

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO
ESCUELA DE POSGRADO
UNIDAD DE POSGRADO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA
QUÍMICA



**“REMOCIÓN DE DUREZA MEDIANTE UN REACTOR DE
CAVITACIÓN HIDRODINÁMICA A PARTIR DE AGUA RESIDUAL
PROVENIENTE DE UN MÓDULO DE ÓSMOSIS INVERSA”**

TESIS PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE MAESTRO EN
INGENIERÍA QUÍMICA

DENIS GABRIEL HURTADO

Handwritten signature of Denis Gabriel Hurtado in black ink.

DAVID MITMA RAMÍREZ

Handwritten signature of David Mitma Ramírez in black ink.

Callao, 2021

PERÚ

HOJA DE REFERENCIA DEL JURADO Y APROBACIÓN

MIEMBROS DEL JURADO:

- Dr. CARRASCO VENEGAS LUIS AMÉRICO: PRESIDENTE
- Dr. RODRÍGUEZ TARANCO ÓSCAR JUAN: SECRETARIO
- Mg. DÍAZ BRAVO PABLO BELIZARIO: VOCAL
- Mg. ÁNGELES QUEIROLO CARLOS ERNESTO: VOCAL

DR. MEDINA COLLANA JUAN TAUMATURGO: ASESOR

Tal como está asentado en el Libro N° 01 – Acta N° 016 de fecha 19 de diciembre de 2021 para obtener el Grado Académico de Maestro en Ingeniería Química, de conformidad con lo establecido por el Reglamento de Grados y Títulos aprobado con Resolución de Consejo Universitario N° 245-2018-CU de fecha 30 de octubre de 2018.

DEDICATORIA

A mis padres Fabián y María por inculcarme a superarme, a mi esposa y a mis hermanos, por estar conmigo siempre y apoyarme en todo momento para llegar hasta aquí.

A mi padre Donato, que se encuentra en el reino de Dios, a mi madre Leonor y a mis hermanos, quienes son la base y los motores de mi formación.

AGRADECIMIENTOS

A nuestro asesor el Dr. Juan Medina Collana por su apoyo logístico y disposición constante en orientarnos al logro de esta investigación.

A nuestros compañeros, los Ing. Arturo Vela Chamoly y Juan Sánchez Gonzáles, por brindarnos su apoyo en los recursos necesarios para hacer posible este trabajo.

INDICE

TABLAS DE CONTENIDO	4
RESUMEN	6
RESUMO	7
INTRODUCCIÓN	8
I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	9
1.1. Descripción de la realidad problemática	9
1.2. Formulación del problema	10
1.2.1. Problema general	10
1.2.2. Problemas específicos.....	10
1.3. Objetivos.....	10
1.3.1. Objetivo general.....	10
1.3.2. Objetivos específicos.....	10
1.4. Limitantes de la investigación	11
1.4.1. Limitante teórica	11
1.4.2. Limitante temporal	11
II. MARCO TEÓRICO	12
2.1. Antecedentes	12
2.1.1. Antecedentes internacionales.....	12
2.1.2. Antecedentes nacionales.....	13
2.2. Bases teóricas	14
2.2.1. Dureza del agua	14
2.2.2. Cavitación.....	16
2.2.3. Aguas residuales	17

2.3. Conceptual.....	18
2.3.1. Cavitación hidrodinámica.....	18
2.3.2. Reactores de cavitación hidrodinámica	22
2.4. Definición de términos básicos	26
III. HIPÓTESIS Y VARIABLES.....	28
3.1. Hipótesis	28
3.1.1. Hipótesis general	28
3.1.2. Hipótesis específicas	28
3.2. Definición conceptual de las variables	28
3.2.1. Operacionalización de variable.....	29
IV. DISEÑO METODOLÓGICO	31
4.1. Tipo y diseño de investigación	31
4.1.1. Tipo de investigación	31
4.1.2. Diseño de investigación.....	31
4.1.3. Diseño experimental.....	32
4.2. Método de investigación	34
4.3. Población y muestra	36
4.3.1. Población.....	36
4.3.2. Muestra.....	36
4.4. Lugar de estudio y período desarrollado.....	36
4.5. Técnicas e instrumentos para la recolección de la información	37
4.5.1. Materiales, equipos y reactivos	38
4.5.2. Toma de muestra del agua residual	39
4.5.3. Medición de las características fisicoquímicas de las muestras de agua residual y tratada	39
4.5.4. Medición de parámetros de operación del proceso	41

4.5.5. Descripción del equipo experimental	42
4.6. Análisis y procesamiento de datos.....	44
V. RESULTADOS	45
5.1. Resultados descriptivos	45
5.2. Resultados inferenciales.....	49
VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	58
6.1. Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados	58
6.2. Contrastación de los resultados con otros estudios similares.....	58
6.3. Responsabilidad ética de acuerdo a los reglamentos vigentes	59
CONCLUSIONES	60
RECOMENDACIONES	61
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	62
ANEXOS	67
ANEXO 1. Matriz de Consistencia	68
ANEXO 2. Ficha de Registro de Datos de la Muestra de Agua	69
ANEXO 3. Ficha Técnica del Equipo	70
ANEXO 4. Esquema del Equipo Experimental	71
ANEXO 5. Informe de Ensayo de Agua Residual	72
ANEXO 6. Instructivo para la Medición de Dureza	74

TABLAS DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Clasificación del agua según su dureza	15
Tabla 2 Operacionalización de variables	30
Tabla 3 Variables de proceso y niveles de operación	32
Tabla 4 Matriz de experimentación	32
Tabla 5 Diseño factorial para el proceso de cavitación hidrodinámica	33
Tabla 6 Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	37
Tabla 7 Características fisicoquímicas iniciales del agua residual	45
Tabla 8 Porcentaje de remoción de dureza con los parámetros de operación	46
Tabla 9 Resultados de las características fisicoquímicas del agua residual con respecto al tiempo en la experimentación	47
Tabla 10 Características hidráulicas de las placas de orificio	49
Tabla 11 Resultados de la prueba de t-student.....	51
Tabla 12 Resultados del análisis de varianza	52

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Residuos de agua dura y agua blanda en calderas	16
Figura 2 Principio de cavitación	16
Figura 3 Diagrama de fases del agua	19
Figura 4 Crecimiento y colapso de una burbuja o cavidad.....	19
Figura 5 Variación de la presión.....	20
Figura 6 Configuración del cavitador basado en múltiples orificios.....	23
Figura 7 Esquema de un sistema de cavitación hidrodinámica	24
Figura 8 Representación general de un venturi	25
Figura 9 Diagrama del diseño experimental.....	31
Figura 10 Diagrama del sistema de cavitación hidrodinámica	34
Figura 11 Secuencia del método de investigación	35
Figura 12 Esquema del diseño experimental	36
Figura 13 Placas de orificio	38
Figura 14 Medidores de pH, conductividad y dureza total	39
Figura 15 Medición in situ de los parámetros fisicoquímicos	41
Figura 16 Lectura de las presiones	41
Figura 17 Medición del caudal	42
Figura 18 Esquema del equipo experimental de cavitación hidrodinámica	43
Figura 19 Montaje del equipo experimental de cavitación hidrodinámica	44
Figura 20 Porcentaje de remoción de dureza para los diferentes tratamientos	46
Figura 21 Efecto de las placas de orificio operando a un caudal de 0,6 L/min	48
Figura 22 Efecto de las placas de orificio operando a un caudal de 1 L/min ...	48
Figura 23 Efecto de las placas de orificio operando a un caudal de 1,5 L/min	49
Figura 24 Resultado de la prueba de normalidad	50
Figura 25 Resultado de la prueba de igualdad de varianzas	50
Figura 26 Diagramas de residuos para dureza	54
Figura 27 Diagrama de Pareto	54
Figura 28 Diagrama de efectos principales	55
Figura 29 Diagrama de interacción	56
Figura 30 Diagrama de contorno.....	56
Figura 31 Resultado de optimización de respuesta	57

RESUMEN

La dureza del agua genera problemas como la obstrucción de las tuberías y ductos generando pérdidas económicas en especial en empresas que utilizan agua a elevada temperatura, por lo que estas empresas utilizan en sus procesos agua blanda con el fin de prolongar la durabilidad de sus máquinas. En el presente trabajo de investigación se estudiaron la influencia de los parámetros de operación de un reactor de cavitación hidrodinámica como caudal de recirculación y número de orificios en la placa metálica con respecto al porcentaje de remoción de dureza de agua de rechazo de un sistema de ósmosis inversa. Para su estudio se utilizó el diseño factorial de dos factores a tres niveles: placas de 3, 5 y 9 orificios y caudal de recirculación de 0,6; 1 y 1,5 L/min con un tiempo de operación de 1 hora. Fueron evaluados la dureza total, la conductividad, los sólidos totales disueltos, el pH y la temperatura en función del tiempo. Los resultados muestran que a medida que el caudal y el número de orificios se incrementa, el porcentaje de remoción de dureza aumenta, para el flujo de recirculación de 1,5 L/min y placa de 9 orificios se alcanza un porcentaje de remoción máxima de 66,76%. De igual manera, la conductividad, los sólidos totales disueltos y la temperatura aumentan en función del tiempo. Por tanto, la cavitación hidrodinámica representa una tecnología de tratamiento amigable con el ambiente y eficaz para el ablandamiento del agua.

Palabras clave: Cavitación hidrodinámica, dureza del agua, placa de orificio, remoción de dureza.

RESUMO

A dureza da água gera problemas como a obstrução de tubulações e dutos, gerando prejuízos econômicos, principalmente em empresas que utilizam água em altas temperaturas, razão pela qual essas empresas utilizam água mole em seus processos a fim de prolongar a durabilidade de suas máquinas. No presente trabalho de pesquisa, estudou-se a influência dos parâmetros de operação de um reator de cavitação hidrodinâmico como vazão de recirculação e número de orifícios na placa metálica com relação à porcentagem de remoção de dureza da água rejeitada de um sistema de osmose reversa. Para seu estudo foi utilizado o planejamento fatorial de dois fatores em três níveis: placas com 3, 5 e 9 furos e vazão de recirculação de 0,6; 1 e 1,5 L/min com tempo de operação de 1 hora. Dureza total, condutividade, sólidos totais dissolvidos, pH e temperatura em função do tempo foram avaliados. Os resultados mostram que à medida que a vazão e o número de furos aumentam, a porcentagem de remoção de dureza aumenta, para a vazão de recirculação de 1,5 L/min e placa com 9 furos, porcentagem máxima de remoção de 66,76%. Da mesma forma, a condutividade, o total de sólidos dissolvidos e a temperatura aumentam em função do tempo. Por tanto, a cavitação hidrodinâmica representa uma tecnologia de tratamento ecologicamente correta e eficaz para o amaciamento da água.

Palavras chave: Cavitação hidrodinâmica, dureza da água, placa de orifício, remoção de dureza.

INTRODUCCIÓN

La dureza del agua está caracterizada por el alto contenido de sales, en especial de calcio y magnesio, los cuales al precipitarse forman incrustaciones en las superficies internas de los ductos, provocando la disminución de su diámetro y en otros casos la obstrucción. Estos fenómenos son los causantes del deterioro de equipos, siendo más intensos en las industrias donde utilizan agua a elevada temperatura, debido a ello estas industrias están enfocados en utilizar agua con bajo contenido de sales.

Existen diferentes métodos para bajar la dureza total del agua siendo una alternativa importante la cavitación hidrodinámica, donde se utiliza la energía de la implosión de burbujas para activar las reacciones químicas como por ejemplo la formación de carbonatos a partir de bicarbonato, así como también se utiliza en las nucleaciones de partículas coloidales haciendo que una solución se convierta en suspensión con partículas precipitables. La remoción de la dureza del agua generalmente se mide en términos de porcentaje de las sales eliminadas de calcio y magnesio, para lo cual, las muestras fueron caracterizadas en la dureza además de la conductividad, los sólidos totales disueltos, el pH y la temperatura.

El objetivo de este trabajo es remover la dureza del agua que proviene como rechazo de un equipo de osmosis inversa, por el método de cavitación hidrodinámica, para lo cual se ha diseñado un reactor batch provisto de un dispositivo de cavitación que consta de una placa de acero con orificios de 1 mm de diámetro. Los ensayos se realizaron evaluando parámetros de operación como tipo de placas metálicas, caracterizados por la cantidad de orificios y los diferentes caudales de operación.

I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción de la realidad problemática

La dureza del agua es uno de los problemas comunes de calidad de agua en todo el mundo. El problema que se enfrentan muchas industrias es la dureza total, siendo las sales con calcio y magnesio generadores de incrustaciones en diferentes equipos industriales que trabajan con el agua (Guillén y Cañazaca, 2020).

La tecnología de osmosis inversa utilizada en la producción de agua purificada genera como corriente de rechazo un tipo de agua con altas concentraciones de sales, por lo que su tratamiento constituye un reto a tener en cuenta antes de descargarlo al cuerpo de agua, principalmente debido al volumen y la calidad de la descarga (Joo y Tansel, 2015; Subramani y Jacangelo, 2014).

Tecnología de Membranas, es una empresa que se dedica a la producción de agua pura por ósmosis inversa, generando agua de rechazo de alta dureza con valores que se encuentra alrededor de 600 ppm, el cual es vertido directamente a la red de alcantarillado y que provoca incrustaciones en los ductos y tuberías, de modo que causan impactos en la infraestructura sanitaria. Ante esta situación se busca aplicar una tecnología limpia y emergente como lo es la cavitación hidrodinámica para el tratamiento de aguas con alto contenido de dureza y reducir su concentración; en tal sentido Kim et al. (2007) informó que el proceso de cavitación mejora la cristalización y precipitación de CaCO_3 mediante la conversión de la forma y el tamaño de las partículas de éste. Benito y Arroyo (2006) refieren que los dispositivos y materiales requeridos para producir este mecanismo son sencillos y de bajo costo, asimismo implica menos mantenimiento, simplicidad en la operación y eficiencia significativa por lo que la tecnología resulta accesible tanto en operación como en inversión.

En esta investigación se propone evaluar un reactor de cavitación hidrodinámica para la remoción de la dureza total de aguas residuales que proviene de concentrados del proceso de ósmosis inversa.

1.2. Formulación del problema

1.2.1. Problema general

¿Cuál es el grado de remoción de dureza total del agua residual proveniente de un módulo de ósmosis inversa mediante la aplicación de la cavitación hidrodinámica en un reactor batch?

1.2.2. Problemas específicos

- ¿Cuáles son las características fisicoquímicas del agua residual proveniente de un módulo de osmosis inversa a tratar?
- ¿Cuál es la influencia de los parámetros de operación por cavitación hidrodinámica que incrementen el grado de remoción de dureza total del agua residual proveniente de un módulo de ósmosis inversa?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Determinar el grado de remoción de dureza total del agua residual proveniente de un módulo de ósmosis inversa mediante la aplicación de la cavitación hidrodinámica en un reactor batch.

1.3.2. Objetivos específicos

- Determinar las características fisicoquímicas del agua residual proveniente de un módulo de ósmosis inversa a tratar.
- Evaluar la influencia de los parámetros de operación por cavitación hidrodinámica que incrementen el grado de remoción de dureza total del agua residual proveniente de un módulo de ósmosis inversa.

1.4. Limitantes de la investigación

1.4.1. Limitante teórica

No hay tesis de investigación del ámbito nacional sobre el estudio de la cavitación hidrodinámica para la reducción de dureza de las aguas. Y en el ámbito internacional hay un número limitado de trabajos que han abordado sobre el tema, por lo que la presente investigación resulta de interés y amplía el campo de aplicación de tecnologías innovadoras y amigables con el ambiente.

1.4.2. Limitante temporal

La investigación se efectuará entre los meses de setiembre del 2020 a setiembre del 2021, y esto en parte a la inaccesibilidad que se tiene a los laboratorios de la universidad por estar cerrados debido a la pandemia de la Covid-19.

II. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

2.1.1. Antecedentes internacionales

Tithe & Gode (2019) realizaron el tratamiento del agua del río Indrayani mediante cavitación hidrodinámica en combinación con cal sodada. Como dispositivo de cavitación se utilizaron placas metálicas de 1, 6 y 9 orificios. Se analizó el efecto de los parámetros del proceso como la presión de entrada, el número de cavitación (C_v), el caudal y la carga de cal sodada en el grado de reducción de DQO, STD y dureza; y se observó que estos parámetros aumentan a medida que el número de orificios aumenta y el número de cavitación disminuye. Para la placa de orificio de 9 orificios hubo una reducción porcentual máxima de 71,4% de DQO, 85% de STD y 82,5% de dureza a una presión de 2 atm y caudal de 3 m³/h al cabo de 2 horas de operación, demostrándose que proceso de cavitación hidrodinámica reduce la resistencia de las aguas superficiales a un nivel óptimo significativo.

