



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

**COMPARACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA DE UN EQUIPO DE FILTRACIÓN DE AGUA
DE TECNOLOGÍA VORTISAND EN RELACIÓN CON UN EQUIPO DE
FILTRACIÓN DE AGUA CONVENCIONAL EN UNA EMBOTELLADORA DE BEBIDAS**

Sindi Fabiola Reyes

Asesorado por el Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez

Guatemala, agosto de 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**COMPARACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA DE UN EQUIPO DE FILTRACIÓN DE AGUA
DE TECNOLOGÍA VORTISAND EN RELACIÓN CON UN EQUIPO DE
FILTRACIÓN DE AGUA CONVENCIONAL EN UNA EMBOTELLADORA DE BEBIDAS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

SINDI FABIOLA REYES

ASESORADO POR EL ING. VÍCTOR MANUEL MONZÓN VALDEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA QUÍMICA

GUATEMALA, AGOSTO DE 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Narda Lucía Pacay Barrientos
VOCAL V	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Federico Guillermo Salazar Rodríguez
EXAMINADOR	Ing. Otto Raúl De León De Paz
EXAMINADOR	Ing. Jorge Mario Estrada Asturias
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

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:

**COMPARACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA DE UN EQUIPO DE FILTRACIÓN DE AGUA
DE TECNOLOGÍA VORTISAND EN RELACIÓN CON UN EQUIPO DE
FILTRACIÓN DE AGUA CONVENCIONAL EN UNA EMBOTELLADORA DE BEBIDAS**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 22 de mayo de 2014.


Sindi Fabiola Reyes

Guatemala, 26 de marzo de 2014

Ingeniero

Víctor Manuel Monzón Valdez

Director de escuela de Ingeniería química

Universidad de San Carlos de Guatemala

Estimado Ing. Monzón

Reciba un cordial saludo de mi parte. El motivo de la presente es para hacer de su conocimiento que he aceptado asesorar a la estudiante **Sindi Fabiola Reyes** carné universitario No. 200819351, en el planteamiento y ejecución de su tesis para optar al título de Ingeniera Química, denominada: **"COMPARACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA DE UN EQUIPO DE FILTRACIÓN DE AGUA DE TECNOLOGÍA VORTISAND EN RELACIÓN CON UN EQUIPO DE FILTRACIÓN DE AGUA CONVENCIONAL EN UNA EMBOTELLADORA DE BEBIDAS"** y he aprobado el informe final de trabajo de graduación realizado por la estudiante.

Me suscribo a usted, esperando su aprobación.

Agradeciendo su atención a la presente.

Atentamente,



Ingeniero Víctor Manuel Monzón Valdez

Asesor de tesis

Escuela de Ingeniería Química, USAC

Ing. Qco. Víctor Manuel Monzón Valdez
Colegiado No. 656



Guatemala, 02 de julio de 2014
Ref. EIQ.TG-IF.021.2014

Ingeniero
Víctor Manuel Monzón Valdez
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Monzón:

Como consta en el registro de evaluación del informe final EIQ-PRO-REG-007 correlativo **011-2013** le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN

Solicitado por la estudiante universitaria: **Sindi Fabiola Reyes**.
Identificada con número de carné: **2008-19351**.

Previo a optar al título de **INGENIERA QUÍMICA**.

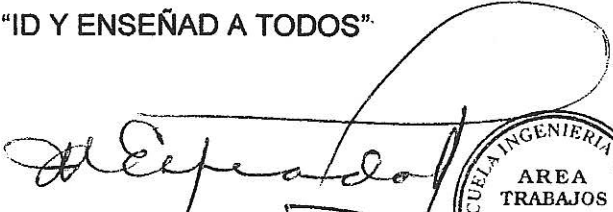
Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

COMPARACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA DE UN EQUIPO DE FILTRACIÓN DE AGUA DE TECNOLOGÍA VORTISAND EN RELACIÓN CON UN EQUIPO DE FILTRACIÓN DE AGUA CONVENCIONAL EN UNA EMBOTELLADORA DE BEBIDAS

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

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

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"


Ing. Jorge Mario Estrada Asturias
COORDINADOR DE TERNA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo





Ref.EIQ.TG.139.2014

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación de la estudiante, **SINDI FABIOLA REYES** titulado: "**COMPARACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA DE UN EQUIPO DE FILTRACIÓN DE AGUA DE TECNOLOGÍA VORTISAND EN RELACIÓN CON UN EQUIPO DE FILTRACIÓN DE AGUA CONVENCIONAL EN UNA EMBOTELLADORA DE BEBIDAS**". Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.


Ing. Víctor Manuel Moazón Valdez
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, agosto 2014

Cc: Archivo
VMMV/ale

Universidad de San Carlos
de Guatemala



Facultad de Ingeniería
Decanato

DTG. 387.2014

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: **COMPARACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA DE UN EQUIPO DE FILTRACIÓN DE AGUA DE TECNOLOGÍA VORTISAND EN RELACIÓN CON UN EQUIPO DE FILTRACIÓN DE AGUA CONVENCIONAL EN UNA EMBOTELLADORA DE BEBIDAS**, presentado por la estudiante universitaria **Sindi Fabiola Reyes**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
Decano

Guatemala, 7 de agosto de 2014

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

Dios

Por darme la confianza, la fe y la fortaleza necesaria para culminar esta etapa tan importante de mi vida, y por protegerme en cada paso de ella haciendo de mi fe el único instrumento necesario para seguir adelante.

Mi mamá

Josefina Reyes Colindres. Por ser el pilar en mi vida, la persona a la que más quiero, respeto y admiro, y por apoyarme en cada momento dándome siempre su amor, su confianza y su comprensión. Te quiero mucho.

Mis abuelos

Herminio Reyes y Amanda Lidia Colindres, en agradecimiento por cada uno de sus consejos, su apoyo incondicional y su infinito cariño.

Mi ángel de la guarda

Angela Reyes Colindres, por estar presente en cada momento de mi vida, por celebrar a mi lado los triunfos y ayudarme a levantarme de las caídas.

Mi madrina

Guadalupe Reyes Colindres, por ser una fuente de inspiración profesional, espiritual y personal para mí y por todo su apoyo brindado durante mi carrera.

Mis tías

Cristina, Piedad, Amanda y Silvia, por acompañarme en cada etapa de mi vida y de mi carrera, por su apoyo incondicional y su inmensurable cariño.

Mi tío

Francisco Reyes Colindres, por apoyarme incondicionalmente y ser una figura paterna en mi vida.

Mis tíos

Mario, Ezequiel y Rafael Reyes (q.e.p.d.), porque sé que donde quiera que estén, me acompañan con mucha alegría al cumplir esta meta tan importante en mi vida.

Mis primos y primas

Por ser como mis hermanos, por celebrar conmigo mis triunfos, y por ayudarme a levantarme en los fracasos. Los quiero mucho.

Mi novio

Mario Maldonado, por su amor y su apoyo incondicional, y por estar a mi lado desde el inicio hasta el final de este viaje.

AGRADECIMIENTOS A:

**La Universidad de San
Carlos de Guatemala**

Por darme la oportunidad de concluir mi carrera profesional, y por darme las herramientas necesarias para poner en práctica los conocimientos adquiridos a nivel profesional.

Facultad de Ingeniería

Por ser una importante influencia en mi carrera, por proveerme los recursos necesarios para enfrentarme a los retos del día a día en el área profesional.

**Mis amigos de la
facultad**

Karla Mis, Vania Godoy, Eddie Raxón, José Ramás, Gabriela Jo, Jacobo Martínez y Damián Ochoa. Porque mi vida universitaria no habría sido la misma si no hubiera tenido el privilegio de compartirla con ustedes.

**Lic. Juan Luis Martínez,
Ing. Julio García,
Ing. Víctor Monzón**

Por su apoyo incondicional en la realización del trabajo final de graduación.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN.....	XI
OBJETIVOS.....	XIII
HIPÓTESIS.....	XIV
INTRODUCCIÓN	XVII
1. ANTECEDENTES	1
2. MARCO TEÓRICO.....	3
2.1. Filtración del agua	3
2.1.1. Mecanismos responsables de la filtración	3
2.1.2. Etapas del proceso de filtración.....	4
2.1.2.1. Transporte de partículas dentro de los poros	4
2.1.2.2. Adherencia de granos al medio	6
2.1.3. Factores que influyen en la filtración	7
2.1.3.1. Tipo de medio filtrante	7
2.1.3.2. Velocidad de filtración.....	7
2.1.3.3. Tipo de suspensión.....	7
2.2. Filtros convencionales de grava, carbón activado y filtros pulidores.....	8
2.2.1. Ciclos de filtración.....	9
2.2.2. Selección de las capas filtrantes.....	11

2.3.	Filtro Vortisand	11
2.4.	Sistemas de medición de la turbidez.....	13
2.4.1.	Medición de la turbidez.....	13
2.4.2.	Instrumentos para la lectura de la turbidez.....	15
2.4.2.1.	Turbidímetro digital.....	15
2.4.3.	Turbiedades permisibles en el agua filtrada	16
2.5.	Propiedades fisicoquímicas del agua filtrada	16
2.5.1.	Conductividad.....	16
2.5.2.	Dureza.....	17
2.5.2.1.	Dureza temporal.....	17
2.5.2.2.	Dureza permanente.....	18
2.5.2.3.	Método de determinación de dureza	18
2.5.2.4.	Reacciones.....	18
2.5.2.5.	Procedimiento	19
2.5.2.6.	Cálculos.....	19
2.5.3.	PH	20
2.5.4.	Alcalinidad.....	21
2.5.4.1.	Procedimiento	22
2.5.4.2.	Cálculos.....	22
2.6.	Evaluación de la reducción de los costos de operación	23
2.6.1.	Costo de agua en retrolavados	23
2.6.1.1.	Costo de agua en retrolavados de filtros de grava.....	24
2.6.1.2.	Costo de agua en retrolavados de filtros de carbón.....	24
2.6.1.3.	Costo de agua en retrolavados de filtros pulidores	25
2.6.1.4.	Costo total de agua en retrolavados.....	26
2.6.2.	Gasto de vapor en retrolavados	26

	2.6.2.1.	Gasto de vapor en retrolavados de filtros de carbón	27
3.		DISEÑO METODOLÓGICO	29
	3.1.	Variables.....	29
	3.2.	Delimitación del campo de estudio	30
	3.3.	Recursos humanos disponibles.....	30
	3.4.	Recursos materiales disponibles	31
	3.4.1.	Equipo	31
	3.4.2.	Materia prima.....	31
	3.5.	Técnica cualitativa o cuantitativa	32
	3.5.1.	Comparación de la eficiencia de los filtros.....	32
	3.5.2.	Comparación de las propiedades fisicoquímicas....	32
	3.5.3.	Evaluación de la reducción de costos de operación.....	33
	3.6.	Recolección y ordenamiento de la información	33
	3.6.1.	Comparación de la eficiencia de los filtros.....	33
	3.6.2.	Comparación de las propiedades fisicoquímicas del agua.....	34
	3.6.3.	Evaluación de la reducción de los costos de operación.....	34
	3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información.....	35
	3.8.	Análisis estadístico	53
	3.8.1.	Medidas de dispersión.....	53
	3.8.1.1.	Media de una muestra	53
	3.8.1.2.	Desviación estándar	54
	3.8.1.3.	Contraste de significación (análisis de varianza).....	54

4.	RESULTADOS.....	61
4.1.	Evaluación de la eficiencia del sistema en función de la turbidez de salida en cada etapa	61
4.2.	Comparación de las propiedades fisicoquímicas obtenidas en cada etapa de filtración para ambos sistemas	63
4.2.1.	Comparación de pH	63
4.2.2.	Comparación de conductividad	65
4.2.3.	Comparación de alcalinidad	66
4.2.4.	Comparación de dureza del agua	67
4.2.5.	Comparación de cloro libre.....	68
4.3.	Evaluación de la reducción de costos de operación en retrolavados	69
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	71
	CONCLUSIONES.....	77
	RECOMENDACIONES	79
	BIBLIOGRAFÍA.....	81
	APÉNDICES.....	83
	ANEXOS.....	87

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Ciclo de filtrado después del retrolavado	10
2.	Filtro Vortisand	12
3.	Turbidez obtenida con ambos sistemas	61
4.	PH: convencional <i>versus</i> Vortisand.....	64
5.	Conductividad: convencional <i>versus</i> Vortisand	65
6.	Alcalinidad: convencional <i>versus</i> Vortisand.....	66
7.	Dureza del agua: convencional <i>versus</i> Vortisand.....	67
8.	Cloro libre: convencional <i>versus</i> Vortisand.....	68

TABLAS

I.	Interpretación de la dureza.....	18
II.	Variables involucradas	29
III.	Turbidez sistema convencional	35
IV.	Turbidez sistema Vortisand.....	36
V.	Propiedades fisicoquímicas sistema convencional	37
VI.	Promedio propiedades fisicoquímicas sistema convencional.....	39
VII.	Propiedades fisicoquímicas sistema Vortisand	39
VIII.	Promedio propiedades fisicoquímicas sistema Vortisand	41
IX.	Gasto de agua en retrolavados de filtros pulidores día 1	42
X.	Gasto de agua en retrolavados filtros pulidores día 2	43
XI.	Gasto de agua en retrolavados filtros pulidores día 3	44

XII.	Gasto de agua en retrolavados filtros pulidores día 4.....	45
XIII.	Gasto de agua en retrolavados filtros pulidores día 5.....	46
XIV.	Gasto de agua retrolavados filtros de carbón convencional	47
XV.	Gasto de vapor retrolavados pulidores sistema convencional	50
XVI.	Gasto de vapor retrolavados filtros de carbón convencional	51
XVII.	Gasto de vapor retrolavados carbón y pulidores Vortisand	51
XVIII.	Costo por bombeo de agua en retrolavados.....	52
XIX.	pH y conductividad: entrada	57
XX.	Alcalinidad, dureza y cloro: entrada	58
XXI.	pH y conductividad: salida	59
XXII.	Alcalinidad, dureza y cloro: salida.....	60
XXIII.	Identificación de series, figura 3.....	62
XXIV.	Eficiencia de los sistemas de filtración.....	62
XXV.	Identificación de series, figura 4.....	64
XXVI.	Identificación de series, figura 5.....	65
XXVII.	Identificación de series, figura 6.....	66
XXVIII.	Identificación de series, figura 7.....	67
XXIX.	Identificación de series, figura 8.....	68
XXX.	Comparación económica de los sistemas de filtración	69

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
CaCO₃	Carbonato de calcio
EG	Entrada filtro de grava
EV	Entrada Vortisand
kWh	Kilowatt/hora
m³	Metros cúbicos
mg/L	Miligramos por litro
mS/cm	Microsiemens por centímetro
Q	Quetzales
SC	Salida filtros de carbón
SG	Salida filtros de grava
SP	Salida filtros pulidores
SV	Salida Vortisand
s	Segundos
t	Tiempo (horas)
NTU	Unidades nefelométricas de turbidez

GLOSARIO

Alcalinidad	Medida de la cantidad de sales básicas disueltas en el agua, se cuantifica por medio de titulaciones ácido-base y generalmente se expresa en miligramos por litro de CaCO_3 . Da una referencia de la neutralidad relativa del agua potabilizada.
Carbón activado	Material de filtración utilizado para eliminar el cloro libre en el agua, y asegurar de esta forma su potabilidad.
Conductividad	La conductividad de una sustancia se define como la habilidad o poder de conducir o transmitir calor, electricidad o sonido. Es una medida de la cantidad de iones disueltos en el agua, pues la conductividad es directamente proporcional a la concentración de iones. Se mide utilizando un conductímetro y generalmente se expresa en microsiemes por centímetro (mS/cm).
Filtración	Técnica utilizada para eliminar partículas floculantes de un fluido, haciéndolo pasar por un lecho filtrante de poros más pequeños que las partículas suspendidas para que éstas, como consecuencia del arrastre, se queden atrapadas en él.

Retrolavados

Procedimiento de limpieza utilizado para eliminar residuos en los lechos de filtrado. La palabra Retro-Lavado se refiere a un flujo de agua a contracorriente, que asegura la eliminación de todas las partículas que quedaron atrapadas durante el ciclo de filtrado.

Turbidez

Es la falta de transparencia en un líquido debido a la presencia de partículas en suspensión. Se mide utilizando un turbidímetro y las unidades son NTU (Unidades turbidimétricasnefelométricas).

Vortisand

Equipo de filtración que utiliza la generación de un vórtice en la entrada del filtro como ventaja técnica, pues este vórtice provoca que el agua a su paso por el lecho filtrante, esté relativamente limpia. Posee también un sistema de retrolavados automáticos que genera una considerable reducción de los costos de operación.

RESUMEN

Una embotelladora de agua purificada considera el cambio del sistema de filtración actual debido a las ventajas técnicas y económicas que el nuevo ofrece.

A partir de esto, se realiza una comparación entre ambos para determinar la viabilidad del proyecto, tomando como primicia una significativa reducción de los costos de operación como resultado del cambio de los retrolavados manuales del sistema convencional por los retrolavados automáticos del sistema Vortisand, una mayor eficiencia de filtrado evaluada en función de la turbidez, y las mismas tendencias presentadas en la variación de las propiedades fisicoquímicas pH, conductividad, alcalinidad, dureza y cloro para ambos sistemas.

Se tomaron 15 muestras de agua para cada etapa del sistema en ambos sistemas, y se procedió a evaluar en cada una de ellas las propiedades fisicoquímicas mencionadas anteriormente y la turbidez de salida en cada etapa. Asimismo, se evaluó el gasto de agua utilizado para los retrolavados en cada uno de los sistemas, los kilowatt por hora por bombeo de agua y el gasto de vapor utilizado para el calentamiento del agua.

Con los resultados obtenidos, se concluyó que el cambio del sistema convencional por el sistema Vortisand es favorable dado que la eficiencia en función de la turbidez es mayor, se obtiene la misma tendencia con las propiedades fisicoquímicas del agua filtrada y se observa una notable reducción económica con los el cambio de los retrolavados en el sistema.

OBJETIVOS

General

Comparar técnica y económicamente un equipo de filtración de agua de tecnología Vortisand en relación con un sistema de filtración convencional instalada en una embotelladora de bebidas.

Específicos

1. Comparar la eficiencia del equipo de filtración de tecnología Vortisand, respecto del sistema de filtración de tecnología convencional a partir del análisis de turbidez del agua para ambos equipos.
2. Comparar las propiedades fisicoquímicas alcalinidad, conductividad, dureza y cloro libre del agua filtrada obtenida con el sistema convencional y el sistema Vortisand de filtración.
3. Comparar los costos de operación del proceso de filtración del sistema convencional en cuanto a los retrolavados manuales, con los costos de operación del sistema Vortisand en cuanto a los retrolavados automáticos.

