

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**  
**UNIDAD DE INVESTIGACION**



**INFORME FINAL DE INVESTIGACIÓN**

“SÍNTESIS DE CARBONATO DE CALCIO MEDIANTE UN SISTEMA  
COMBINADO DE REACTOR DE CAVITACIÓN HIDRODINÁMICA Y  
ULTRAFILTRACIÓN A PARTIR DE AGUA DE MAR”.

JUAN TAUMATURGO MEDINA COLLANA

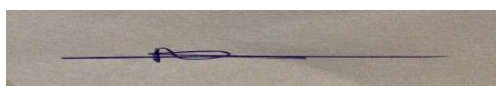
Período de ejecución: Del 01 de Octubre 2019 al 30 de Setiembre 2020

Resolución Rectoral N° 1170-2019-R

**Callao, 2020**

**PERÚ**





## DEDICATORIA

El presente trabajo investigación lo dedico a mi esposa, por la paciencia y darnos fuerza para continuar con mi labor académica y culminar este trabajo de investigación.

Así mismo a mis hijos, Jhoel y Melissa por estar siempre presentes, acompañándonos y por el apoyo moral, que me brindaron a lo largo de esta investigación.



## **AGRADECIMIENTO**

A la Universidad Nacional del Callao por el financiamiento para el desarrollo de la investigación a través del Fondo Especial de Desarrollo Universitario (FEDU).



## INDICE

<b>INDICE</b> .....	1
<b>INDICE DE FIGURAS</b> .....	4
<b>INDICE DE TABLAS</b> .....	5
<b>RESUMEN</b> .....	6
<b>ABSTRACT</b> .....	7
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	8
<b>CAPITULO I</b> .....	10
<b>PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b> .....	10
<b>1.1. Descripción de la realidad problemática</b> .....	10
<b>1.2. Formulación del Problema</b> .....	12
<b>1.2.1. Problema general</b> .....	12
<b>1.2.2. Problemas específicos</b> .....	12
<b>1.3. Objetivos</b> .....	12
<b>1.3.1. Objetivo general</b> .....	12
<b>1.3.2. Objetivos específicos</b> .....	12
<b>1.4. Limitantes de la investigación</b> .....	13
1.4.1. Teórico .....	13
1.4.2. Espacial .....	13
<b>CAPITULO II</b> .....	14
<b>MARCO TEÓRICO</b> .....	14
2.2. Marco .....	16
2.2.1. Marco teórico .....	16
2.2.2. Marco conceptual .....	25
2.3. Definición de términos .....	27
<b>CAPITULO III</b> .....	28
<b>HIPOTESIS Y VARIABLES</b> .....	28
<b>3.1. Hipótesis General</b> .....	28
<b>3.1.1. Hipótesis General</b> .....	28
<b>3.1.2. Hipótesis específica</b> .....	28



<b>3.2. Definición conceptual de variables</b> .....	29
<b>3.2.1. Variable dependiente</b> .....	29
<b>3.2.2. Variable dependiente</b> .....	29
<b>3.3. Operacionalización de las Variables</b> .....	29
<b>CAPITULO IV</b> .....	31
<b>DISEÑO METODOLOGICO</b> .....	31
<b>4.1. Tipo y diseño de la investigación</b> .....	31
<b>4.1.1. Tipo de investigación</b> .....	31
<b>4.2. Método de la investigación</b> .....	31
<b>4.2.1. Diseño factorial</b> .....	32
<b>4.3. Población y muestra</b> .....	33
<b>4.3.1. Población</b> .....	33
<b>4.3.2. Muestra</b> .....	34
<b>4.4. Lugar de estudio</b> .....	34
<b>4.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos</b> .....	34
<b>4.5.1. Descripción del experimental</b> .....	35
<b>4.5.2. Placa de orificio</b> .....	36
<b>4.5.3. Metodología</b> .....	37
<b>4.6. Análisis y procesamiento de datos</b> .....	42
<b>4.6.1. Reactivos</b> .....	42
<b>4.6.2. Método de análisis</b> .....	42
<b>4.6.3. Procesamiento de datos</b> .....	43
<b>CAPITULO V</b> .....	44
<b>RESULTADOS</b> .....	44
<b>5.1. Equipo experimental</b> .....	44
<b>5.2. Resultados del diseño experimental</b> .....	45
<b>5.3. Numero de cavitación</b> .....	46
<b>5.4. Media de la variable respuesta</b> .....	49
<b>5.5. Modelo de regresión Lineal</b> .....	51
<b>5.6. Diagrama de Pareto</b> .....	51
<b>5.7. Grafica de contornos</b> .....	53
<b>5.8. Optimización de variables</b> .....	54



<b>CAPITULO VI</b> .....	56
<b>DISCUSION DE RESULTADOS</b> .....	56
<b>6.1. Contratación y demostración de la hipótesis con los resultados</b> 56	
6.1.1. Contratación de las hipótesis con el diseño del reactor .	56
6.1.2. Contratación de la hipótesis con los parámetros . . . . .	56
6.1.3. Contratación de la hipótesis del número de cavitación . .	57
6.2. Contratación de los resultados con otros estudios similares .	57
6.3. Responsabilidad ética .....	58
<b>CONCLUSIONES</b> .....	59
<b>RECOMENDACIONES</b> .....	61
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS</b> .....	62
<b>Anexos</b> .....	64



## INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Efecto del pH sobre la solubilidad de $\text{CaCO}_3$ a $25^\circ\text{C}$ y 1 atm .	17
Figura 2 Efecto de la temperatura sobre la solubilidad de $\text{CaCO}_3$ . . . .	18
Figura 3 Esquema de un tubo Venturi . . . . .	19
Figura 4 Esquema de una tubería y placa de orificio . . . . .	20
Figura 5 Esquema de una placa de orificio . . . . .	20
Figura 6 Efecto de la presión y velocidad sobre posición del fluido . . .	22
Figura 7 Esquema de un sistema de filtración vertical . . . . .	25
Figura 8 Esquema de filtración tangencial . . . . .	26
Figura 9 Esquema de un diseño experimental . . . . .	31
Figura 10 Reactor de cavitación hidrodinámica . . . . .	36
Figura 11 Esquema de la placa de orificio . . . . .	36
Figura 12 Esquema de la placa de orificio . . . . .	39
Figura 13 Esquema de un tubo Venturi . . . . .	39
Figura 14 Tanque de dióxido de carbono . . . . .	40
Figura 15 Diagrama del diseño experimental . . . . .	41
Figura 16 Diagrama del diseño experimental . . . . .	42
Figura 17 Conductímetro . . . . .	43
Figura 18 Equipo experimental . . . . .	44
Figura 19 Efecto del flujo vs número de cavitación . . . . .	46
Figura 20 Efecto del flujo sobre velocidad del fluido en la placa de orificio . . . . .	47
Figura 21 Efecto de la presión sobre el número de cavitación . . . . .	48
Figura 22 Efecto de cavitación sobre peso de carbonato de calcio . . .	48
Figura 23 Efecto de la velocidad sobre el número de cavitación . . . . .	49
Figura 24 Efecto principal para las medias de los datos . . . . .	50
Figura 25 Influencia de los factores con respecto a la respuesta . . . . .	52
Figura 26 Contorno peso vs concentración; presión . . . . .	53
Figura 27 Contorno peso vs tiempo; presión . . . . .	53
Figura 28 Contorno peso vs tiempo; concentración . . . . .	54
Figura 29 Optimización de variables . . . . .	55





## INDICE DE TABLAS

Tabla 1:Concentración de cationes y aniones en agua de mar .....	16
Tabla 2:Operacionalización de las Variables Independientes .....	29
Tabla 3:Operacionlización de las variables dependientes.....	30
Tabla 4:Parámetros de operación y niveles en estudio .....	32
Tabla 5 :Matriz de experimentación .....	33
Tabla 6:Concentración de las sustancias en la solución modelo.....	34
Tabla 7:Características del orificio .....	37
<i>Tabla 8:Resultados del diseño experimental.....</i>	<i>45</i>
Tabla 9:Cálculo de número de cavitación .....	46



## RESUMEN

La carbonatación indirecta es una de las tecnologías típicas de captura, utilización y almacenamiento de carbono. En este estudio, investigamos la producción de partículas precipitadas de carbonato de calcio (PCC) a partir de una solución modelo utilizando un reactor de cavitación hidrodinámico. La solución se hizo circular mediante una bomba pasando por una placa de orificio para la reacción con el dióxido de carbono para producir precipitado de carbonato. Para evaluar los efectos de las variables de operación del reactor se efectuó un diseño factorial de tres variables a 2 niveles como la presión de alimentación, concentración de la solución electrolítica y el tiempo de reacción frente a la cantidad de carbonato de calcio producido y caída de presión en la placa de orificio manteniendo constante el caudal de CO<sub>2</sub>. Los resultados experimentales indican que la placa de orificio tuvo un fuerte efecto sobre la caída de presión como consecuencia la formación de carbonato de calcio. Los resultados más adecuados obtenidos de los parámetros e operación son la presión de alimentación de 60 Psi, concentración de 30 g/L y tiempo de reacción de 40 min. alcanzado un peso de 4,4g de carbonato de calcio.

Keywords: Carbonatación, carbonato de calcio, placa de orificio, reactor de cavitación hidrodinámico



## ABSTRACT

Indirect carbonation is one of the typical carbon capture, utilization and storage technologies. In this study, we investigated the production of precipitated calcium carbonate (PCC) particles from a model solution using a hydrodynamic cavitation reactor. The solution was circulated by pump passing through an orifice plate for reaction with carbon dioxide with the solution to produce carbonate precipitate. To evaluate the effects of the operating variables of the reactor, a factorial design of three variables was carried out at 2 levels such as the feed pressure, concentration of the electrolyte solution and the reaction time against the amount of calcium carbonate produced and the drop in pressure in the orifice plate keeping the CO<sub>2</sub> flow constant. The experimental results indicate that the orifice plate had a strong effect on the pressure drop as a consequence of the formation of calcium carbonate. The most suitable results obtained from the operating parameters are the feed pressure of 60 Psi, concentration of 30 g / L, and reaction time of 40 min. reached a weight of 4.5 g of calcium carbonate

Keywords: Carbonation, calcium carbonate, orifice plate, hydrodynamic cavitation reactor



## INTRODUCCIÓN

Encontrar soluciones para minimizar los niveles de dióxido de carbono, en la atmósfera, ha llevado esfuerzos extensos de investigación en el desarrollo de tecnologías para capturar CO<sub>2</sub> de fuentes concentradas como plantas de energía de combustión de combustibles fósiles, plantas de cemento y refinerías. Sin embargo, estas fuentes son responsables de solo aproximadamente la mitad de todas las emisiones de dióxido de carbono, la otra mitad puede atribuirse a la industria del transporte. En el medio ambiente, el CO<sub>2</sub> está en equilibrio constante con el océano, como el dióxido de carbono aumenta en la atmósfera, los océanos del mundo absorben más y más CO<sub>2</sub> como ácido carbónico. El ácido carbónico está en equilibrio con especies de carbonato y bicarbonato que son principalmente responsable de amortiguar y mantener el pH de los océanos. La carbonatación indirecta es una técnica de almacenamiento de sales en forma de sólidos de carbonato insolubles, que son termodinámicamente estables, al reaccionar con iones Ca o Mg formando CaCO<sub>3</sub> y el MgCO<sub>3</sub> que pueden ser utilizado en la industria de cemento, cerámica etc. La cavitación es la formación de microburbujas debido a una caída repentina en presión dentro del agua y la enorme liberación de energía debido al colapso violento de estas burbujas. en el presente trabajo una solución electrolítica preparada semejante a agua de mar en concentraciones de iones calcio ingresa a un venturímetro y placa de



orificio propiciando un cambio sustancial de presión, el líquido experimenta una caída de presión provocando colapso en las cavidades formadas, dando lugar a la formación de carbonato de calcio.