Redekar et al. (2020) evaluaron el rendimiento de un sistema de cavitación hidrodinámica para el ablandamiento y desinfección de agua subterránea. Dicho sistema consistió de placas de orificio con aberturas (1, 2, 3, 4 y 5), bomba sumergible, tubería acrílica de 1,15 pulgadas, válvulas, manómetro y tanque de 15 L. Se estudió los parámetros del proceso basado en la presión, el diámetro del orificio y el número de orificios de la placa, y su efecto sobre el pH, dureza, alcalinidad, STD y número más probable (NMP) del agua problema obtenida con muestreo al azar y muestreo compuesto. Los resultados mostraron una reducción máxima de dureza del 82% para la muestra compuesta con presión de 1 bar, 2 mm de diámetro y 2 aberturas en la placa. En caso de desinfección, se observa una reducción en el recuento bacteriano que es en promedio del 85%.

Kim et al. (2007) examinaron la remoción de calcio en el efluente de una empresa de fabricación de semiconductores. Se instaló una unidad de tratamiento de operación por lotes a escala piloto, la cual empleó el proceso de cristalización de vórtice hipercinético (HVC) que incorpora tecnología de cavitación hidrodinámica para acelerar la precipitación del ion calcio. La eliminación de calcio fue del 40% con el método convencional de carbonato de sodio, pero se mejoró al 70% cuando se aplicó la tecnología HVC en la misma dosis de carbonato de sodio y con un número de ciclos igual a 2. La eliminación de calcio se incrementó aún más al 78% con un número de ciclos igual a 4. El proceso se caracterizó por ser una tecnología respetuosa con el medio ambiente que reduce la dosificación de productos químicos y la producción de lodos y minimiza el costo de mantenimiento.

Kim et al. (2009) evaluaron la eliminación de ion calcio mediante el uso de carbonato de sodio en combinación con la unidad de cavitación hidrodinámica controlada (CHC) que emplea el proceso de cristalización de vórtice hipercinético (HVC) mediante una operación continua a escala piloto. La eficiencia de eliminación de calcio aumentó del 63,5% al 91,7% en promedio cuando se aplicó la unidad CHC. Así mismo se observó el cambio de la forma de la calcita de laminar a esférica, lo cual evita la formación de incrustaciones de calcita en las partes internas de las tuberías y el reactor. Se demostró que el proceso HVC es eficiente para la eliminación de calcio con las ventajas de reducir el uso de productos químicos y prevenir la formación de incrustaciones en la instalación de tratamiento de aguas residuales.

2.1.2. Antecedentes nacionales

Bendezú (2017) estudió el tratamiento de aguas subterráneas con un generador de micro nano burbujas para disminuir la dureza del agua. Se encontró que las muestras de agua del sector Villa El Pinar, presentaron una concentración de dureza total de 610 ppm (M-01), 600 ppm (M-02) y 602 ppm (M-03), lo cual se consideró como agua muy

dura y sobrepasó el límite máximo permisible para consumo humano (500 ppm). Se obtuvieron porcentajes de reducción de la dureza total después del tratamiento mediante las micro/ nano burbujas en un 17% para la muestra M-01 y M-02; y para la M-03 se obtuvo un 16% de porcentaje de remoción. Por tanto, las micro/nano burbujas lograron remover un porcentaje de la dureza total, manteniéndose cerca al límite máximo permisible.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Dureza del agua

1. Definición y origen de la dureza

Neira (2006) manifiesta que el agua viaja a través de ríos, lagos, suelos, rocas como parte de su ciclo hidrobiológico y debido a su alto poder disolvente, va incorporando sales de carácter orgánico e inorgánico, la concentración de estas sales puede variar según su localización geográfica y estación del año, la concentración de iones más importantes del agua en orden decreciente es así;

$Ca^{2+} > Na^+ > Mg^{2+} > K^+$ para los cationes

$HCO_3^- > SO_4^{2-} > Cl^-$ para los aniones

Estos iones están presentes en concentraciones de 1 a 250 mg/L, los restantes iones están en concentraciones bajas a 1 µg/L en algunos casos menos, los iones de Ca y Mg son los principales cationes bivalentes y constituyen el 95 % de lo que se considera la dureza del agua, la cual es una mezcla compleja y variable de cationes y aniones. El calcio es el principal responsable de la dureza del agua y se encuentra en un rango de 5 a 500 mg/L en forma de $CaCO_3$ (de 2 a 200 mg/L de Ca).

2. Clasificación de la dureza en aguas

Moreno (2018) menciona que la clasificación puede ser permanente o temporal según los cationes y aniones que lo ocasionen.

Dureza Temporal; está provocada por una combinación de iones de calcio y iones de bicarbonato en el agua. Puede eliminarse sin más que hervir el agua o añadiendo cal (hidróxido de calcio). La ebullición favorece la formación de carbonato a partir del bicarbonato y extrae el carbonato de calcio de la solución, obteniéndose agua más blanda tras su enfriamiento.

Dureza Permanente; es aquella dureza de contenido mineral que no puede eliminarse mediante ebullición del agua. Suele estar provocada por la presencia en el agua de sulfatos y/o cloruros de calcio y magnesio, aumentándose su solubilidad a medida que aumenta la temperatura del agua.

Dureza Total; vendría ser la suma de la dureza temporal y permanente.

Tabla 1

Clasificación del agua según su dureza

Tipo de agua	ppm de CaCO ₃
Agua muy blanda	< 30
Agua blanda	31 - 60
Agua medianamente dura	61 - 120
Agua dura	121 - 180
Agua muy dura	>180

Fuente: Adaptado de González (1984)

3. Problemas asociados a la dureza

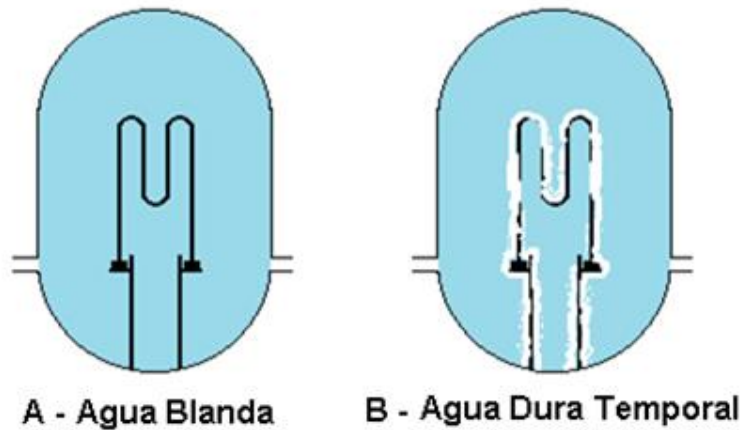
Dependiendo de las interacciones con otros factores, como el pH y la alcalinidad, el agua dura puede causar un mayor consumo de jabón y deposición de incrustaciones en el sistema de distribución de agua, así como en sistemas de agua caliente donde se forman carbonatos metálicos insolubles, recubriendo superficies y reduciendo la eficiencia de éstos (World Health Organization [WHO], 2011).

En la figura 1 se muestra el efecto del agua blanda y agua dura presente en las calderas, notándose la generación de incrustaciones

en la parte B cuando el agua presenta dureza.

Figura 1

Residuos de agua dura y agua blanda en calderas



2.2.2. Cavitación

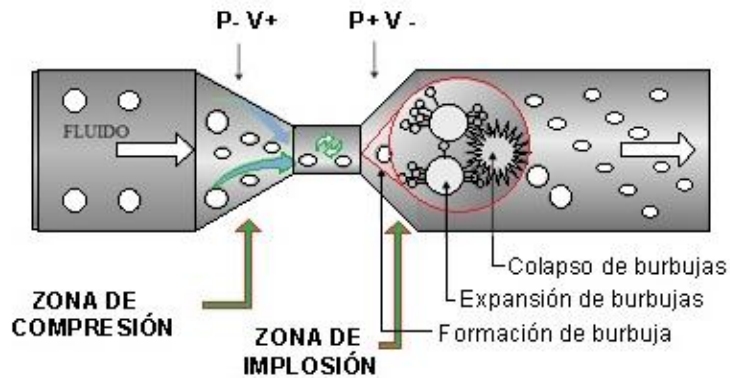
1. Definición

Carrillo et al. (2012) indican que la cavitación es la formación crecimiento y colapso de cavidades o burbujas dentro de un fluido debido a un proceso dinámico con alta concentración de energía, la palabra cavitación involucra dos tipos de formación de cavidades, siendo la primera la formación de una cavidad nueva y la segunda se refiere al crecimiento o expansión de cavidades ya existentes que se encuentran inmersas en los líquidos o las cavidades que se encuentran atrapados en las fisuras de las superficies como por ejemplo en la superficie de las partículas suspendidas.

En la Figura 2 se observan las tres etapas principales de la cavitación: formación de burbujas, expansión de burbujas y su colapso e implosión en un tubo Venturi.

Figura 2

Principio de cavitación



Nota: Principio de cavitación en un tubo Venturi. Fuente: Adaptado de Carrillo et al. (2012).

2. Tipos de cavitación

Young (como se citó en Carrillo et al., 2012) refiere que existen cuatro tipos de cavitación que dependen de las formas como la energía se absorbe en el líquido:

- Cavitación hidrodinámica: se produce por pulsos de presión en virtud de los cambios de geometría en el conducto por donde circula el líquido.
- Cavitación acústica: se genera por ondas ultrasónicas en un líquido que producen cambios de presión local.
- Cavitación óptica: es producida por pulsación de fotones de alta intensidad (como los rayos láser), lo cuales provocan la ruptura del líquido.
- Cavitación por partículas: es producida por el bombardeo de partículas elementales con alta energía focalizadas al interior de un líquido.

2.2.3. Aguas residuales

1. Definición

“Son aquellas aguas cuyas características originales han sido

modificadas por actividades humanas y que por su calidad requieren un tratamiento previo, antes de ser reusadas, vertidas a un cuerpo natural de agua o descargadas al sistema de alcantarillado” (Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental [OEFA], 2014, p. 7).

2. Clasificación de las aguas residuales

Según OEFA (2014) considera que se pueden clasificar como:

- a. Aguas residuales domésticas: Son aquellas de origen residencial y comercial que contienen desechos fisiológicos, entre otros, provenientes de la actividad humana, y deben ser dispuestas adecuadamente.
- b. Aguas residuales industriales: Son aquellas que resultan del desarrollo de un proceso productivo, incluyéndose a las provenientes de la actividad minera, agrícola, energética, agroindustrial, entre otras.
- c. Aguas residuales municipales: Son aquellas aguas residuales domésticas que pueden estar mezcladas con aguas de drenaje pluvial o con aguas residuales de origen industrial previamente tratadas, para ser admitidas en los sistemas de alcantarillado de tipo combinado.

2.3. Conceptual

2.3.1. Cavitación hidrodinámica

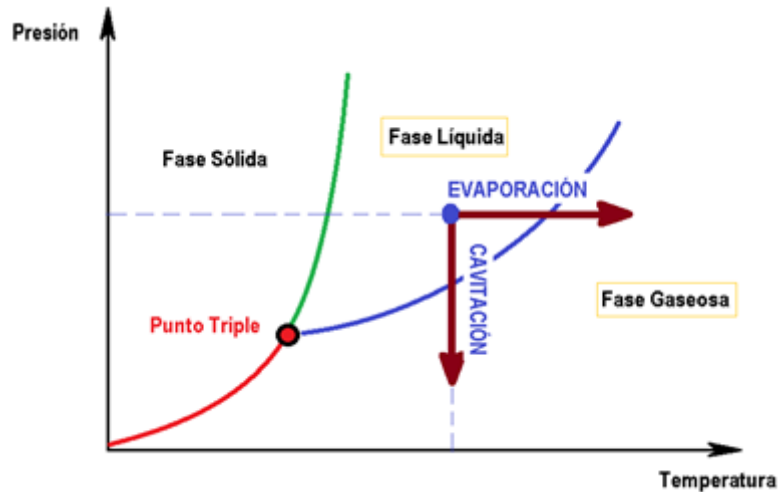
1. Fundamentos de la cavitación hidrodinámica

Vargas y Esquivel (2014) indican que el paso del estado líquido al estado gaseoso puede realizarse aumentando la temperatura a presión constante (ebullición) o disminuyendo la presión a temperatura constante, en el caso de la cavitación permite disminuir la presión del líquido hasta por debajo de la presión de evaporación y de esta manera

se forman las cavidades o burbujas. Esto se aprecia en el diagrama de fases P-T que se muestra en la Figura 3.

Figura 3

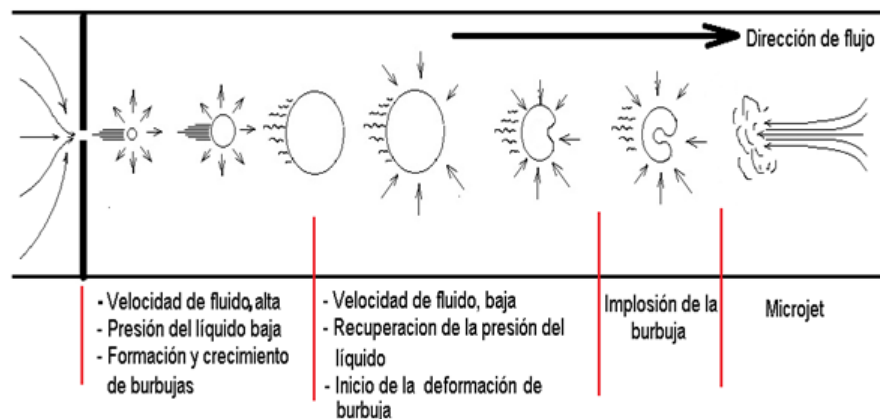
Diagrama de fases del agua



Gutiérrez et al. (2019) definen a la cavitación hidrodinámica como el fenómeno de formación, desarrollo, crecimiento e implosión de cavidades, o burbujas, en un medio líquido como se muestra en la Figura 4. Esto debido a la variación de presión existente en un fluido tras aumentarse repentinamente su velocidad, como resultado de un cambio abrupto en la geometría y/o área de sección transversal del conducto de transporte.

Figura 4

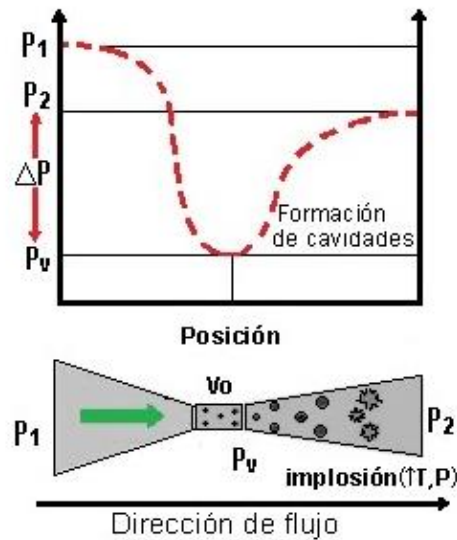
Crecimiento y colapso de una burbuja o cavidad



La Figura 5 representa el comportamiento típico de la presión en un proceso de cavitación hidrodinámica.

Figura 5

Variación de la presión



Nota: Variación de la presión, como función de la geometría y la posición, en un dispositivo por cavitación hidrodinámica. P₁: presión inicial o de entrada, P₂: presión de descarga o recuperación, P_v: presión de vapor del líquido a la temperatura del sistema, ΔP: caída de presión, V_o: velocidad media del fluido en la garganta. Adaptado de Carpenter et al. (2016).

2. Parámetros de importancia en la cavitación hidrodinámica

Se deben tener ciertas consideraciones para el manejo de parámetros de operación adecuados, los cuales se presentan a continuación:

a. El número de cavitación (C_v)

Según Gogate y Pandit (2001), es la intensidad de cavitación obtenida en el reactor, que es un número adimensional expresado mediante la siguiente ecuación:

$$C_v = \frac{P_2 - P_v}{\frac{1}{2}\rho v^2}$$

Donde P₂ es la presión de descarga (Pa), P_v es la presión de vapor del líquido a la temperatura de trabajo (Pa), ρ es la densidad del

fluido (kg/m^3) y v es la velocidad media en la garganta (m/s). Las cavidades se generan típicamente con valores de $C_v \leq 1$ en condiciones ideales, sin embargo, en muchos casos las cavidades también se generan con $C_v > 1$ debido a la presencia de algunos gases disueltos y partículas en suspensión que proporcionan núcleos adicionales para la formación de cavidades (Bagal y Gogate, 2014).

b. Geometría de los dispositivos de cavitación

La eficacia de la cavitación hidrodinámica depende del tamaño y la forma del inductor de cavitación y la cámara de flujo, que pueden afectar tanto al número de burbujas de cavitación como a la intensidad del colapso, por ejemplo, diámetros pequeños de agujeros en la placa ofrecen una mayor área de cizallamiento, lo cual se traduce en colapsos más eficientes (Mancuso et al., 2020; González y Londoño, 2014). La condición de cavitación en el reactor para el caso de una placa de orificio puede alterarse con la modificación de la relación del perímetro de los orificios a su sección de área transversal; mientras que para el caso de un tubo venturi se da con la modificación de la longitud de la garganta a su diámetro/altura y ángulo divergente (Zuluaga, 2019).

c. Velocidad de flujo

Al aumentar la velocidad del flujo, disminuye el número de cavitación; de ahí que se dan oscilaciones de presión local más altas y la presión puede caer por debajo de la presión de vapor del líquido a la temperatura de operación, provocando la vaporización parcial del líquido y la generación de cavidades, lo que resulta en un aumento de los efectos de la cavitación. La velocidad del flujo se puede variar ajustando el caudal de la bomba o cambiando la geometría del dispositivo de cavitación, es decir, reduciendo o aumentando el área de constricción (Mancuso et al., 2020).

d. Presión de entrada

La presión de entrada es un parámetro operativo importante en los dispositivos de cavitación, que consigue alterar en gran medida el comportamiento de la burbuja y la intensidad de la cavitación, puede generar colapsos más violentos que conducen a la formación de fuertes pulsos de presión, aumentando así el grado de disociación de las moléculas de agua para producir más radicales hidroxilos que intensifican la degradación (Wang et al., 2021; Gutiérrez et al., 2019). Sin embargo, un aumento excesivo de la presión de entrada hará que la densidad del número de cavidades sea tan alta que estas cavidades se fusionen para formar burbujas de cavitación mucho más grandes. Estas grandes burbujas escapan del líquido sin colapsar o sufren un colapso incompleto, reduciendo la tasa de degradación. La presión de entrada óptima depende de la geometría y configuración del reactor de cavitación (Tao et al., 2016).