HIPÓTESIS

La utilización del filtro Vortisand presenta una significativa reducción de costos de operación, porcentaje de eficiencia de reducción de turbidez mayor que el sistema convencional y para 5 parámetros fisicoquímicos presenta iguales o mejores valores que el sistema convencional.

Hipótesis nula:

H_{o_1} = los costos de operación de retrolavados obtenidos con el sistema Vortisand, son iguales que los obtenidos con el sistema de filtración convencional.

H_{o_2} = no existe diferencia significativa entre las propiedades fisicoquímicas obtenidas en el agua de entrada del filtro de grava con el sistema convencional comparadas con las del sistema Vortisand.

H_{o_3} = no existe diferencia significativa entre las propiedades fisicoquímicas obtenidas en el agua filtrada con el sistema convencional comparadas con las obtenidas para el sistema Vortisand.

Hipótesis alternativa:

H_{i_2} = los costos de operación de retrolavados obtenidos con el sistema Vortisand, son significativamente menores que los obtenidos con el sistema de filtración convencional.

H_{i_2} = existe diferencia significativa entre las propiedades fisicoquímicas obtenidas en el agua de entrada del filtro de grava con el sistema convencional comparadas con las del sistema Vortisand.

H_{i_2} = existe diferencia significativa entre las propiedades fisicoquímicas obtenidas en el agua filtrada con el sistema convencional comparadas con las obtenidas para el sistema Vortisand.

INTRODUCCIÓN

El proceso de filtración de agua se lleva a cabo actualmente a nivel industrial, por medio de sistemas convencionales de filtración; estos constan de filtros de grava, carbón y filtros pulidores. El agua después de su paso por el sistema de filtración pasa por un tratamiento de desinfección, en el cual se aseguran las propiedades microbiológicas del agua, por lo tanto los parámetros de interés a obtener en el agua filtrada son: turbidez y parámetros fisicoquímicos.

La eficiencia de la filtración del agua se determina en función de la turbidez de entrada y de salida de esta, y de la obtención de parámetros fisicoquímicos en el agua que se encuentren dentro de los estándares. Actualmente, existe una nueva tecnología en los sistemas de filtración basada en el mismo principio técnico de funcionamiento: un lecho filtrante en el cual se quedan retenidos los sólidos en suspensión del agua; la diferencia radica en que dicho sistema, llamado Vortisand, genera un vórtice en el agua como resultado de la fuerza centrífuga, lo que obliga a las partículas a depositarse en las paredes del recipiente, por lo que el agua a su paso por el lecho filtrante ya está relativamente limpia.

El sistema ofrece, además del incremento en la eficiencia, la obtención de al menos las mismas propiedades fisicoquímicas en el agua filtrada y una reducción en los costos de operación. Sin embargo, es necesario realizar una comparación técnica y económica de todo el sistema de filtración, es decir, tomando en cuenta las demás etapas del sistema dado que el sistema Vortisand es solamente un filtro de grava.

Para asegurar las propiedades fisicoquímicas y la turbidez de salida total, se evaluó también el agua de salida de los filtros de carbón y de los filtros pulidores, y de ésta manera se determinó la eficiencia de ambos sistemas.

La embotelladora de bebidas tiene la opción de sustituir el sistema convencional de filtración por el sistema Vortisand, es por ello que se realizó una comparación técnica y económica entre ambos sistemas para verificar la factibilidad de dicha sustitución.

Se tomaron muestras de agua a la entrada del sistema y a la salida de cada uno de los procesos de filtración, y se evaluó, como se indicó anteriormente, la turbidez del agua y las propiedades fisicoquímicas de la misma. Asimismo, se cuantificó el agua utilizada para los retrolavados de cada uno de los sistemas, y en función de esta los kilowatts por hora utilizados para el bombeo de la misma, dependiendo de la duración de cada retrolavado.

En los filtros de carbón y en los filtros pulidores se utiliza agua a 60 grados centígrados para realizar los retrolavados, temperatura que se obtiene con el paso del agua por un intercambiador de calor que trabaja con vapor vivo de caldera, este paso representa también una variación en los costos de operación.

Los resultados de turbidez se presentaron como porcentajes de eficiencias de los filtros, observando que el sistema Vortisand posee un notable incremento en la misma; las propiedades fisicoquímicas se presentan en gráficas, con lo cual se puede observar que estas mantienen la misma tendencia de variación en función de la etapa del sistema para ambos y los costos de operación se presentan en un resumen anual de reducción como consecuencia del cambio del sistema convencional de filtración por el sistema Vortisand.

1. ANTECEDENTES

El proceso de filtración de agua a nivel industrial, actualmente se lleva a cabo utilizando sistemas convencionales, logrando a través de este la calidad deseada en el agua filtrada en cuanto a turbidez y propiedades fisicoquímicas, previo al paso de esta por el proceso de desinfección. El sistema convencional de filtrado está compuesto por filtros de grava, filtros de carbón activado y filtros pulidores. Un flujo de agua, se hace pasar por cada uno de los filtros y en cada lecho de filtrado van quedando atrapadas las partículas floculantes del agua.

Como resultado de la filtración del agua, los lechos de filtrado van quedando impregnados de partículas, llegando a acumular en la superficie del lecho filtrante una pequeña capa de estas. Tanto las partículas que quedan impregnadas en los lechos como la acumulación de estas en la superficie debe removerse al completar el ciclo de filtrado.

En cuanto a los filtros de grava y carbón, esta limpieza se efectúa realizando retrolavados semanales, en los cuales se hace pasar un flujo de agua a contracorriente con el lecho filtrante para remover todas las partículas depositadas; para los filtros de grava el agua es utilizada a temperatura ambiente, en tanto que para los filtros de carbón activado se utiliza agua a 80 grados Celsius. Los retrolavados de los filtros pulidores, se realiza diariamente utilizando un flujo de agua a 80 grados Celsius a contracorriente durante 1 hora.

Actualmente, se han realizado investigaciones sobre la filtración de agua y se ha diseñado un nuevo sistema de filtración denominado Vortisand.

El filtro Vortisand utiliza el mismo principio técnico de funcionamiento, el paso de agua por un lecho filtrante que elimina las partículas floculantes.

La diferencia de este con los filtros convencionales consiste en la formación de un vórtice en el agua como resultado de la fuerza centrífuga, causando en el agua el denominado efecto vórtice, lo cual obliga a las partículas floculantes a depositarse en las paredes del tanque, cuyo resultado es el paso de agua relativamente limpia por el lecho de filtrado; esto provoca que la calidad del agua filtrada sea mucho mejor en cuanto a turbidez, pues los filtros convencionales tienen la capacidad de filtrar partículas de hasta 1 micrones y los filtros Vortisand hasta 0,45 micrones.

Asimismo, como resultado del efecto vórtice la capa de partículas que se depositan sobre el lecho de filtrado tiene un espesor mucho menor, dando así una turbidez menor en el agua filtrada. Con dicho sistema de filtrado las propiedades fisicoquímicas obtenidas en el agua filtrada no se ven afectadas. Además de esto, el sistema ofrece una reducción en los costos de operación debido a los retrolavados automáticos que realiza dicho sistema.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Filtración del agua

El objetivo básico de la filtración es separar las partículas y microorganismos objetables, que no han quedado retenidos en los procesos de coagulación y sedimentación.

2.1.1. Mecanismos responsables de la filtración

La remoción de partículas muchísimo más pequeñas que los poros del medio filtrante descartó la idea primitiva de que la filtración se realizaba por el simple efecto físico de cernido.

En efecto, el agua, ya sea sedimentada o no, que entra a un filtro que contiene una variedad de partículas en suspensión. Su tamaño puede variar desde flóculos relativamente grandes de 1 milímetro de diámetro hasta coloides, bacterias y virus con tamaños de 1 micrón. Todo esto en conjunto queda en mayor o menor proporción retenido en el lecho filtrante, preferentemente adherido a la superficie de sus granos formando una película alrededor de ellos, cuya resistencia al esfuerzo cortante producido por la fuerza de arrastre del flujo es función de la magnitud de las fuerzas que mantienen pegadas las partículas a cada elemento del medio granular.

Las partículas de menor diámetro que los poros del medio filtrante, entran libremente en el material granular y tienen que atravesar una distancia

relativamente grande antes de poderse adherir a los granos que forman dichos poros.

2.1.2. Etapas del proceso de filtración

Dados los fenómenos que intervienen en el proceso de filtración, se puede considerar que este ocurre en dos etapas distintas pero complementarias, de las cuales se obtiene como resultado la retención de las partículas en el lecho filtrante, estas etapas son:

2.1.2.1. Transporte de partículas dentro de los poros

El transporte de partículas es debido a fenómenos físicos e hidráulicos, influenciados por los factores que gobiernan la transferencia de masa. Los mecanismos que pueden realizar el transporte son:

- **Cernido:** es evidente que cuando la partícula es de tamaño mayor que los poros del lecho filtrante, puede quedar atrapado en los intersticios, cuyo tamaño suele variar entre 0,1 y 0,2 milímetros para granos de 0,5 milímetros, y entre 0,3 y 0,6 milímetros para los de 1,2 milímetros, dado que las partículas grandes pueden tener de 0,5 a 2,0 milímetros de diámetro. El cernido en general actúa sólo en las capas más superficiales del lecho y con partículas relativamente fuertes capaces de resistir los esfuerzos cortantes producidos por el flujo.
- **Sedimentación:** la remoción de partículas menores que el tamaño de los poros, podría deberse a la sedimentación de ellas en la superficie de los granos. La sedimentación solo puede producirse con material suspendido

relativamente grande y denso cuya velocidad de asentamiento sea alta, y en zonas de lecho donde la carga hidráulica sea baja.

- **Intercepción:** la remoción de las partículas floculantes dentro del lecho es llevada a cabo principalmente por contacto de las partículas floculantes con la superficie de los granos o con partículas ya depositadas o adheridas a ellos.
- **Difusión:** debido al movimiento browniano, existe una tendencia de las partículas pequeñas a difundirse desde las áreas de mayor concentración a las áreas de menor concentración. Experimentalmente se ha demostrado que las suspensiones de arcillas presentan fenómenos de difusión.
- **Impacto inercial:** cuando la velocidad de flujo es baja, la partícula viaja de manera parabólica relativamente adherida a las paredes del filtro como efecto del flujo laminar. Cuando la velocidad es alta y la partícula es grande, deben tenerse en cuenta los efectos de inercia, los cuales hacen que aquella pueda seguir una trayectoria distinta a la de las líneas de flujo si adquiere suficiente cantidad de movimiento para eso. Esto implica que al pasar una suspensión alrededor de un obstáculo, mientras las líneas de flujo se curvan, las partículas pueden continuar su trayectoria original, impulsadas por las fuerzas de inercia, y chocar con el grano del filtro quedando adheridas a él. Sin embargo, la viscosidad del fluido hace difícil que la materia suspendida pueda adquirir suficiente cantidad de movimiento, como para que el impacto inercial sea de significación.

- Acción hidrodinámica: partículas de tamaño relativamente grande en un medio viscoso en movimiento laminar podrán tener en sus extremos velocidades diferentes, debido al gradiente de velocidades.

2.1.2.2. Adherencia de granos al medio

La adherencia es debida a fenómenos de acción superficial que son influenciados por parámetros físicos y químicos. Los mecanismos que pueden realizar la adherencia son:

- Fuerzas de Vander Waals: dentro de la distancia desde la superficie de cada grano sobre la cual las fuerzas de adhesión son operativas, hay un volumen alrededor de cada grano que puede designarse como espacio de adhesión y las partículas suspendidas que entran en este espacio serían removidas del flujo, a medida que sean atraídas para adherirse a la superficie de los granos.
- Fuerzas electrostáticas: los granos del medio filtrante son negativos y las partículas en suspensión son positivas, lo que provoca una atracción entre el medio y las partículas, por esto, la sola aproximación de éstas a los granos del lecho, puede producir atracción y adhesión.
- Puente químico: la desestabilización de los coloides es efectuada por los productos de la hidrólisis que a determinados pH se polimerizan. Las cadenas poliméricas adheridas a las partículas dejan sus segmentos extendidos en el agua, los que pueden ser adsorbidos por otras partículas o por sitios vacantes en los granos del filtro. Este fenómeno es independiente de las fuerzas de Van Der Waals y de las cargas electrostáticas

2.1.3. Factores que influyen en la filtración

Existen tres distintos factores involucrados directamente en el proceso de filtración, que por su interacción dan como resultado el cumplimiento adecuado o no del proceso en mención.

2.1.3.1. Tipo de medio filtrante

La forma del tipo del medio filtrante tiene importancia no solo por el aspecto hidráulico (pérdida de carga inicial) sino por la relación superficie a volumen, ya que el proceso de la filtración tiene relación directa con el área total de los granos.

2.1.3.2. Velocidad de filtración

La velocidad de filtración es directamente proporcional al tamaño de partícula. En función de esto, se establece el régimen de flujo con el cual trabajará el filtro.

2.1.3.3. Tipo de suspensión

Las características específicas del flóculo o grano intervienen directamente en la elección del lecho filtrante a utilizar, así como las temperaturas de operación para obtener resultados adecuados.

- Características físicas: el volumen, la densidad y el tamaño del flóculo se relacionan en varias formas con la rapidez con que se aumenta la pérdida de carga en el filtro. Si el volumen del flóculo es grande, los poros del medio filtrante se llenarán con más velocidad. Un volumen de flóculo esponjoso aumenta hasta 10 veces el trabajo del filtro. Las fuerzas de Van Der Waals se incrementan con la densidad de las

partículas, de manera que esta puede influir en la adhesividad del flóculo. El tamaño de las partículas influye a su vez en el mecanismo que predomina para la remoción del material suspendido, lo que se relaciona con la proporción de partículas de determinado diámetro que resultan retenidas en el proceso.

- Influencia de la temperatura: la temperatura del agua afecta tanto los mecanismos físicos como los químicos que intervienen en la filtración. Se ha demostrado experimentalmente que la temperatura es directamente proporcional a la velocidad de depósito de los flóculos en el medio filtrante.

2.2. Filtros convencionales de grava, carbón activado y filtros pulidores

La filtración en medios granulares es la forma más económica y eficiente de separar sólidos suspendidos que no son removidos por sedimentación.

El filtro más usado para remover sólidos suspendidos es el filtro de grava y arena, se le llama así precisamente porque es un lecho de grava y arena el que retiene las partículas suspendidas en el agua. En este tipo de filtros, el agua fluye a través de un lecho de grava y arena. Las propiedades del medio, causan que el agua tome caminos erráticos y largos trayectos, lo cual incrementa la probabilidad de que el sólido tenga contacto con otras partículas suspendidas, y con el medio formado en la superficie del gránulo de grava o arena, siendo de esta manera retenido entre el material filtrante.

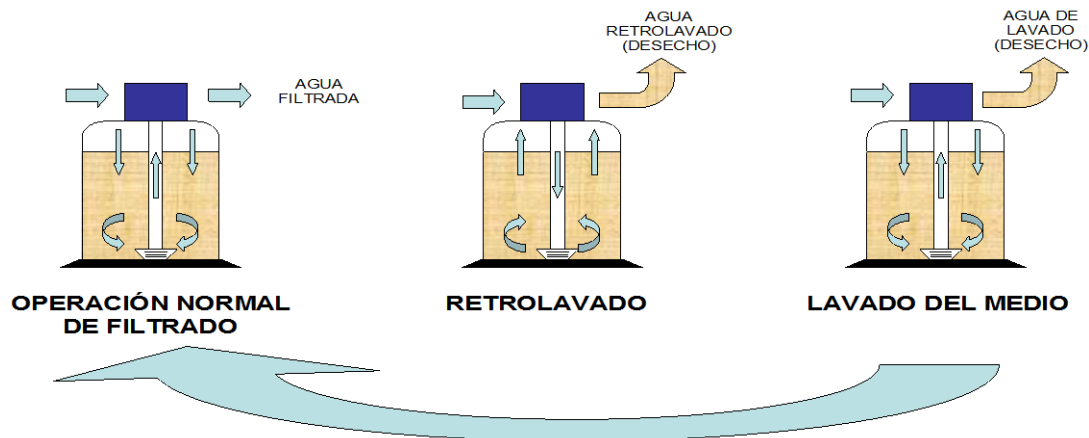
Para una filtración o separación de sólidos más eficiente, también es conveniente darle un tratamiento previo al agua a tratar, agregándole sustancias químicas que causen la coagulación y floculación de las partículas, ya que es más probable que el coágulo o flóculo sea retenido en el lecho del filtro que una sola partícula en estado coloidal.

Filtros pulidores: el objetivo del filtro pulidor es dar claridad y brillantez al agua, reteniendo partículas de hasta 5 micras. Sus componentes son un portafiltro y además un cartucho filtrante intercambiable de 5 micras de retención. La función de este filtro es de detener las impurezas pequeñas (sólidos hasta 5 micras). Los pulidores son fabricados en polipropileno grado alimenticio (FDA). Después de este paso se puede tener una agua brillante y cristalina. Hay que tomar en cuenta que el cambio del cartucho filtrante se debe hacer cada 4 o 6 meses de uso o cuando el flujo de agua disminuye considerablemente.

2.2.1. Ciclos de filtración

A medida que los sólidos son retenidos en las capas del lecho filtrante, la caída de presión o resistencia al flujo es cada vez mayor y el volumen de agua disminuye y/o la calidad del efluente es reducida, presentándose en el líquido un mayor grado de turbidez, ya que la cantidad de sólidos que se encuentran en el filtro es muy grande y la superficie disponible para retención de sólidos suspendidos está agotada. Cuando esto ocurre se dice que se ha cumplido el ciclo de filtración.

Figura 1. **Ciclo de filtrado después del retrolavado**



Fuente: *Sonitec- Vortisand Inc*: <http://www.sonitec.com/en/home.html>. Consulta: 06 de noviembre de 2012.

Para regresar el medio filtrante a su condición original, es necesario remover los sólidos adheridos a la superficie del material granular del filtro. Para esto, se hace fluir agua en forma ascendente, en forma inversa a como fluye el agua durante la filtración, tratando de desprender los sólidos que saturan el material granular del filtro.

A esto se le llama retrolavado, y el flujo de agua empleado para retrolavar el filtro, debe ser suficientemente grande para desprender los sólidos retenidos, pero no tan grande como para arrastrar las partículas de arena que son las que se encuentran en la parte inmediatamente superior del filtro.