Para su evaluación de la síntesis de carbonato de calcio, se va a construir un reactor de cavitación hidrodinámica y mediante un diseño factorial se evaluarán los parámetros de operación del reactor



## CAPITULO I

### PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

#### 1.1. Descripción de la realidad problemática

A medida que se agotan los recursos de agua dulce y la demanda de agua potable aumenta a nivel mundial tecnologías como la desalinización del agua de mar se empleará cada vez más para producir agua potable , resultando en la eliminación de volúmenes de salmuera de mayor concentración a menudo se disponen en cuerpos de agua superficiales donde representan una amenaza para la vida marina, debido al aumento de la salinidad y la reducción de niveles de oxígeno disuelto, como tal, el tratamiento de desechos concentrados de salmuera antes de desecharlos en agua los cuerpos son una necesidad ambiental apremiante.

La utilización de CO<sub>2</sub> puede usarse para mitigar el impacto de la eliminación de la salmuera concentrada en cuerpos de agua. Al reaccionar CO<sub>2</sub> con los cationes en salmuera, es posible hacer carbonatos que puede usarse como agregados de construcción o materia prima para productos químicos industriales.



La salmuera producida como subproducto de las plantas de desalinización de agua de mar es un fuente prometedora de Ca y Mg necesaria para la mineralización de  $\text{CO}_2$ .

como la concentración de Ca y Mg en salmuera es el doble que en agua de mar además, el Ca y el Mg ya existen como iones en la salmuera, lo que significa que los ácidos no se requieren para extraer o ionizar estos metales de la salmuera (a diferencia de las fuentes sólidas) y la posterior neutralización del pH de ácidos no se requieren condiciones antes de la producción de  $\text{CO}_3^{2-}$ .

La cavitación hidrodinámica es producida por los cambios en la presión del flujo de líquidos en una tubería equipado con placa de orificio o Venturi. Un líquido experimenta una repentina caída de presión que resulta en el colapso de cavidades formadas. El colapso de las cavidades genera radicales altamente reactivos, que son responsables de reacciones químicas. La generación de cavidades en un reactor hidrodinámico es dependiente del diseño y la geometría de los reactores.

La síntesis de carbonato de calcio mediante el proceso de cavitación hidrodinámica, en donde se burbujea gas  $\text{CO}_2$  a través de una solución de agua de mar será investigada y la solución obtenida será purificada mediante un sistema de ultrafiltración.



## **1.2. Formulación del Problema**

Efectuar un estudio experimental responderá a las siguientes interrogantes:

### **1.2.1. Problema general**

¿Cómo se efectuará la síntesis de carbonato de calcio mediante un sistema combinado de reactor de cavitación hidrodinámica y filtración a partir de agua de mar?

### **1.2.2. Problemas específicos**

1. ¿El diseño efectuado del reactor de cavitación hidrodinámico permite la síntesis de carbonato de calcio a partir de una solución electrolítica?
2. ¿Cuáles serán los factores y niveles de operación de la del reactor de cavitación hidrodinámica para la formación del carbonato de calcio ?
3. ¿ qué influencia existe en el número de cavitación con respecto a la formación del carbonato de carbonato de calcio

## **1.3. Objetivos**

### **1.3.1. Objetivo general**

Sintetizar carbonato de calcio mediante un sistema combinado de reactor de cavitación hidrodinámica y ultrafiltración a partir de agua de mar

### **1.3.2. Objetivos específicos**





1. Diseñar el reactor de cavitación hidrodinámico para la síntesis de carbonato de calcio a partir de una solución electrolítica
2. Evaluar la influencia de los factores de operación de la del reactor de cavitación hidrodinámica en la formación de carbonato de calcio.
3. Evaluar la influencia del número de cavitación con respecto a la formación del carbonato de carbonato de calcio

#### **1.4. Limitantes de la investigación**

##### 1.4.1. Teórico

Se hará uso del balance de energía usando la ecuación de Bernoulli y a partir de ella se evaluará el número e cavitación hidrodinámica.

##### 1.4.2. Espacial

El trabajo está limitado a la precipitación química únicamente de iones calcio de una solución electrolítica modelo semejante en concentración de calcio del agua de mar. Para la formación de carbonato de calcio, se utilizará una placa de orificio con un solo agujero.



## **CAPITULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### 2.1. Antecedentes internacionales

Mahmut (2019) afirma; los parámetros utilizados en el proceso de obtención de nano partículas  $\text{CaCO}_3$  es la temperatura de la reacción es de  $40^\circ\text{C}$ , flujo de  $\text{CO}_2$  de 0,138 litros/minutos. En este artículo se hizo reaccionar los iones  $\text{Ca}^{+2}$  con el  $\text{CO}_2$  para formar nano partículas de  $\text{CaCO}_3$ , esta reacción se llevó a cabo en tubo de Venturi. La velocidad de agitación es de 300 rpm y durante un tiempo de 1 hora. El diseño del equipo contiene siete operaciones las cuales son las siguientes: tanque de solución de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  , un agitador mecánico con recubrimiento, bomba para circulación del líquido, tubo de Venturi, tubo de  $\text{CO}_2$ , medidor de flujo de  $\text{CO}_2$ .

Miran Yoo (2013) afirma, que para el diseño del equipo de obtención de  $\text{CaCO}_3$  se diseñó lo siguiente un tanque de 5 litros de volumen, una bomba de 280 rpm y 0.5 HP de potencia. Para el presente artículo se utilizó tres diámetros de orificio diferentes de 2, 3 y 4 mm y una placa de orificio de 5 orificios de 1mm de diámetro para la cavitación, además se trabajó con un porcentaje de



suspensión del 2, 4 y 6 % de  $\text{Ca(OH)}_2$  y un flujo de  $\text{CO}_2$  de 3, 5 y 7 litros/minuto.