3. Ventajas de la cavitación hidrodinámica

De acuerdo con Pandit (2016), las ventajas de la tecnología de cavitación son las siguientes:

- Una tecnología más ecológica que no requiere necesariamente productos químicos adicionales.
- Puede acoplarse con otros procesos de oxidación avanzada.
- Mejora el rendimiento de la instalación de tratamiento de efluentes existente (mejora la eficiencia del reactor aeróbico, aumenta la biodegradabilidad del efluente, reduce la DQO del efluente, etc.).
- Los sistemas de reactores basados en cavitación pueden diseñarse y operarse prácticamente para cualquier presión y caudal.

2.3.2. Reactores de cavitación hidrodinámica

Existen varios dispositivos para producir estrangulamiento en la línea

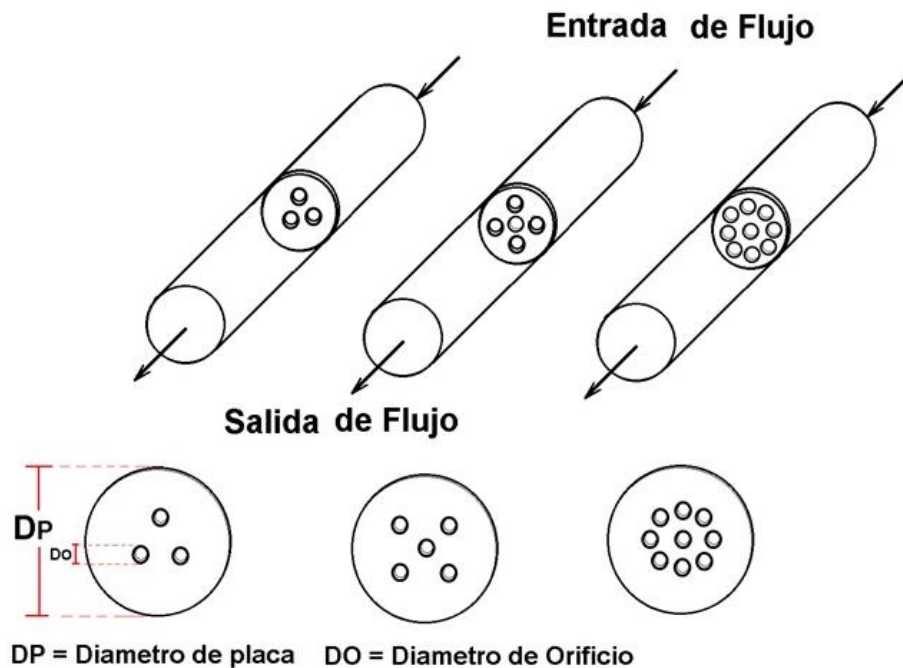
de conducción como placa de orificio, tubo venturi, rotor de alta velocidad y homogeneizador de alta presión (Carpenter et al., 2016).

1. Reactores de platos perforados

Gutiérrez et al. (2019) indican que en el modelo de platos perforados el flujo que fluye en la línea principal, atraviesa una constricción que puede estar formada por un solo orificio o un conjunto de estos alojados en un plato perforado. Los parámetros de diseño a considerar en este tipo de reactor son: el perímetro total de los orificios presentes en la placa y el área de sección transversal de la placa. El área de flujo puede ser variable dependiendo de la geometría de la placa con múltiples orificios como se muestra en la Figura 6.

Figura 6

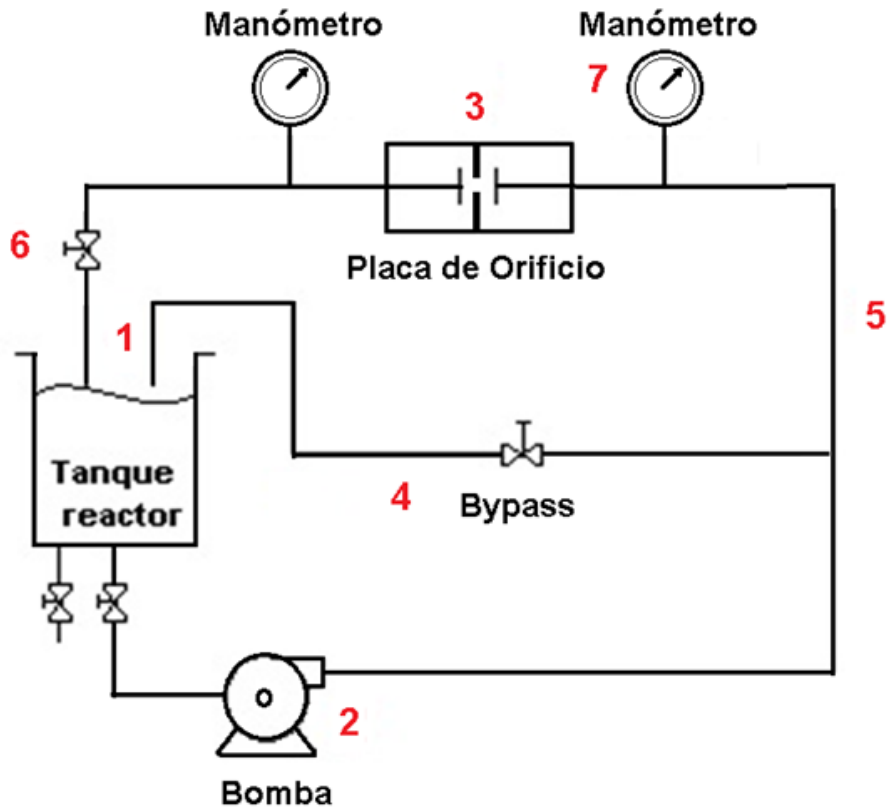
Configuración del cavitador basado en múltiples orificios



La Figura 7 representa el esquema de un sistema experimental típico de cavitación hidrodinámica empleando una placa de orificio.

Figura 7

Esquema de un sistema de cavitación hidrodinámica



Nota: 1: tanque principal, 2: bomba principal centrífuga, 3: dispositivo de constricción (plato perforado), 4: línea bypass, 5: línea principal, 6: válvulas de control, 7: manómetros.

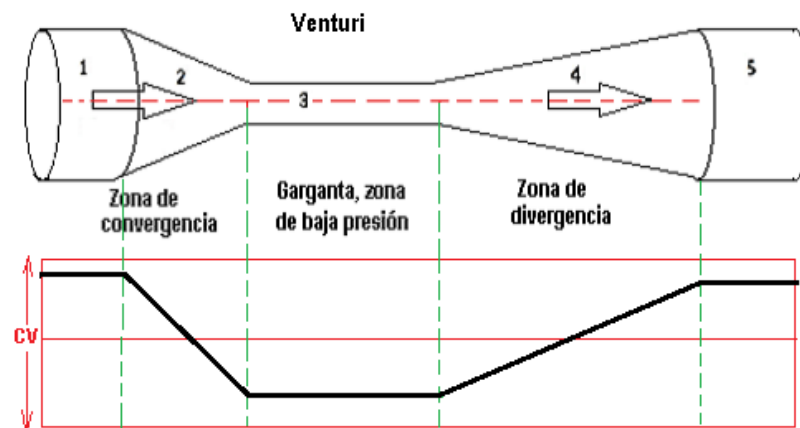
2. Reactor tipo venturi

Según Carpenter et al. (2016) el reactor venturi es un arreglo que consta de dos secciones divididos por una garganta de diámetro menor, en la primera sección los fluidos convergen en la garganta adquiriendo mayor velocidad y la segunda sección es la de divergencia donde los líquidos recuperan su presión. El tamaño y la forma son los factores que afectan en la intensidad de la cavitación por lo que se debe de tomar en consideración el número de eventos cavitantes, la magnitud de la presión de colapso y el tiempo de residencia de la burbuja en la zona de baja presión. A diferencia de una placa de orificio, en un venturi no existe una contracción ni expansión repentina del fluido, se observa una variación gradual en

la dinámica del fluido, por lo que la presión y la velocidad varían gradualmente a lo largo de éste. El venturi puede tener diferentes formas, como rectangular, circular y elíptica.

Figura 8

Representación general de un venturi



Nota: Los numerales corresponden a: 1. Ingreso del fluido. 2. Zona de convergencia. 3. Garganta o constricción. 4. Etapa de expansión y recuperación de presión. 5. Descarga. Cv. Número de cavitación. Adaptado de Gutiérrez et al. (2019).

3. Otros reactores

Según Gutiérrez et al. (2019) existen 2 tipos más de reactores:

Onda Choque

Compuesto por dos cilindros concéntricos: uno estacionario y externo y otro interno y en movimiento. El líquido fluye a través de la sección anular y pasa a través de algunas hendiduras ubicadas sobre la superficie del cilindro central. Este dispositivo es utilizado en la inactivación de células vegetativas de levaduras, bacterias y esporas resistentes al calor.

Doble Rotor

Se basa en dos rotores enfrentados, donde cada uno gira en dirección opuesta. Cada impulsor posee una geometría especial, que causa un efecto repetitivo en la caída de presión. Este tipo de

mecanismo se utiliza para el tratamiento fisicoquímico del agua, especialmente en la remoción de agentes contaminantes indeseables.

2.4. Definición de términos básicos

1. Agua dura

Es aquella agua que contiene un nivel apreciable de iones metálicos en disolución, siendo los iones de calcio y magnesio los principales.

2. Cavitación hidrodinámica

Es un fenómeno físico que se produce cuando un fluido se somete a ondas (oscilaciones) de presión como resultado de hacer circular un flujo de líquido a través de una constricción instalada en un conducto, de tal forma que la presión se reduce por debajo de la presión de vapor del líquido en la vena contracta propiciando el crecimiento y colapso violento de minúsculas cavidades de vapor que liberan una alta energía (Carpenter et al., 2016; Young, 1989).

3. Dureza

Es una propiedad referida a la concentración de sales disueltas presentes en el agua, en particular sales de calcio y magnesio. El grado de dureza es directamente proporcional a la concentración Ca^{2+} y Mg^{2+} presentes en el agua (Odetti y Bottani, 2005).

4. Nanoburbujas

Se definen por su diámetro entre menos de una micra y más grande que un nanómetro, siendo la longevidad su característica más distintiva. En comparación con microburbujas (1–999 μm) y burbujas finas (1–2 mm), las nanoburbujas tienen una capacidad de carga muy pequeña (Zimmerman et al., 2011).

5. Reactor

Un reactor químico es un equipo en cuyo interior tiene lugar una reacción química, diseñado para maximizar la conversión y la

selectividad de esa reacción con el menor coste posible.

6. Número de cavitación

Es un número adimensional que expresa la relación entre la diferencia de la presión local absoluta del fluido con respecto a su presión de vapor y la energía cinética por volumen del flujo.

7. Implosión

Es una acción de romperse hacia dentro con estruendo las paredes de una cavidad en cuyo interior existe una presión inferior a la exterior, es lo contrario a una explosión. Este fenómeno ocurre a la salida de la placa de orificio.

III. HIPÓTESIS Y VARIABLES

3.1. Hipótesis

3.1.1. Hipótesis general

El grado de remoción de dureza total es mayor a un 50% en el agua residual proveniente de un módulo de ósmosis inversa mediante la aplicación de la cavitación hidrodinámica en un reactor batch.

3.1.2. Hipótesis específicas

- Las características fisicoquímicas del agua residual proveniente de un módulo de ósmosis inversa tienen elevados niveles de dureza total, conductividad y sólidos totales disueltos.
- Los parámetros de operación por cavitación hidrodinámica como el tipo de arreglo y caudal influyen significativamente en el incremento del grado de remoción de dureza total del agua residual proveniente de un módulo de ósmosis inversa.

3.2. Definición conceptual de las variables

1. Variable dependiente

Y = Grado de remoción de dureza total

La remoción de la dureza depende de su forma, tanto si es permanente o temporal (Anaokar y Khambete, 2021). Para eliminar la dureza se emplean diversos tratamientos. La cavitación promueve la formación de partículas coloidales de CaCO_3 que actúan como sitios de crecimiento para que los iones de calcio disueltos se precipiten (Koestler et al., 2003).

2. Variable independiente

X_1 = Características fisicoquímicas del agua residual

La caracterización del agua residual comprende la identificación y cuantificación de sus propiedades físicas, químicas y biológicas (Gil, 2020). Por consiguiente, la identificación de algunos parámetros fisicoquímicos proporciona una evaluación preliminar de la calidad y el grado de contaminación del agua (Messrouk et al., 2014). Por ello, se deben realizar algunas pruebas físicas en el agua para determinar su temperatura, color, olor, pH, turbidez, conductividad, sólidos totales disueltos, etc.; mientras que se deben realizar pruebas químicas para determinar su DBO, DQO, oxígeno disuelto, alcalinidad, dureza y otros caracteres (Patil et al., 2012).

X₂ = Parámetros de operación por cavitación hidrodinámica

El rendimiento de la cavitación hidrodinámica se ve afectado por varios parámetros como la presión, el dispositivo de cavitación, la ubicación del dispositivo de cavitación y su alineación en la tubería, el flujo, el diámetro y el material de la tubería, etc. (Zhou et al., 2012; Arroyo y Benito, 2008).

3.2.1. Operacionalización de variable

Tabla 2

Operacionalización de variables

VARIABLES	DEFINICION CONCEPTUAL	DIMENSIONES	DEFINICION OPERACIONAL	INDICADORES	MÉTODO	TÉCNICA
DEPENDIENTE						
Y = Grado de remoción de dureza total	Anaokar y Khambete (2021) manifiestan que la remoción de la dureza depende de su forma, tanto si es permanente o temporal.	Y ₁ = Porcentaje de remoción	Evaluar la capacidad de remoción de dureza total presente en el agua de rechazo del módulo de osmosis inversa	%	Aritmético	Análisis fisicoquímico
INDEPENDIENTE						
X ₁ = Características fisicoquímicas del agua residual	Gil (2020) refiere que la caracterización del agua residual comprende la identificación y cuantificación de sus propiedades físicas, químicas y biológicas.	X _{1.1} = Dureza total	Selección y medición de parámetros fisicoquímicos para caracterizar el agua de rechazo del módulo de osmosis inversa.	mg CaCO ₃ /L	Titulométrico	Análisis fisicoquímico
		X _{1.2} = Conductividad		μS/cm	Electrométrico	Análisis fisicoquímico
		X _{1.3} = STD		mg/L	Electrométrico	Análisis fisicoquímico
X ₂ = Parámetros de operación por cavitación hidrodinámica	El rendimiento de la cavitación hidrodinámica se ve afectado por varios parámetros como la presión, el dispositivo de cavitación, la ubicación del dispositivo de cavitación y su alineación en la tubería, el flujo, el diámetro y el material de la tubería, etc. (Zhou et al., 2012; Arroyo y Benito, 2008).	X _{2.1} = Tipo de placa	El equipo de cavitación hidrodinámica se acondiciona con la placa de orificio seleccionada, luego se carga el agua a tratar en el reactor y se pone en marcha determinando el caudal y el tiempo de operación.	Número orificios	Observación	Conteo
		X _{2.2} = Caudal		L/min	Volumétrico	Aforo continuo
		X _{2.3} = Tiempo de operación		min	Observación	Conteo

IV. DISEÑO METODOLÓGICO

4.1. Tipo y diseño de investigación

4.1.1. Tipo de investigación

La investigación aplicada se caracteriza por confirmar la teoría de manera directa, en un campo concreto de aplicación (Moreno, 2000).

Según el propósito, la presente investigación es de tipo aplicada con enfoque cuantitativo, dado que en la experimentación se medirán y cuantificarán las variables dependientes e independientes, lo cual conformará una base informativa para la remoción de dureza mediante la cavitación hidrodinámica.

