Apéndice 4xviii. **Pérdida total de energía por fricción y accesorios**

Concepto	Valor [N.m/N]
$h_{L0}$	0,619
$h_{L1}$	1,672
$h_{L2}$	3,837
$h_{L3}$	6,065
$h_L$	12,193

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4xix. **Cálculo de la carga total sobre la bomba**

Punto 1		Punto 2		Punto 3	
Concepto	Carga [m]	Concepto	Carga [m]	Concepto	Carga [m]
$p_1/\gamma$	1,524	$p_2/\gamma$	0,000	$p_3/\gamma$	0,000
$z_1$	3,200	$z_2$	1,000	$z_3$	1,000
$v_1/2g$	0,017	$v_2/2g$	0,261	$v_3/2g$	0,171
$p_0/\gamma$	0,000	$p_0/\gamma$	0,000	$p_0/\gamma$	0,000
$z_0$	2,060	$z_0$	2,060	$z_0$	2,060
$v_0/2g$	0,000	$v_0/2g$	0,000	$v_0/2g$	0,000
$h_{L0}$	0,619	$h_{L0}$	0,619	$h_{L0}$	0,619
$h_{L1}$	1,672	$h_{L2}$	3,837	$h_{L3}$	6,065
$h_{A1}$	4,972	$h_{A2}$	3,656	$h_{A3}$	5,796

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4xx. **Cálculo de la potencia de la bomba**

Concepto	Valor	Unidad
$h_A$	14,424	N.m/N
$P_A$	444,987	W
$P_A$	0,596	Hp
$e_M$	65	%
$P_I$	0,918	hp

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4xxi. **Cálculo de la cabeza neta de succión positiva de la bomba**

Concepto	Valor	Unidad
$p_{sp}$	85,574	kN/m <sup>2</sup>
$h_{sp}$	8,750	m
$h_s$	2,060	m
$h_f$	0,205	m
$h_{vp}$	0,337	m
$NPSH_A$	10,268	m
$NPSH_R$	9,335	m

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4xxii. **Número de Reynolds para el flujo del sistema de recepción**

Tubería	$D$ [pulg]	$D_i$ [pulg]	Área [m <sup>2</sup> ]	$Q$ [gal/min]	$Q$ [m <sup>3</sup> /s]	Velocidad [m/s]	$N_R$
Succión	1 ¼	1,380	0,00096	20	0,00126	1,308	46456
Descarga	1	1,049	0,00056	20	0,00126	2,263	64318

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4xxiii. **Pérdida de energía por fricción en la tubería de recepción**

Tubería	$D$ [pulg]	$D_i$ [pulg]	Rugosidad [m]	$\epsilon/D$	$f$	Long. [m]	$h_L$ [N.m/N]
Descarga 1	1 ¼	1,380	3,00E-07	116840	0,021	2,5	0,1308
Descarga 2	1	1,049	3,00E-07	88815	0,020	3,3	0,6310

Fuente: elaboración propia, anexo 2.

Apéndice 4xxiv. **Pérdidas de energía por accesorios en la recepción**

Accesorio	$D$ [pulg]	$D_i$ [pulg]	$\epsilon$ [m]	$\epsilon/D$	$f$	$\frac{Le}{D}$	$K$	$v$ [m/s]	$h_L$ [N.m/N]
Entrada	-	-	-	-	-	-	0,50	1,308	0,0436
Válvula	1 ¼	1,049	3,0E-7	88815	0,009	8	0,07	1,308	0,0063
Válvula	1	1,380	3,0E-7	116840	0,010	8	0,08	2,263	0,0209
T estándar	1 ¼	1,049	3,0E-7	88815	0,009	60	0,54	1,308	0,0471
Codo	1 ¼	1,049	3,0E-7	88815	0,009	30	0,27	1,308	0,0235
Codo	1	1,049	3,0E-7	88815	0,010	30	0,30	2,263	0,1566

Fuente: elaboración propia, con base en anexo 2.

Apéndice 4xxv. **Cálculo de la carga total sobre la bomba de recepción**

Concepto	Carga [m]
$p_1/\gamma$	0,000
$z_1$	2,100
$v_1/2g$	0,261
$p_0/\gamma$	0,000
$z_0$	0,350
$v_0/2g$	0,000
$h_L$	0,298
$h_A$	2,309

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4xxvi. **Cálculo de la potencia de la bomba de recepción**

Concepto	Valor	Unidad
$h_A$	2,309	N.m/N
$P_A$	28,493	W
$P_A$	0,038	Hp
$e_M$	65	%
$P_I$	0,059	hp

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4xxvii. **Cálculo de la cabeza neta de succión positiva de la bomba de recepción**

Concepto	Valor	Unidad
$p_{sp}$	85,574	kN/m <sup>2</sup>
$h_{sp}$	8,750	m
$h_s$	0,350	m
$h_f$	0,120	m
$h_{vp}$	0,337	m
$NPSH_A$	8,643	m
$NPSH_R$	7,857	m

Fuente: elaboración propia.