Una vez que el filtro se ha retrolavado, se inicia nuevamente la operación de filtración hasta que nuevamente el filtro se sature con sólidos retenidos. Al proceso: filtración-retrolavado-lavado-filtración se le conoce también como ciclo de filtración.

2.2.2. Selección de las capas filtrantes

La selección del número de capas y de la granulometría de cada una de estas, depende de las características del agua que se desee tener. No existe una forma única para seleccionar y disponer dichas capas de material filtrante, por lo que es recomendable, en ausencia de datos, de efectuar pruebas piloto para poder seleccionar y diseñar un filtro que dé resultados satisfactorios. Los filtros de carbón activado tienen la función de eliminar las partículas de cloro molecular que han quedado presentes en el agua filtrada.

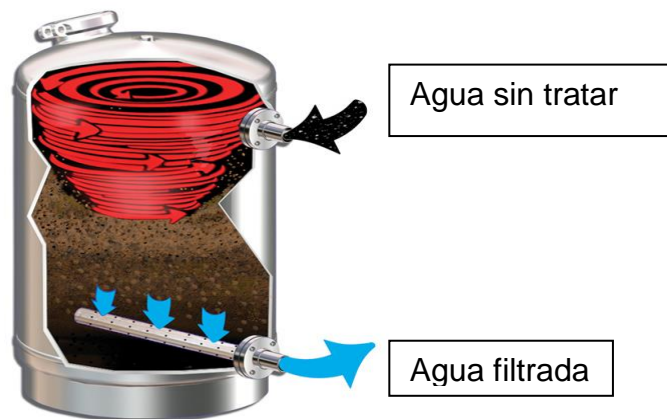
El sistema de filtración es igual que el descrito anteriormente, la única diferencia es que el agente utilizado para la filtración es el carbón activado. Los retrolavados de este tipo de filtro se realizan de manera similar a la presentada anteriormente, la diferencia radica en que el agua para el retrolavado se calienta antes de realizarlo, pues al estar a una temperatura de entre 75 y 80 grados Celsius la eliminación del cloro retenido en éste es realmente eficiente.

2.3. Filtro Vortisand

Utiliza la fuerza centrífuga para crear un efecto vórtice en el agua sin procesar sobre el medio de filtrado (arena) ayudando a eliminar sólidos suspendidos. Esto aumenta en forma significativa el área efectiva de filtrado dentro del tanque. La turbulencia provoca una acción de limpieza continua, la cual obliga a las partículas suspendidas a acumularse en las paredes internas del tanque. Además, se puede utilizar arena mucho más fina sin problemas de atasco. El agua, ahora básicamente libre de impurezas es filtrada a través de los medios de filtrado y altamente pulida para diferentes usos.

La ventaja de Vortisand radica en que la mayoría de los contaminantes se depositan sobre el lecho de filtrado, hasta que el sistema necesite ser lavado a contracorriente requiriendo a su vez menos agua y menor tiempo de operación en el retrolavado en comparación con los sistemas convencionales de filtrado por arena. Además, el proceso permite ciclos más largos y mejores niveles de filtrado. Frecuentemente el lavado está en función de la carga material por lo que una carga elevada de sólidos necesitará un lavado más frecuente.

Figura 2. **Filtro Vortisand**



Fuente: Aquarent, S.A. de C.V. <http://www.living-water.org/id6.htm2006>. Consulta: de 14 de diciembre de 2012.

Vostisand provee filtración que es 10 veces más fina que la obtenida con los filtros tradicionales. Este filtro está diseñado para remover sólidos de hasta 0.45 micrones de diámetro, y este resultado es la prueba de la alta eficiencia proporcionada por el filtro debido a la combinación de la fuerza centrífuga con la filtración convencional.

2.4. Sistemas de medición de la turbidez

Se entiende como turbidez, el efecto óptico que causa la acumulación de sólidos en suspensión en mayor o menor grado en determina cantidad de agua.

Generalmente se toma la turbidez como el parámetro básico para evaluar la eficiencia del proceso de filtración ya que en sí engloba otros factores.

Esta se puede medir tanto en el afluente como en el efluente del filtro, así como a distintas alturas dentro del lecho filtrante y a distintos intervalos de tiempo.

En función de la turbidez del agua se puede establecer la eficiencia del filtro, tomando como patrón de comparación la turbidez a la entrada y la turbidez a la salida de agua, considerando los factores físicos y químicos prácticamente constantes para obtener resultados objetivos.

2.4.1. Medición de la turbidez

En la actualidad existen multitud de aparatos que pueden medir la turbidez del agua. Básicamente se dividen en dos grandes grupos: los fotómetros de transmitancia y los fotómetros nefelométricos, según sea el ángulo y la forma como se mida la luz que atraviesa la muestra que se desea analizar.

Es eso lo que hace que la misma suspensión patrón, de valores distintos cuando se emplean diferentes instrumentos para medir la turbidez, ya que esta es la determinación de la luz diseminada por las partículas en diferentes direcciones y con diferentes longitudes de onda y color, que unos equipos

detectan de una manera y otros de otra, sin que se haya estandarizado ninguno.

Cuando la luz se detecta a 180 grados, solamente se habla del fotómetro de transmitancia que es el más antiguo. Los nefelómetros actuales la detectan a 10, 30 y 90 o una combinación de varios ángulos como ocurre con el Hach. Algunos pueden detectar la luz total, que sería la que se obtendría al colocar una serie de fotoceldas alrededor de la muestra para configurar un diagrama de luz diseminada.

La lectura de la turbidez depende de los siguientes factores:

- El ángulo de medida: el instrumento de medición utilizado dará una lectura diferente en cada caso dependiendo del ángulo de medida utilizado.
- El tipo de luz incidente: según la amplitud del rayo que se lance, la longitud de onda de este y el hecho de que la luz sea monocromática u policromática, cambia la lectura de la turbiedad.
- El tipo de fotocelda: el tipo que se utilice para medir la intensidad de la luz diseminada o peor aún la sensibilidad del ojo del observador, si no se usan fotoceldas, afectan notablemente las lecturas.
- El tipo de partículas: las partículas presentes en la suspensión hace que la luz se disemine en diferente forma: las bacterias, por ejemplo, reflejan más luz hacia adelante que hacia atrás o los costados, algunas arcillas lo hacen con preferencia a 90 y otras sin dirección preferencial. Hay

también partículas que son opacas y no reflejan la luz como algunas de carácter orgánico.

- El patrón de comparación adoptado: este hace que cambie la lectura puesto que al variar este, varía el tipo de partículas presente en la suspensión.

2.4.2. Instrumentos para la lectura de la turbidez

Existen varios métodos manuales establecidos para realizar medidas de turbidez, sin embargo, no dan una medida cuantitativa objetiva de esta y pueden utilizarse solamente para observaciones preliminares. Entre estos se pueden mencionar el turbidímetro de Jackson o un sistema de luz sumergida. Dada la facilidad de uso y los datos cuantitativos obtenidos, se utiliza un turbidímetro digital.

2.4.2.1. Turbidímetro digital

Un gran avance en el control de la calidad del agua filtrada, es el uso de monitores de turbidez. Se entiende por tales, los fotómetros capaces de mantener un registro permanente de la turbiedad, de manera que en cualquier instante se puede conocer el valor de ésta y en algunos casos hacer sonar una alarma o prender una luz, cuando exceda de determinado límite.

Existen una variedad de aparatos: unos sirven para controlar altas turbiedades (agua cruda), otros muy sensibles para detectar bajas turbiedades (agua filtrada) y algunos son sensibles tanto a altas como a bajas turbiedades.

2.4.3. Turbiedades permisibles en el agua filtrada

Los límites permisibles de turbiedad del agua deben analizarse desde dos aspectos: el estético y el sanitario.

El estético fue el más importante en el pasado, sin embargo, de 1976 a 1988 rigió la norma de la EPA, que exigía una turbidez inferior a 1,0 NTU en el 95 por ciento de las muestras tomadas en un mes.

En realidad, el control de la turbiedad es el método más simple y práctico para evaluar la eficiencia no sólo de la filtración, sino de todos los procesos de tratamiento. Las turbiedades inferiores a 1,0 UNT o preferentemente inferiores a 0,5 UNT, indican una operación cuidadosa de todo el sistema, segura desde el punto de vista bacteriológico, en lo referente a remoción de virus y protozoarios patógenos, que difícilmente son eliminados en los procesos de desinfección.

2.5. Propiedades fisicoquímicas del agua filtrada

Para evaluar la eficiencia del agua filtrada es necesario obtener al menos las mismas propiedades fisicoquímicas en el agua obtenida a partir de ambos sistemas, entre ellas, se evaluarán las siguientes:

2.5.1. Conductividad

La conductividad de una sustancia se define como la habilidad o poder de conducir o transmitir calor, electricidad o sonido. Las unidades son: Siemens por metro [S/m] en sistema de medición SI y micromhos por centímetro [mmho/cm] en unidades estándar de EE.UU. Su símbolo es k o s.

Agua pura es un buen conductor de la electricidad. El agua destilada ordinaria en equilibrio con dióxido de carbono en el aire tiene una conductividad aproximadamente de $10 \times 10^{-6} \text{ W}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ (20 dS/m). Debido a que la corriente eléctrica se transporta por medio de iones en solución, la conductividad aumenta cuando aumenta la concentración de iones. De tal manera, que la conductividad cuando el agua disuelve compuestos iónicos.

Parámetros de conductividad en distintos tipos de agua:

Agua ultra pura $5,5 \cdot 10^{-6} \text{ S/m}$

Agua potable 0,005 – 0.05 S/m

Agua del mar 5 S/m

2.5.2. Dureza

La dureza es una característica química del agua que está determinada por el contenido de carbonatos, bicarbonatos, cloruros, sulfatos y ocasionalmente nitratos de calcio y magnesio, la dureza es indeseable en algunos procesos, tales como el lavado doméstico e industrial, provocando que se consuma más jabón, al producirse sales insolubles. Existen dos tipos de dureza:

2.5.2.1. Dureza temporal

Está determinada por el contenido de carbonatos y bicarbonatos de calcio y magnesio. Puede ser eliminada por ebullición del agua y posterior eliminación de precipitados formados por filtración, también se le conoce como Dureza de Carbonatos.

2.5.2.2. Dureza permanente

Está determinada por todas las sales de calcio y magnesio excepto carbonatos y bicarbonatos. No puede ser eliminada por ebullición del agua y también se le conoce como Dureza de No carbonatos.

Tabla I. Interpretación de la dureza

Dureza como mg/L CaCO ₃	Interpretación
0-75	Agua suave
75-150	Agua poco dura
150-300	Agua dura
> 300	Agua muy dura

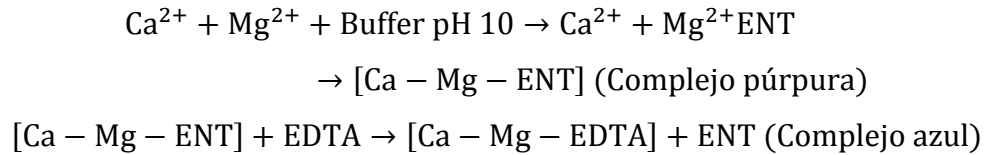
Fuente: Ref. No. 3 p. 30.

2.5.2.3. Método de determinación de dureza

La muestra de agua que contiene los iones calcio y magnesio se le añade el buffer de pH 10, posteriormente, se le agrega el indicador eriocromo negro T(ENT), que hace que se forme un complejo de color púrpura, enseguida se procede a titular con EDTA (sal disódica) hasta la aparición de un color azul.

2.5.2.4. Reacciones

Las reacciones de neutralización de las sales disódicas y de calcio que se encuentran en el agua como dureza temporal o permanente, permiten cuantificar la presencia de estas.



2.5.2.5. Procedimiento

Para cuantificar la cantidad de sales disódicas disueltas en el agua y que representan la dureza, se debe realizar una reacción de neutralización que permita obtener datos numéricos.

- Colocar 50 ml de la muestra de agua en un matraz erlenmayer.
- Agregar 5 gotas de buffer PH 10
- Añadir una medida de eriocromo negro T
- Titular con EDTA 0.02 N
- Viraje de púrpura a azul

2.5.2.6. Cálculos

Una vez realizadas a nivel laboratorio las pruebas para cuantificar la dureza del agua, el procesamiento de la información para determinar la dureza del agua se realiza como:

$$C_2 = \frac{C_1 * V_1 * 1000}{V_2}$$

Donde:

C_1 = concentración EDTA (N)

V_1 = volumen de EDTA utilizado para el viraje (mL)

V_2 = volumen de muestra de agua (mL)

C_2 = concentración de carbonatos y manganatos en la muestra (meq/L)

$$D=(C_2*50)$$

Donde:

D= dureza del agua (mg/L CaCO₃)

C₂= concentración de carbonatos y manganatos en la muestra (mg/L)

2.5.3. PH

El pH es un indicador de la acidez de una sustancia. Está determinado por el número de iones libres de hidrógeno (H⁺) en una sustancia. La acidez es una de las propiedades más importantes del agua.

El agua disuelve casi todos los iones. El pH sirve como un indicador que compara algunos de los iones más solubles en agua.

El resultado de una medición de pH viene determinado por una consideración entre el número de protones (iones H⁺) y el número de iones hidroxilo (OH⁻). Cuando el número de protones iguala al número de iones hidroxilo, el agua es neutra. Tendrá entonces un pH alrededor de 7. El pH del agua puede variar entre 0 y 14. Cuando el pH de una sustancia es mayor de 7, es una sustancia básica. Cuando el pH de una sustancia está por debajo de 7, es una sustancia ácida. Cuanto más se aleje el pH por encima o por debajo de 7, más básica o ácida será la solución.

El pH-metro es un sensor utilizado en el método electroquímico para medir el pH de una disolución. La determinación de pH consiste en medir el potencial que se desarrolla a través de una fina membrana de vidrio que separa dos soluciones con diferente concentración de protones. En consecuencia se

conoce muy bien la sensibilidad y la selectividad de las membranas de vidrio delante el pH.

Una celda para la medida de pH consiste en un par de electrodos, uno de calomel (mercurio, cloruro de mercurio) y otro de vidrio, sumergidos en la disolución en la que se quiere encontrar el pH. La varita de soporte del electrodo es de vidrio común y no es conductor, mientras que el bulbo sensible, que es el extremo sensible del electrodo, está formado por un vidrio polarizable (vidrio sensible de pH). Se llena el bulbo con la solución de ácido clorhídrico 0.1N saturado con cloruro de plata. El voltaje en el interior del bulbo es constante, porque se mantiene su pH constante (pH 7) de manera que la diferencia de potencial solo depende del pH del medio externo.

2.5.4. Alcalinidad

La alcalinidad de una muestra de agua es su capacidad para reaccionar o neutralizar iones hidronio (H^+) hasta un valor de pH igual a 4,5. La alcalinidad es causada principalmente por los bicarbonatos, carbonatos e hidróxidos presentes en solución y, en menor grado, por los boratos, fosfatos y silicatos que puedan estar presentes en la muestra.

La alcalinidad del agua se expresa como la concentración equivalente de iones hidroxilo, en miligramos por litro, o como la cantidad equivalente de $CaCO_3$, en miligramos por litro. La alcalinidad, entendida como la concentración de metales alcalinotérreos, tiene importancia en la determinación de la calidad del agua para riego y es, además, un factor importante en la interpretación y control de los procesos de purificación de aguas residuales.

Esta se mide por titulación de una alícuota de muestra con ácido clorhídrico, de concentración 0,02 N, utilizando indicadores como fenolftaleína cuando las muestras tienen un pH mayor de 8,3 o naranja de metilo en caso contrario. A la alcalinidad determinada con fenolftaleína se le llama alcalinidad F y a la determinada con naranja de metilo se le llama alcalinidad m. El viraje con fenolftaleína se da como identificación de hidróxidos y carbonatos en la muestra, en tanto que el viraje con naranja de metilo se da como identificación de bicarbonatos en la muestra.

2.5.4.1. Procedimiento

La titulación ácido-base realizada para determinar alcalinidad en la muestra de agua se realiza de la siguiente manera:

Se debe medir una alícuota de determinado volumen de la muestra de agua y colocar en un earlenmeyer para la titulación. Agregar dos gotas de fenolftaleína; si la solución se torna fucsia, titular con ácido sulfúrico agitando hasta que el color desaparezca. Anotar los mililitros necesarios para dicho viraje y registrar como dato para determinar alcalinidad F.

A la misma muestra, agregar 3 gotas de solución de naranja de metilo, titular con ácido sulfúrico hasta que vire de amarillo-naranja a rojo.

2.5.4.2. Cálculos

Una vez obtenidos los datos de la titulación para determinar la alcalinidad en el agua, deben realizarse los cálculos necesarios utilizando el volumen de ácido sulfúrico utilizado.

$$n\text{CaCO}_3=(V_f-V_{nm})\cdot C_t$$

Donde:

$n\text{CaCO}_3$ = moles de bicarbonato de calcio

V_{nm} = volumen de titulante utilizados para el viraje con naranja de metilo (mL)

C_t = concentración del titulante (M)

$$n\text{Ca}_2\text{CO}_3 = V_{nm}C_t$$

Donde:

$n\text{CaCO}_3$ = moles de bicarbonato de calcio

V_{nm} = volumen de titulante utilizados para el viraje con naranja de metilo (mL)

C_t = concentración del titulante (M)

2.6. Evaluación de la reducción de los costos de operación

El objetivo principal de la embotelladora es obtener una significativa reducción de costos de operación como consecuencia del cambio del sistema, estos se determinarán tomando en cuenta distintos factores para cada sistema y posteriormente se comparará el resultado obtenido para ambos.

2.6.1. Costo de agua en retrolavados

Los retrolavados automáticos y más cortos del sistema Vortisand debería repercutir directamente en una reducción de los costos de operación, por el menor tiempo de bombeo, el menor costo de agua y el menor gasto de vapor.

2.6.1.1. Costo de agua en retrolavados de filtros de grava

Los retrolavados de los filtros de grava se realiza semanalmente. Un flujo de agua a temperatura ambiente se hace pasar a contracorriente por el lecho de filtrado durante un período de 4 horas, 30 minutos aproximadamente. Para determinar el costo de agua en dichos retrolavados, se medirá el flujo de agua en el efluente de los filtros y el costo de esta se determina mediante la siguiente ecuación:

$$CA_{RG} = F_A * t * C_A$$

Donde:

CA_{RG} = costo de agua en retrolavado de filtros de grava (Q)

F_A = flujo de agua (m³/min)

t = duración del retrolavado (min)

C_A = costo de agua (Q/m³)

Nota: el costo de agua en los retrolavados de los filtros de grava determinados con la ecuación anterior, da un costo semanal de agua.