Pía Llpp ( 1997 ) en su trabajo de investigación sobre el tratamiento de las aguas superficiales de los depósitos cacareos, investigó una nueva combinación de filtración de piedra caliza y ultrafiltración (UF) en experimentos piloto. Resultados en la eficiencia de eliminación de partículas de carbonato de calcio y manganeso y se discuten la dependencia específica del flujo de permeado en el procedimiento de retro lavado, se presenta el concepto a gran escala de un nuevo trabajo de agua basado en los experimentos piloto.

Junhyeok Jeona(2019) en su estudio utilizó polvo de horno de cemento (CKD), que es un subproducto industrial alcalino, junto con agua de mar. En este trabajo, lograron el almacenamiento de  $\text{CO}_2$  y el rendimiento de  $\text{CaCO}_3$  a pesar del uso de agua de mar. . El  $\text{CO}_2$  almacenamiento y rendimiento de  $\text{CaCO}_3$  fueron 185 kg- $\text{CO}_2$  / ton-CKD y 419 kg- $\text{CaCO}_3$  / ton-CKD, respectivamente. Con la adición de Mg en el agua de mar, además, las cantidades podrían aumentar significativamente para llegar a 271 kg- $\text{CO}_2$  / ton-CKD y 615 kg- $\text{CaCO}_3$  / ton-CKD, respectivamente. A pesar de usar CKD y agua de mar que contiene muchas impurezas, la pureza de el  $\text{CaCO}_3$  producido fue tan alto como el 99,4%. El flujo



de CO<sub>2</sub> y la dosis de NaOH tuvieron poco efectos poco significativos en la eficiencia de carbonatación

## 2.2. Marco

### 2.2.1. Marco teórico

#### 1. Composición química del agua de mar

Las sales disueltas en el agua de mar, se encuentran principalmente en forma de iones. En la tabla 1 se presenta las concentraciones de los principales iones.

**Tabla 1**

*Concentración de Cationes y Aniones en Agua de Mar*

Espece iónica	Concentración (ppm)
$Na^{1+}$	10 550
$Ca^{2+}$	400
$Mg^{2+}$	1270
$K^{1+}$	300
$Ba^{2+}$	0,5
$Cl^{1-}$	12 500
$SO_4^{2-}$	1200
$CO_3^{2-}$	800
$(HCO_3)^{2-}$	650

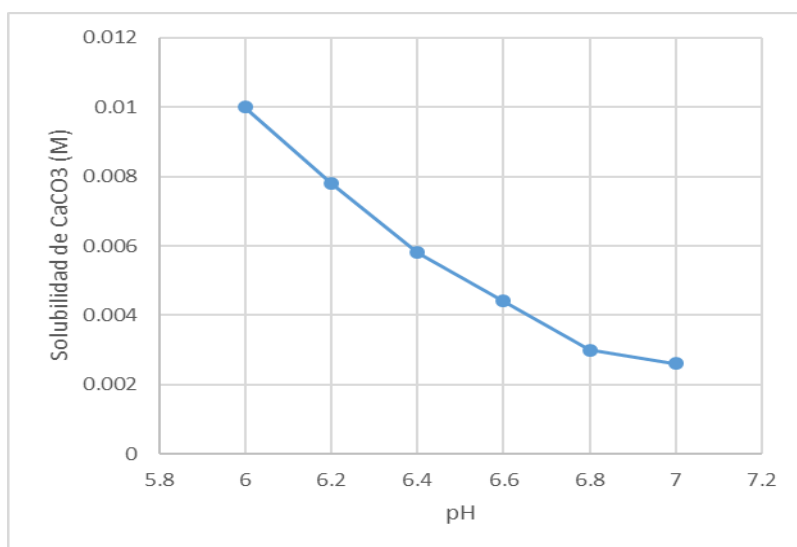


## 2. Propiedades físicas y químicas del carbonato de calcio

El carbonato de calcio es un polvo blanco, cristales incoloros, prácticamente insoluble en agua. En la figura 1 se muestra la relación entre la solubilidad de  $\text{CaCO}_3$  y el pH en solución acuosa reportado por (Nakayama, 1968) a un valor de temperatura de  $25^\circ\text{C}$  y presión de 1 bar. El pH de la solución acuosa es de gran importancia ya que los valores más bajos de pH ( $P_{\text{CO}_2}$  alto) modifican la cantidad de especies presentes en la solución acuosa (aumentando la cantidad de  $\text{HCO}_3^{1-}$  y  $\text{CO}_3^{2-}$ , causando que la solubilidad del carbonato de calcio se incremente. Como puede verse en la figura 1, a medida que el pH cae de alrededor de 6, la solubilidad de las sal en el agua aumenta.

Figura 1

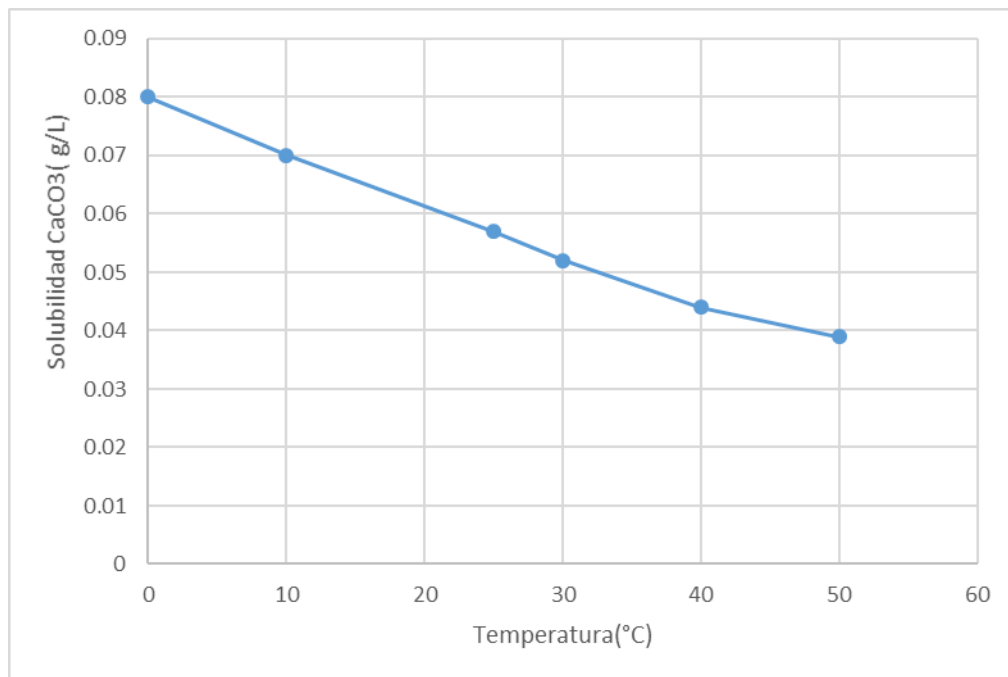
*Efecto del pH sobre la solubilidad de  $\text{CaCO}_3$  a  $25^\circ\text{C}$  y 1 atm*