**Apéndice 5. Prueba de Jarras a diferentes concentraciones**



Fuente: elaboración propia.

**Apéndice 6. Flóculos utilizando 10 mg/L**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 7. **Flóculos utilizando 20 mg/L**



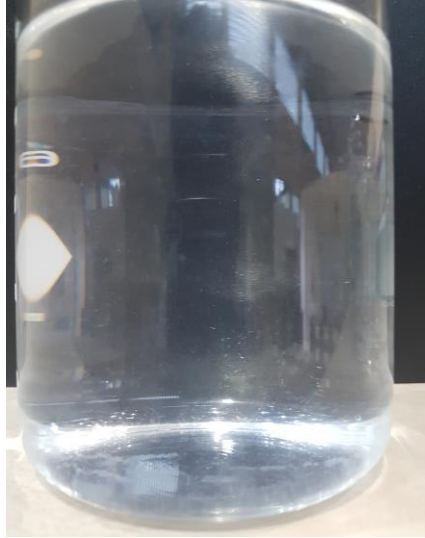
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 8. **Flóculos utilizando 25 mg/L**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 9. **Flóculos utilizando 30 mg/L**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 10. **Flóculos utilizando 40 mg/L**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 11. **Flóculos utilizando 50 mg/L**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 12. **Flóculos utilizando 60 mg/L**



Fuente: elaboración propia.

## ANEXOS

### Anexo 1. Valores de diseño de la rugosidad de tubos

Material	Rugosidad $\epsilon$ (m)	Rugosidad $\epsilon$ (pie)
Vidrio	Liso	Liso
Plástico	$3,0 \times 10^{-7}$	$1,0 \times 10^{-6}$
Tubo extruido; cobre, latón, acero	$1,5 \times 10^{-6}$	$5,0 \times 10^{-6}$
Acero, comercial o soldado	$4,6 \times 10^{-5}$	$1,5 \times 10^{-4}$
Hierro galvanizado	$1,5 \times 10^{-4}$	$5,0 \times 10^{-4}$
Hierro dúctil	$1,2 \times 10^{-4}$	$4,0 \times 10^{-4}$
Hierro dúctil, no recubierto	$2,4 \times 10^{-4}$	$8,0 \times 10^{-4}$
Concreto, bien fabricado	$1,2 \times 10^{-4}$	$4,0 \times 10^{-4}$
Acero remachado	$1,8 \times 10^{-3}$	$6,0 \times 10^{-3}$

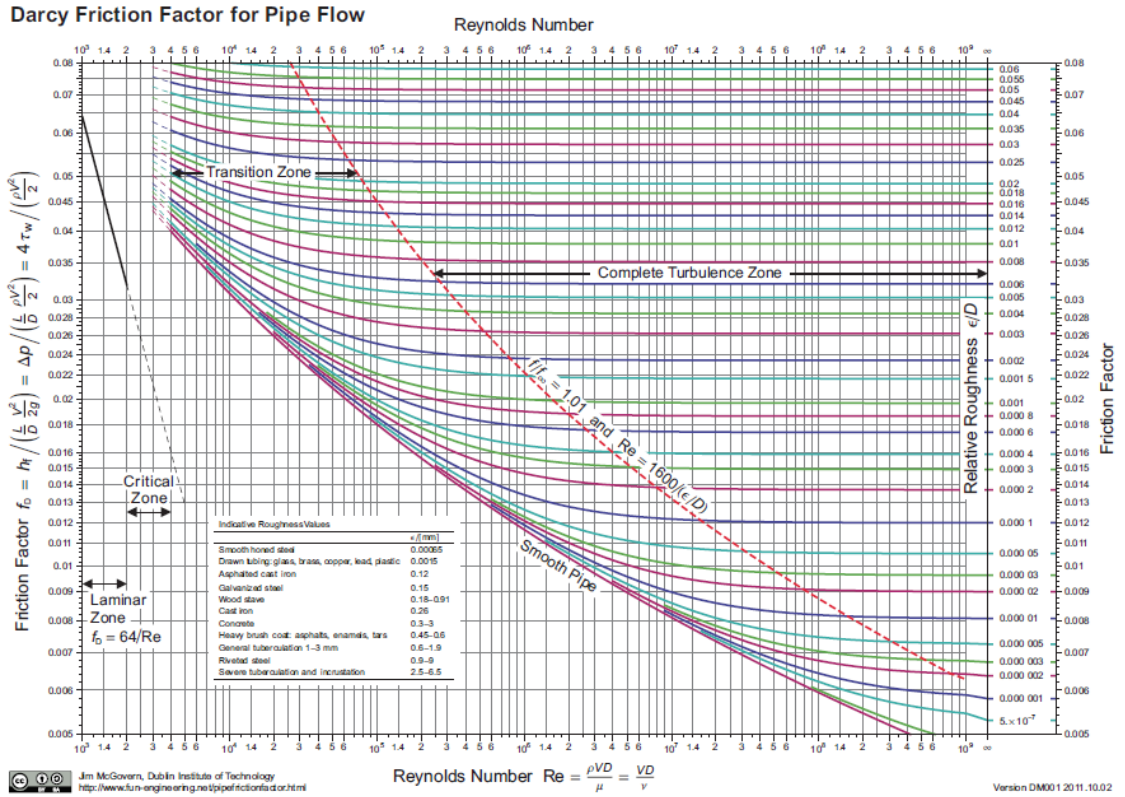
Fuente: MOTT, Robert L. *Mecánica de fluidos*. P. 235