4.1.2. Diseño de investigación

El diseño de la investigación es experimental de tipo pre experimental (Pre test / Post test con un solo grupo)

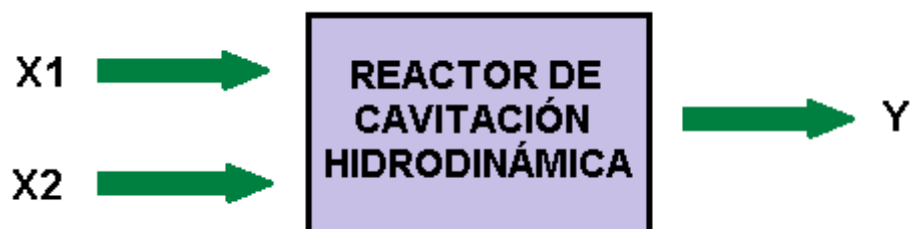


Donde:

- O₁: Análisis de la muestra inicial del agua problema
- X: Variables operacionales del reactor de cavitación hidrodinámica
- O₂: Análisis de la muestra final del agua problema

Figura 9

Diagrama del diseño experimental



4.1.3. Diseño experimental

En el diseño experimental de la presente investigación se han establecido dos variables controlantes para el reactor de cavitación hidrodinámica, habiéndose precisado tres niveles para cada variable, que en este caso son variables cuantitativas. A continuación, se muestran las variables y los niveles para la experimentación:

Tabla 3

Variables de proceso y niveles de operación

Factores de operación	Factor	Nivel inferior (-)	Nivel medio (0)	Nivel superior (+)
Tipo de placa (Número de orificios)	X ₁	3	5	9
Caudal (L/min)	X ₂	0,6	1,0	1,5

Tiempo: 1 hora

Para hallar el número de tratamientos se utiliza el diseño factorial de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$N^{\circ} \text{ de tratamientos} = m^n$$

Donde:

m: Indica los niveles de estudio

n: Indica la cantidad de variables independientes

Reemplazando:

$$N^{\circ} \text{ de tratamientos} = 3^2$$

$$N^{\circ} \text{ de tratamientos} = 9$$

Tabla 4

Matriz de experimentación

N°	X ₁	X ₂	Y
1	3	0,6	Y ₁
2	3	1,0	Y ₂
3	3	1,5	Y ₃
4	5	0,6	Y ₄
5	5	1,0	Y ₅
6	5	1,5	Y ₆
7	9	0,6	Y ₇
8	9	1,0	Y ₈
9	9	1,5	Y ₉

Los experimentos que se han desarrollado siguiendo el presente diseño experimental son como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 5

Diseño factorial para el proceso de cavitación hidrodinámica

N°	X ₁	X ₂	X ₁ Tipo de placa	X ₂ Caudal	Y ₁ Porcentaje de remoción de dureza
1	-	-	3	0,6	Y ₁
2	-	0	3	1,0	Y ₂
3	-	+	3	1,5	Y ₃
4	0	-	5	0,6	Y ₄
5	0	0	5	1,0	Y ₅
6	0	+	5	1,5	Y ₆
7	+	-	9	0,6	Y ₇
8	+	0	9	1,0	Y ₈
9	+	+	9	1,5	Y ₉

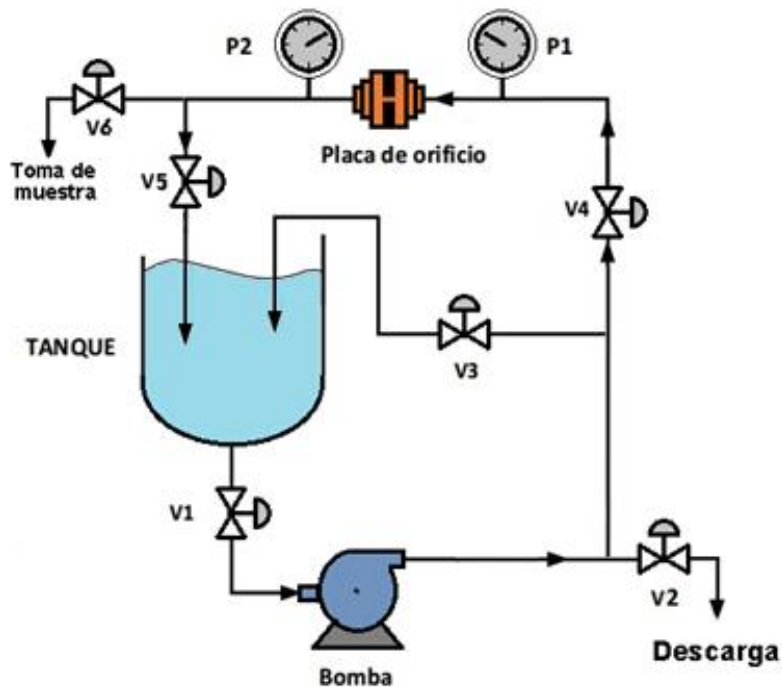
Es importante señalar que con la finalidad de trabajar con una mayor precisión y menor variabilidad en la experimentación, se han de realizar las corridas con una réplica adicional, por lo cual resulta que:

$$N^{\circ} \text{ de tratamientos totales} = 9 \times 2 = 18$$

La Figura 10 representa el diagrama de flujo del sistema de cavitación hidrodinámica para la experimentación.

Figura 10

Diagrama del sistema de cavitación hidrodinámica

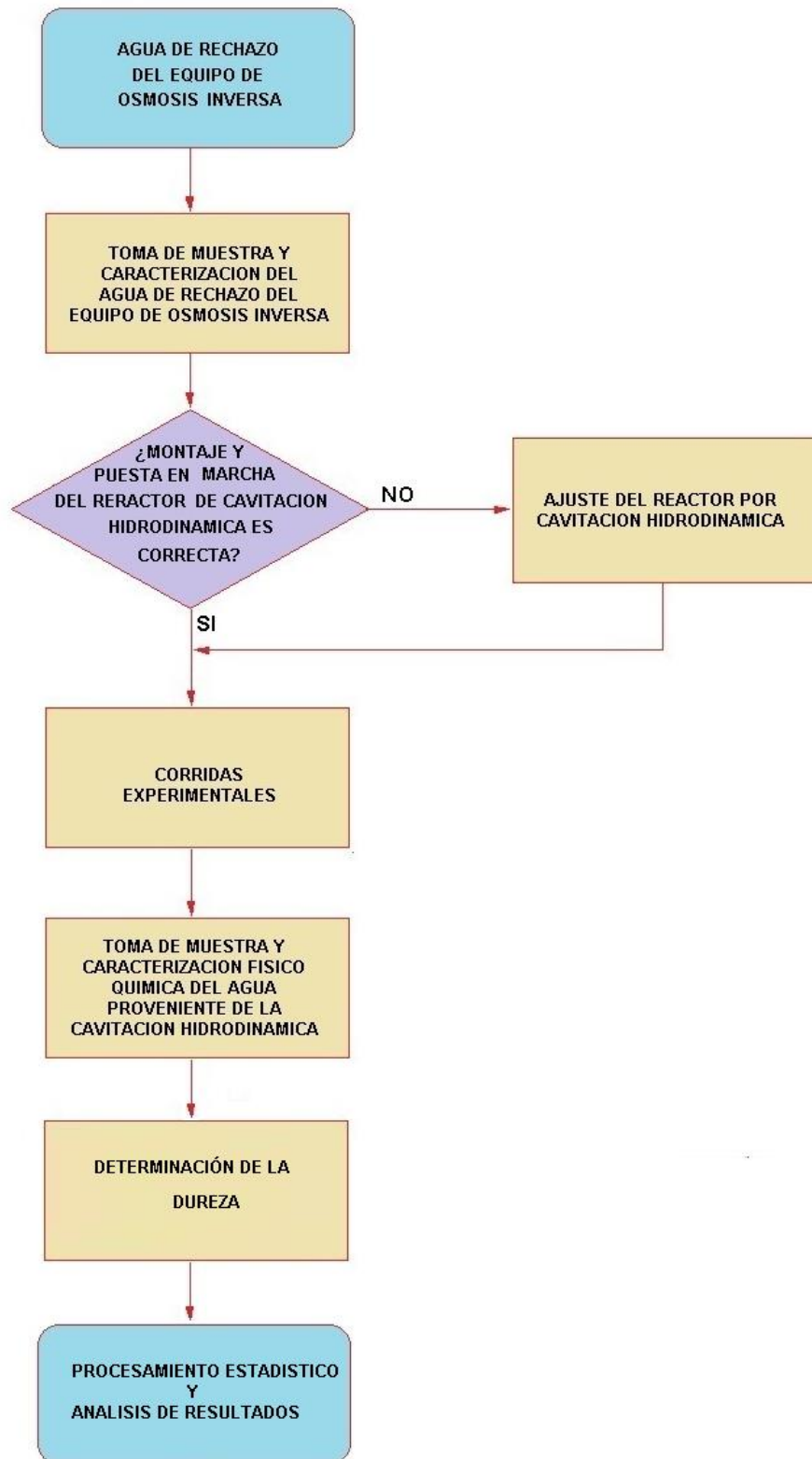


4.2. Método de investigación

En el presente trabajo se empleó una metodología cuantitativa, la misma que se complementó con el método analítico - sintético. La presente investigación obedece a un modelo experimental en la que se pretende encontrar el efecto de las variables independientes sobre la variable dependiente a través de un proceso sistemático y controlado. La secuencia del método de investigación se muestra en la Figura 11.

Figura 11

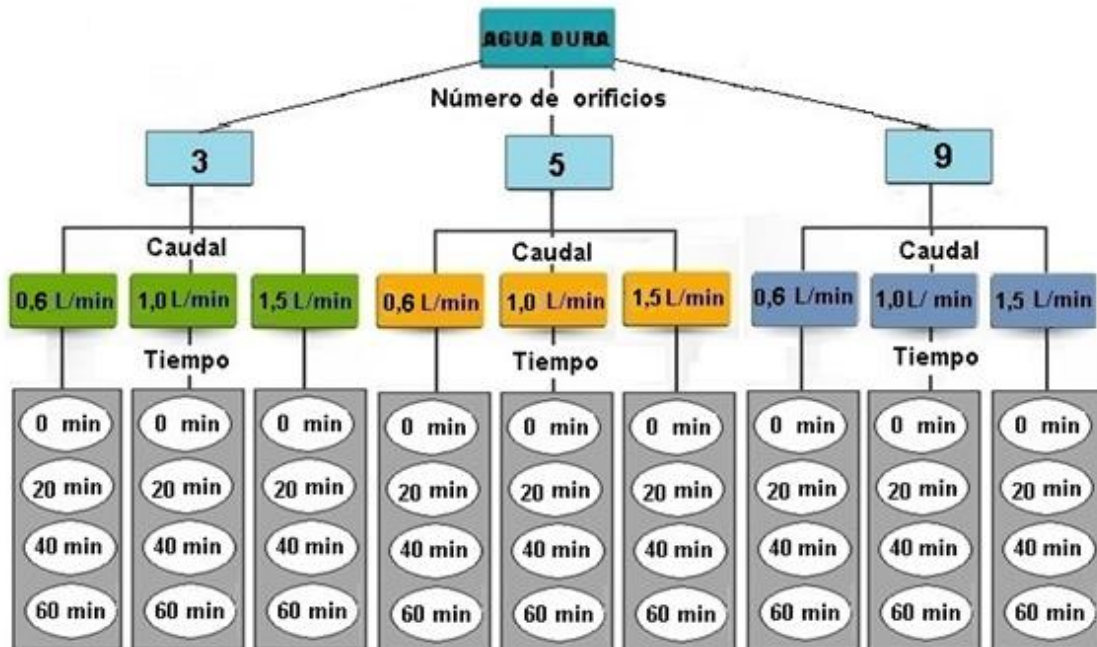
Secuencia del método de investigación



En la Figura 12 se muestra el esquema del diseño experimental realizado en la investigación.

Figura 12

Esquema del diseño experimental



4.3. Población y muestra

4.3.1. Población

Para la presente investigación la población lo constituye el agua residual (rechazo) proveniente del módulo de ósmosis inversa de la empresa Tecnología de Membranas.

4.3.2. Muestra

La muestra de agua fue de 4 litros para cada experimentación.

4.4. Lugar de estudio y período desarrollado

- **Lugar de estudio**

El presente trabajo de investigación se llevó a cabo en las instalaciones

de la empresa Tecnología de Membranas, ubicada en el distrito de Carabaylo.

- **Periodo de desarrollo**

Se llevó a cabo desde setiembre del 2020 hasta setiembre del 2021.

4.5. Técnicas e instrumentos para la recolección de la información

Para el presente estudio se emplearon las siguientes técnicas e instrumentos de recolección de datos, tal como se muestra en la Tabla 6:

Tabla 6

Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Etapa	Técnica	Instrumento	Resultado	Metodología
Recolección de muestra del agua residual	Observación	Ficha de registro de datos de la muestra de agua residual (Cadena de custodia)	Muestra de agua residual preservada y rotulada	NTP 214.060 2016 Protocolo de muestreo de aguas residuales no domésticas
Análisis de la muestra del agua residual	Análisis fisicoquímico	Informe de ensayo de la muestra del agua residual	Nivel de dureza, conductividad y STD	Método SM 2320-C Método titulométrico con EDTA Método SM 2510-B Medición de conductividad con conductímetro Hanna
Análisis de la muestra del agua tratada	Análisis fisicoquímico	Informe de ensayo de la muestra del agua tratada	Nivel de dureza, conductividad y STD	Método SM 2320-C Método titulométrico con EDTA Método SM 2510-B Medición de conductividad con conductímetro Hanna
Construcción del prototipo	Armado y montaje	Ficha técnica del equipo (registro de datos)	Descripción del equipo y parámetros de operación	Prototipado

4.5.1. Materiales, equipos y reactivos

➤ Materiales

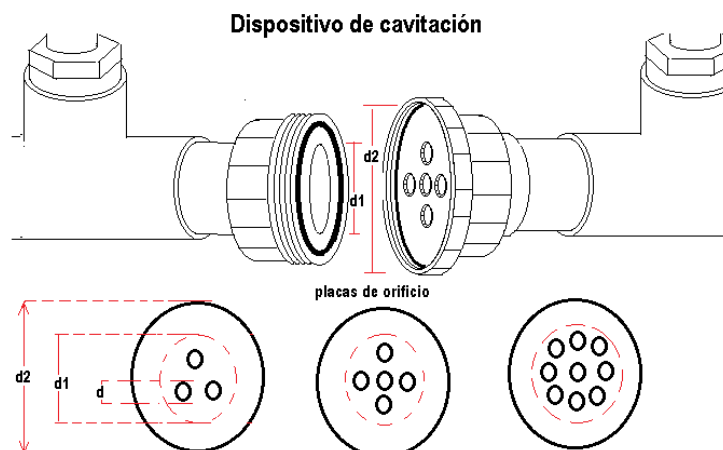
- Balde de plástico de 4,5 litros
- Tubos para agua caliente de ½ pulgada
- Niples
- Válvula de bypass
- Accesorios de tubería de PVC (codo, te)
- Pegamento para tubos

➤ Dispositivos y equipos

- Placas de orificio: Se dispusieron 3 placas circulares de acero de 2 pulgadas de diámetro y espesor de 1 mm con 3, 5 y 9 orificios de 1 mm de diámetro en cada uno (Véase la Figura 13).
- Válvula universal: Se acondicionó una válvula universal de 1 pulgada de diámetro interno para que pueda contener las placas de orificio, permitiendo una fácil manipulación en el cambio y limpieza.

Figura 13

Placas de orificio



- Bomba de 1 hp marca Pedrollo
- Manómetros de alta presión

- Kit de prueba de dureza HANNA HI 3812
- Medidor de conductividad y sólidos totales disueltos HANNA HI 98311
- Medidor de pH y temperatura EZDO MP-103
- Manómetros de alta presión
- Cronómetro

Los equipos de medición de los parámetros fisicoquímicos se muestran en la Figura 14.

Figura 14

Medidores de pH, conductividad y dureza total



4.5.2. Toma de muestra del agua residual

El agua residual para cada experimento fue de 4 litros, el cual se tomó del efluente residual del sistema de ósmosis inversa que fue recolectado en un recipiente de gran capacidad siguiendo los lineamientos de la NTP 214.060 2016 Protocolo de muestreo de aguas residuales no domésticas.

4.5.3. Medición de las características fisicoquímicas de las muestras de agua residual y tratada

Antes de realizar las mediciones los equipos de análisis fueron calibrados y estandarizados.

➤ **Determinación de la dureza total**

Para medir la dureza total se empleó el Kit de Prueba de Dureza HI 3812 de la marca Hanna basado en la titulación volumétrica con EDTA (ver Anexo 6).

➤ **Determinación del porcentaje de remoción de dureza total**

El porcentaje de remoción de dureza total se calculó usando la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Remoción de dureza total} = \frac{D_0 - D_f}{D_0} \times 100$$

Donde, D_0 es la dureza inicial del agua residual y D_f es la dureza final del agua tratada.