En la figura 2 se observa la solubilidad del carbonato de calcio en función de la temperatura. Como puede verse, a medida que la temperatura aumenta disminuye, la solubilidad de la sal.

*Figura 2*

*Efecto de la temperatura sobre la solubilidad de CaCO<sub>3</sub>*



### 3. Tubo de Venturi

El tubo Venturi es un dispositivo que origina una pérdida de presión al pasar por una restricción de tubería. Consiste de dos secciones cónicas denominado como convergente y otra en la vena contracta, o garganta.

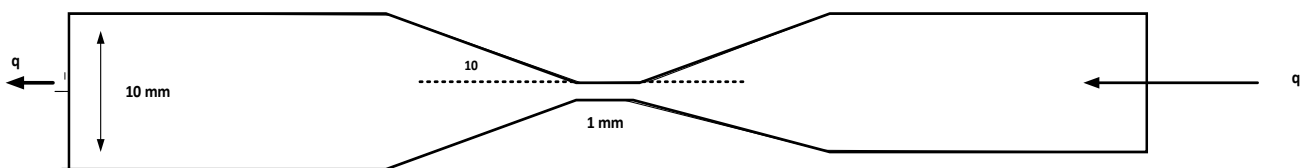
cuando un tubo Venturi es insertado a lo largo de una tubería, el diámetro de la tubería se reducirá primero a lo largo la dirección del flujo para crear una restricción de flujo y luego ensanchar de nuevo al diámetro original.



basado en la ecuación de Bernoulli, asumiendo que el fluido fluye a través una restricción de tubería en condiciones de estado estacionario, una relación puede ser establecido entre el caudal y la presión diferencial a través de la restricción, haciendo posible calcular el caudal

**Figura 3**

*Esquema de un tubo Venturi*



a partir de la ecuación de Bernoulli, se obtiene la siguiente ecuación que permite evaluar el flujo volumétrico.

En la figura 3 se observa que el diámetro de la tubería es de 10 mm y el diámetro de la garganta 1 mm.

$$Q = C_v A_2 \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho_{h2O} \left(1 - \left(\frac{A_2^2}{A_1^2}\right)\right)}}$$

Donde; P1 es la presión de corriente de entrada al tubo Venturi ( Pa ) ; P2 es la presión en la contracción (Pa) ; ρ es la densidad de agua (kg/m<sup>3</sup>), A1 es el área de la tubería y A2 área de la garganta y Q flujo volumétrico.

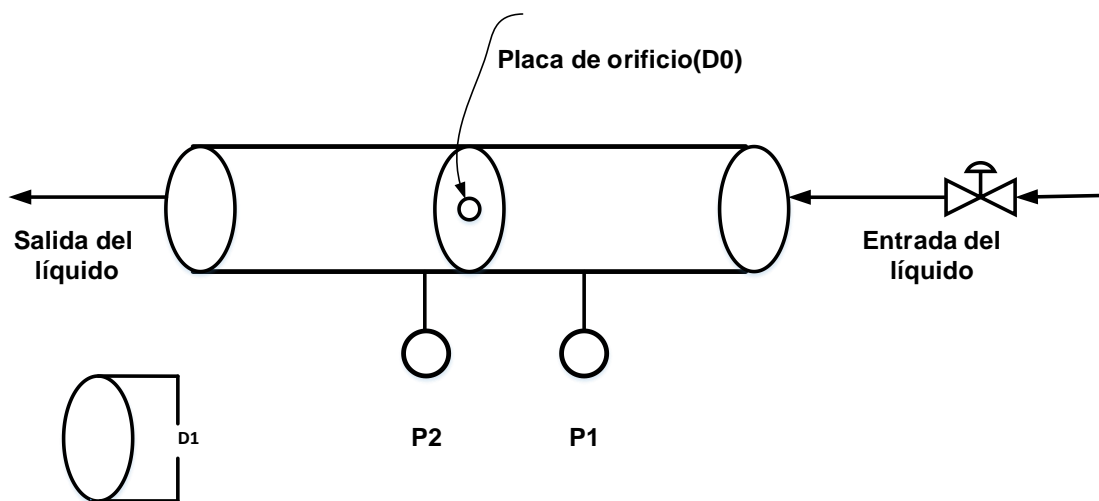
#### 4. Placa de orificio



Consiste en una placa plana con una perforación generalmente concéntrica a la tubería. La placa se instala en forma perpendicular a la dirección del flujo. Las líneas del flujo alcanzan una sección transversal mínima -vena contracta que es una relación de diámetros orificio / tubería. La toma de presión de la placa deberá estar próxima a la vena contracta para asegurar una diferencia máxima de caída de presión.