## Anexo 2. Valores de diseño de la rugosidad de tubos

Tuberías de PVC y CPVC – Cédula 40					
Tamaño nominal de tubería (pulg)	Diámetro exterior (pulg)	Grosor mínimo de pared (pulg)	Diámetro interno (pulg)	Peso (lb)	
				PVC	CPVC
1/2	0,840	0,109	0,622	0,16	0,17
3/4	1,050	0,113	0,824	0,21	0,23
1	1,315	0,133	1,049	0,32	0,34
1 1/4	1,660	0,140	1,380	0,43	0,46
1 1/2	1,900	0,145	1,610	0,51	0,55
2	2,375	0,154	2,067	0,68	0,74
2 1/2	2,875	0,203	2,469	1,07	1,18
3	3,500	0,216	3,068	1,41	1,54
4	4,500	0,237	4,026	2,01	2,20
5	5,563	0,258	5,047	2,73	
6	6,625	0,280	6,065	3,53	3,86
8	8,625	0,322	7,981	5,39	5,81
10	10,750	0,365	10,020	7,55	8,24
12	12,750	0,406	11,938	1,001	10,89
14	14,000	0,438	13,124	1,180	
16	16,000	0,500	15,000	1,543	

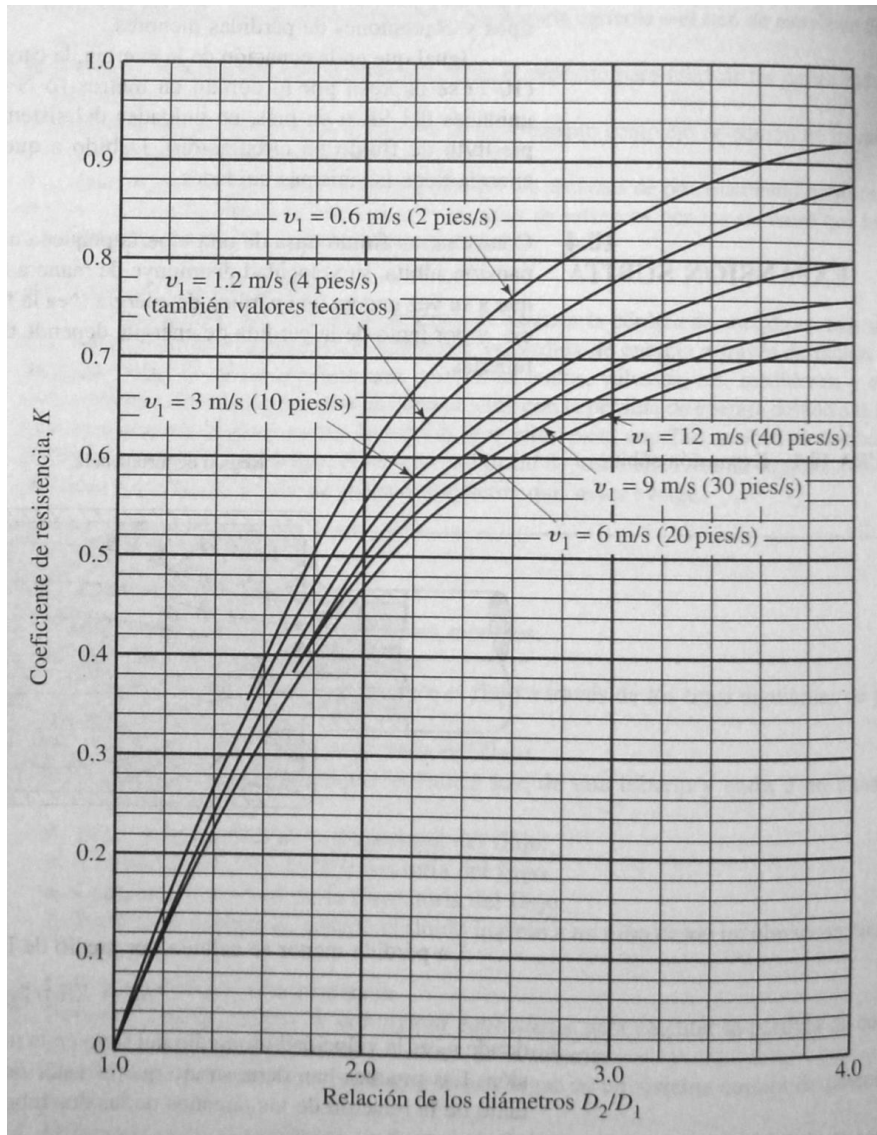
Fuente: ASTM International. Standard Specification for Poly (Vinyl Chloride) (PVC) Plastic Pipe, Schedule 40,80 and 120. D 1785-15.