2.6.1.2. Costo de agua en retrolavados de filtros de carbón

Los retrolavados de los filtros de carbón se realizan semanalmente. Un flujo de agua a 80 grados Celsius se hace pasar a contracorriente por el lecho de filtrado durante un período de 4 horas, 30 minutos aproximadamente. Para determinar el costo de agua en dichos retrolavados, se medirá el flujo de agua en el efluente de los filtros y el costo de esta se determina mediante la siguiente ecuación:

$$CA_{RC} = F_A * t * C_A$$

Donde:

CA_{RC} = costo de agua en retrolavado de filtros de carbón (Q)

F_A = flujo de agua (m³/min)

t = duración del retrolavado (min)

C_A = costo de agua (Q/m³)

Nota: el costo de agua en los retrolavados de los filtros de carbón determinados con la ecuación anterior, da un costo semanal de agua.

2.6.1.3. Costo de agua en retrolavados de filtros pulidores

Los retrolavados de los filtros pulidores se realiza diariamente. Un flujo de agua a temperatura ambiente se hace pasar a contracorriente con el lecho de filtrado durante 5 minutos aproximadamente, posteriormente un flujo de agua a 80 grados Celsius se hace circular de la misma manera durante un período de 35 minutos y para finalizar, se hace circular nuevamente un flujo de agua a temperatura ambiente durante 15 minutos. La batería de filtros pulidores consta de 13 filtros y en cada uno de estos se encuentra un efluente. Se mide el flujo de agua en cada uno de estos y se suma para obtener un conjugado, y el costo de agua se determina mediante la siguiente ecuación:

$$CA_{RP} = [(F_{A1} * t_1) + (F_{A2} * t_2) + (F_{A3} * t_3)] * C_A$$

Donde:

CA_{RF} = costo de agua en retrolavados de filtros pulidores (Q)

F_{A1} = primer flujo de agua fría (m³/min)

t_1 = duración del retrolavado con el primer flujo de agua fría (min)

F_{A2} = flujo de agua caliente (m^3/min)

t_2 = duración del retrolavado con agua caliente (min)

F_{A3} = segundo flujo de agua fría (m^3/min)

t_3 = duración del retrolavado con el segundo flujo de agua fría (min)

Nota: el costo de agua para retrolavados de filtros pulidores determinado mediante la ecuación anterior, se realizará de la misma manera para cada día y posteriormente se sumarán para dar un total semanal.

2.6.1.4. Costo total de agua en retrolavados

El costo total semanal de agua en retrolavados se determinatomoando en cuenta los costos obtenidos con los 3 distintos filtros del sistema, haciendo uso de la siguiente ecuación:

$$CT = CA_{RG} + CA_{RC} + CA_{RP}$$

Donde:

CT = costo total semanal de agua en retrolavados (Q)

CA_{RG} = costo de agua de retrolavado en filtros de grava (Q)

CA_{RC} = costo de agua de retrolavado en filtros de carbón (Q)

CA_{RF} = costo de agua de retrolavado en filtros pulidores (Q)

2.6.2. Gasto de vapor en retrolavados

En los retrolavados de filtros de carbón y filtros pulidores se utiliza agua a 80 grados Celsius, la cual llega a dicha temperatura a su paso por un intercambiador de calor que funciona con vapor vivo de caldera.

2.6.2.1. Gasto de vapor en retrolavados de filtros de carbón

Para el calentamiento del agua utilizada para el retrolavado de los filtros de carbón, así como de los filtros pulidores, se hace circular vapor proveniente del área de calderas. El flujo de vapor se determina mediante un balance de energía en la salida de tubo de agua, tomando como base que el calor transferido por el vapor es igual al calor recibido por el agua; como sigue:

$$\dot{Q}_{\text{transf}} = \dot{Q}_{\text{recibido}}$$

Donde el calor transferido por el vapor se define como:

$$\dot{Q}_{\text{transf}} = \dot{m} \Delta H_v$$

Donde:

Q_{transf} = calor transferido por el vapor (W)

\dot{m} = flujo másico de vapor (kg/s)

ΔH_v = entalpía de vaporización a las condiciones de vapor (kJ/kg)

Y el calor recibido por el agua se define como:

$$\dot{Q}_{\text{recibido}} = \dot{m} * c_P * \Delta T$$

Donde:

Q_{recibido} = calor recibido por el agua (W)

\dot{m} = flujo másico de vapor (kg/s)

c_P = calor específico del agua a las condiciones de temperatura (kJ/kg.k)

ΔT = diferencia de temperatura del agua (K)

Igualando ambas ecuaciones:

$$\dot{m}\Delta H_v = \dot{m}^*c_p^*\Delta T$$

Despejando el flujo másico de vapor (Condición ideal):

$$\dot{m}_v = \frac{\dot{m}^*c_p^*\Delta T}{\Delta H_v}$$

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Variables

Para determinar la factibilidad del cambio del sistema de filtración, se consideran distintas variables que intervienen en el proceso, ya sea de manera directa o indirecta, estas se presentan a continuación.

Tabla II. Variables involucradas

Variables	Unidad	Indep.	Dep.	Cte.	No cte.
Turbidez	NTU	X			X
pH		X			X
Conductividad	Ohm/cm	X			X
Alcalinidad	M CaCO ₃ M Ca ₂ CO ₃		X		X
Dureza	Mg/L CaCO ₃		X		X
Consumo de energía eléctrica en bomba	kWh	X			X
Consumo de energía para calentamiento	kWh	X			x
Consumo de vapor					
Consumo de agua para retrolavados en filtro de arena y grava	m ³	x			x
Consumo de agua para retrolavados en filtros pulidores	m ³	x			X

Fuente: elaboración propia.

3.2. Delimitación del campo de estudio

El trabajo de investigación se llevó a cabo en una empresa embotelladora de agua purificada, en la sede central de esta se realizaron las pruebas al agua filtrada obtenida con los filtros convencionales de grava, carbón y filtros pulidores y las pruebas del agua obtenida con los filtros Vortisand se realizó en una de las sucursales de dicha empresa. Con los datos obtenidos se comparó el desempeño de ambos equipos para evaluar su eficiencia.

3.3. Recursos humanos disponibles

Para la realización del trabajo de investigación, participó directamente el investigador, encargado de toda la parte experimental y el asesor, un experto técnico en la materia que aportó sus conocimientos sobre el tema de estudio para llegar a las conclusiones sobre el mismo.

Investigador:

Nombre:	Sindi Fabiola Reyes
Correo electrónico:	sindifabiola@hotmail.com
Profesión:	Estudiante de Ingeniería Química Universidad de San Carlos de Guatemala

Asesor:

Nombre:	Víctor Manuel Monzón Valdez
Correo electrónico:	vimamonzon@hotmail.com
Profesión:	Ingeniero químico.

3.4. Recursos materiales disponibles

Además de los sistemas de filtración a comparar se cuenta con distintos recursos materiales, desde reactivos y cristalería de laboratorio hasta bombas de presión y de vapor.

3.4.1. Equipo

Para la comparación de la eficiencia de los filtros se utilizará un turbidímetro digital, para la determinación de las propiedades fisicoquímicas se utilizará equipo y cristalería de laboratorio.

- Turbidímetro
- Pipeta volumétrica
- Bureta volumétrica
- Earlenmeyer
- Beacker
- Potenciómetro
- Conductivímetro

3.4.2. Materia prima

Las muestras de agua provenientes de cada uno de los sistemas de filtración son la materia prima vital para la realización del trabajo de investigación, asimismo, se cuenta con distintos reactivos de laboratorio para realizar las pruebas fisicoquímicas a estas.

- Agua sin filtrar proveniente de cada uno de los filtros.
- Agua filtrada proveniente de cada uno de los filtros.

- Reactivos para determinación de dureza: solución de buffer pH 10, Indicador negro de ericromo t, solución de EDTA 0.02 N.
- Reactivos necesarios para la determinación de la alcalinidad: ácido clorhídrico 0.02N, fenolftaleína, naranja de metilo.

3.5. Técnica cualitativa o cuantitativa

En cada caso de investigación se utilizarán distintas técnicas cualitativas o cuantitativas para obtener los resultados deseados para determinar si es factible o no el cambio del sistema.

3.5.1. Comparación de la eficiencia de los filtros

Se tomaron muestras de agua a la entrada de los filtros de grava, arena y carbón, y a la salida de los filtros pulidores para el sistema convencional y a la entrada y salida del filtro Vortisand; se midió la turbidez de cada una y de esta manera se evaluó la eficiencia.

3.5.2. Comparación de las propiedades fisicoquímicas

Con una porción de las muestras de agua tomadas para comparar la eficiencia de los filtros, en la salida de cada etapa de filtración para ambos sistemas, se midió el pH, conductividad, dureza del agua y alcalinidad total. Se compararon los resultados obtenidos con ambos filtros para determinar si se obtienen al menos las mismas propiedades fisicoquímicas en el agua. Asimismo, se midió la cantidad de cloro presente en el agua a la salida de los filtros de carbón, utilizando una solución de O-tolidina y un instrumento óptico.

3.5.3. Evaluación de la reducción de costos de operación

Se tomaron datos de los kWh consumidos por bombeo de agua para retrolavado, gasto de vapor para calentamiento de agua de retrolavados de los filtros de carbón y pulidores, cantidad de agua utilizada y su costo en el sistema de filtrado convencional instalado actualmente, para sacar un total de costos de retrolavado. De igual forma, se tomaron datos de kWh consumidos por bombeo de agua y cantidad y costo del agua para retrolavados en el sistema de filtrado con Vortisand, para sacar un total de costos de retrolavado. Con dicha evaluación, se determinó si el sistema cumple con la reducción de costos.

3.6. Recolección y ordenamiento de la información

Una vez obtenida la información de cada uno de los sistemas de filtración se procederá a utilizar una hoja de cálculo para realizar el análisis de datos obtenidos, por medio de la tabulación y ordenamiento de los mismos.

3.6.1. Comparación de la eficiencia de los filtros

Se tomaron datos de turbidez del agua de entrada y de salida a cada uno de los filtros y se aplicó la siguiente fórmula en cada caso:

$$\%E = \frac{T_e - T_s}{T_e} * 100$$

Donde:

T_e = turbidez del agua de entrada al filtro

T_s = turbidez del agua de salida del filtro

Se determinó la eficiencia de cada uno de los filtros y a partir de la comparación entre ambos se obtuvo una conclusión sobre la viabilidad en el cambio del sistema.

3.6.2. Comparación de las propiedades fisicoquímicas del agua

Se tomaron valores de pH, conductividad, alcalinidad y dureza para el agua de salida de cada uno de los sistemas de filtración y se realizó una comparación entre ellas para dilucidar si se obtienen al menos las mismas propiedades fisicoquímicas en el agua filtrada.

3.6.3. Evaluación de la reducción de los costos de operación

Se determinaron los costos totales de los retrolavados para el sistema convencional de filtración de agua, incluyendo los retrolavados semanales de los filtros de grava y carbón activado y los retrolavados diarios de los filtros pulidores. Estos costos obtenidos se compararon con los costos de retrolavados automáticos del sistema Vortisand.

3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

La información obtenida para cada caso de estudio en cada uno de los sistemas de filtración, se ha tabulado para su análisis en interpretación. A continuación se presentan los datos obtenidos en cada caso.

Tabla III. **Turbidez sistema convencional**

ANÁLISIS DE TURBIDEZ (NTU)					
SISTEMA CONVENCIONAL					
Muestra	Entrada grava	Salida grava	Salida carbón	Salida pulidores	% Ef. grava
1	0,14	0,10	0,09	0,04	28,57
2	0,14	0,08	0,07	0,04	42,85
3	0,15	0,07	0,06	0,04	53,33
4	0,25	0,13	0,10	0,04	48,00
5	0,18	0,09	0,08	0,04	50,00
6	0,20	0,11	0,10	0,06	45,00
7	0,13	0,09	0,09	0,04	30,77
8	0,10	0,06	0,06	0,04	40,00
9	0,16	0,11	0,10	0,06	31,25
10	0,21	0,12	0,12	0,06	42,86
11	0,18	0,10	0,09	0,04	44,44
12	0,14	0,09	0,08	0,04	35,71
13	0,14	0,08	0,07	0,04	42,86
14	0,16	0,09	0,08	0,04	43,75
15	0,15	0,07	0,06	0,04	53,33
MEDIA	0,162	0,092	0,083	0,044	42,182

Fuente: elaboración propia.

Tabla IV. **Turbidez sistema Vortisand**

ANÁLISIS DE TURBIDEZ (NTU)					
SISTEMA VORTISAND					
Muestra	Entrada Vortisand	Salida Vortisand	Salida carbón	Salida pulidores	% Ef.
1	0,16	0,05	0,05	0,04	68,75
2	0,18	0,06	0,05	0,04	66,67
3	0,17	0,06	0,05	0,04	64,70
4	0,14	0,05	0,04	0,03	64,28
5	0,13	0,04	0,04	0,03	69,23
6	0,20	0,07	0,06	0,04	65,00
7	0,17	0,06	0,05	0,04	64,70
8	0,16	0,06	0,05	0,04	62,50
9	0,15	0,06	0,06	0,04	60,00
10	0,17	0,07	0,05	0,04	58,82
11	0,14	0,05	0,05	0,04	64,28
12	0,14	0,04	0,04	0,03	71,42
13	0,13	0,05	0,05	0,04	61,53
14	0,16	0,05	0,04	0,03	68,75
15	0,13	0,04	0,04	0,03	69,23
MEDIA	0,155	0,054	0,048	0,036	65,32

Fuente: elaboración propia.

Tabla V. **Propiedades fisicoquímicas sistema convencional**

PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS SISTEMA CONVENCIONAL					
DÍA 1					
Etapa	pH	Conductividad (mS/s)	Alcalinidad (t)	Dureza (mg/L CaCO ₃)	Cloro (mg/L)
EG	8,31	175	30	62	0,4
SG	8,04	176	28	56	0,4
SC	7,95	169	28	58	0,1
SP	7,89	169	28	56	0,1
DÍA 2					
EG	8,26	175	26	58	0,40
SG	8,12	176	26	52	0,40
SC	8,08	169	26	54	0,05
SP	7,98	169	26	54	0,05
DÍA 3					
EG	8,31	161	26	50	0,40
SG	8,18	167	24	52	0,40
SC	8,11	169	28	56	0,05
SP	8,01	170	30	56	0,05
DÍA 4					
EG	8,29	174	28	58	0,40
SG	8,19	175	30	56	0,30
SC	8,03	169	30	56	0,10
SP	7,98	170	26	58	0,05
DÍA 5					
EG	8,20	173	30	58	0,30
SG	8,13	169	26	58	0,30
SC	8,07	169	24	54	0,05
SP	7,99	170	24	50	0,05
DÍA 6					
EG	8,09	172	26	58	0,30
SG	8,11	169	26	58	0,30
SC	8,06	170	24	54	0,05
SP	8,08	170	24	50	0,05
DÍA 7					
EG	8,15	172	26	60	0,30
SG	8,14	168	24	60	0,30
SC	8,08	170	26	54	0,05
SP	8,03	171	24	52	0,05

Continuación de la tabla V.

DÍA 8					
EG	8,16	170	28	60	0,30
SG	8,06	168	26	60	0,30
SC	7,87	169	24	58	0,05
SP	7,92	179	26	56	0,05
DÍA 9					
EG	8,19	168	30	60	0,30
SG	8,11	169	26	58	0,30
SC	8,10	170	24	54	0,05
SP	8,06	174	24	52	0,05
DÍA 10					
EG	8,12	170	30	60	0,30
SG	8,10	169	26	60	0,30
SC	8,06	170	30	56	0,05
SP	8,04	162	24	54	0,05
DÍA 11					
EG	8,12	205	32	60	0,30
SG	8,11	202	28	68	0,30
SC	8,11	204	26	68	0,05
DÍA 12					
EG	8,13	204	28	60	0,30
SG	8,10	202	26	62	0,30
SC	8,09	205	26	64	0,05
DÍA 13					
EG	8,12	172	28	58	0,30
SG	8,10	170	25	56	0,30
SC	8,10	172	26	54	0,05
SP	8,09	174	26	56	0,05
DÍA 14					
EG	8,26	175	30	56	0,30
SG	8,19	173	28	56	0,30
SC	8,16	174	26	54	0,05
SP	8,14	174	28	52	0,05
DÍA 15					
EG	8,29	203	28	64	0,30
SG	8,2	202	30	62	0,30
SC	8,19	204	30	60	0,05
SP	8,16	205	26	60	0,05

Fuente: elaboración propia.

Tabla VI. **Promedio propiedades fisicoquímicas sistema convencional**

PROMEDIO PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS SISTEMA CONVENCIONAL						
Etapa de filtración	pH	Conductividad (mS/cm)	Alcalinidad (total)	Dureza (mg/L CaCO ₃)	Cloro (mg/L)	Turbidez (NTU)
Entrada grava	8,18	177,93	28,40	58,80	0,33	0,162
Salida Grava	8,12	177,00	26,60	58,27	0,32	0,092
Salida Carbón	8,07	176,86	26,53	56,93	0,06	0,083
Salida Pulidores	8,04	178,73	26,13	55,87	0,05	0,044

Fuente: elaboración propia

Tabla VII. **Propiedades fisicoquímicas sistema Vortisand**

PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS SISTEMA VORTISAND					
DÍA 1					
Etapa	pH	Conductividad (mS/s)	Alcalinidad (t)	Dureza (mg/L CaCO ₃)	Cloro (mg/L)
EV	8,1	178	32	60	0,65
SV	8,12	170	30	54	0,57
SC	8,01	170	28	56	0,01
SP	7,86	170	28	58	0,01
DÍA 2					
EV	8,2	180	34	64	0,54
SV	8,09	184	32	62	0,51
SC	8,04	184	28	60	0,01
SP	7,93	183	28	58	0,01
DIA 3					
EV	8,34	172	28	58	0,58
SV	8,26	169	26	54	0,55
SC	8,18	168	26	52	0,05
SP	8,13	167	28	54	0,05
DÍA 4					
EV	8,32	182	32	60	0,6
SV	8,24	181	28	56	0,44
SC	8,14	172	28	56	0,02

Continuación de la tabla VII.