**Figura 4**

*Esquema de una tubería y placa de orificio*



**Figura 5**

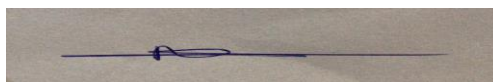
*Esquema de una placa de orificio*





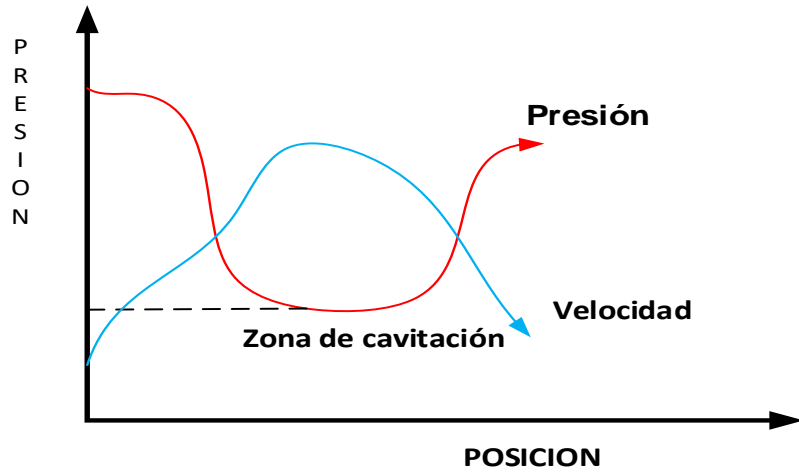
## 5. Cavitación

La cavitación es un fenómeno general de mecánica de fluidos que puede ocurrir cada vez que se usa un líquido en una máquina, lo que induce fluctuaciones de presión y velocidad en el fluido como se indica en la figura 6. Cuando el fluido experimenta una presión crítica (es decir, más baja que el vapor), comienza la formación de cavidades y el tamaño máximo de las cavidades se alcanzan típicamente bajo expansión isotérmica. Cuando se recupera una presión más alta, las burbujas sufren un colapso adiabático. Tal colapso conduce a la formación de ondas de presión y micro-chorros. Que liberan instantáneamente una gran cantidad de energía mientras generan una intensa tensión normales y de cizallamiento además, los picos de alta temperatura promueven reacciones químicas, como la disociación de las moléculas de agua en en radicales OH.



**Figura 6**

Efecto de la presión y velocidad sobre posición del fluido



Generalmente, esta baja presión es la consecuencia de un aumento en la velocidad del flujo, como lo muestra la ecuación de Bernoulli quien, según su expresión más simple, supone un fluido perfecto, flujo estacionario, y en ausencia de transferencia de calor, se escribe mediante la ecuación

$$\frac{v^2}{2g} + z + \frac{P}{\rho g} = \text{constante}$$

$\frac{v^2}{2g}$  : Energía cinética

$z$  : Energía potencial

$\frac{P}{\rho g}$  : Energía interna



## 6. Numero de cavitación

Representa la intensidad de la cavitación está definido mediante la ecuación

$$C_v = \sigma_0 = \frac{(P_2 - P_v)}{(0,5\rho v_0^2)}$$

Donde  $C_v$  es el número de cavitación;  $P_2$  es la presión de corriente de salida del líquido ( Pa ) ;  $P_v$  es la presión de vapor del agua (Pa) ;  $\rho$  es la densidad de agua ( $\text{kg/m}^3$ ),  $V_0$  es la velocidad del líquido a través del orificio.

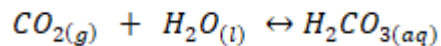
La eficiencia de la cavitación hidrodinámica está influenciada por varios factores como el diseño del dispositivo de cavitación, condiciones de proceso y características del fluido. La intensidad de la cavitación es dependiente con el número de cavitación y está altamente influenciado por la configuración del dispositivo de cavitación como número, diámetro de agujeros, geometría y presión aguas arriba (Balasundaram y Harrison, 2006; Pawar, 2017; Simpson y Ranade, 2018)

## 7. Química de formación de carbonato de calcio

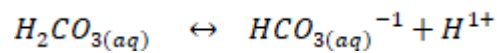
Las reacciones inorgánicas para la formación del carbonato de calcio se presentan en cuatro etapas.

Etapas 1, la primera etapa el gas dióxido carbono reacciona con el agua formando ácido carbónico como se indica en la siguiente ecuación.

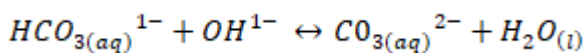
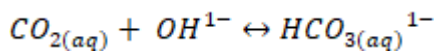




Etapa 2 el ácido se disocia en ion bicarbonato con la liberación de iones hidronio.

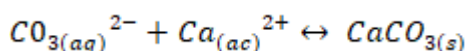


Etapa 3, el dióxido de carbono acuoso reacciona con los iones oxidrilos ( $OH^{1-}$ ) para generar ion bicarbonato  $HCO_3^{1-}$  y ion carbonato  $CO_3^{2-}$  como se expresa en las ecuaciones siguientes



Las ecuaciones anteriores son reacciones reversibles con velocidades de reacción muy rápidas en un rango de pH alto (Fleischer et al., 1996). La Reacción se lleva a cabo inmediatamente después de la formación de bicarbonato (Guo et al., 2011). El  $CO_2$  acuoso no existe en la solución durante la reacción, después de su formación se reacciona inmediatamente con OH. Una vez que se genera  $CO_2$  acuoso en la solución, se consume instantáneamente a través de las reacciones (Fleischer et al., 1996).

Etapa 4, La última etapa el ion carbonato reacciona con los iones calcio, para formar precipitados de carbonato de calcio.



## 2.2.2. Marco conceptual

### 1. Reactores de cavitación hidrodinámica

Los reactores de cavitación encuentran una aplicación generalizada en las áreas de procesamiento químico, tratamiento de aguas y efluentes, biotecnología, química de polímeros, extracción sólido-líquido, cristalización y las industrias del petróleo y textil ( Lekhraj, 2010 ).