### Anexo 3. Diagrama de Moody



Fuente: L.F. Moody, *Trans. ASME*, vol. 66, 1944

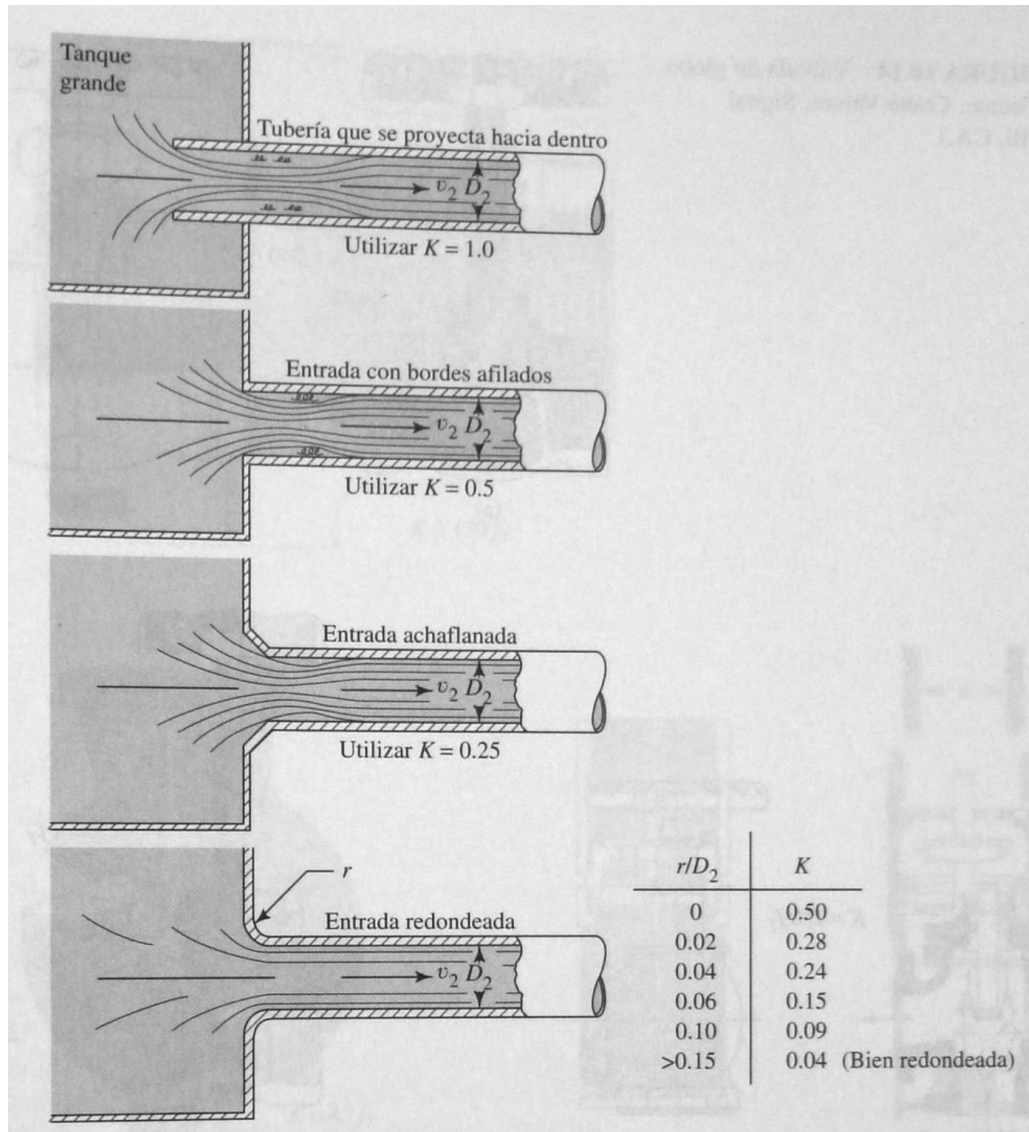
#### Anexo 4. Coeficiente de resistencia para expansión súbita



Fuente: MOTT, Robert L. *Mecánica de fluidos*. P. 282



Anexo 5. **Coefficiente de resistencia para expansión súbita**



Fuente: MOTT, Robert L. *Mecánica de fluidos*. P. 293

Anexo 6. **Resistencia de válvulas y acoplamientos, expresada como longitud equivalente en diámetros de tubería  $L_e/D$**