DÍA 5					
EV	8,24	179	34	62	0,62
SV	8,11	174	32	58	0,46
SC	8,04	173	26	58	0,02
SP	7,92	176	26	54	0,02
DÍA 6					
EV	8,13	176	32	60	0,6
SV	8,09	173	30	58	0,48
SC	8,06	174	28	56	0,03
SP	8,01	174	28	52	0,03
DÍA 7					
EV	8,18	174	28	62	0,6
SV	8,15	172	28	60	0,46
SC	8,1	172	26	56	0,01
DÍA 8					
EV	8,22	176	30	64	0,63
SV	8,18	174	28	62	0,48
SC	8,09	173	24	58	0,01
SP	8,01	175	26	54	0,01
DÍA 9					
EV	8,23	182	32	62	0,66
SV	8,16	176	30	58	0,45
SC	8,12	174	26	56	0,01
SP	8,04	178	24	52	0,01
DÍA 10					
EV	8,16	174	34	58	0,68
SV	8,14	176	30	56	0,46
SC	8,09	175	30	54	0,01
SP	8,05	172	32	52	0,01
DÍA 11					
EV	8,18	194	30	62	0,60
SV	8,15	196	32	64	0,42
SC	8,1	198	28	64	0,05
SP	8,09	196	28	66	0,05
DÍA 12					
EV	8,18	200	32	64	0,63
SV	8,12	192	26	62	0,44

Continuación de la tabla VII.

DÍA 13					
EV	8,16	180	28	60	0,6
SV	8,12	176	26	56	0,43
SC	8,08	176	24	54	0,02
SP	8,06	178	28	56	0,02
DÍA 14					
EV	8,2	201	32	60	0,68
SV	8,16	198	28	58	0,43
SC	8,14	196	28	56	0,01
SP	8,09	198	30	54	0,01
DÍA 15					
EV	8,32	198	30	64	0,64
SV	8,2	184	28	62	0,42
SC	8,16	186	28	58	0,03
SP	8,12	186	26	56	0,03

Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. **Promedio propiedades fisicoquímicas sistema Vortisand**

PROMEDIO PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS SISTEMA VORTISAND						
Etapa de filtración	pH	Conductividad (mS/cm)	Alcalinidad (t)	Dureza (mg/L CaCO ₃)	Cloro (mg/L)	Turbidez (NTU)
Entrada Vortisand	8,21	180,00	31,20	60,33	0,62	0,155
Salida Vortisand	8,15	178,00	28,00	59,16	0,42	0,054
Salida Carbón	8,09	178,95	26,93	57,33	0,03	0,048
Salida Pulidores	8,04	179,73	26,98	56,40	0,02	0,036

Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. **Gasto de agua en retrolavados de filtros pulidores día 1**

RETROLAVADO DE FILTROS PULIDORES: DÍA 1										
Filtro	Agua caliente					Agua fría				
	Tiempo (min)	Volumen (Gal)	Flujo (gal/min)	Duración (min)	Galones totales	Tiempo (min)	Volumen (gal)	Flujo (gal/min)	Dura. (min)	Flujo total
1	0,684	3,0	4,4	33	144,81	0,13	3	23,97	14	335,55
2	0,806	3,0	3,7	33	122,83	0,15	3	20,09	14	281,25
3	0,901	3,0	3,3	33	109,88	0,22	3	13,35	14	186,94
4	0,798	3,0	3,8	33	124,01	0,22	3	13,46	14	188,48
5	0,750	3,0	4,0	33	132,03	0,23	3	13,27	14	185,84
6	0,773	3,0	3,9	33	128,16	0,23	3	13,01	14	182,08
7	0,833	3,0	3,6	33	118,92	0,23	3	13,02	14	182,34
8	0,890	3,0	3,4	33	111,30	0,17	3	17,82	14	249,50
9	0,706	3,0	4,3	33	140,26	0,13	3	22,28	14	311,88
10	0,549	3,0	5,5	33	180,33	0,12	3	24,13	14	337,80
11	1,020	3,0	2,9	33	97,06	0,23	3	12,91	14	180,77
12	0,734	3,0	4,1	33	134,94	0,15	3	20,36	14	285,07
13	0,752	3,0	4,0	33	131,74	0,18	3	16,45	14	230,35
Flujo volumétrico AC			50.8	Gal. Totales AC	1676,2	GALONES TOTALES AGUA FRÍA				3137,9
GALONES TOTALES RETROLAVADO DÍA 1										4814,1

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. Gasto de agua en retrolavados filtros pulidores día 2

RETROLAVADO DE FILTROS PULIDORES: DÍA 2										
Filtro	Agua caliente					Agua fría				
	Tiempo (min)	Volumen (Gal)	Flujo (gal/min)	Duración (min)	Galones totales	Tiempo (min)	Volumen (gal)	Flujo (gal/min)	Duración (min)	Flujo total
1	0,698	3,000	4,2	30	128,971	0,128	3	23,4	14	327,70
2	0,773	3,000	3,8	30	116,429	0,142	3	21,1	14	295,43
3	0,976	3,000	3,0	30	92,29	0,225	3	13,3	14	186,53
4	0,873	3,000	3,4	30	103,32	0,228	3	13,1	14	183,94
5	0,883	3,000	3,3	30	101,906	0,246	3	12,1	14	170,50
6	0,853	3,000	3,5	30	105,469	0,219	3	13,6	14	191,78
7	0,917	3,000	3,2	30	98,128	0,234	3	12,8	14	179,87
8	0,917	3,000	3,2	30	98,182	0,172	3	17,4	14	244,42
9	0,739	3,000	4,0	30	127,731	0,145	3	20,6	14	288,99
10	0,597	3,000	5,0	30	150,712	0,104	3	28,9	14	405,14
11	1,060	3,000	2,8	30	84,906	0,237	3	12,6	14	177,22
12	0,742	3,000	4,0	30	121,348	0,162	3	18,5	14	260,06
13	0,826	3,000	3,6	30	108,937	0,169	3	17,7	14	249,01
			Gal.			GALONES TOTALES AGUA FRÍA				
			47.74	Totales AC	1432,1					3160,6
GALONES TOTALES RETROLAVADO DÍA 2										4592,7

Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. Gasto de agua en retrolavados filtros pulidores día 3

RETROLAVADO DE FILTROS PULIDORES: DÍA 3										
Filtro	Agua caliente					Agua fría				
	Tiempo (min)	Volumen (Gal)	Flujo (gal/min)	Duración (min)	Galones totales	Tiempo (min)	Volumen (gal)	Flujo (gal/min)	Duración (min)	Flujo total
1	0,829	3,000	3,6	30	108,630	0,148	3	20,2	14	284,10
2	0,809	3,000	3,7	30	111,248	0,146	3	20,1	14	288,66
3	1,052	3,000	2,8	30	85,524	0,242	3	12,4	14	173,67
4	0,734	3,000	4,0	30	122,672	0,227	3	13,2	14	184,89
5	0,680	3,000	4,4	30	132,353	0,235	3	12,7	14	179,10
6	0,731	3,000	4,1	30	123,091	0,234	3	12,8	14	179,87
7	0,870	3,000	3,4	30	103,409	0,245	3	12,2	14	171,43
8	0,811	3,000	3,7	30	111,020	0,169	3	17,7	14	248,03
9	0,829	3,000	3,6	30	108,521	0,163	3	18,3	14	257,41
10	0,635	3,000	4,7	30	141,769	0,126	3	23,8	14	333,77
11	1,130	3,000	2,6	30	179,46	0,228	3	13,1	14	184,48
12	0,502	3,000	5,9	30	179,283	0,172	3	17,4	14	244,66
13	0,687	3,000	4,3	30	131,068	0,154	3	19,4	14	272,73
			Gal. Totales							
			51.2	AC	1538,2	GALONES TOTALES AGUA FRÍA				3002,8
GALONES TOTALES RETROLAVADO DÍA 3										4541

Fuente: elaboración propia.

Tabla XII. Gasto de agua en retrolavados filtros pulidores día 4

RETROLAVADO DE FILTROS PULIDORES: DÍA 4										
Filtro	Agua caliente					Agua fría				
	Tiempo (min)	Volumen (Gal)	Flujo (gal/min)	Duración (min)	Galones totales	Tiempo (min)	Volumen (gal)	Flujo (gal/min)	Duración (min)	Flujo total
1	0,59	3,00	5,12	30	153,45	0,139	3	21,58	14	302,2
2	0,58	3,00	5,15	30	154,46	0,153	3	19,60	14	274,5
3	0,74	3,00	4,06	30	121,68	0,218	3	13,76	14	192,7
4	0,72	3,00	4,18	30	125,46	0,221	3	13,55	14	189,8
5	0,69	3,00	4,37	30	131,00	0,228	3	13,13	14	183,9
6	0,68	3,00	4,44	30	133,10	0,231	3	12,96	14	181,6
7	0,78	3,00	3,86	30	115,66	0,231	3	12,99	14	181,9
8	0,69	3,00	4,36	30	130,75	0,175	3	17,15	14	240,2
9	0,80	3,00	3,74	30	112,31	0,141	3	21,25	14	297,5
10	0,44	3,00	6,87	30	206,11	0,107	3	28,03	14	392,5
11	0,81	3,00	3,69	30	110,68	0,216	3	13,86	14	194,1
12	0,68	3,00	4,43	30	132,87	0,174	3	17,27	14	241,8
13	0,58	3,00	5,13	30	154,02	0,169	3	17,71	14	248,0
			59.39	Gal. Totales AC	1781,6	GALONES TOTALES AGUA FRÍA				3120,8
GALONES TOTALES RETROLAVADO DÍA 4									4902,4	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. Gasto de agua en retrolavados filtros pulidores día 5

RETROLAVADO DE FILTROS PULIDORES: DÍA 5										
Filtro	Agua caliente					Agua fría				
	Tiempo (min)	Volumen (Gal)	Flujo (gal/min)	Duración (min)	Galones totales	Tiempo (min)	Volumen (gal)	Flujo (gal/min)	Duración (min)	Flujo total
1	0,6	3,0	5,0	30,0	148,8	0,1	3,0	21,7	14,0	304,3
2	0,6	3,0	5,1	30,0	153,0	0,2	3,0	19,1	14,0	267,5
3	0,7	3,0	4,1	30,0	121,9	0,2	3,0	13,2	14,0	184,3
4	0,7	3,0	4,2	30,0	126,2	0,2	3,0	13,4	14,0	187,4
5	0,7	3,0	4,3	30,0	130,3	0,2	3,0	13,1	14,0	183,1
6	0,7	3,0	4,4	30,0	131,2	0,2	3,0	13,4	14,0	187,4
7	0,8	3,0	3,9	30,0	116,7	0,2	3,0	13,1	14,0	183,9
8	0,7	3,0	4,3	30,0	130,2	0,2	3,0	17,0	14,0	238,2
9	0,8	3,0	3,7	30,0	111,0	0,1	3,0	21,0	14,0	294,4
10	0,5	3,0	5,9	30,0	177,6	0,1	3,0	26,6	14,0	372,8
11	0,8	3,0	3,7	30,0	109,5	0,2	3,0	14,4	14,0	201,9
12	0,7	3,0	4,4	30,0	131,1	0,2	3,0	17,0	14,0	237,7
13	0,6	3,0	4,9	30,0	147,1	0,2	3,0	17,3	14,0	242,8
	Flujo volumétrico AC		57,8	Gal. Totales AC	1734,7	GALONES TOTALES AGUA FRÍA				3085,8
GALONES TOTALES RETROLAVADO DÍA 5										4820,5
GALONES TOTALES SEMANALES RETROLAVADO FILTROS PULIDORES										23671

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. Gasto de agua retrolavados filtros de carbónconvencional

SEMANA 1	Filtro 1	t(s) [3 gal]	Filtro 2	t(s) [3 gal]	Filtro 3	t(s)
Duración del retrolavado con agua caliente: 3 horas, 45 min	Toma 1	13,37	Toma 1	11,4	Toma 1	12,57
	Toma 2	13,42	Toma 2	12,4	Toma 2	12,40
	Toma 3	14,12	Toma 3	11,6	Toma 3	12,48
	Toma 4	13,35	Toma 4	11,8	Toma 4	12,55
	Media	13,65	Media	11,8	Media	12,50
	Tiempo total (min)	225	Tiempo total	225	Tiempo total	225
	Gal. Total	2985,625	Gal. Total	3432,2034	Gal. Total	3240
SEMANA 1	Filtro 1	t(s) [3 gal]	Filtro 2	t(s) [3 gal]	Filtro 3	t(s)
Duración del retrolavado con agua fría: 45 min	Toma 1	1,87	Toma 1	1,68	Toma 1	1,52
	Toma 2	1,82	Toma 2	1,82	Toma 2	1,56
	Toma 3	1,76	Toma 3	1,74	Toma 3	1,45
	Media	1,82	Media	1,75	Media	1,51
	Tiempo total (min)	45	Tiempo total	45	Tiempo total	45
	Gal. Total	4458,72	Gal. Total	4637,40	Gal. Total	5364,24
	Galones totales en el día					
SEMANA 2	Filtro 1	t(s) [3 gal]	Filtro 2	t(s) [3 gal]	Filtro 3	t(s)
Duración del retrolavado con agua caliente: 3 horas, 30 minutos	Toma 1	10,88	Toma 1	11,45	Toma 1	9,89
	Toma 2	10,51	Toma 2	12,19	Toma 2	10,22
	Toma 3	10,40	Toma 3	11,97	Toma 3	10,64
	Toma 4	10,64	Toma 4	11,89	Toma 4	10,28
	Media	10,61	Media	11,88	Media	10,26
	Tiempo total (min)	210	Tiempo total	210	Tiempo total	210
	Gal. Total	3563,52	Gal. Total	3183,16	Gal. Total	3685,11
SEMANA 2	Filtro 1	t(s) [3 gal]	Filtro 2	t(s) [3 gal]	Filtro 3	t(s)
Duración del retrolavado con agua fría: 45 min	Toma 1	1,58	Toma 1	1,50	Toma 1	1,47
	Toma 2	1,50	Toma 2	1,52	Toma 2	1,50
	Toma 3	1,52	Toma 3	1,40	Toma 3	1,53
	Toma 4	1,56	Toma 4	1,38	Toma 4	1,56
	Media	1,54	Media	1,45	Media	1,52
	Tiempo total (min)	45	Tiempo total	45	Tiempo total	45
	Gal. Total	5259,74	Gal. Total	5586,21	Gal. Total	5346,53
Galones totales en el día						26624,6

Continuación de la tabla XIV.

SEMANA 3	Filtro 1	t(s) [3 gal]	Filtro 2	t(s) [3 gal]	Filtro 3	t(s)
Duración del retrolavado con agua caliente: 3 horas, 45 minutos	Toma 1	10,92	Toma 1	11,54	Toma 1	10,12
	Toma 2	10,86	Toma 2	12,24	Toma 2	10,22
	Toma 3	10,94	Toma 3	12,10	Toma 3	10,48
	Toma 4	10,92	Toma 4	12,12	Toma 4	10,38
	Media	10,91	Media	12,00	Media	10,30
	Tiempo total (min)	225	Tiempo total	225	Tiempo total	225
	Gal. Total	3712,19	Gal. Total	3375	Gal. Total	3932,04
SEMANA 3	Filtro 1	t(s) [3 gal]	Filtro 2	t(s) [3 gal]	Filtro 3	t(s)
Duración del retrolavado con agua fría: 50 min	Toma 1	1,58	Toma 1	1,50	Toma 1	1,47
	Toma 2	1,50	Toma 2	1,52	Toma 2	1,50
	Toma 3	1,52	Toma 3	1,40	Toma 3	1,53
	Toma 4	1,56	Toma 4	1,38	Toma 4	1,56
	Media	1,54	Media	1,45	Media	1,52
	Tiempo total (min)	50	Tiempo total	50	Tiempo total	50
	Gal. Total	5844,16	Gal. Total	6206,90	Gal. Total	5940,59
Galones totales en el día						29010,87
SEMANA 4	Filtro 1	t(s)	Filtro 2	t(s)	Filtro 3	t(s)
Duración del retrolavado con agua caliente: 3 horas, 40 minutos	Toma 1	10,94	Toma 1	11,54	Toma 1	10,12
	Toma 2	10,98	Toma 2	12,22	Toma 2	10,22
	Toma 3	10,40	Toma 3	12,10	Toma 3	10,64
	Toma 4	10,64	Toma 4	11,89	Toma 4	10,24
	Media	10,74	Media	11,94	Media	10,31
	Tiempo total (min)	220	Tiempo total	220	Tiempo total	220
	Gal. Total	3687,15	Gal. Total	3317,28	Gal. Total	3842,79
SEMANA 4	Filtro 1	t(s)	Filtro 2	t(s)	Filtro 3	t(s)
Duración del retrolavado con agua fría: 45 min	Toma 1	2,10	Toma 1	1,64	Toma 1	1,56
	Toma 2	1,64	Toma 2	1,60	Toma 2	1,54
	Toma 3	1,66	Toma 3	1,54	Toma 3	1,60
	Toma 4	1,72	Toma 4	1,42	Toma 4	1,57
	Media	1,78	Media	1,55	Media	1,57
	Tiempo total (min)	45	Tiempo total	45	Tiempo total	45
	Gal. Total	4550,56	Gal. Total	5225,81	Gal. Total	5167,46
Galones totales en el día						25791,05

Continuación de la tabla XIV.

AGUA CALIENTE						
SEMANA 5	Filtro 1	t(s)	Filtro 2	t(s)	Filtro 3	t(s)
Duración del retrolavado con agua caliente: 3 horas, 30 minutos	Toma 1	11,12	Toma 1	11,62	Toma 1	10,20
	Toma 2	10,92	Toma 2	12,06	Toma 2	9,86
	Toma 3	10,68	Toma 3	11,92	Toma 3	10,68
	Toma 4	10,54	Toma 4	11,88	Toma 4	10,29
	Media	10,15	Media	11,87	Media	10,26
	Tiempo total (min)	210	Tiempo total	210	Tiempo total	210
	Gal. Total	3495,15	Gal. Total	3184,50	Gal. Total	3685,11
AGUA FRÍA						
SEMANA 2	Filtro 1	t(s)	Filtro 2	t(s)	Filtro 3	t(s)
Duración del retrolavado con agua fría: 55 min	Toma 1	1,60	Toma 1	1,59	Toma 1	1,54
	Toma 2	1,56	Toma 2	1,52	Toma 2	1,50
	Toma 3	1,64	Toma 3	1,48	Toma 3	1,52
	Toma 4	1,56	Toma 4	1,42	Toma 4	1,56
	Media	1,59	Media	1,50	Media	1,53
	Tiempo total (min)	55	Tiempo total	55	Tiempo total	55
	Gal. Total	6226,41	Gal. Total	6589,02	Gal. Total	6470,59
Galones totales en el día						29650,774

Fuente: elaboración propia.