### 2. Filtración

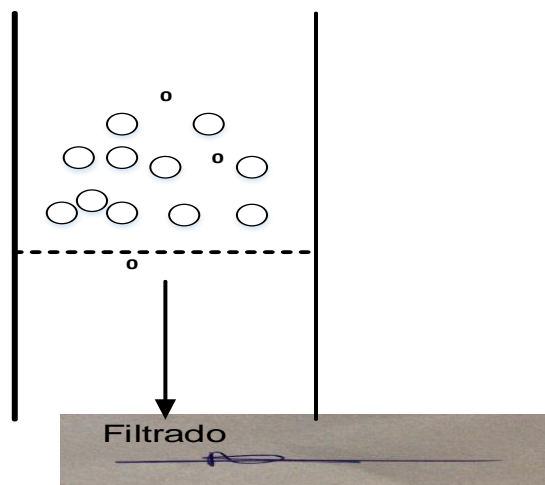
La filtración consiste en la separación de un sólido de un fluido por acción de un medio filtrante y un gradiente de presión. En la figura siguiente se muestra dos regímenes operativos utilizados en la filtración.

### 3. Filtración vertical

El flujo se dirige hacia el medio filtrante en forma vertical , depositando sólidos en el medio formando una torta de filtración.

### **Figura 7**

*Esquema de un sistema de filtración vertical*

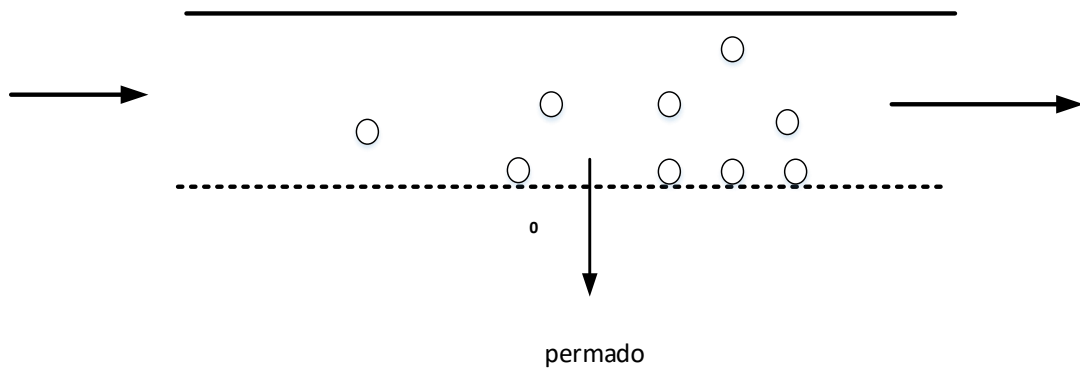


## 2. Filtración tangencial

Flujo cruzado, el flujo se dirige a través del medio filtrante. En este régimen, se forma una torta de filtración, generalmente se limpia con el cizallamiento del fluido.

### **Figura 8**

*Esquema de filtración tangencial*



### 2.3. Definición de términos

#### 1. Agua de mar

El agua de mar, en promedio, en el mundo tiene una salinidad de aproximadamente 3,5% (35 g /L, 599 mM). El agua de mar tiene aproximadamente 35 g de sales disueltas en un litro de agua, predominantemente iones sodio ( $\text{Na}^{+1}$ ) y cloruro ( $\text{Cl}^{-1}$ )

#### 2. Desalinización

La desalinización es el proceso por medio del cual se separan las sales disueltas en el agua de mar.

#### 3. Hidrodinámica

Estudia el comportamiento del movimiento de los fluidos; se fundamenta principalmente en los fluidos incompresibles de los líquidos.

#### 4. Dióxido de carbono

Se libera por la combustión de hidrocarburos y descomposición de materia orgánica. Puede ser almacenado en cilindros, en tanques cuando está licuado o en estado sólido (hielo seco).

#### 5. Diseño experimentos:

Es una técnica que permite identificar y cuantificar las causas de un efecto dentro de un estudio experimental



## **CAPITULO III**

### **HIPOTESIS Y VARIABLES**

#### **3.1. Hipótesis General**

##### **3.1.1. Hipótesis General**

Con la evaluación de los factores de operación del sistema combinado de reactor de cavitación hidrodinámica y ultrafiltración, obtendremos carbonato de calcio a partir de agua de mar

##### **3.1.2. Hipótesis específica**

1. Al diseñar el reactor de cavitación hidrodinámico en forma adecuada para la síntesis de carbonato de calcio a partir de una solución electrolítica se logrará la síntesis de carbonato de calcio.
2. Al seleccionar en forma adecuada los parámetros de operación (presión de alimentación a la placa de orificio, concentración de alimentación y tiempo de operación ) del sistema combinado de reactor de cavitación hidrodinámica y filtración se logrará





alcanzar la síntesis de carbonato de calcio.

3. Al obtener el número de cavitación en la placa de orificio nos permitirá evaluar su influencia respecto a la formación del carbonato de calcio

### 3.2. Definición conceptual de variables

#### 3.2.1. Variable dependiente

Factores de operación del reactor de cavitación hidrodinámica

1. Presión de alimentación :  $X_1$
2. Concentración del agua de mar :  $X_2$
3. Tiempo de operación :  $X_3$

#### 3.2.2. Variable dependiente

Es la respuesta obtenida al variar las variables dependientes

Peso de carbonato de calcio :  $y$

### 3.3. Operacionalización de las Variables

**Tabla 2**

*Operacionalización de las Variables Independientes*

N°	Variable Independiente	Dimensión	Indicadores	Instrumento
1	Presión de alimentación	Presión en la entrada y salida	Lectura en psi	manómetro
2	Concentración	Conductividad y ppm	ms/cm	conductímetros
3	Tiempo	Tiempo de operación	min.	cronometro



**Tabla 3**

*Operacionalización de las Variables Dependientes*

Variable dependiente	Dimensión	Indicadores	Instrumento
Peso de carbonato de calcio	Valor obtenido	gramos	Balanza



## CAPITULO IV

### DISEÑO METODOLOGICO

#### 4.1. Tipo y diseño de la investigación

##### 4.1.1. Tipo de investigación

De acuerdo al propósito de la investigación, la naturaleza de los problemas y objetivos formulados es una investigación experimental, se evalúa la influencia de los factores sobre la formación de carbonato de calcio, es una investigación causa – efecto

#### 4.2. Método de la investigación

El diseño de investigación es de tipo causa efecto, es investigar la influencia de ellos factores como la presión de operación, concentración de alimentación y tiempo de operación con respecto peso de carbonato de calcio formado.