Tipo	Longitud equivalente en diámetros de tubería $L_e/D$
Válvula de globo—abierta por completo	340
Válvula de ángulo—abierta por completo	150
Válvula de compuerta—abierta por completo	8
— $3/4$ abierta	35
— $1/2$ abierta	160
— $1/4$ abierta	900
Válvula de verificación—tipo giratorio	100
Válvula de verificación—tipo bola	150
Válvula de mariposa—abierta por completo, 2 a 8 pulg	45
—10 a 14 pulg	35
—16 a 24 pulg	25
Válvula de pie—tipo disco de vástago	420
Válvula de pie—tipo disco de bisagra	75
Codo estándar a $90^\circ$	30
Codo a $90^\circ$ de radio largo	20
Codo roscado a $90^\circ$	50
Codo estándar a $45^\circ$	16
Codo roscado a $45^\circ$	26
Vuelta cerrada en retorno	50
Te estándar—con flujo directo	20
—con flujo en el ramal	60

Fuente: MOTT, Robert L. *Mecánica de fluidos*. P. 297

Anexo 7. **Resultados de los análisis físico-químicos de las aguas residuales de los equipos de laboratorio**



**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



---

**ANÁLISIS FÍSICO QUÍMICO DE AGUAS RESIDUALES DE ORIGEN DOMÉSTICO Y/O DESECHOS INDUSTRIALES** **No. 4388**

Orden de trabajo No.: 36079 Informe No. 2 230

INTERESADO:	PABLO CÉSAR MÉNDEZ RODAS, CARNÉ No. 2011 13968	PROYECTO:	Informe final: Diseño de un sistema de recirculación, almacenamiento y tratamiento para los efluentes de los equipos utilizados en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Escuela de Ingeniería Química"
MUESTRA CAPTADA POR:	Interesado	DEPENDENCIA:	FACULTAD DE INGENIERÍA /USAC
MUESTRA CAPTADA EN:	Laboratorio de Operaciones Unitarias -FIUSAC-	FECHA DE RECOLECCIÓN DE LA MUESTRA:	2016-05-25; 09h25min
FUENTE:	Equipo medidor de flujo LOPU	FECHA Y HORA DE LLEGADA AL LABORATORIO:	2016-05-25; 10 h 25 min.
MUNICIPIO:	Guatemala	CONDICIONES DE TRANSPORTE:	Sin refrigeración
DEPARTAMENTO:	Guatemala		

**CARACTERÍSTICAS FÍSICAS**

OLOR: <u>Inodora</u>	SÓLIDOS SEDIMENTABLES: <u>00,00</u> cm <sup>3</sup> /litro en 1 hora
COLOR: <u>19,00</u> unidades	SÓLIDOS SUSPENDIDOS: <u>38,00</u> mg/L.

**DETERMINACIONES QUÍMICAS**

DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (D.B.O. <sub>5</sub> ):	<u>&lt; 5</u>	mg/L.
DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (D.Q.O.):	<u>&lt; 5</u>	mg/L.
FOSFATOS	<u>01,40</u> mg/L.	NITRATOS: <u>09,30</u> mg/L.
POTENCIAL DE HIDRÓGENO (pH):	<u>07,83</u> unidades	


OTRAS DETERMINACIONES: SÓLIDOS DISUELTOS TOTALES 233,00 mg/L. ALCALIDAD 182,00 mg/L. DUREZA 164,00 mg/L. TEMPERATURA 26,00 °C

TÉCNICAS DEL "STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER" DE LA A.P.H.A. - A.W.W.A. - W.E.F. 21<sup>TH</sup> EDITION 2,005. NORMA COGUANOR NGO 4.010 SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES.

Guatemala, 2016-06-10



Vo.Bo. **Ing. Francisco Javier Quiñonez de la Cruz**  
DIRECTOR CII/USAC





**Zedon Much Santos**  
Ing. Químico Col. No. 428 USAC  
MSc. en Ingeniería Sanitaria  
Jefe Técnico Laboratorio

FACULTAD DE INGENIERÍA —USAC—  
Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12  
Teléfono directo: 2418-9115, Planta: 2418-8000 Exts. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121  
Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Continuación del anexo 7.



**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



---

**ANÁLISIS FÍSICO QUÍMICO DE AGUAS RESIDUALES DE ORIGEN DOMÉSTICO Y/O DESECHOS INDUSTRIALES**      **No. 4389**

**Orden de trabajo No.: 36079**

**Informe No. 2 231**

<b>INTERESADO:</b>	PABLO CÉSAR MÉNDEZ RODAS, CARNÉ No. 2011 13968	<b>PROYECTO:</b>	Informe final: Diseño de un sistema de recirculación, almacenamiento y tratamiento para los efluentes de los equipos utilizados en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Escuela de Ingeniería Química
<b>MUESTRA CAPTADA POR:</b>	Interesado	<b>DEPENDENCIA:</b>	FACULTAD DE INGENIERÍA /USAC
<b>MUESTRA CAPTADA EN:</b>	Laboratorio de Operaciones Unitarias -FIUSAC-	<b>FECHA DE RECOLECCIÓN DE LA MUESTRA:</b>	2016-05-25; 09h35min
<b>FUENTE:</b>	Equipo bomba	<b>FECHA Y HORA DE LLEGADA AL LABORATORIO:</b>	2016-05-25; 10 h 25 min.
<b>MUNICIPIO:</b>	Guatemala	<b>CONDICIONES DE TRANSPORTE:</b>	Sin refrigeración
<b>DEPARTAMENTO:</b>	Guatemala		