Tabla XV. Gasto de vapor retrolavados pulidores sistema convencional

Día	Flujo Volumétrico de agua (gal/min)	Flujo másico de agua (kg/s)	Cp del agua (kJ/kg.K)	Diferencia de temperatura $\Delta T(^{\circ}K)$	Entalpía de vapor AHvap (KJ/Kg)	Gasto de Vapor (kg/s)	Gasto de vapor (kg)
1	50,80	3,74	4,20	55,00	2436,56	0,35	636,95
2	47,74	3,51	4,20	55,00	2436,56	0,33	598,58
3	51,27	3,77	4,20	55,00	2436,56	0,36	642,95
4	59,39	4,37	4,20	55,00	2436,56	0,41	744,66
5	57,82	4,25	4,20	55,00	2436,56	0,40	725,09
6	56,53	4,16	4,20	55,00	2436,56	0,39	708,87
7	59,08	4,34	4,20	55,00	2436,56	0,41	740,81
8	58,94	4,33	4,20	55,00	2436,56	0,41	739,02
9	59,12	4,35	4,20	55,00	2436,56	0,41	741,30
10	58,27	4,28	4,20	55,00	2436,56	0,41	730,66
11	59,36	4,37	4,20	55,00	2436,56	0,41	744,38
12	59,99	4,41	4,20	55,00	2436,56	0,42	752,21
13	59,04	4,34	4,20	55,00	2436,56	0,41	740,33
14	58,92	4,33	4,20	55,00	2436,56	0,41	738,88
15	58,96	4,34	4,20	55,00	2436,56	0,41	739,29

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVI. **Gasto de vapor retrolavados filtros de carbón convencional**

Día	Flujo Volumétrico de agua (gal/min)	Flujo másico de agua (kg/s)	Cp del agua (kJ/kg.K)	Diferencia de temperatura $\Delta T(^{\circ}K)$	Entalpía de vapor ΔH_{vap} (KJ/Kg)	Gasto de Vapor (kg/s)	Gasto de vapor (kg)
1	42,92	3,156031	4,197	55	2436,56	0,29	4036,45
2	49,67	3,652377	4,197	55	2436,56	0,35	4359,84
3	48,12	3,538402	4,197	55	2436,56	0,33	4424,92
GASTO SEMANAL DE VAPOR PROMEDIO EN RETROLAVADOS SISTEMA CONVENCIONAL(kg)							
7848,39 Kilogramos							

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVII. **Gasto de vapor retrolavados carbón y pulidores Vortisand**

RETROLAVADO FILTROS PULIDORES								
CONST	Flujo Volumétrico de agua (gal/min)	Flujo másico de agua (kg/s)	Cp del agua (kJ/kg.K)	Diferencia de temperatura $\Delta T(^{\circ}K)$	Entalpía de vapor ΔH_{vap} (KJ/Kg)	Gasto de Vapor (kg/s)	Gasto de vapor (kg)	Gasto de Vapor semanal (kg)
	90	6,617958	4,197	55	2436,56	0,63	752,37	3761,84
RETROLAVADO FILTROS DE CARBÓN								
CONST	Flujo Volumétrico de agua (gal/min)	Flujo másico de agua (kg/s)	Cp del agua (kJ/kg.K)	Diferencia de temperatura $\Delta T(^{\circ}K)$	Entalpía de vapor ΔH_{vap} (KJ/Kg)	Gasto de Vapor (kg/s)	Gasto de vapor (kg)	Gasto de Vapor semanal (kg)
	100	7,35	4,197	55	2436,56	0,70	3761,84	3761,84
GASTO SEMANAL DE VAPOR PROMEDIO EN RETROLAVADOS VORTISAND (kg)								
7523,67 Kilogramos								

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVIII. Costo por bombeo de agua en retrolavados

COSTO POR BOMBEO DE AGUA EN RETROLAVADOS								
SISTEMA VORTISAND								
FILTRO	Volts	Amperes	W	KW	t	kwh	Q.	COSTO
Grava	460	40,60	18676	18,67	2,25	42,02	1,8859	79,24866
Carbón	460	75,00	34500	34,50	1,50	51,75	1,8859	97,59688
Pulidores	460	75,00	34500	34,50	2,50	86,25	1,8859	162,6615
COSTO TOTAL SEMANAL								339,507
COSTO POR BOMBEO DE AGUA EN RETROLAVADOS								
SISTEMA CONVENCIONAL								
FILTRO	Volts	Amperes	W	Kw	t	kwh	Q.	COSTO
Grava	3500	33,2	116200	116,2	1	116,2	1,8859	219,1451
Carbón	3500	33,2	116200	116,2	4,5	522,9	1,8859	986,1528
Pulidores	3500	33,2	116200	116,2	6	697,2	1,8859	1314,8700
COSTO TOTAL SEMANAL								2520,17

Fuente: elaboración propia.

3.8. Análisis estadístico

En cada uno de los casos analizados para ambos sistemas de filtración, se utilizaron distintos análisis estadísticos para concluir en función de estos sobre la viabilidad del proyecto.

3.8.1. Medidas de dispersión

Se tomo una muestra significativa de cada parámetro analizado, para dar resultados concretos de cada uno de estos se utilizó la media de una muestra y para analizar su confiabilidad, la desviación estándar.

3.8.1.1. Media de una muestra

Dadas las muestras obtenidas para cada parámetro a analizar, se utilizó la media muestral para cada uno de ellos. Para determinar el valor medio de una muestra de datos en la fase experimental, se utilizó la siguiente ecuación:

$$\bar{X} = \frac{\sum_i X_i}{n}$$

Donde:

X_i = datos obtenidos en la muestra

n = número de datos de la muestra

3.8.1.2. Desviación estándar

Para verificar la confiabilidad de los datos obtenidos con la media muestral se utilizó la desviación estándar. Para determinar el valor de la desviación estándar de una muestra de datos de la fase experimental, se utilizó la siguiente ecuación:

$$s = \sqrt{\sum_i \frac{(x_i - \bar{X})^2}{n-1}}$$

Donde:

X_i = datos obtenidos en la muestra

\bar{X} = mediamuestral

n = número de datos de la muestra

3.8.1.3. Contraste de significación (análisis de varianza)

Es la prueba estadística utilizada para distinguir si la diferencia entre las cantidades medidas es significativa. En este caso se tendrá dos medias muestrales \bar{x}_1 y \bar{x}_2 .

Para determinar si las propiedades fisicoquímicas del agua filtrada con el filtro de grava en cada uno de los sistemas tienen una diferencia significativa entre ellas, se determinará un intervalo de confianza a través de los valores obtenidos mediante la *T de student*, y los grados de libertad.

Uno de los objetivos es demostrar que las propiedades fisicoquímicas obtenidas con cada uno de los sistemas son iguales o mejores, por lo que se necesita probar si $(\bar{x}_1 - \bar{x}_2)$ difiere significativamente de cero.

Para decidir si $H_0: \mu_1 = \mu_2$, cuando se tiene dos muestras con desviaciones estándar diferentes, se calcula el estadístico t, mediante la siguiente ecuación:

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}}$$

Donde:

t=valor de t calculada

\bar{x} = media

n =número de muestras

s=desviación estándar

El valor de t calculada por este estadístico es contrastado posteriormente utilizando el valor crítico de t en tablas (figura 12, anexos). Este valor depende del nivel de significancia y de los grados de libertad. Los grados de libertad son calculados mediante la siguiente ecuación

$$G.L. = \frac{\left(\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}\right)^2}{\frac{s_1^4}{n_1^2(n_1-1)} + \frac{s_2^4}{n_2^2(n_2-1)}}$$

Donde:

G.L.= grados de libertad

n= número de muestras

s= desviación estándar

El valor de los grados de libertad calculados, debe aproximarse al entero inmediato.

El criterio de decisión sobre los valores de t calculado y críticos, son los siguientes:

- Si $t_{\text{cal}} < t_{\text{Crit}}$ entonces H_0 es aceptada
- Si $t_{\text{cal}} > t_{\text{Crit}}$ entonces H_0 es rechazada

Los resultados obtenidos del contraste de significación en cada caso fueron:

Tabla XIX. **pH y conductividad: entrada**

Muestra No:	pH 2	pH 1	Conductividad 2	Conductividad 1
1	8,10	8,13	175	178
2	8,20	8,26	175	180
3	8,34	8,31	161	172
4	8,32	8,29	174	182
5	8,24	8,20	173	179
6	8,13	8,09	172	176
7	8,18	8,15	172	174
8	8,22	8,16	170	176
9	8,23	8,19	168	182
10	8,16	8,12	170	174
11	8,18	8,12	205	194
12	8,18	8,13	204	200
13	8,16	8,12	172	180
14	8,20	8,26	175	201
15	8,32	8,29	203	198
Media:	8,21	8,18	177,93	183,07
Desviación estandar	0,070	0,074	13,95	10,01
T calculada	0,85		1,16	
Grados de libertad	27,88		25,39	
Intervalo de confianza	98%		98%	
T crítica	2,46		2,46	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XX. **Alcalinidad, dureza y cloro: entrada**

Muestra No:	Alcalinidad 2	Alcalinidad 1	Dureza 2	Dureza 1	Cloro 2	Cloro 1
1	32	30	60	62	0,65	0,40
2	34	26	64	58	0,54	0,40
3	28	26	58	50	0,58	0,40
4	32	28	60	58	0,60	0,40
5	34	30	62	58	0,62	0,30
6	32	26	60	58	0,60	0,30
7	28	26	62	60	0,60	0,30
8	30	28	64	60	0,63	0,30
9	32	30	62	60	0,66	0,30
10	34	30	58	60	0,68	0,30
11	30	32	62	60	0,60	0,30
12	32	28	64	60	0,63	0,30
13	28	28	60	58	0,60	0,30
14	32	30	60	56	0,68	0,30
15	30	28	64	64	0,64	0,30
Media:	31,20	28,40	61,33	58,80	0,62	0,33
Desviación estandar	2,11	1,88	2,09	3,10	0,04	0,05
T calculada	3,83		2,46		19,12	
Grados de libertad	27,64		24,58		27,10	
Intervalo de confianza	98%		98%		98%	
T crítica	2,46		2,46		2,46	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXI. pH y conductividad: salida

Muestra No:	pH 2	pH 1	Conductividad 2	Conductividad 1
1	8,04	8,12	176	170
2	8,12	8,09	176	184
3	8,18	8,26	167	169
4	8,19	8,24	175	181
5	8,13	8,11	169	174
6	8,11	8,09	169	173
7	8,14	8,15	168	172
8	8,06	8,18	168	174
9	8,11	8,16	169	176
10	8,10	8,14	169	176
11	8,11	8,15	202	196
12	8,10	8,12	202	192
13	8,10	8,12	170	176
14	8,19	8,16	173	198
15	8,20	8,20	202	184
Media:	8,13	8,15	177	179,67
Desviación estandar	0,05	0,05	13,27	9,29
T calculada	1,53		0,64	
Grados de libertad	27,90		25,07	
Intervalo de confianza	98%		98%	
T Crítica	2,46		2,46	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXII. **Alcalinidad, dureza y cloro: salida**

Muestra No:	Alcalinidad 2	Alcalinidad 1	Dureza 2	Dureza 1	Cloro 2	Cloro 1
1	28	30	56	54	0,40	0,57
2	26	32	52	62	0,40	0,51
3	24	26	52	54	0,40	0,55
4	30	28	56	56	0,30	0,44
5	26	32	58	58	0,30	0,46
6	26	30	58	58	0,30	0,48
7	24	28	60	60	0,30	0,46
8	26	28	60	62	0,30	0,48
9	26	30	58	58	0,30	0,45
10	26	30	60	56	0,30	0,46
11	28	32	68	64	0,30	0,42
12	26	26	62	62	0,30	0,44
13	25	26	56	56	0,30	0,43
14	28	28	56	58	0,30	0,43
15	30	28	62	62	0,30	0,42
Media:	26,60	28,93	58,27	58,67	0,32	0,47
Desviación estandar	1,84	2,12	4,06	3,17	0,04	0,04
T calculada	3,22		0,30		9,25	
Grados de libertad	27,47		26,47		27,77	
Intervalo de confianza	98%		98%		98%	
T crítica	2,46		2,46		2,46	

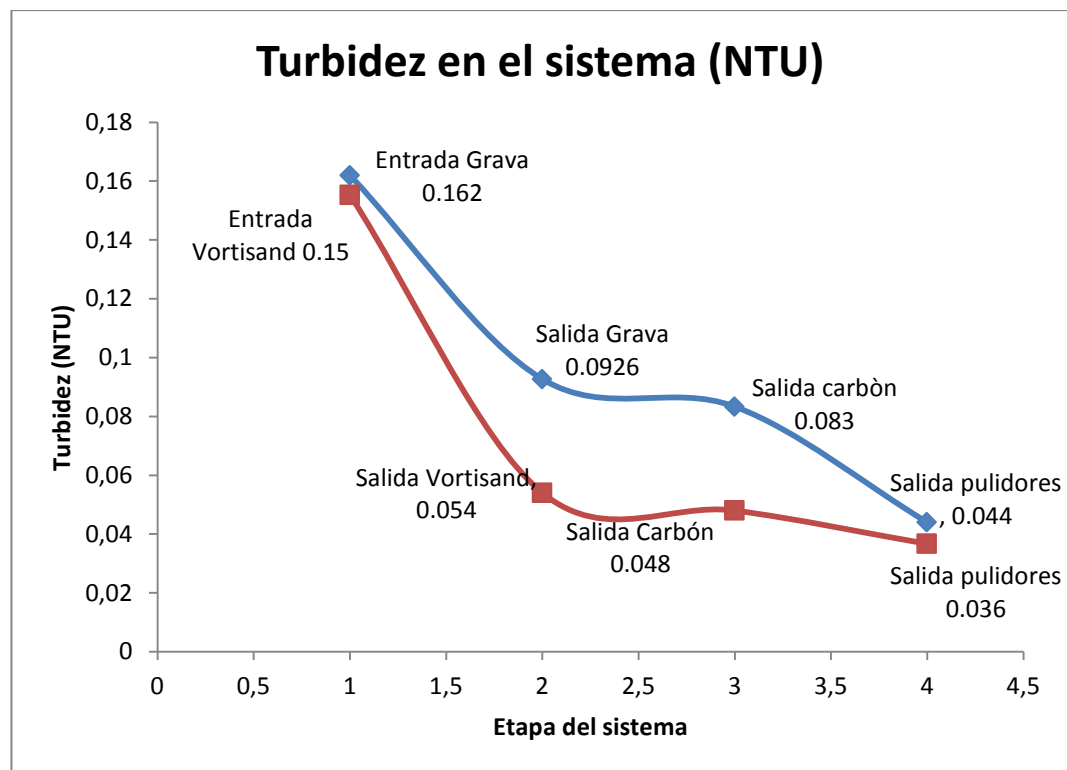
Fuente: elaboración propia

4. RESULTADOS

4.1. Evaluación de la eficiencia del sistema en función de la turbidez de salida en cada etapa

En cada etapa del sistema, se determinó la turbidez para ambos sistemas de filtración, obteniendo curvas con la misma tendencia pero significativamente menores en el sistema Vortisand.

Figura 3. Turbidez obtenida con ambos sistemas



Fuente: tabla III y IV, tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información.

Tabla XXIII. **Identificación de series, figura 3**

Color	Serie	Ecuación	R ²	Intervalo
	Sistema convencional	$y = -0,015x^3 + 0,12x^2 - 0,324x + 0,381$	1	0,01-0,16
	Sistema Vortisand	$y = -0,016x^3 + 0,148x^2 - 0,428x + 0,452$	1	0,01-0,16

Fuente: figura 3, resultados.

Tabla XXIV. **Eficiencia de los sistemas de filtración**

ANÁLISIS DE TURBIDEZ (NTU)				
SISTEMA CONVENCIONAL				
Entrada grava	Salida grava	Salida carbón	Salida pulidores	% Ef grava
0,162	0,093	0,083	0,044	42,182
SISTEMA VORTISAND				
Entrada Vortisand	Salida Vortisand	Salida carbón	Salida pulidores	% Ef grava
0,155	0,054	0,048	0,037	65,326

Fuente: tabla III y IV tabulación, procesamiento y ordenamiento de la información.

4.2. Comparación de las propiedades fisicoquímicas obtenidas en cada etapa de filtración para ambos sistemas

Para ambos sistemas se tomaron 15 alícuotas de agua en cada etapa, de las cuales se obtuvo una media y a través de ella se determinó una tendencia para cada propiedad, en cada sistema.

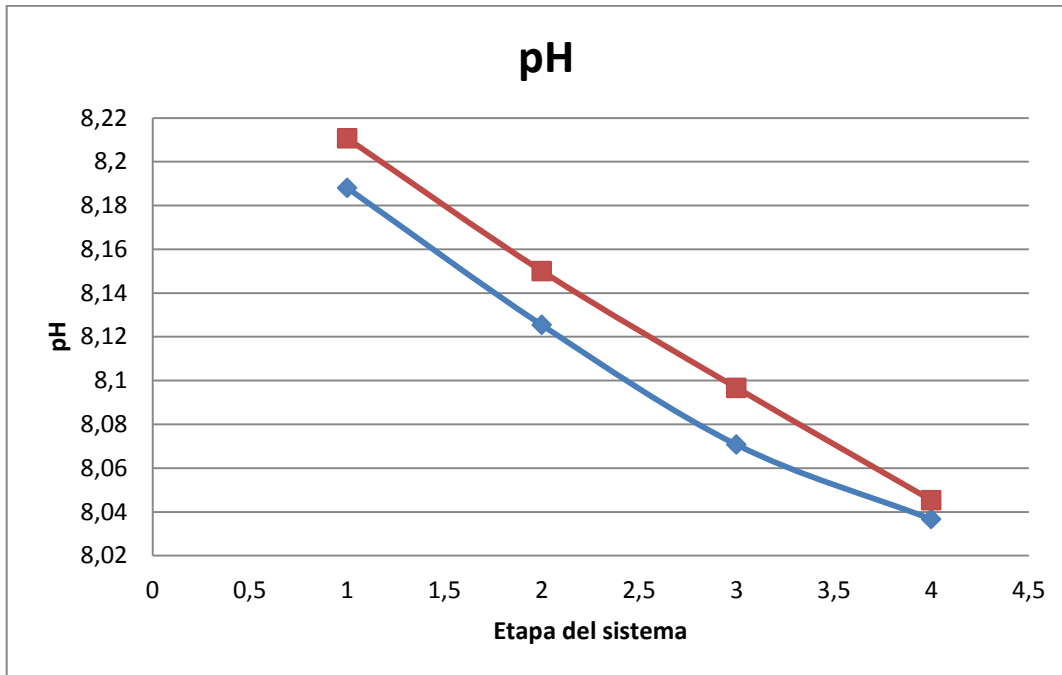
Se obtuvieron en todos los casos, las mismas tendencias y ecuaciones matemáticas similares, y del mismo grado para cada propiedad, demostrando de esta manera que no se verá afectada la calidad del agua obtenida con el cambio del sistema de filtración.