➤ **Determinación de la conductividad y los sólidos totales disueltos**

La conductividad y los sólidos totales disueltos de las muestras de agua se determinó empleando una sonda CE/TDS de la marca HANNA modelo HI 98311 cuyo rango de medición es de 0 a 3999 $\mu\text{S/cm}$ para la conductividad y de 0 a 2000 ppm para los sólidos totales disueltos.

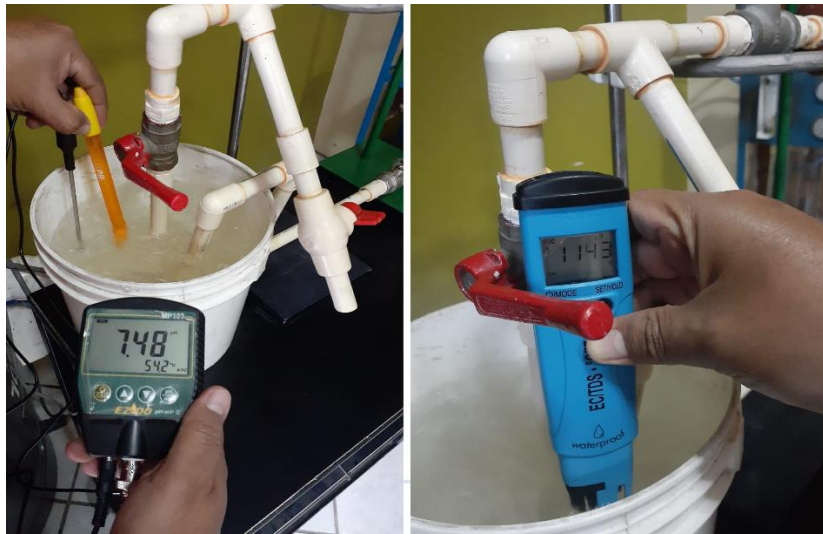
➤ **Determinación del pH y la temperatura**

El pH y la temperatura de las muestras de agua se determinó haciendo uso de un medidor portátil de la marca EZDO provisto de un electrodo para pH (rango 0 -14) y sonda de temperatura (rango 0 – 100 °C).

En la Figura 15 se muestra la medición realizada del pH, la temperatura, la conductividad y los sólidos totales disueltos durante la experimentación.

Figura 15

Medición in situ de los parámetros fisicoquímicos



4.5.4. Medición de parámetros de operación del proceso

Las lecturas de las presiones fueron tomadas en forma directa a través de manómetros instalados antes y después del dispositivo que contiene la placa de orificio en donde se produce la cavitación hidrodinámica que se muestra en la Figura 16.

Figura 16

Lectura de las presiones



La medida del caudal se realizó por el método de flujo volumétrico en la línea de salida del dispositivo de cavitación hidrodinámica. Para

estas mediciones se dispuso una probeta de 1 L de capacidad y un cronometro, en los cuales se tomaron los tiempos que tardan los niveles del agua en alcanzar un litro de capacidad (L/min), tal como se muestra en la Figura 17.

Figura 17

Medición del caudal



4.5.5. Descripción del equipo experimental

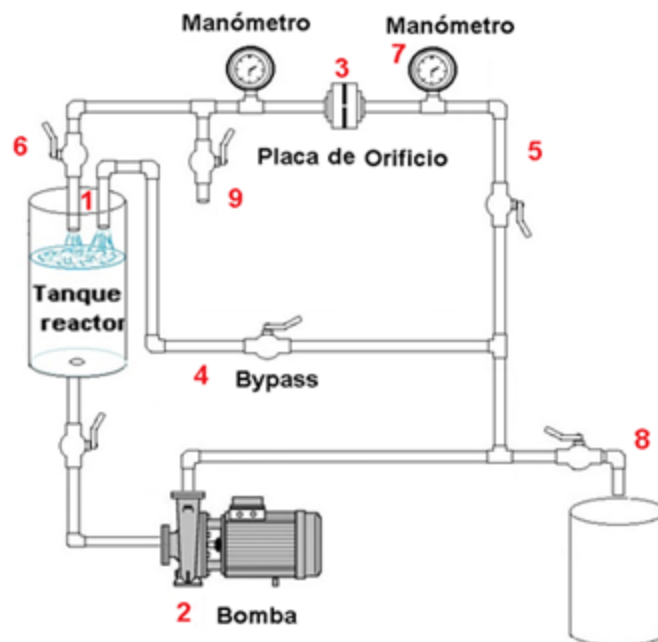
El módulo experimental consiste de un tanque de alimentación de 4 litros de capacidad que contiene el agua problema, el tanque está conectado por la parte del fondo a una bomba de 1 hp de potencia, el cual impulsa el agua hacia el dispositivo de cavitación a través de una tubería de agua caliente de $\frac{1}{2}$ pulgada de diámetro. Antes y después del dispositivo de cavitación se encuentran dos manómetros que miden la diferencia de presión que genera el dispositivo, además se cuenta con una conexión directa de la bomba al tanque de alimentación que actúa como alivio de presión, el cual consta de una llave de paso que sirve para controlar el caudal en el dispositivo de cavitación. El dispositivo de cavitación hidrodinámica, está diseñado con una válvula de unión universal de 2 pulgadas de diámetro el cual contiene una placa

de orificio ajustado con empaquetaduras, permitiendo la fácil manipulación en la limpieza y cambio de las placas.

De acuerdo al prototipo experimental propuesto mostrado en la Figura 18, se emplearon tres tipos de dispositivos de cavitación hidrodinámica: con tres, cinco y nueve orificios y en cada uno se trabajó con caudales de 0,6; 1,0 y 1,5 L/min. En cada prueba se hizo recircular la muestra de agua dura durante 1 hora, dentro del cual se tomaron muestras de agua de la línea de flujo del dispositivo de cavitación en los tiempos de 0, 20, 40 y 60 minutos, donde se midió la dureza total, la conductividad, los sólidos totales disueltos, el pH y la temperatura. Las nueve pruebas fueron realizadas con su réplica correspondiente, realizando en total 18 experimentos.

Figura 18

Esquema del equipo experimental de cavitación hidrodinámica

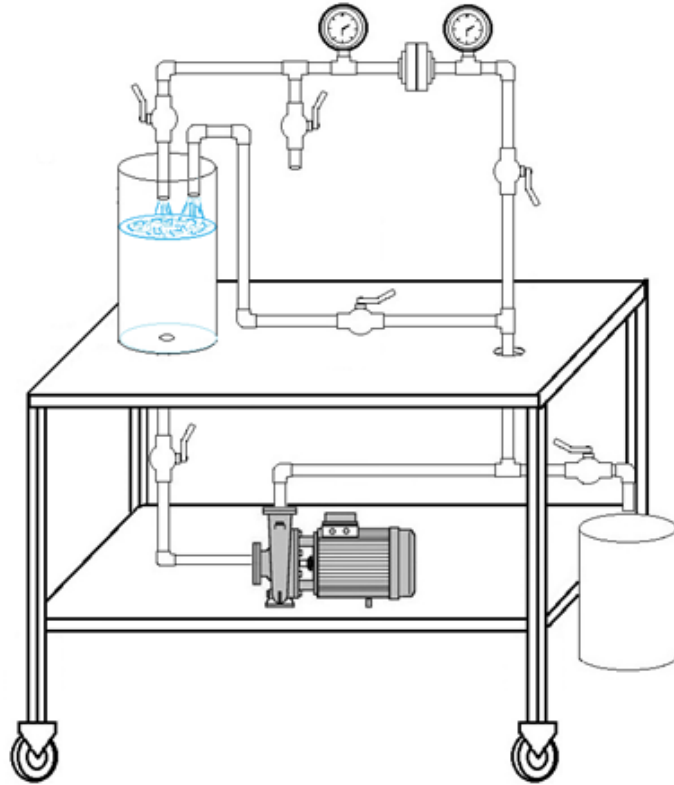


Nota: 1: tanque principal, 2: bomba centrífuga, 3: dispositivo de cavitación (placa de orificio), 4: línea bypass, 5: línea principal, 6: válvulas de control, 7: manómetros, 8: descarga, 9: toma de muestra.

La Figura 19 muestra el montaje terminado del equipo experimental de cavitación hidrodinámica realizado en la planta.

Figura 19

Montaje del equipo experimental de cavitación hidrodinámica



4.6. Análisis y procesamiento de datos

El análisis de los resultados experimentales obtenidos se realizó mediante los softwares de Microsoft Excel y Minitab 18. La estadística descriptiva generó cuadros y gráficos estadísticos, medidas de tendencia central (media aritmética) y medidas de dispersión (desviación estándar). La estadística inferencial incluyó la prueba de normalidad, la prueba de homogeneidad de varianzas, así también las pruebas paramétricas de DOE factorial y T-Student para evaluar la relación de los parámetros medidos y su incidencia en la variable dependiente (Grado de remoción de dureza total).

V. RESULTADOS

5.1. Resultados descriptivos

El desarrollo experimental de la remoción de dureza mediante la cavitación hidrodinámica se realizó con los siguientes parámetros de operación:

- Tipo de dispositivo: Placa de 3, 5 y 9 orificios
- Caudal: 0,6; 1,0 y 1,5 L/min

En la caracterización del agua residual para la experimentación se recolectó la muestra total de 90 L del punto de salida del efluente residual del sistema de ósmosis inversa en un tiempo específico, constituyendo una muestra puntual al azar según lo indicado en la NTP 214.060 2016 Protocolo de muestreo de aguas residuales no domésticas. Luego se midieron in situ las características fisicoquímicas del agua residual para cada experimento y se consignaron en una hoja de registro de datos.

En la Tabla 7 se muestran los resultados del análisis inicial del agua residual proveniente del módulo de ósmosis inversa.

Tabla 7

Características fisicoquímicas iniciales del agua residual

Parámetros	Unidad	Valor Promedio
Dureza	mg CaCO ₃ /L	510.0
Conductividad	μS/cm	1484.75
STD	mg/L	757.06
pH	Unidad de pH	8.0
Temperatura	°C	18.53

Nota: Se reporta el valor promedio de las mediciones realizadas al agua residual de alimentación para los 9 experimentos realizados.

En la Tabla 8 se detallan los resultados de la dureza y su porcentaje de remoción después del tratamiento con la cavitación hidrodinámica a los diferentes niveles de los parámetros de operación:

Tabla 8

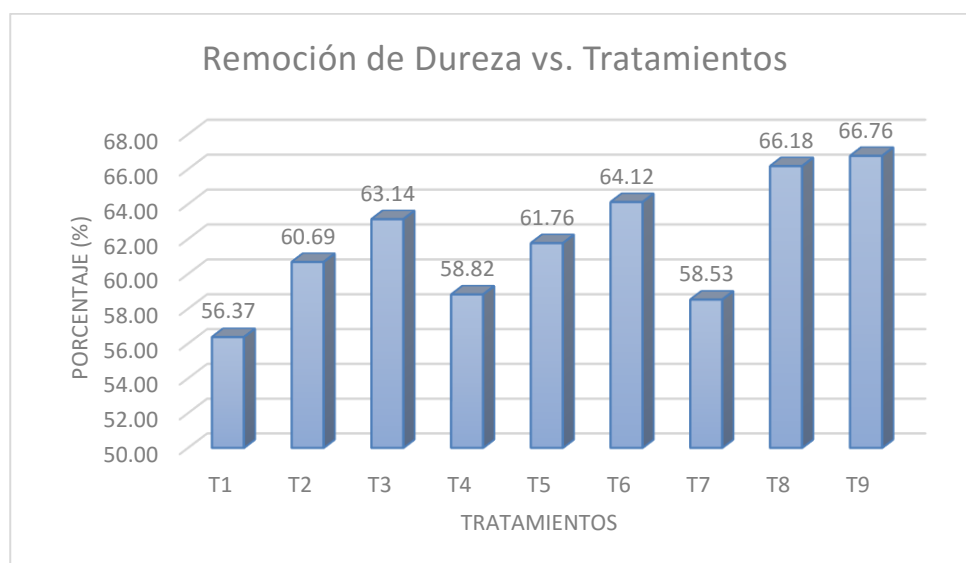
Porcentaje de remoción de dureza con los parámetros de operación

Tratamiento	X ₁ Tipo de Placa # de orificios	X ₂ Caudal L/min	Y Dureza (mg/L)			Porcentaje de remoción de dureza %
			1era Medición	2da Medición	Promedio	
T1	3	0,6	225	220	222.5	56.37
T2	3	1,0	197	204	200.5	60.69
T3	3	1,5	190	186	188	63.14
T4	5	0,6	210	210	210	58.82
T5	5	1,0	198	192	195	61.76
T6	5	1,5	186	180	183	64.12
T7	9	0,6	210	213	211.5	58.53
T8	9	1,0	171	174	172.5	66.18
T9	9	1,5	168	171	169.5	66.76

En la Figura 20 se muestra el porcentaje de remoción de dureza, se observa el incremento de la remoción de dureza con un caudal de 1.5 L/min en los tratamientos T3, T6 y T9 para las placas de 3, 5 y 9 orificios respectivamente.

Figura 20

Porcentaje de remoción de dureza para los diferentes tratamientos



En la Tabla 9 se tiene un resumen de las características fisicoquímicas del

agua residual con respecto al tiempo.

Tabla 9

Resultados de las características fisicoquímicas del agua residual con respecto al tiempo en la experimentación

X ₁ Tipo de Placa (# de orificios)	X ₂ Caudal (L/min)	X ₃ Tiempo (S)	Y Dureza (mg/L)	Conductividad (μS/cm)	STD (mg/L)	Temperatura (°C)	pH
3	0.6	20	333	1281	642.5	52	7.54
		40	241.5	1235	617.5	66	7.55
		60	222.5	1218	608.5	71.5	7.55
	1	20	378	1343	672	51	7.65
		40	262.5	1274	629	67	7.45
		60	200.5	1187	593	76.5	7.65
	1.5	20	346.5	1310	654.5	49.4	7.6
		40	247	1252	625	66	7.4
		60	188	1186	585	73	7.4
0.6	20	358	1362	678	49.5	7.61	
	40	255	1266	630	67.5	7.6	
	60	210	1171	583	73.2	7.7	
5	1	20	357	1277	636	49.5	7.55
		40	253.5	1205	604.5	63.5	7.45
		60	195	1178	588.5	74.5	7.55
1.5	20	339	1316	655.5	53.5	7.46	
	40	238.5	1233	615	68	7.38	
	60	183	1140	565.5	74.5	7.4	
0.6	20	349	1321	660.5	50.5	7.5	
	40	238.5	1219	609.5	65.5	7.52	
	60	211.5	1160	579.5	72.5	7.6	
9	1	20	322.5	1139	569	52.1	7.63
		40	225.5	1041	519.5	64.5	7.55
		60	172.5	989	495	73.9	7.6
1.5	20	304.5	1093	547	51.5	7.6	
	40	216	1017	509	66.5	7.52	
	60	169.5	952	477	71.5	7.55	

La reducción de la dureza con respecto al tiempo para diferentes caudales de operación se muestra en las Figuras 21, 22 y 23.