**CARACTERÍSTICAS FÍSICAS**

<b>OLOR:</b>	Inodora	<b>SÓLIDOS SEDIMENTABLES:</b>	00,00 cm <sup>3</sup> /litro en 1 hora
<b>COLOR:</b>	13,00 unidades	<b>SÓLIDOS SUSPENDIDOS:</b>	01,00 mg/L

**DETERMINACIONES QUÍMICAS**

DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (D.B.O <sub>5</sub> ):	< 5	mg/L
DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (D.Q.O.):	< 5	mg/L
FOSFATOS	00,94 mg/L	NITRATOS: 08,70 mg/L
POTENCIAL DE HIDRÓGENO (pH):	07,60 unidades	

OTRAS DETERMINACIONES: SÓLIDOS DISUELTOS TOTALES 255,00 mg/L. ALCALIDAD 160,00 mg/L. DUREZA 162,00 mg/L. TEMPERATURA 26,00°C

TÉCNICAS DEL "STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER" DE LA A.P.H.A. - A.W.W.A. - W.E.F. 21<sup>TH</sup> EDITION 2.005. NORMA COGUANOR NGO 4.010 SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES.

Guatemala, 2016-06-10

Vo.Bo.   
**Ing. Francisco Javier Quiñonez de la Cruz**  
DIRECTOR CII/USAC




**Zenón Much Santos**  
Ing. Químico Col. No. 4200  
MSc. en Ingeniería Sanitaria  
Jefe Técnico Laboratorio




LABORATORIO UNIFICADO DE INGENIERIA QUIMICA Y MICROBIOLOGIA SANITARIA "DRA. ALBA TABARIN MOLINA" -USAC- GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA —USAC—  
Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12  
Teléfono directo: 2418-9115, Planta: 2418-8000 Exts. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121  
Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Continuación del anexo 7.



**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



---

**ANÁLISIS FÍSICO QUÍMICO DE AGUAS RESIDUALES DE ORIGEN DOMÉSTICO Y/O DESECHOS INDUSTRIALES** No. **4391**

---

Orden de trabajo No.: **36079**

Informe No. **2 232**

INTERESADO:	PABLO CÉSAR MÉNDEZ RODAS, CARNÉ No. 2011 13968	PROYECTO:	Informe final: Diseño de un sistema de recirculación, almacenamiento y tratamiento para los efluentes de los equipos utilizados en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Escuela de Ingeniería Química"
MUESTRA CAPTADA POR:	Interesado	DEPENDENCIA:	FACULTAD DE INGENIERÍA /USAC
MUESTRA CAPTADA EN:	Laboratorio de Operaciones Unitarias -FIUSAC-	FECHA DE RECOLECCIÓN DE LA MUESTRA:	2016-05-25; 09h45min
FUENTE:	Equipo caída de presión		
MUNICIPIO:	Guatemala	FECHA Y HORA DE LLEGADA AL LABORATORIO:	2016-05-25; 10 h 25 min.
DEPARTAMENTO:	Guatemala	CONDICIONES DE TRANSPORTE:	Sin refrigeración

**CARACTERÍSTICAS FÍSICAS**

OLOR:	Inodora	SÓLIDOS SEDIMENTABLES:	00,00 cm <sup>3</sup> /litro en 1 hora
COLOR:	30,00 unidades	SÓLIDOS SUSPENDIDOS:	28,00 mg/L.


**DETERMINACIONES QUÍMICAS**


DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (D.B.O. <sub>5</sub> ):	< 5	mg/L.
DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (D.Q.O.):	< 5	mg/L.
FOSFATOS	00,43 mg/L	NITRATOS: 13,70 mg/L.
POTENCIAL DE HIDRÓGENO (pH):	08,15 unidades	

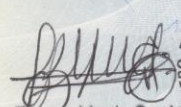
OTRAS DETERMINACIONES: SÓLIDOS DISUELTOS TOTALES 232,00 mg/L. ALCALIDAD 162,00 mg/L. DUREZA 164,00 mg/L. TEMPERATURA 26,00°C

TÉCNICAS DEL "STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER" DE LA A.P.H.A. - A.W.W.A. - W.E.F. 2005. NORMA COGUANOR NGO 4.010 SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES.

Guatemala, 2016-06-10

Vo.Bo.   
Ing. Francisco Javier Quiroz de la Cruz  
DIRECTOR CIUSAC



  
Zenon Much Santos  
Ing. Químico Col. No. 4200  
MSc. en Ingeniería Sanitaria  
Jefe Técnico Laboratorio

FACULTAD DE INGENIERÍA –USAC–  
Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12  
Teléfono directo: 2418-9115, Planta: 2418-8000 Exts. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121  
Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Continuación del anexo 7.