Además de esto, se demostró a través de los valores R2 obtenidos, que las tendencias son totalmente aplicables a los datos obtenidos en la práctica diaria de análisis de la calidad del agua, pues todos los valores fueron cercanos a uno en ambos casos.

4.2.1. Comparación de pH

La tendencia que presenta el pH para ambos sistemas es la misma, y la diferencia entre los resultados obtenidos es no significativa, como se puede observar a través de la siguiente gráfica.

Figura 4. PH: convencional versus Vortisand



Fuente: tabla V y VI tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información.

Tabla XXV. Identificación de series, figura 4

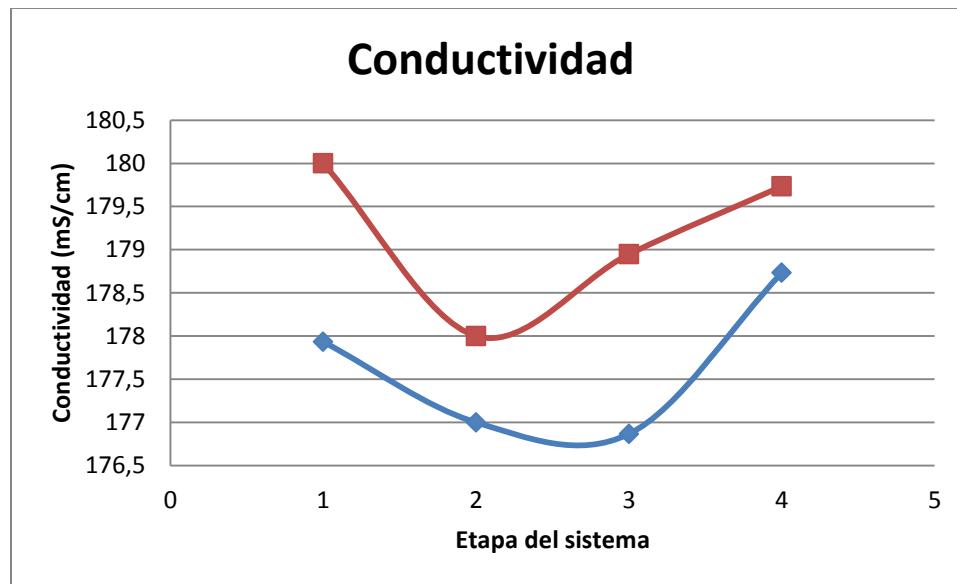
Color	Serie	Ecuación	R2	Intervalo
	Sistema convencional	$y = -0,050x + 8,232$	0,983	8,03-8,22
	Sistema Vortisand	$y = -0,054x + 8,263$	0,998	8,03-8,22

Fuente: figura 4 resultados.

4.2.2. Comparación de conductividad

Para cada etapa del sistema se evaluó de igual forma, la conductividad de 15 alícuotas de ambos sistemas, para obtener con ellos una media de los resultados obtenidos y así presentar una tendencia para conductividad.

Figura 5. Conductividad: convencional *versus* Vortisand



Fuente: tabla V y VI tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información.

Tabla XXVI. Identificación de series, figura 5

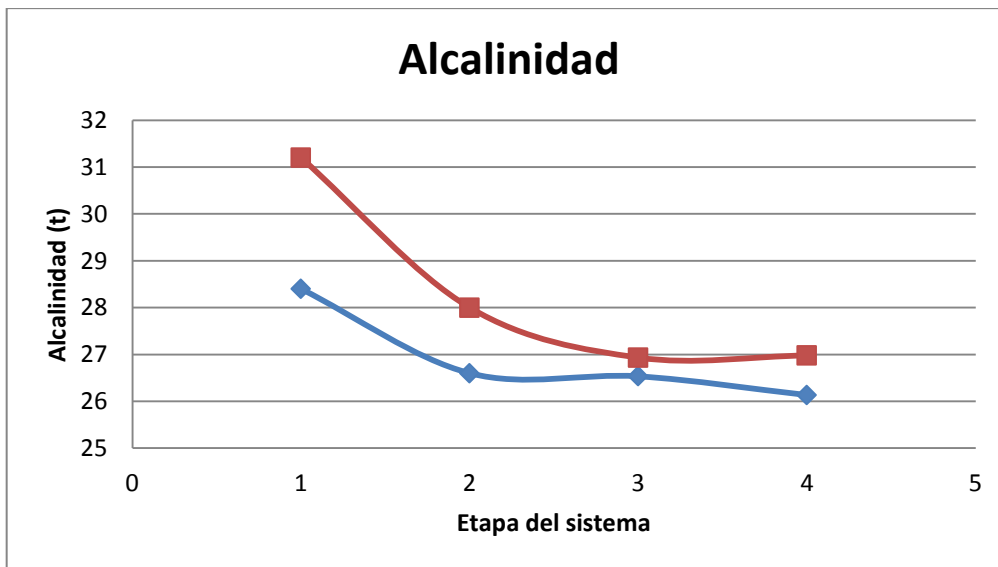
Color	Serie	Ecuación	R2	Intervalo
	Sistema convencional	$y = 0,696x^2 - 3,468x + 182,6$	0,801	176,5-179
	Sistema Vortisand	$y = 0,7x^2 - 3,273x + 180,5$	0,968	178-180

Fuente: figura 5 resultados.

4.2.3. Comparación de alcalinidad

Entre las propiedades fisicoquímicas analizadas, la alcalinidad presentó la mayor diferencia en los valores obtenidos en la entrada del sistema, sin embargo, a la salida de estos, la tendencia fue similar, hecho que se puede observar a continuación:

Figura 6. **Alcalinidad: convencional versus Vortisand**



Fuente: tabla V y VI tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información.

Tabla XXVII. **Identificación de series, figura 6**

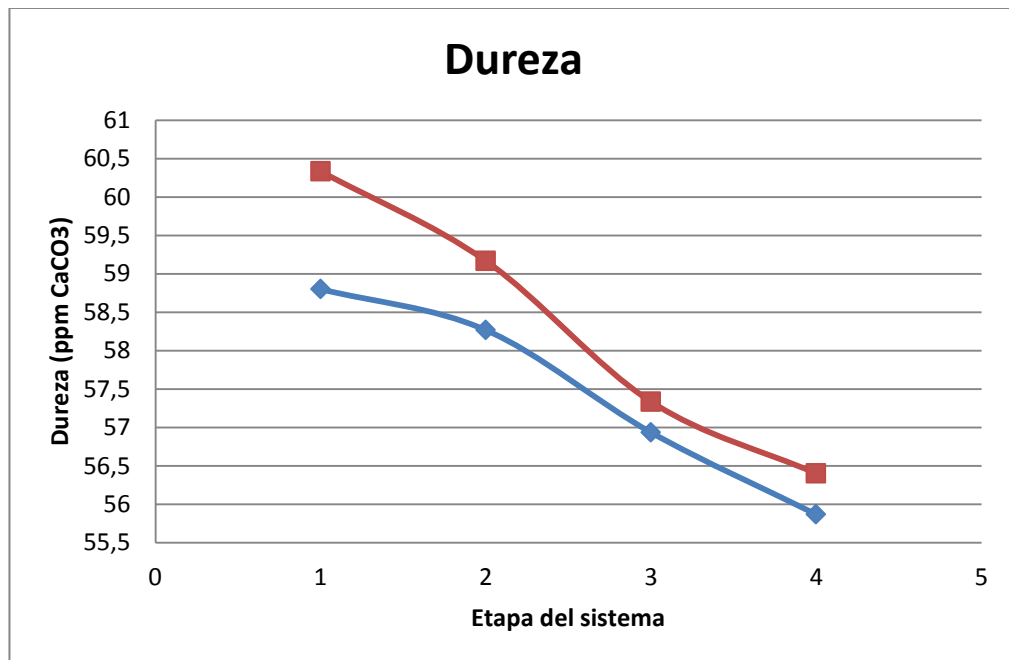
Color	Serie	Ecuación	R2	Intervalo
	Sistema convencional	$y = 0,35x^2 - 2,436x + 30,38$	0,93	27-31
	Sistema Vortisand	$y = 0,811x^2 - 5,429x + 35,76$	0,99	27-31

Fuente: figura 6 resultados.

4.2.4. Comparación de dureza del agua

En cuanto a la dureza del agua, se puede observar la misma tendencia en los datos obtenidos para cada uno de los sistemas, obteniendo ecuaciones matemáticas del mismo grado.

Figura 7. Dureza del agua: convencional *versus* Vortisand



Fuente: tabla V y VI tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información.

Tabla XXVIII. Identificación de series, figura 7

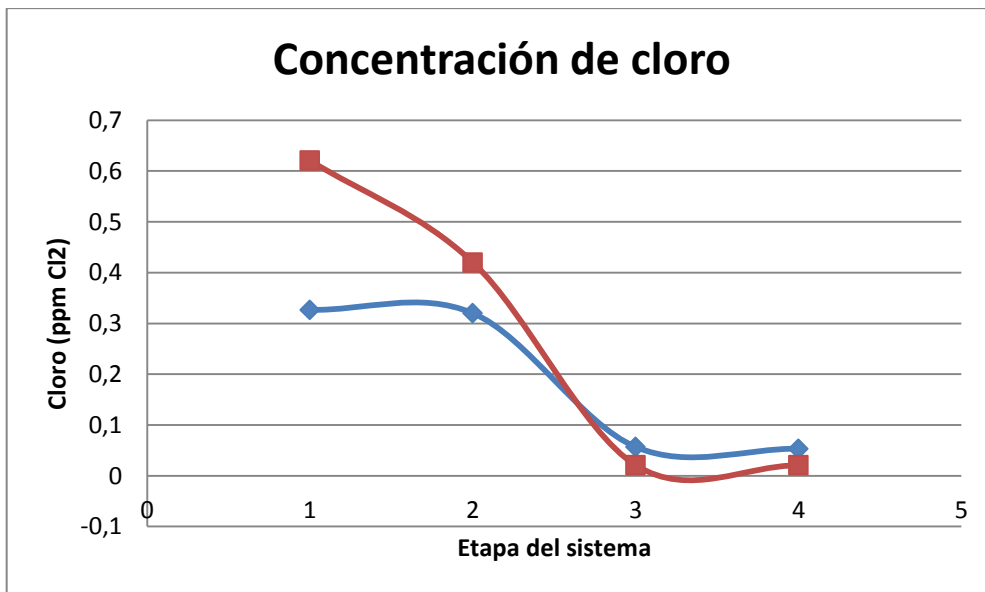
Color	Serie	Ecuación	R2	Intervalo
	Sistema convencional	$y = -1,013x + 60$	0,975	56-60,5
	Sistema Vortisand	$y = -1,363x + 61,71$	0,985	56-60,5

Fuente: figura 7 resultados

4.2.5. Comparación de cloro libre

Como se puede observar en la siguiente gráfica, la cantidad de cloro libre en el agua de entrada difiere en valores para ambos sistemas, sin embargo, por la acción de los filtros de carbón, proporcionan la misma calidad en el agua de salida para ambos sistemas en cuanto a esta propiedad.

Figura 8. Cloro libre: convencional *versus* Vortisand



Fuente: Tabla V y VI Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

Tabla XXIX. Identificación de series, figura 8

Color	Serie	Ecuación	R2	Intervalo
	Sistema convencional	$y = 0,086x^3 - 0,645x^2 + 1,325x - 0,44$	1	0,01-0,6
	Sistema Vortisand	$y = 0,099x^3 - 0,697x^2 + 1,193x + 0,024$	1	0,01-0,6

Fuente: figura 8 resultados.

4.3. Evaluación de la reducción de costos de operación en retrolavados

La reducción de los costos de operación en base al cambio de retrolavados se determinó utilizando el costo por el agua utilizada, el costo por bombeo de agua y el costo de vapor para el caso de los filtros de carbón y pulidores.

Tabla XXX. Comparación económica de los sistemas de filtración

COMPARACIÓN ECONÓMICA SISTEMAS DE FILTRACIÓN				
COSTOS EN RETROLAVADOS				
	Convencional	Vortisand	Ahorro en Gal	Reducción económica semanal (Q)
Gasto de agua en retrolavados grava (Gal)	6,500	3,250	3250	49,5480628
Gasto de agua en retrolavados carbón (Gal)	25,300	12,150	13,150	200,4790849
Gasto de agua en retrolavados pulidores (Gal)	24,200	13,500	10,700	163,1274683
Gasto total semanal de vapor (kg)	7,850	7,525	325	7,1478875
Gasto por bombeo de agua	2,520	340	2,181	2,181
Ahorro de agua total semanal en galones				28,900
Ahorro de agua total anual en galones				15028,00
Costo total mensual reducido en retrolavados				Q. 2 600,963758
Costo total anual reducido en retrolavados				Q. 135 250,1154

Fuente: tabla VII – XVII tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Se realizó una comparación técnica y económica entre un sistema de filtración de agua convencional y un sistema de filtración Vortisand. En el aspecto técnico, se evaluó el funcionamiento del sistema Vortisand, para asegurar la obtención de agua con los parámetros establecidos en cuanto a cinco propiedades fisicoquímicas: pH, conductividad, alcalinidad, dureza y concentración de cloro, así como la turbiedad obtenida en el agua filtrada para cada uno de los sistemas. En el aspecto económico se comparó el costo del agua utilizada para realizar los retrolavados de cada etapa del sistema, el costo por bombeo de dicha agua y el gasto de vapor, esperando una disminución significativa en los costos con el sistema Vortisand.

Se procedió a realizar un análisis de turbidez en el agua, tomando 15 muestras en cada una de las etapas del proceso: entrada de filtros de grava, salida de filtros de grava, salidas de filtros de carbón y salida de filtros pulidores. Posteriormente, se realizó un análisis de la eficiencia de cada uno de los filtros, tomando como base la turbidez promedio en la entrada y en la salida con los filtros de grava convencionales y de los filtros de grava Vortisand.

Se tomaron 5 muestras a la semana en cada uno de los sistemas para verificar si existe alguna variación con respecto a la etapa del ciclo de retrolavado en que se encontrara el sistema, es decir, si se reporta una menor turbiedad en el día uno de cada semana, que correspondería a las muestras 1, 5 y 10, más no se obtuvo ninguna diferencia entre estas y las otras muestras, con lo que se comprueba que el tiempo establecido para realizar los ciclos de

retrolavados es correcto, pues en el intermedio el sistema de filtración no baja su eficiencia; este comportamiento se dio en ambos sistemas.

La diferencia de turbiedad obtenida con cada sistema, para cada etapa del proceso se puede observar en la figura 3 en la sección de resultados, la diferencia entre la turbiedad de entrada y salida en cada sistema se refleja en la eficiencia de filtrado, que para los filtros convencionales es de 42,18 por ciento, mientras que para los filtros Vortisand es de 65,32 por ciento. Esto refleja la viabilidad del cambio del sistema, puesto que la primicia al considerar dicho cambio fue obtener una turbiedad menor, esto como consecuencia de la mayor ventaja técnica del equipo: la creación de un vórtice en la parte superior del filtro que provoca que el agua que pasa por el lecho de filtrado esté relativamente limpia.

Actualmente, el sistema convencional está compuesto de tres filtros de grava, seis filtros de carbón y trece filtros pulidores, la turbidez de salida del agua, después de todas las etapas es de 0,04 NTU con el sistema convencional y 0,036 NTU con el sistema Vortisand, estos datos parecieran no tener una diferencia significativa, sin embargo, esta radica en que el sistema Vortisand al final del proceso tiene únicamente un filtro pulidor, y con este se obtiene la turbidez deseada, para lo cual en el sistema convencional se utilizan trece.

El sistema Vortisand está compuesto por ocho filtros de grava, dos filtros de carbón y un filtro pulidor, la diferencia en unidades de filtrado para las etapas de carbón y pulidores además de darle una eficiencia mayor al sistema Vortisand (mejor filtración con menos unidades de filtrado), son de suma importancia en la evaluación de los costos de operación, pues el bombeo de agua, el gasto de vapor y la cantidad de agua utilizada en los retrolavados es proporcional a la cantidad de unidades de filtración, por lo cual, se adiciona otra

ventaja al cambio del sistema. Por todo lo mencionado anteriormente, se recomienda el cambio del sistema en función de la turbidez registrada, pues presenta una mayor eficiencia y una significativa reducción de costos de operación.

El siguiente punto a evaluar para la comparación técnica del equipo, son las propiedades fisicoquímicas del agua filtrada. De cada una de las muestras tomadas para el análisis de turbiedad, se tomó una alícuota para realizar el análisis de las propiedades fisicoquímicas obtenidas, siendo estas pH, conductividad, alcalinidad, dureza y concentración de cloro.

Como se puede observar en las figuras 4 - 8 en la sección de resultados, la tendencia es la misma para cada una de las propiedades fisicoquímicas evaluadas, se observa un comportamiento inversamente proporcional en cada una de ellas, registrándose de igual forma para ambos sistemas. La embotelladora que está evaluando el cambio del sistema convencional, requiere que las propiedades fisicoquímicas registradas con el sistema de filtración sean iguales o mejores, lo cual concuerda con las gráficas obtenidas de dichas filtraciones.

En las etapas de filtrado, el aumento o la disminución de las propiedades fisicoquímicas pH, conductividad, alcalinidad y dureza, no es crítico, puesto que no se adiciona en el proceso ningún químico que pueda alterar las propiedades obtenidas. Asimismo, dado que la filtración del agua es un proceso físico, las propiedades fisicoquímicas mencionadas no se alteran durante el proceso. Sin embargo, es crítica la evaluación de la concentración de cloro obtenida con ambos filtros, pues esto determina el paso del agua por los filtros de carbón.

Como en las demás propiedades fisicoquímicas, la tendencia de variación de la concentración de cloro es la misma para ambos sistemas de filtración. Por otra parte, para garantizar los resultados obtenidos gráficamente, se realizó un análisis de varianza entre las propiedades fisicoquímicas de entrada y salida para el filtro de grava en cada sistema, los resultados obtenidos fueron satisfactorios en todos los casos.