Figura 21

Efecto de las placas de orificio operando a un caudal de 0,6 L/min

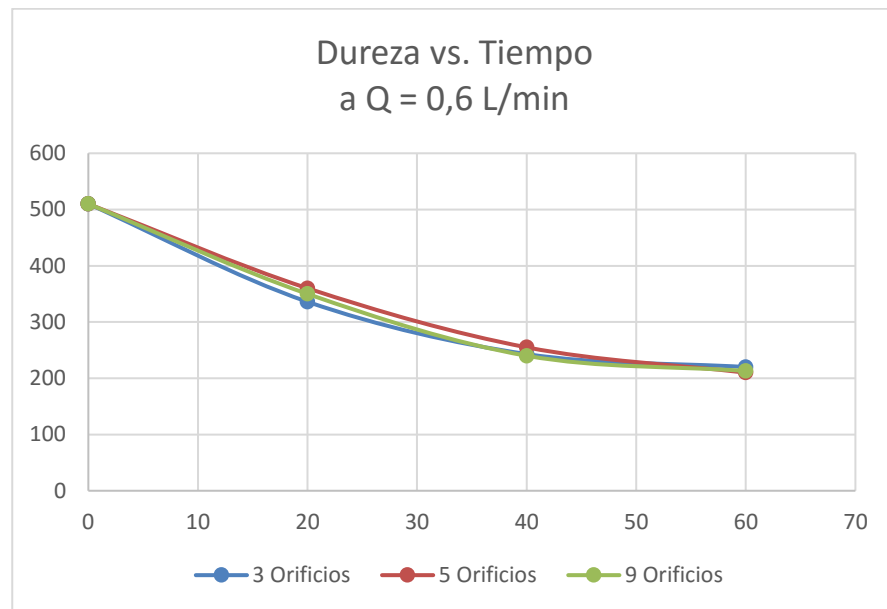


Figura 22

Efecto de las placas de orificio operando a un caudal de 1 L/min

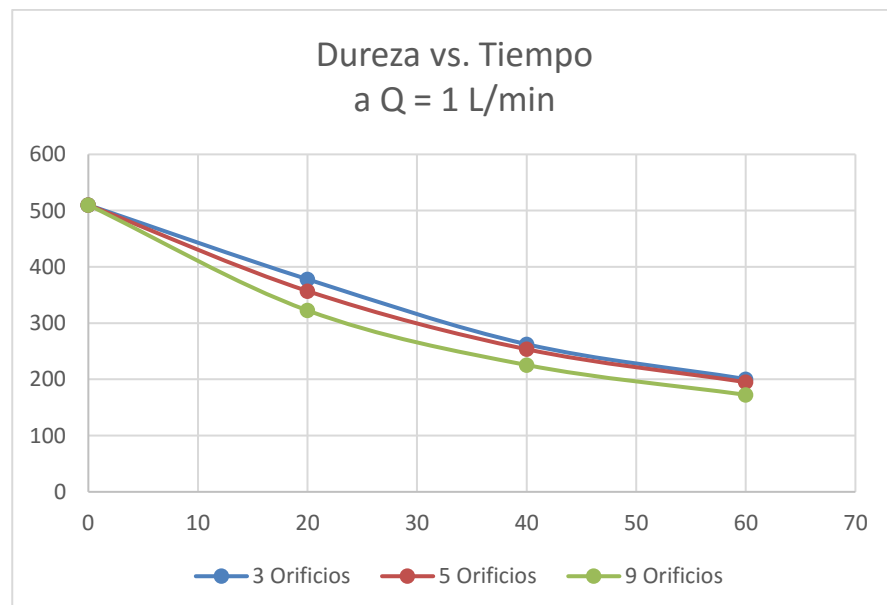
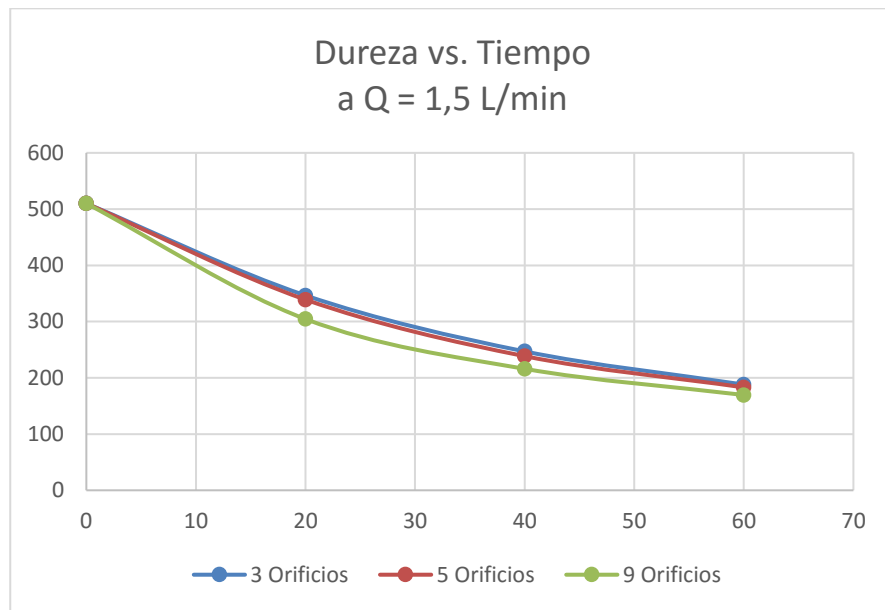


Figura 23

Efecto de las placas de orificio operando a un caudal de 1,5 L/min



Características hidrodinámicas

Las características hidráulicas de las placas se muestran en la Tabla 10.

Tabla 10

Características hidráulicas de las placas de orificio

Tipo de placa # de orificios	Diámetro de agujero mm	Área de flujo mm ²
3	1	2.355
5	1	3.925
9	1	7.065

5.2. Resultados inferenciales

Prueba de Normalidad

H₀: Los datos tienen una distribución normal

H₁: Los datos NO tienen una distribución normal

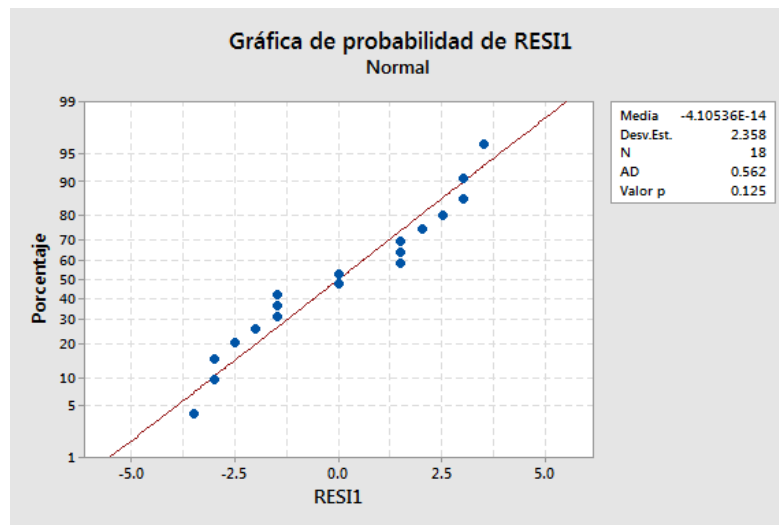
P-value = 0.125 > 0.05

Decisión: No se rechaza la H₀

Conclusión: Con una significancia del 5% se concluye que los datos tienen una distribución normal. Véase la Figura 24.

Figura 24

Resultado de la prueba de normalidad



Prueba de Homogeneidad de Varianzas

H₀: Las varianzas son iguales

H₁: Al menos una varianza es diferente

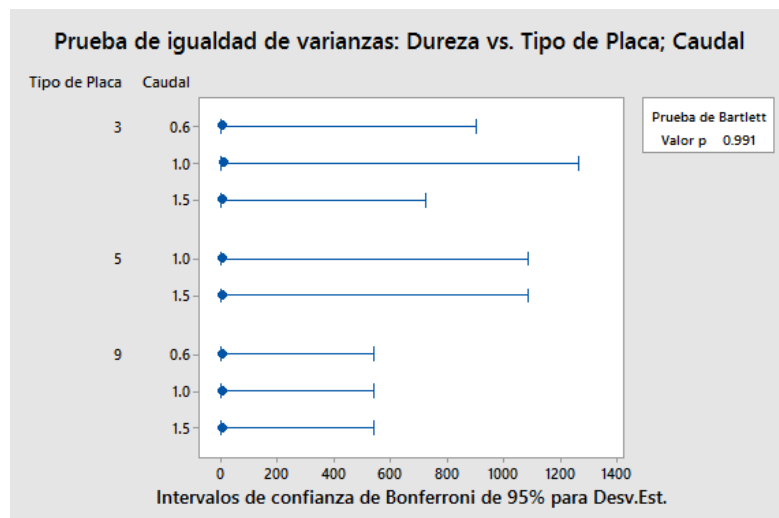
P-value = 0.991 > 0.05

Decisión: No se rechaza la H₀

Conclusión: Con una significancia del 5% se concluye que las varianzas son iguales. Véase la Figura 25.

Figura 25

Resultado de la prueba de igualdad de varianzas



Análisis de Media del Grado de Remoción de Dureza

H_0 : El grado de remoción de dureza total NO es mayor al 50% en el agua residual proveniente de un módulo de ósmosis inversa mediante la aplicación de la cavitación hidrodinámica en un reactor batch.

H_1 : El grado de remoción de dureza total es mayor al 50% en el agua residual proveniente de un módulo de ósmosis inversa mediante la aplicación de la cavitación hidrodinámica en un reactor batch.

P-value = 0.000 < 0.05

Decisión: Se rechaza la H_0 y se acepta H_1

Conclusión: Con una significancia del 5% se concluye que el grado de remoción de dureza total es mayor al 50% en el agua residual proveniente de un módulo de ósmosis inversa mediante la aplicación de la cavitación hidrodinámica en un reactor batch. Véase la Tabla 10.

Tabla 11

Resultados de la prueba de t-student

T de una muestra: Porcentaje de remoción de dureza
Estadísticas descriptivas

N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media	Límite inferior de 95% para μ
9	61.82	3.56	1.19	59.61

μ : media de Porcent de remoción de dureza

Prueba

Hipótesis nula $H_0: \mu = 0.5$

Hipótesis alterna $H_1: \mu > 0.5$

Valor T	Valor p
51.71	0.000

Análisis de Varianza de los Parámetros de Operación

a) Con la variable Tipo de Placa

H_0 : El Tipo de Placa no influye en la disminución de la dureza

H₁: El Tipo de Placa influye en la disminución de la dureza

P-value = 0.000 < 0.05

Decisión: Se rechaza la H₀ y se acepta H₁

Conclusión: Con una significancia del 5% se concluye que el Tipo de Placa influye en la disminución de la dureza.

b) Con la variable Caudal

H₀: El Caudal no influye en la disminución de la dureza

H₁: El Caudal influye en la disminución de la dureza

P-value = 0.000 < 0.05

Decisión: Se rechaza la H₀ y se acepta H₁

Conclusión: Con una significancia del 5% se concluye que el Caudal influye en la disminución de la dureza.

c) Con la interacción entre las variables Tipo de Placa y Caudal.

H₀: No existe interacción entre el Tipo de Placa y el Caudal que influye en la disminución de la dureza

H₁: Existe interacción entre el Tipo de Placa y el Caudal que influye en la disminución de la dureza

P-value = 0.006 < 0.05

Decisión: Se rechaza la hipótesis nula

Conclusión: Con una significancia del 5% se concluye que hay interacción entre el Tipo de Placa y el Caudal que influye en la disminución de la dureza.

En la Tabla 11 se muestran los resultados del análisis de varianza para el diseño de experimentos (DOE).

Tabla 12

Resultados del análisis de varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	8	5265.11	658.14	62.68	0.000
Lineal	4	4948.89	1237.22	117.83	0.000
Tipo de Placa	2	1116.78	558.39	53.18	0.000
Caudal	2	3832.11	1916.06	182.48	0.000
Interacciones de 2 términos	4	316.22	79.06	7.53	0.006
Tipo de Placa*Caudal	4	316.22	79.06	7.53	0.006
Error	9	94.50	10.50		
Total	17	5359.61			

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
3.24037	98.24%	96.67%	92.95%

La variabilidad de la disminución de la dureza es explicada en un 96,67% por el Tipo de Placa y el Caudal y la interacción Tipo de Placa*Caudal.

Análisis de los Resultados: Residuales y efectos estandarizados

NORMALIDAD

Los datos están relativamente cerca de la línea de distribución normal ajustada cuyo valor p (0,125) > 0,05. Por lo tanto, los datos siguen una distribución normal.

VARIANZA CONSTANTE

Los residuos están distribuidos aleatoriamente y la varianza en los diferentes tratamientos son aproximadamente iguales.

INDEPENDENCIA

Los residuos son independientes ya que no muestran tendencias ni patrones cronológico.

Estas características descritas se representan en la Figura 26.

Figura 26

Diagramas de residuos para dureza

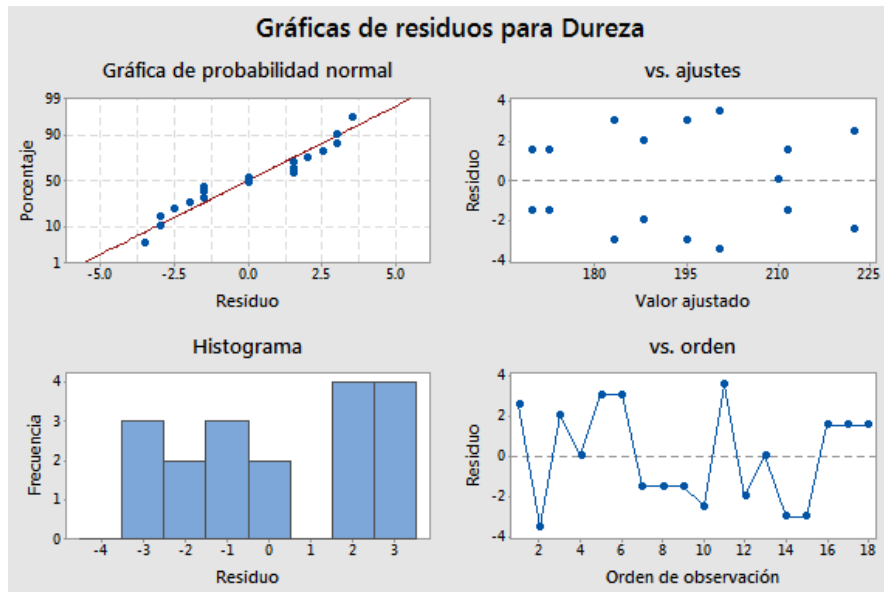
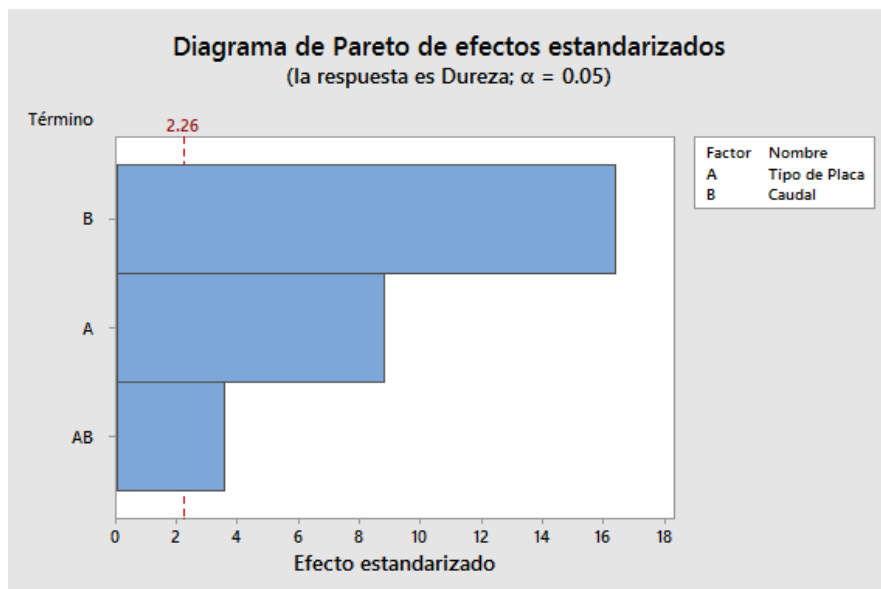


Diagrama de Pareto

Los efectos de los parámetros de operación de la cavitación hidrodinámica y su interacción en la variable respuesta se representan mediante barras horizontales, tal como se muestra a en la Figura 27.

Figura 27

Diagrama de Pareto



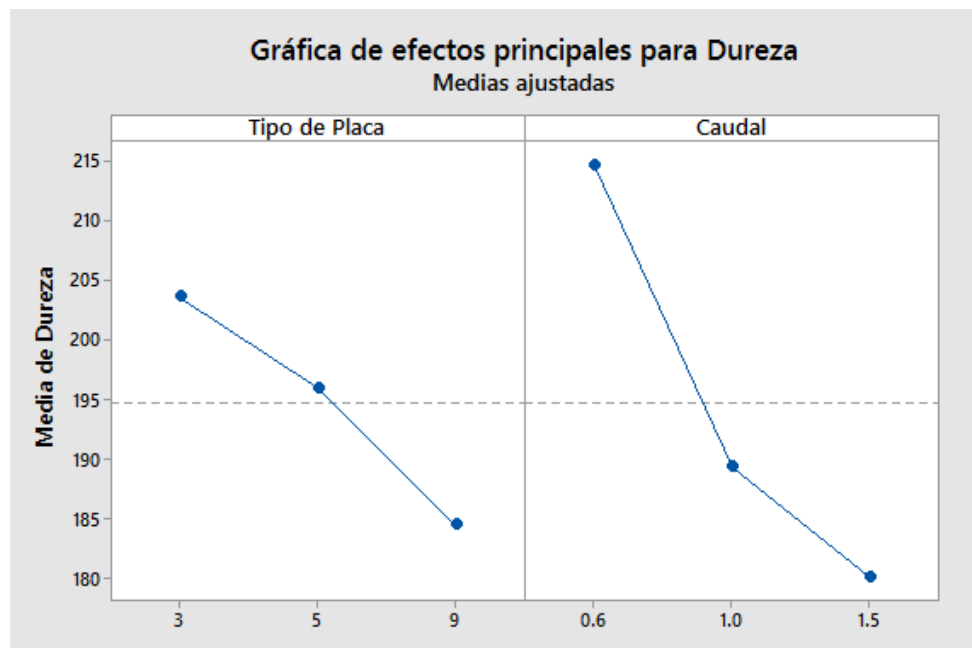
Interpretación: Se observa que la disminución de la dureza está influenciada por el tipo de dispositivo, el caudal y la interacción de ambos, es decir que estos factores son significativos y sus efectos estandarizados en valor absoluto son mayores al valor de la $t_{\alpha/2}$, g.l. error = 2.26.

Análisis de los Resultados: Efectos principales

En general, se tiene que el Tipo de Placa y el Caudal a medida que aumentan tienen incidencia en la disminución de la dureza, ya que se observan pendientes pronunciadas de cada factor. Véase la Figura 28.