**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



---

**ANÁLISIS FÍSICO QUÍMICO DE AGUAS RESIDUALES DE ORIGEN DOMÉSTICO Y/O DESECHOS INDUSTRIALES**      **No. 4394**

**Orden de trabajo No.: 36079**      **Informe No. 2 233**

<b>INTERESADO:</b>	PABLO CÉSAR MÉNDEZ RODAS, CARNÉ No. 2011 13968	<b>PROYECTO:</b>	Informe final: Diseño de un sistema de recirculación, almacenamiento y tratamiento para los efluentes de los equipos utilizados en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Escuela de Ingeniería Química"
<b>MUESTRA CAPTADA POR:</b>	Interesado	<b>DEPENDENCIA:</b>	FACULTAD DE INGENIERÍA /USAC
<b>MUESTRA CAPTADA EN:</b>	Laboratorio de Operaciones Unitarias -FIUSAC-	<b>FECHA DE RECOLECCIÓN DE LA MUESTRA:</b>	2016-05-25; 09h50min
<b>FUENTE:</b>	Equipo intercambiador de calor TC	<b>FECHA Y HORA DE LLEGADA AL LABORATORIO:</b>	2016-05-25; 10 h 25 min.
<b>MUNICIPIO:</b>	Guatemala	<b>CONDICIONES DE TRANSPORTE:</b>	Sin refrigeración

**CARACTERÍSTICAS FÍSICAS**

<b>OLOR:</b>	Inodora	<b>SÓLIDOS SEDIMENTABLES:</b>	00,00    cm <sup>3</sup> /litro en 1 hora
<b>COLOR:</b>	18,00    unidades	<b>SÓLIDOS SUSPENDIDOS:</b>	00,04    mg/L

**DETERMINACIONES QUÍMICAS**

DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (D.B.O. <sub>5</sub> ):	< 5	mg/L
DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (D.Q.O.):	< 5	mg/L
FOSFATOS	00,33    mg/L	NITRATOS:    09,00    mg/L
POTENCIAL DE HIDRÓGENO (pH):	07,65    unidades	

OTRAS DETERMINACIONES: SÓLIDOS DISUELTOS TOTALES 234.00 mg/L. ALCALIDAD 166.00 mg/L. DUREZA 174.00 mg/L. TEMPERATURA 26.00°C

TÉCNICAS DEL "STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER" DE LA A.P.H.A. - A.W.W.A. - W.E.F. ORGANIZATION 2.005. NORMA COGUANOR NGO 4.010 SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES.

Guatemala, 2016-06-10

Vo.Bo. 

**Ing. Francisco Javier Quiñonez de la Cruz**  
**DIRECTOR CI/USAC**




**Zedon Mueh Santos**  
Ing. Químico Col. No. 420  
MSc. en Ingeniería Sanitaria  
Jefe Técnico Laboratorio




FACULTAD DE INGENIERÍA —USAC—  
Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12  
Teléfono directo: 2418-9115, Planta: 2418-8000 Exts. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121  
Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Continuación del anexo 7.



**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



---

**ANÁLISIS FÍSICO QUÍMICO DE AGUAS RESIDUALES DE ORIGEN DOMÉSTICO Y/O DESECHOS INDUSTRIALES** **No. 4392**

Orden de trabajo No.: **36079** Informe No. **2 234**

INTERESADO:	PABLO CÉSAR MÉNDEZ RODAS, CARNÉ No. 2011 13968	PROYECTO:	Informe final: Diseño de un sistema de recirculación, almacenamiento y tratamiento para los efluentes de los equipos utilizados en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Escuela de Ingeniería Química"
MUESTRA CAPTADA POR:	Interesado	DEPENDENCIA:	FACULTAD DE INGENIERIA /USAC
MUESTRA CAPTADA EN:	Laboratorio de Operaciones Unitarias -FIUSAC-	FECHA DE RECOLECCIÓN DE LA MUESTRA:	2016-05-25; 10h05min
FUENTE:	Equipo intercambiador de calor CT	FECHA Y HORA DE LLEGADA AL LABORATORIO:	2016-05-25; 10 h 25 min.
MUNICIPIO:	Guatemala	CONDICIONES DE TRANSPORTE:	Sin refrigeración
DEPARTAMENTO:	Guatemala		

**CARACTERÍSTICAS FÍSICAS**

OLOR:	Inodora	SÓLIDOS SEDIMENTABLES:	00,00 cm <sup>3</sup> /litro en 1 hora
COLOR:	18,00 unidades	SÓLIDOS SUSPENDIDOS:	12,00 mg/L

**DETERMINACIONES QUÍMICAS**


DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (D.B.O. <sub>5</sub> ):	< 5		mg/L
DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (D.Q.O.):	< 5		mg/L
FOSFATOS	00,23 mg/L	NITRATOS:	14,20 mg/L
POTENCIAL DE HIDRÓGENO (pH):	07,58 unidades		

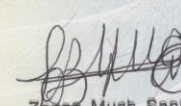
OTRAS DETERMINACIONES: SÓLIDOS DISUELTOS TOTALES 230,00 mg/L. ALCALIDAD 164,00 mg/L. DUREZA 164,00 mg/L. TEMPERATURA 20,00°C

TÉCNICAS DEL "STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER" DE LA A.P.H.A. - A.W.W.A. - W.E.F. 21<sup>TH</sup> EDITION 2,005. NORMA COGUANOR NGO 4.010 SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES.