Para comprobar que las diferencias obtenidas entre las propiedades fisicoquímicas fueran no significativas, se utilizó el criterio estadístico de la T de student, se determinaron los grados de libertad en cada caso comparando las propiedades de salida del filtro de grava para el sistema convencional y de salida del filtro Vortisand, y se obtuvo un intervalo de confianza en cada uno de los casos. Con los resultados obtenidos y el uso de la figura 12 de la sección de anexos, se determinó, para una confiabilidad del 98 por ciento en los datos obtenidos, que la hipótesis nula si es aceptada, exceptuando los parámetros alcalinidad y cantidad de cloro. Estas diferencias se deben a la calidad del agua de entrada en función del agua de salida, no son una consecuencia de la eficiencia del filtro.

Los resultados obtenidos para las propiedades fisicoquímicas del agua en ambos sistemas fueron satisfactorios, por lo cual se propone el cambio del sistema de filtración en cuanto a las propiedades obtenidas.

El punto determinante para considerar o descartar el cambio del sistema, es la comparación económica entre ambos, tomando como primicia que los costos de operación en cuanto a retrolavados son significativamente menores con el sistema Vortisand en comparación con el sistema convencional. Los retrolavados del sistema convencional se dividen de la siguiente manera: retrolavados de filtros de grava, periodicidad mensual, duración de 4

horas;retrolavados de filtros de carbón, periodicidad semanal, duración de 5 horas; retrolavados de filtros pulidores, periodicidad diaria, duración de 1 hora 30 minutos.

Los retrolavados en el sistema Vortisand se dividen de la siguiente manera: retrolavados de filtros Vortisand, automáticos, cada 3 días aproximadamente, duración de 45 minutos; retrolavados de filtros de carbón, periodicidad semanal, duración de 1 hora 30 minutos; retrolavados filtros pulidores, periodicidad diaria, duración de 1 hora. En ambos sistemas se utiliza agua fría y caliente para los filtros de carbón y pulidores y agua fría para los filtros de grava.

La duración del retrolavado y el número de unidades de filtrado a limpiar, son las variables determinantes para determinar el costo de operación en ambos sistemas, es por ello que el filtro Vortisand presenta una reducción de costos tan significativa, como se puede observar en la tabla XXVII de la sección de resultados, la reducción anual de costos en retrolavados es de Q.135,250. Esta reducción se obtiene como consecuencia de las reducciones de recursos para los retrolavados, de agua bombeada para limpieza, del vapor utilizado para calentar el agua en los casos necesarios, y del menor tiempo de bombeo de agua por la reducción del tiempo de retrolavados.

El costo reducido con el uso del sistema Vortisand es determinante para el cambio del sistema, por lo cual se hace la recomendación de realizar dicho cambio en la embotelladora.

Los resultados obtenidos de la comparación técnica y económica realizada a ambos sistemas de filtración reportó resultados satisfactorios en cada una de las etapas; eficiencia de filtración, propiedades fisicoquímicas y reducción de los costos de operación.

CONCLUSIONES

1. El sistema Vortisand presenta una eficiencia significativamente mayor a la del sistema convencional, ambas obtenidas en función de la turbiedad del agua obtenida tras el proceso de filtración.
2. Las propiedades fisicoquímicas pH, conductividad y dureza obtenidas en el agua filtrada proveniente de cada uno de los sistemas presentan la misma tendencia y no tienen diferencia significativa. En cuanto a la alcalinidad y la cantidad de cloro libre, las propiedades fisicoquímicas difieren por las condiciones del agua de entrada a los filtros, y no son una consecuencia de la eficiencia del sistema de filtración.
3. Se obtiene una reducción de costos de operación como consecuencia de la realización de los retrolavados automáticos en el sistema Vortisand en comparación con los retrolavados manuales del sistema convencional.

RECOMENDACIONES

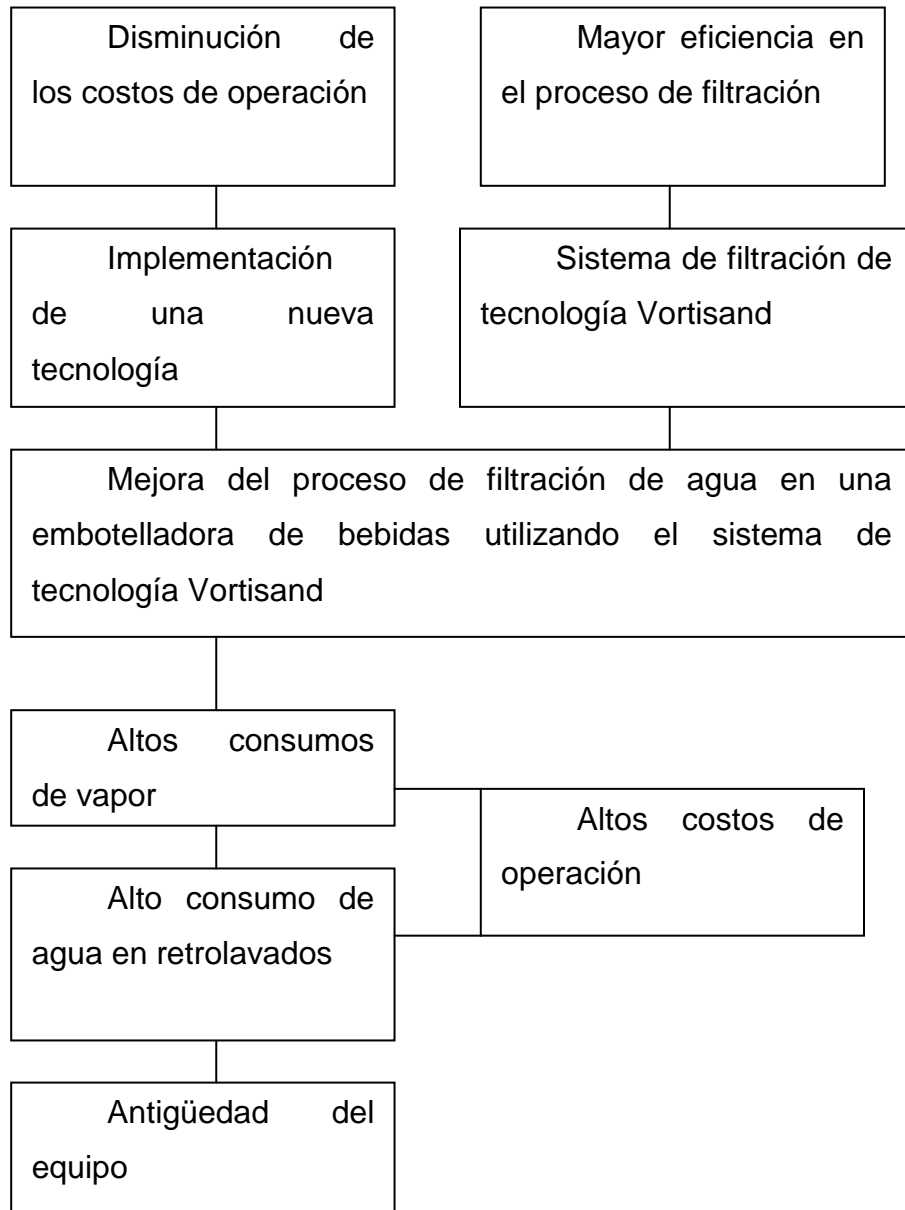
1. Establecer como medida de control de la calidad del agua obtenida en la embotelladora, una medición periódica de la turbiedad de salida en cada etapa del sistema, para asegurar que las propiedades obtenidas son las adecuadas.
2. Al momento de la instalación del nuevo sistema de filtración, colocar los filtros pulidores al final del sistema, pues esto incrementa la eficiencia de los mismos en cuanto a turbidez.
3. Utilizar las ecuaciones obtenidas con las gráficas de las propiedades fisicoquímicas para validar los resultados obtenidos con una periodicidad semanal en el agua obtenida del proceso de filtración.
4. Evaluar la posibilidad de implementar un control microbiológico periódico en el agua de salida de cada una de las etapas del sistema, para validar de esta manera la efectividad del sistema de purificación del agua.
5. Tomar en cuenta los costos de mantenimiento minimizados con el cambio del sistema, para filtros de grava, de carbón y pulidores.

BIBLIOGRAFÍA

1. ARBOLEDA VALENCIA, Jorge. *Teoría y práctica de la purificación del agua*. Colombia: McGraw-Hill, 2000. 480 p.
2. CENGEL, Yunus A. *Transferencia de calor y masa: un enfoque práctico*. 3a. ed. México: McGraw-Hill, 2007. 436 p.
3. DICK, J.G. *Química analítica*. México: El manual moderno, 1979. 485 p.
4. FELDER, Richard M; ROUSSEAU, Ronald W. *Principios elementales de los procesos químicos*. 3a. ed. México, LimusaWiley, 2008. 494 p.
5. KENER, Frank. *Manual del agua*. México: McGraw-Hill, 1989. Tomo 1: Capítulo 7, Tomo 4: Capítulo 37.
6. MILLER & MILLER. *Estadística y quimiometría para química analítica*. 4a. ed. Madrid, España: Prentice Hall, 2002. 354 p.
7. MOTT, Robert L. *Mecánica de fluidos aplicada*. 4a. ed. México: Prentice Hall, 1996. 584 p.
8. Perry, Robert H. *Perry's Chemical Engineers' Handbook*. 8a. ed. New York, United States: McGraw-Hill, 2008. 472 p.

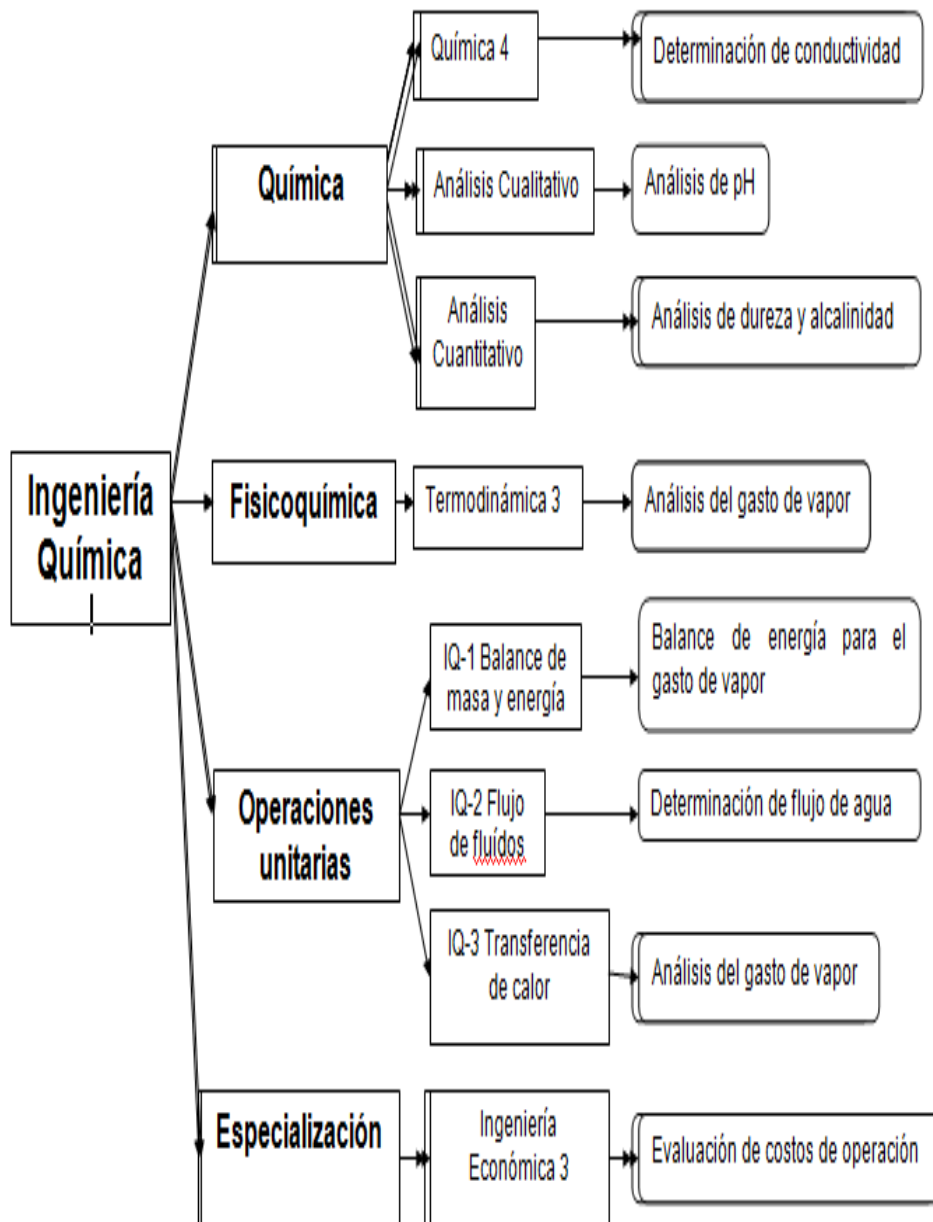
APÉNDICES

1. ÁRBOL DEL PROBLEMA



Fuente: elaboración propia.

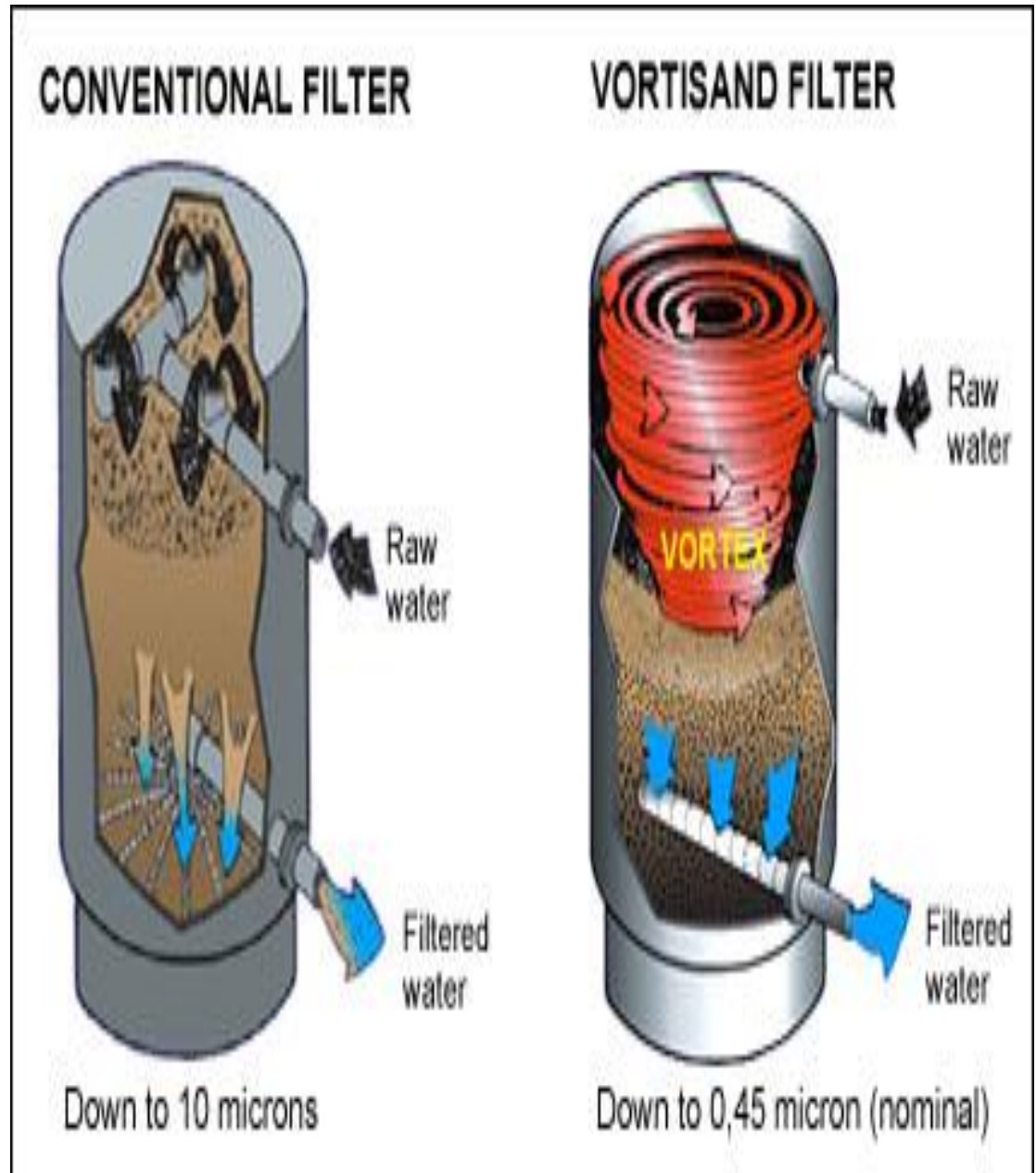
2. DIAGRAMA DE REQUISITOS ACADÈMICOS



Fuente: elaboración propia.

ANEXOS

Anexo 1. Comparación filtros convencionales con *Vortisand*



Fuente: Sonitec- VortisandInc: <http://www.sonitec.com/en/home.html>, 2002. Consulta: 06 de noviembre de 2012.

Anexo 2. Filtros convencionales de grava y carbón



Fuente: embotelladora.

Anexo 3: Filtros Vortisand



Fuente: embotelladora

Anexo 4: Tabla para determinar el intervalo de confianza

<i>Valor de t para un intervalo de confianza de</i> <i>Valor crítico de t para valores de P de número</i> <i>de grados de libertad</i>	<i>90%</i>	<i>95%</i>	<i>98%</i>	<i>99%</i>
	<i>0.10</i>	<i>0.05</i>	<i>0.02</i>	<i>0.01</i>
1	6.31	12.71	31.82	63.66
2	2.92	4.30	6.96	9.92
3	2.35	3.18	4.54	5.84
4	2.13	2.78	3.75	4.60
5	2.02	2.57	3.36	4.03
6	1.94	2.45	3.14	3.71
7	1.89	2.36	3.00	3.50
8	1.86	2.31	2.90	3.36
9	1.83	2.26	2.82	3.25
10	1.81	2.23	2.76	3.17
12	1.78	2.18	2.68	3.05
14	1.76	2.14	2.62	2.98
16	1.75	2.12	2.58	2.92
18	1.73	2.10	2.55	2.88
20	1.72	2.09	2.53	2.85
30	1.70	2.04	2.46	2.75
50	1.68	2.01	2.40	2.68
∞	1.64	1.96	2.33	2.58

Fuente: MILLER & MILLER. *Estadística y Quimiometría para química analítica*. 4a. Edición.
Madrid, España: Prentice Hall, 2002. Págs. 354 p.