Figura 28

Diagrama de efectos principales



Análisis de los Resultados: Interacción

En resumen, se aprecia que la placa de 9 orificios produce los mejores resultados de disminución de la dureza a medida que el caudal aumenta. Véase la Figura 29.

Figura 29

Diagrama de interacción

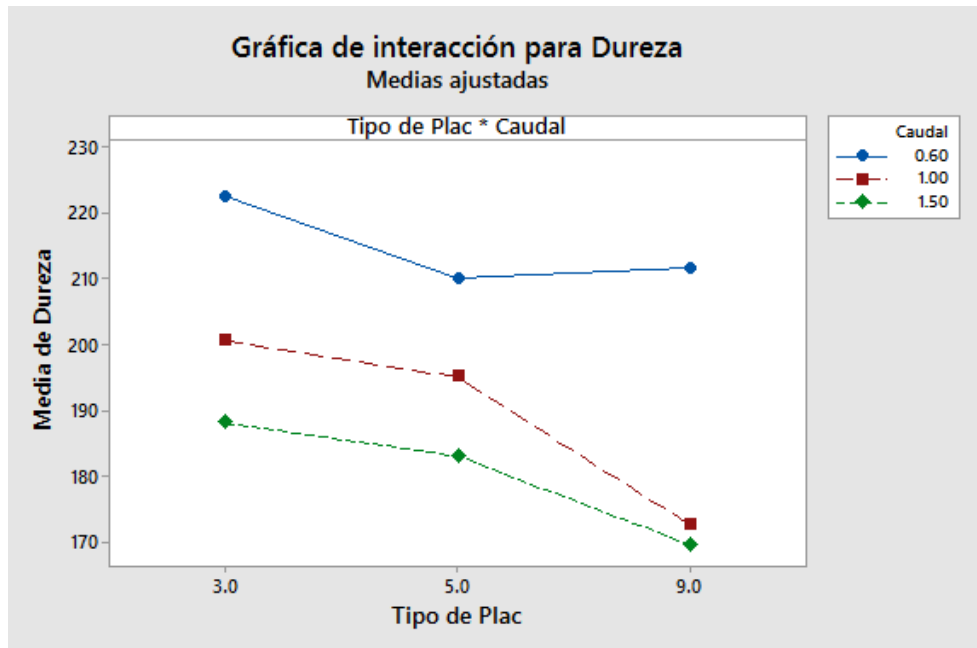
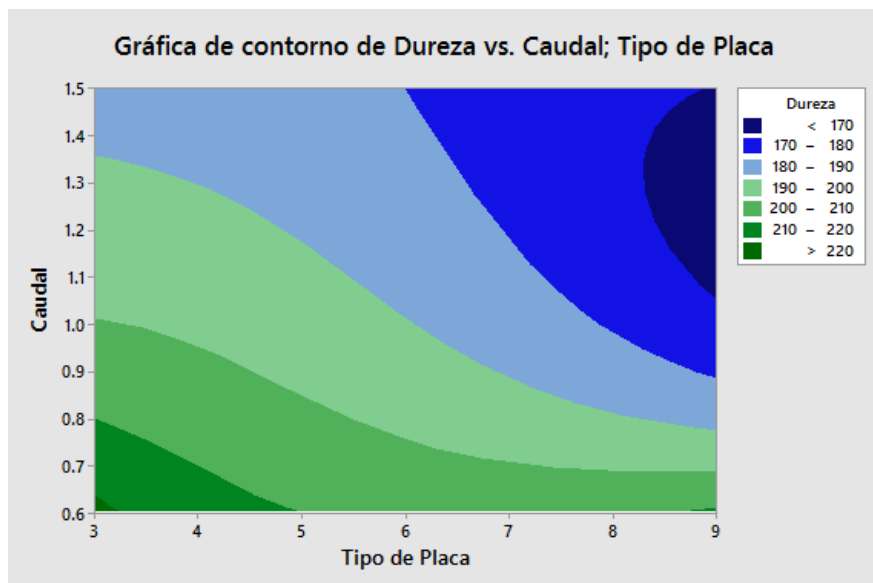


Diagrama de Contorno

En general, se indica que para obtener una reducción de la dureza total menor a 170 mg/L se debe emplear una placa de 9 orificios y un caudal que está en el rango de 1,2 a 1,5 L/min. Véase la Figura 30.

Figura 30

Diagrama de contorno

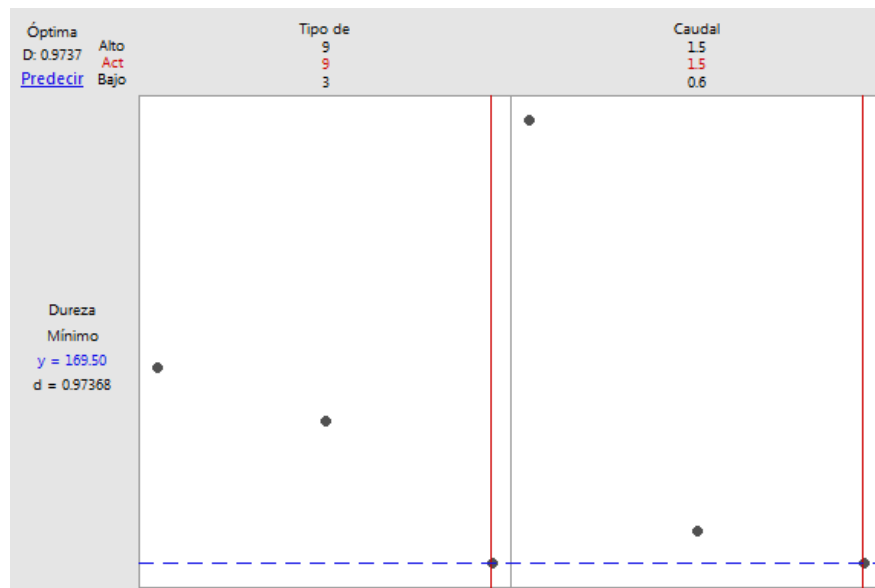


Optimización de Respuesta: Dureza

En la Figura 31 se muestra el optimizador de respuesta, donde el valor de la variable respuesta dureza es de 169,5 para los valores de entrada al proceso de placa de 9 orificios y caudal de 1,5 L/min.

Figura 31

Resultado de optimización de respuesta



VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1. Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados

De acuerdo a la hipótesis general planteada, en el proceso de cavitación hidrodinámica aplicado al agua residual proveniente de un módulo de ósmosis inversa, se obtuvo un grado de remoción de dureza total medio mayor al 50% para todos los tratamientos.

Las características fisicoquímicas del agua residual proveniente de un módulo de ósmosis inversa tienen elevados niveles de dureza total (510 mg/L), conductividad (1484,75 μ S/cm) y sólidos totales disueltos (757,06 mg/L) indicados en la Tabla 7 Características fisicoquímicas iniciales del agua residual.

Empleando una placa de 9 orificios y un caudal de 1,5 L/min se obtiene el mayor porcentaje de remoción de dureza que es de 66,76%. Por lo tanto, queda demostrado que el tipo de placa y caudal influyen significativamente en el incremento del grado de remoción de dureza total.

6.2. Contrastación de los resultados con otros estudios similares

Tithe & Gode (2019) obtuvieron 82,5% de remoción de dureza total de agua de río Indrayani con una placa de 9 orificios de 1 mm de diámetro y un caudal de 50 L/min. Por otro lado, Redekar et al. (2020) obtuvieron una remoción promedio de dureza del 85% empleando una placa de 2 orificios de 2 mm de diámetro y presión de 1 bar.

Estos valores reportados son mayores a lo obtenido en el presente estudio, que fue del 66,76% de remoción de dureza con una placa de 9 orificios de 1 mm de diámetro y un caudal de 1,5 L/min. Sin embargo, lo obtenido es mayor a lo presentado por Bendezú (2017) que fue de 17% de reducción de dureza total mediante micro/nano burbujas de aire-ozono a una presión de 20 psi y un caudal de 4 L/min.

6.3. Responsabilidad ética de acuerdo a los reglamentos vigentes

Los autores de la investigación se responsabilizan por la información emitida en la presente tesis, de acuerdo al Reglamento del Código de Ética de la Investigación de la UNAC, donde se señala los principios éticos como norma de comportamiento conductual, así como también estar de acuerdo con el reglamento en donde reconoce que la investigación es una función esencial y obligatoria en la UNAC, por ello los investigadores son responsables de los procedimientos y evaluación de su investigación.

CONCLUSIONES

Se concluye que el porcentaje de remoción de dureza total es mayor al 50% para todos los tratamientos del agua residual proveniente de un módulo de ósmosis inversa mediante la aplicación de la cavitación hidrodinámica en un reactor batch, validándose de esta manera, la técnica y la hipótesis general propuesta.

Se determinaron las características fisicoquímicas del agua residual proveniente de un módulo de ósmosis inversa como la dureza total, la conductividad y los sólidos totales disueltos, los cuales presentaron altos niveles (dureza: 510 mg CaCO₃/L; conductividad: 1484,75 µS/cm; STD: 757,06 mg/L). También se determinó el pH y la temperatura, obteniéndose valores dentro de lo aceptable (pH: 8,0 y temperatura: 18,53 °C) y después del tratamiento con la cavitación hidrodinámica para un caudal de 1,5 L/min y placa de 9 orificios con resultados de dureza: 169,5 mg CaCO₃/L; conductividad: 952,0 µS/cm; STD: 477,0 mg/L; pH: 7,55 y temperatura: 71,5 °C.

Los parámetros de operación por cavitación hidrodinámica como el tipo de placa y caudal influyen significativamente en el incremento del grado de remoción de dureza total del agua residual proveniente de un módulo de ósmosis inversa. Encontrándose mayor incidencia de remoción 66.76% para un caudal de 1.5 L/min y placa de 9 orificios.

RECOMENDACIONES

Se recomienda para futuras investigaciones, requerir de un tanque con mayor volumen y una bomba de alta presión con la finalidad de conseguir mayor intensidad de cavitación en los experimentos.

Se recomienda experimentar con novedosos arreglos de placa de orificio, por ejemplo, variando las distribuciones, diámetros y número de agujeros empleados.

Se recomienda instalar un flujómetro en la línea de conducción que sale de la bomba para tener lecturas directas del caudal y de la velocidad de flujo.

Después de cada experimentación hacer la limpieza de la línea de conducción con agua desionizada poniendo en marcha el equipo sin las placas, a fin de eliminar restos de partículas sólidas que puedan obstruir los orificios.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anaokar, G. S., & Khambete, A. K. (2021). Fuzzy rule base approach to evaluate performance of hydrodynamic cavitation for borewell water softening. *Materials Today: Proceedings*.
- Arrojo, S., & Benito, Y. (2008). A theoretical study of hydrodynamic cavitation. *Ultrasonics Sonochemistry*, 15(3), 203-211.
- Bagal, M. V., & Gogate, P. R. (2014). Wastewater treatment using hybrid treatment schemes based on cavitation and fenton chemistry: a review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 21(1), 1-14.
- Bendezú, L. (2017). *Reducción de la dureza de aguas subterráneas mediante micro-nano burbujas de aire-ozono en la urbanización Villa El Pinar - Comas*. (Tesis de pregrado) Universidad César Vallejo, Perú.
- Benito, Y. y Arrojo, S. (2006). Tratamiento de efluentes industriales mediante cavitación hidrodinámica. *Tecnología del agua*, 26(279), 38-41.
- Carpenter, J., Badve, M., Rajoriya, S., George, S., Saharan, V. K., & Pandit, A. B. (2016). Hydrodynamic cavitation: an emerging technology for the intensification of various chemical and physical processes in a chemical process industry. *Reviews in Chemical Engineering*, 32, 433-470. [https://DOI 10.1515/revce-2016-0032](https://doi.org/10.1515/revce-2016-0032)
- Carrillo, O., Galindo, G. y García, I. (2012). *Reproducción de cavitación hidrodinámica luminiscente para la limpieza de agua a nivel terciario*. (Tesis de pregrado). Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Gil, M. (2020, 24 de setiembre). Nuevos conceptos en la caracterización de agua residual industrial. *Iagua*. <https://www.iagua.es/blogs/mauricio-gil/nuevos-conceptos-caracterizacion-agua-residual-industrial>

- Gogate, P. R., & Pandit, A. B. (2001). Hydrodynamic cavitation reactors: a state of the art review. *Reviews in Chemical Engineering*, 17(1), 1-85.
- González Fernández, J. A. (1984). *Teoría y práctica de la lucha contra la corrosión*. Consejo Superior de Investigaciones Científicas.
- González, M. M. y Londoño, C. A. (2014). *Diseño de un cavitador hidrodinámico a escala planta a piloto*. (Tesis de pregrado). Universidad del Valle, Colombia.
- Guillen, M. R. y Cañazaca, M. Y. (2020). *Remoción de dureza del agua mediante resinas catiónicas para el uso industrial y consumo humano. Una revisión*. (Trabajo de investigación). Universidad Peruana Unión, Perú.
- Gutiérrez, L., Arias, S. y Cardona, D. (2019). Cavitación hidrodinámica: Un enfoque desde la Ingeniería y la Agroindustria. *Scientia et Technica*, 24 (2), 285-297.
<http://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/19921>
- Joo, S. H., & Tansel, B. (2015). Novel technologies for reverse osmosis concentrate treatment: A review. *Journal of Environmental Management*, 150, 322-335.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.10.027>
- Kim, S., Park, J.Y., Lee, Wang, W., Lee, Y.W., & Hwang, K.W. (2007). The use of hydrodynamic cavitation for calcium removal from electronics wastewater. *Ultrapure Water*, 24 (2) 26-30.
- Kim, S. J., Park, J. Y., Lee, Y. W., Lee, J. J., Choi, J. Y., Choi, Y. K., Hwang, K. W., Vella, P., & Lee, W. K. (2009). High-rate calcium removal using the Hyperkinetic Vortex Crystallization (HVC) process for reuse of electronics wastewater. *Desalination*, 249 (2) 554-559.
<https://doi.org/10.1016/j.desal.2008.11.014>
- Koestler, P., Wang, W., & Kelsey, R. (2003). New Technology Saves Cooling

Water Demands. *Industrial Water Conference*, Las Vegas, NV.

López, I. y Borzacconi, L. (2009). *Introducción al diseño de reactores*. <https://www.fing.edu.uy/iiq/maestrias/DisenioReactores/materiales/notas1.pdf>

Macassi, G. (2017). *Comportamiento del sistema de nanoburbujeo en el tratamiento para reducir los niveles de contaminación de aguas residuales domésticas de la provincia de Concepción*. (Tesis de pregrado) Universidad Nacional del Centro del Perú, Perú.

Mancuso, G., Langone, M., & Andreottola, G. (2020). A critical review of the current technologies in wastewater treatment plants by using hydrodynamic cavitation process: principles and applications. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 18(1), 311-333.

Messrouk, H., Hadj Mahammed, M., Touil, Y., & Amrane, A. (2014). Physico-chemical characterization of industrial effluents from the town of Ouargla (South East Algeria). *Energy Procedia*, 50, 255-262. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.06.031>

Min, K. A., Ramakrishna, Ch., Choon, H., & Thriveni, T. (2018). Removal of hardness from water samples by a carbonation process with a closed pressure reactor. *Water*, 10 (1) 54. <https://doi.org/10.3390/w10010054>

Moholkar, V., & Pandit, A. (2001). Modeling of hydrodynamic cavitation reactors: a unified approach. *Chemical Engineering Science*, 56, 6295-6302. [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(01\)00253-6](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(01)00253-6)

Moreno, F. (2018). *Determinación complexométrica con EDTA de la dureza de aguas corrientes y aguas minerales naturales*. <http://www.escriitoscientificos.es/trab21a40/durezagua/00dureza.htm>

Moreno, M. (2000). *Introducción a la metodología de la investigación educativa*. Progreso.

- Naveena, K., Ram, P., & Ravi, D. V. (2018). Non chemical water treatment process for TDS reduction in cooling tower – specific study on electrical conductivity and turbidity. *International Journal of Applied Engineering Research*, 8 (6), 151-158. <https://10.24247/ijmperdddec201817>
- Neira, M. (2006), *Dureza en aguas de consumo humano y uso industrial, impactos y medidas de mitigación*. (Tesis de pregrado). Universidad de Chile, Chile.
- Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (2014). *La fiscalización ambiental en aguas residuales*. https://www.oefa.gob.pe/?wpfb_dl=7827
- Pandit, A. B. (2016). Hydrodynamic cavitation technology: Industrial applications. In *The Mind of an Engineer* (pp. 329-340). Springer.
- Patil, P. N., Sawant, D. V., & Deshmukh, R. N. (2012). Physico-chemical parameters for testing of water—A review. *International Journal of Environmental Sciences*, 3(3), 1194-1207.
- Redekar, S. D., Shastri, S. S., Anaokar, G. S., & Sawant, M. M. (2020). Feasibility Study of Combined Softening and Disinfection of Water by Hydrodynamic Cavitation. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 9(6), 4726-4732.
- Subramani, A., & Jacangelo, J. G. (2014). Treatment technologies for reverse osmosis concentrate volume minimization: A review. *Separation and Purification Technology*, 122, 472-489. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2013.12.004>
- Tao, Y., Cai, J., Huai, X., Liu, B., & Guo, Z. (2016). Application of hydrodynamic cavitation to wastewater treatment. *Chemical Engineering & Technology*, 39(8), 1363-1376.
- Tithe, S., & Gode, A. (2019, February). A Reliable Solution for Treatment of River Water Using Hydrodynamic Cavitation in Combination with

Chemical Additives. In *International Conference on Reliability, Risk Maintenance and Engineering Management* (pp. 145-152). Springer.