Guatemala, 2016-06-10

Vo.Bo.   
Ing. Francisco Javier Quiñonez de la Cruz  
DIRECTOR CII/USAC



  
Zenon Mueh Santos  
Ing. Químico Col. No. 420  
MSc. en Ingeniería Sanitaria  
Jefe Técnico Laboratorio

FACULTAD DE INGENIERIA —USAC—  
Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12  
Teléfono directo: 2418-9115, Planta: 2418-8000 Exts. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121  
Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

**Anexo 8. Características físicas y organolépticas que debe tener el agua para consumo humano**

Características	LMA	LMP
Color	5,0 u	35,0 u <sup>(a)</sup>
Olor	No rechazable	No rechazable
Turbiedad	5,0 UNT	15,0 UNT <sup>(b)</sup>
Conductividad eléctrica	750 $\mu$ S/cm	1500 $\mu$ S/cm <sup>(d)</sup>
Potencial de hidrógeno	7,0-7,5	6,5-8,5 <sup>(c) (d)</sup>
Sólidos totales disueltos	500,0 mg/L	1000,0 mg/L

(a) Unidades de color en la escala de platino-cobalto  
(b) Unidades nefelométricas de turbiedad (UNT).  
(c) En unidades de pH  
(d) Límites establecidos a una temperatura de 25°C.

Fuente: Norma COGUANOR NTG 29001.

**Anexo 9. Características químicas que debe tener el agua para consumo humano**

Características	LMA (mg/L)	LMP (mg/L)
Cloro residual libre <sup>(a)</sup>	0,5	1,0
Cloruro (Cl <sup>-</sup> )	100,0	250,0
Dureza Total (CaCO <sub>3</sub> )	100,0	500,0
Sulfato (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	100,0	250,0
Aluminio (Al)	0,050	0,100
Calcio (Ca)	75,0	150,0
Cinc (Zn)	3,0	70,0
Cobre (Cu)	0,050	1,500
Magnesio (Mg)	50,0	100,0
Manganeso total (Mn)	0,1	0,4
Hierro total (Fe) <sup>(b)</sup>	0,3	-----

a) El Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social será el ente encargado de indicar los límites mínimos y máximos de cloro residual libre según sea necesario o en caso de emergencia.  
b) No se incluye el LMP porque la OMS establece que no es un riesgo para la salud del consumidor a las concentraciones normales en el agua para consumo humano, sin embargo el gusto y apariencia del agua pueden verse afectados a concentraciones superiores al LMA.

Fuente: Norma COGUANOR NTG 29001.



Anexo 10.

**Límites máximos permisibles para aguas residuales**

Parámetros	Dimensionales	Valores iniciales	Fecha máxima de cumplimiento			
			Dos de mayo de dos mil once	Dos de mayo de dos mil quince	Dos de mayo de dos mil veinte	Dos de mayo de dos mil veinticuatro
			Etapa			
			Uno	Dos	Tres	Cuatro
Temperatura	Grados Celsius	< 40	< 40	< 40	< 40	< 40
Grasas y aceites	Miligramos por litro	1500	200	100	60	60
Materia flotante	Ausencia/presencia	Presente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente
Sólidos suspendidos	Miligramos por litro	3500	1500	700	400	200
Nitrógeno total	Miligramos por litro	1400	180	150	80	40
Fósforo total	Miligramos por litro	700	75	40	20	10
Potencial de hidrógeno	Unidades de potencial de hidrógeno	6 a 9	6 a 9	6 a 9	6 a 9	6 a 9
Coliformes fecales	Número más probable en cien mililitros	< 1x10 <sup>8</sup>	< 1x10 <sup>6</sup>	< 1x10 <sup>5</sup>	< 1x10 <sup>4</sup>	< 1x10 <sup>4</sup>
Arsénico	Miligramos por litro	1	0.5	0.1	0.1	0.1
Cadmio	Miligramos por litro	1	0.4	0.1	0.1	0.1
Cianuro total	Miligramos por litro	6	3	1	1	1
Cobre	Miligramos por litro	4	4	3	3	3
Cromo hexavalente	Miligramos por litro	1	0.5	0.1	0.1	0.1
Mercurio	Miligramos por litro	0.1	0.1	0.02	0.02	0.01
Níquel	Miligramos por litro	6	4	2	2	2
Plomo	Miligramos por litro	4	1	0.4	0.4	0.4
Zinc	Miligramos por litro	10	10	10	10	10
Color	Unidades platino cobalto	1500	1300	1000	750	500
Demanda bioquímica de oxígeno	Miligramos por litro	3500	1500	750	450	200

Fuente: Acuerdo Gubernativo 236-2006.