Vargas, A. Esquivel, D. (2014). *Disminución de la viscosidad de líquidos mediante cavitación hidrodinámica*. (Tesis de pregrado). Universidad Autónoma de México, México.

Wang, B., Su, H., & Zhang, B. (2021). Hydrodynamic cavitation as a promising route for wastewater treatment – A review. *Chemical Engineering Journal*, 128685.

Wang, X., Jia, J. & Wang, Y. (2017). Combination of photocatalysis with hydrodynamic cavitation for degradation of tetracycline. *Chemical Engineering Journal*, 315, 274-282.
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.01.011>

World Health Organization. (2011). *Hardness in drinking-water. Background document for preparation of WHO Guidelines for drinking-water quality*.
https://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/chemicals/hardness.pdf

Young, F. R. (1999). *Cavitation*. World Scientific.

Zhou, Y., Yang, K., Cui, J., Ye, J. Y., & Deng, C. X. (2012). Controlled permeation of cell membrane by single bubble acoustic cavitation. *Journal of Controlled Release*, 157(1), 103-111.

Zimmerman, W. B., Tesař, V., & Bandulasena, H. C. H. (2011). Towards energy efficient nanobubble generation with fluidic oscillation. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 16 (4), 350-356.
<https://doi.org/10.1016/j.cocis.2011.01.010>

Zuluaga, A. (2019). *Evaluación del tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios mediante cavitación hidrodinámica*. (Tesis de posgrado). Universidad Nacional de Colombia, Colombia.

ANEXOS

ANEXO 1. Matriz de Consistencia

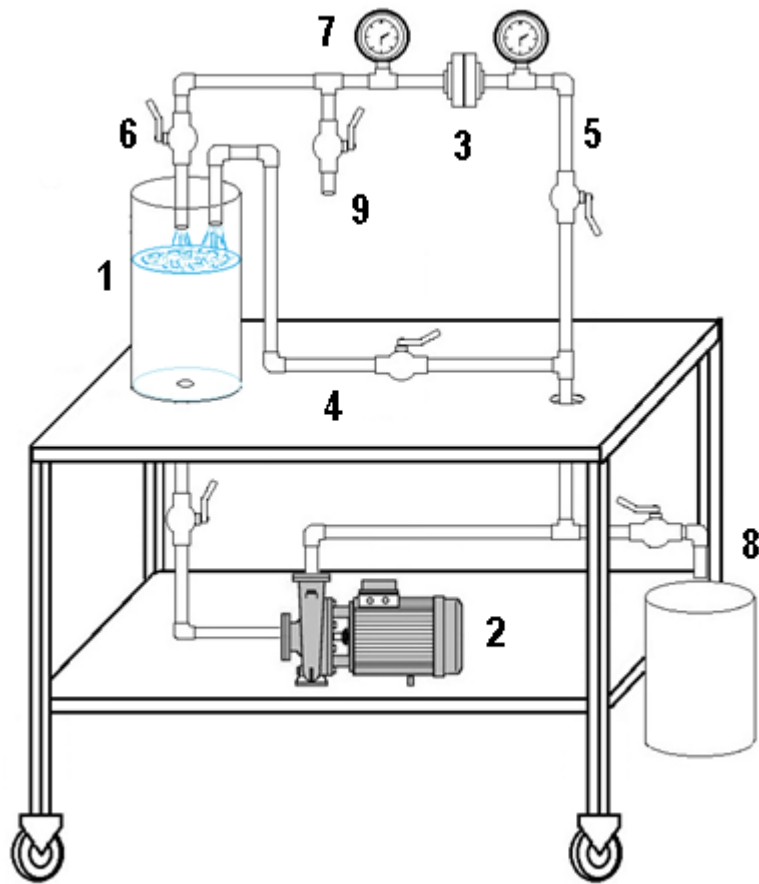
“REMOCIÓN DE DUREZA MEDIANTE UN REACTOR DE CAVITACIÓN HIDRODINÁMICA A PARTIR DE AGUA RESIDUAL PROVENIENTE DE UN MÓDULO DE ÓSMOSIS INVERSA”

PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPÓTESIS GENERAL	VARIABLE DEPENDIENTE	DIMENSIONES	INDICADORES	MÉTODO
¿Cuál es el grado de remoción de dureza total del agua residual proveniente de un módulo de ósmosis inversa mediante la aplicación de la cavitación hidrodinámica en un reactor batch?	Determinar el grado de remoción de dureza total del agua residual proveniente de un módulo de ósmosis inversa mediante la aplicación de la cavitación hidrodinámica en un reactor batch.	El grado de remoción de dureza total es mayor a un 50% en el agua residual proveniente de un módulo de ósmosis inversa mediante la aplicación de la cavitación hidrodinámica en un reactor batch.	Y = Grado de remoción de dureza total	Y ₁ = Porcentaje de remoción	%	Aritmético
				Y _{2.1} = Dureza total	mg/L	Titulométrico
				Y _{2.2} = Conductividad	μS/cm	Electrométrico
				Y _{2.3} = STD	mg/L	Electrométrico
PROBLEMAS ESPECÍFICOS	OBJETIVOS ESPECIFICOS	HIPOTESIS ESPECIFICAS	VARIABLE INDEPENDIENTE	DIMENSIONES	INDICADORES	MÉTODO
¿Cuáles son las características fisicoquímicas del agua residual proveniente de un módulo de osmosis inversa a tratar?	Determinar las características fisicoquímicas del agua residual proveniente de un módulo de ósmosis inversa a tratar.	Las características fisicoquímicas del agua residual proveniente de un módulo de ósmosis inversa tienen elevados niveles de dureza total, conductividad y sólidos totales disueltos.	X ₁ = Características fisicoquímicas del agua residual	X _{1.1.} = Dureza total	mg/L	Titulométrico
				X _{1.2.} = Conductividad	μS/cm	Electrométrico
				X _{1.3.} = STD	mg/L	Electroimétrico
¿Cuál es la influencia de los parámetros de operación por cavitación hidrodinámica que incrementen el grado de remoción de dureza total del agua residual proveniente de un módulo de ósmosis inversa?	Determinar la influencia de los parámetros de operación por cavitación hidrodinámica que incrementen el grado de remoción de dureza total del agua residual proveniente de un módulo de ósmosis inversa.	Los parámetros de operación por cavitación hidrodinámica como el tipo de arreglo y caudal influyen significativamente en el incremento del grado de remoción de dureza total del agua residual proveniente de un módulo de ósmosis inversa.	X ₂ = Parámetros de operación por cavitación hidrodinámica	X _{2.1.} = Tipo de placa	Número orificios	Observación
				X _{2.2.} = Caudal	L/min	Volumétrico
				X _{2.3.} = Tiempo de operación	min	Observación

ANEXO 3. Ficha Técnica del Equipo

CARACTERIZACIÓN DE LA TECNOLOGÍA DE CAVITACIÓN HIDRODINÁMICA						
TÍTULO DEL PROYECTO:						
DATOS DEL RESPONSABLE				DATOS DEL LABORATORIO		
NOMBRE:				NOMBRE:		
TELÉFONO:				TELÉFONO:		
CORREO:				CORREO:		
N° DE MUESTRA	CÓDIGO DE MUESTRA	FECHA	CONDICIONES DE OPERACIÓN			OBSERVACIONES
			Tipo de Placa (# orificios)	Caudal (L/min)	Tiempo (min)	
OBSERVACIONES ADICIONALES:						
FECHA:						
FIRMA:						

ANEXO 4. Esquema del Equipo Experimental



Descripción: 1: tanque principal, 2: bomba centrífuga, 3: dispositivo de cavitación (placa de orificio), 4: línea bypass, 5: línea principal, 6: válvulas de control, 7: manómetros, 8: descarga, 9: toma de muestra.

ANEXO 5. Informe de Ensayo de Agua Residual

CERTIMIN S.A.

INFORME DE ENSAYO DE AGUA RESIDUAL

Tipo de muestra		Agua Residual	Agua Tratada
Fecha De Muestreo		27/092021 16:40	27/092021 17:50
Código de muestra	Unidades	Muestra 1	Muestra 2
Fluoruro	mg/L	0.114	0.062
Clorito	mg/L	0	0
Cloruro	mg/L	234.13	191.94
Nitrito	mg/L	0.8225	0
Bromuro	mg/L	0	0
Sulfato	mg/L	224.9	180.3585
Nitrato	mg/L	19.479	13.1175
Clorato	mg/L	0	0
Fosfato	mg/L	0	0
Plata (Ag)	mg/L	0	0
Aluminio (Al)	mg/L	0.1	0
Arsénico (As)	mg/L	0	0
Boro (B)	mg/L	0.066	0.06
Bario (Ba)	mg/L	0	0
Berilio (Be)	mg/L	0	0
Bismuto (Bi)	mg/L	0	0
Calcio (Ca)	mg/L	162.6	98.6
Cadmio (Cd)	mg/L	0	0
Cerio (Ce)	mg/L	0.03	0
Cobalto	mg/L	0	0
Cromo (Cr)	mg/L	0	0
Cobre (Cu)	mg/L	0	0
Hierro (Fe)	mg/L	0	0
Mercurio (Hg)	mg/L	0	0
Potasio (K)	mg/L	4.3	4
Litio (Li)	mg/L	0.097	0.084
Magnesio (Mg)	mg/L	18.6	14.8
Manganeso (Mn)	mg/L	0	0

CERTIMIN S.A.

INFORME DE ENSAYO DE AGUA
RESIDUAL

Tipo de muestra		Agua Residual	Agua Tratada
Fecha De Muestreo		27/092021 16:40	27/092021 17:50
Código de muestra	Unidades	Muestra 1	Muestra 2
Molibdeno (Mo)	mg/L	0.008	0
Sodio (Na)	mg/L	153.2	127.6
Níquel (Ni)	mg/L	0	0
Fosforo (P)	mg/L	0	0
Plomo (Pb)	mg/L	0	0
Antimonio (Sb)	mg/L	0	0
Selenio (Se)	mg/L	0	0
Silicio (sí)	mg/L	8.643	7.35
Estaño (Sn)	mg/L	0	0
Estroncio (Sr)	mg/L	1.208	0.958
Titanio (Ti)	mg/L	0	0
Talío (Tl)	mg/L	0	0
Vanadio (V)	mg/L	0.009	0.009
Zinc (Zn)	mg/L	0	0
Ac y G	mg/L	<0.5	<0.5
STS	mg/L	0.21	2.95
DBO ₅	mg/L	<2.0	<2.0
DQO	mg/L	3.621	2.469
Alcalinidad por bicarbonato (HCO ⁻)	mg/L	204.93	80.601
Alcalinidad por carbonato (CO ₃ ⁻)	mg/L	0	0
Alcalinidad Total	mg/L	205	80
Nitrógeno Amoniacal N-NH ₃	mg/L	<0.03	<0.03
Amoniaco	mg/L	<0.04	<0.04
pH		7.57	7.31
Conductividad	µmho/cm	1642	1218
STD	mg/L	813.1	619.7

ANEXO 6. Instructivo para la Medición de Dureza

Manual de Instrucciones

HI 3812

Equipo de Analisis de Dureza



www.hannacolombia.com

Estimado Cliente,

Gracias por elegir un producto de Hanna Instruments. Por favor lea las instrucciones cuidadosamente, estas le proveerán de toda la información necesaria para el correcto uso del kit.

Retire el test kit del material de empaque y examínelo cuidadosamente para asegurarse que no ha sufrido algún daño en el proceso de envío. Si encuentre algún daño notifique a su distribuidor o a la oficina Hanna más cercana.

Cada kit se entrega con:

- Reactivo 1 (Buffer de dureza), 1 botella con dosificador (30 ml);
- Reactivo 2 (Indicador calmogita), 1 botella con dosificador (10 ml);
- Reactivo 3 (Solución EDTA HI3812-D), 1 botella (120 mL);
- 2 vasos (10 mL y 50 mL);
- 1 jeringa graduada

Nota: Todo artículo dañado o defectuoso ha de ser devuelto en su embalaje original.

ESPECIFICACIONES

Rango	0 a 30 mg/l (ppm) CaCO ₃ 0 a 300 mg/l (ppm) CaCO ₃
Incremento mínimo	0.3 mg/l [en el rango 0-30 mg/l] 3 mg/l [en el rango 0-300 mg/l]
Método de análisis	Valoración EDTA
Tamaño muestra	5 ml y 50 ml (promedio)
Nº de análisis	100 (promedio)
Dimensiones estuche	200x120x60 mm
Peso	460 g

TRASCENDENCIA Y USO

La dureza del agua se definió a través de la historia por su capacidad de precipitar jabón. Más tarde se descubrió que las especies iónicas del agua causantes de la precipitación eran principalmente calcio y magnesio. Hoy en día, por lo tanto, la dureza del agua es una medición cuantitativa de estos iones en la muestra de agua. También se sabe que otras especies de iones, como el hierro, zinc y manganeso, contribuyen a la dureza general del agua. La medición y consiguiente control de la dureza del agua es esencial para prevenir costras y atascos en las tuberías de agua. El equipo de comprobación de dureza Hanna hace que el control sea fácil, rápido y seguro. Su tamaño compacto permite la versatilidad de su uso en cualquier lugar. Su diseño facilita el manejo y permite a cualquier usuario mediciones rápidas.

REACCION QUIMICA

El nivel de dureza mg/l (ppm) de carbonato cálcico se determina por una medición EDTA (etileno-diamina-ácido tetracético). Primeramente se ajusta la solución a un pH10 con una solución buffer. El indicador crea un complejo con iones metálicos como magnesio o calcio para formar una mezcla de color rojo. Al añadir EDTA, los iones metálicos se mezclan con ella. Tras mezclarse todos los iones metálicos libres, un exceso de EDTA elimina los iones de metal mezclados con el indicador para formar una solución de color azul. Este cambio de rojo a azul es el punto final de la medición.

INSTRUCCIONES

LEA LAS INSTRUCCIONES ANTES DE UTILIZAR EL EQUIPO MIRE AL DORSO PARA VER LA ILUSTRACIÓN DEL PROCESO

Nota: Introduzca y gire la punta de pipeta en la jeringa, asegurando un ajuste hermético.

RANGO ALTO – 0 a 300mg/l de CaCO₃

- Retire la tapa del vaso de plástico pequeño. Enjuague el vaso con la muestra de agua, rellene hasta la marca de 5 ml y ponga la tapa.



- Añada 5 gotas del React. 1 por el orificio de la tapa y mezcle con cuidado girando el vaso en pequeños círculos.



- Añada 1 gota del React. 2 y mézclelo como en el punto anterior. La solución se tornará rojo-violeta.



- Tome la jeringa de medición e introduzca el émbolo completamente dentro de la jeringa. Introduzca la punta en el Reactivo 3 y tire del émbolo hasta que la parte inferior del cierre esté en la marca 0 de la jeringa.



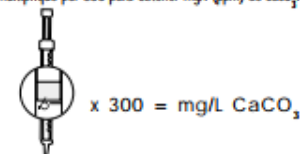
- Ponga la punta de la jeringa en el orificio del vaso de plástico y añada la solución de medición gota a gota, agitando el recipiente lentamente tras cada gota.



- Continúe añadiendo la solución de medición hasta que la mezcla se vuelva morada, entonces mezcle durante 15seg tras cada gota adicional hasta que la solución se vuelva azul.



- Lea los ml de la solución en la escala de la jeringa y multiplique por 300 para obtener mg/l (ppm) de CaCO₃.



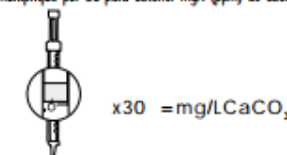
RANGO BAJO – 0 a 30 mg/l de CaCO₃

Si el resultado es menor de 30 mg/l, la precisión del análisis puede ser mejorada siguiendo estas pautas.

- Retire la tapa del vaso de plástico grande. Enjuague con la muestra de agua, llene hasta la marca de 50ml y ponga la tapa.



- Efectúe la medición igual que en caso de rango alto.
- Lea los ml. de solución de la escala de la jeringa y multiplique por 30 para obtener mg/l (ppm) de CaCO₃.



REFERENCIAS

Métodos Standard para el Examen de Agua y Agua Residual, Edición nº 16, 1985, p. 210-214.

1987 Libro anual de ASTM Standard, vol. 11.01 Agua (1), p. 212-215.

SALUD Y SEGURIDAD

Los productos químicos contenidos en este equipo de análisis pueden ser peligrosos si se usan indebidamente. Lea la Hoja Informativa de Salud y Seguridad antes de realizar el análisis.