X1. Presión de alimentación (psi)

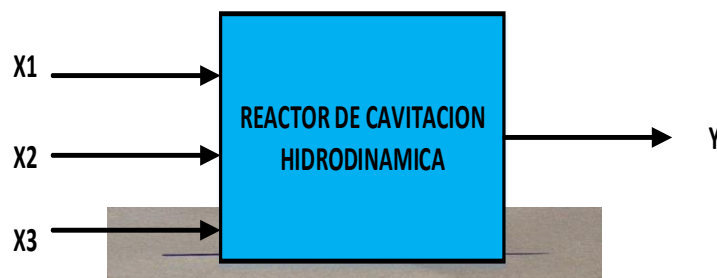
X2: concentración de alimentación( g/L)

X3 : Tiempo (min)

Y: peso de carbonato de calcio(mg)

#### **Figura 9**

*Esquema de un diseño experimental*



#### 4.2.1. Diseño factorial

El diseño factorial como un método eficiente que requiere un número mínimo de experimentos se usó para diseñar los experimentos.

En la tabla 3, se indica los factores y niveles en estudio, el diseño experimental utilizado es con tres factores y a dos niveles. En la tabla 4 se indica la matriz de experimentos. el número de experimentos se calcula de acuerdo con la ecuación

$$N = 2^k$$

Donde N, representan el número de experimentos, k variables independientes y 2 niveles de experimentación. En este estudio, se realizaron 8 experimentos

**Tabla 4**

*Parámetros de Operación y Niveles en Estudio*

Variable independiente	Unidad	Notación	Niveles	
			-1	1
Presión de entrada	Psi	X <sub>1</sub>	40	60
Concentración	g/L	X <sub>2</sub>	25	35
Tiempo	min.	X <sub>3</sub>	20	40

En la tabla 5, se indica la matriz de la experimentación con sus respectivos niveles.



**Tabla 5***Matriz de Experimentación*

N°	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	Presión de entrada(psi)	Concentración (g/L)	Tiempo (min)
1	-	-	-	20	25	20
2	+	-	-	40	25	20
3	-	+	-	20	35	20
4	+	+	-	40	35	20
5	-	-	+	20	25	40
6	+	-	+	40	25	40
7	-	+	+	20	35	40
8	+	+	+	40	35	40

#### 4.3. Población y muestra

##### 4.3.1. Población

Se ha preparado 25 litros de solución sintética para cada tipo de muestra cuyas características químicas son semejantes al agua de mar. Las sustancias y concentración se muestran en la tabla 6



**Tabla 6**

*Concentración de las Sustancias en la Solución Modelo*

Muestra	Sustancia ( g/L)		
	NaCl	CaCl <sub>2</sub>	Concentración
I	20	5	25
II	28	8	36

**4.3.2. Muestra**

La muestra utilizada para cada experiencia fue de 3 litros , el volumen de experimentación está en función de la capacidad del reactor de cavitación hidrodinámico

**4.4. Lugar de estudio**

Universidad Nacional del Callao, Laboratorio de operaciones y procesos unitarios

**4.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos**

Se determinó la conductividad de la solución modelo haciendo uso de un conductímetro de tipo ADWA AD 330 cuyo rango es de ( 0-200ms/cm).La concentración de iones calcio, se analizó mediante titulación volumétrica con EDTA. El carbonato de calcio obtenido es filtrado y secado a 110 °C y pesado



#### 4.5.1. Descripción del experimental

Para la síntesis de carbonato de calcio se ha construido un reactor con cavitación hidrodinámica como se indica en la figura 7 y contiene los siguientes elementos:

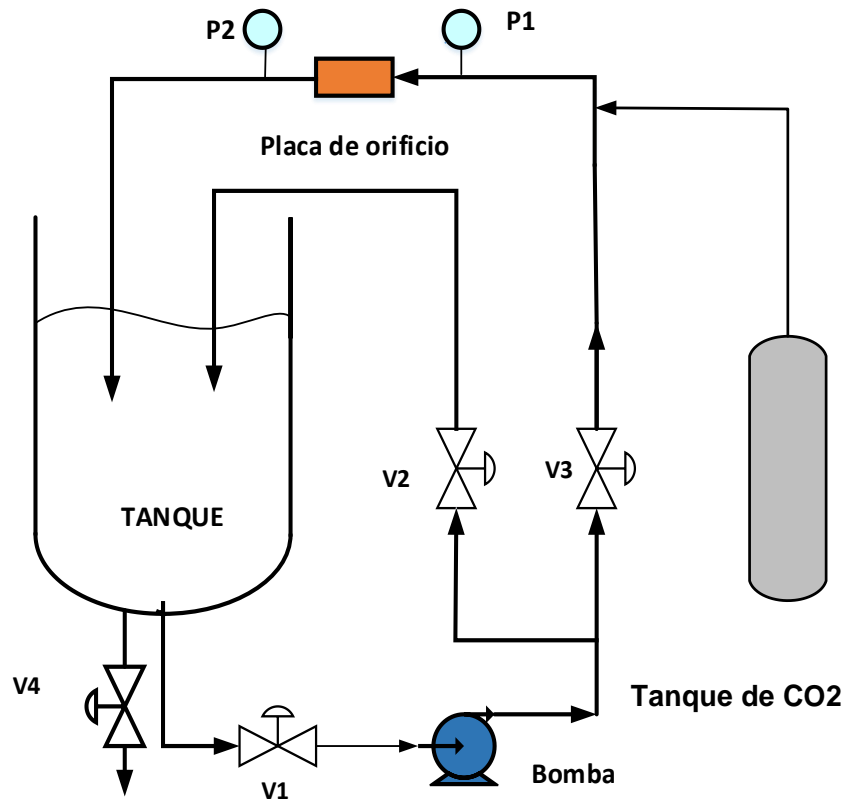
Un reactor cilíndrico de 0,15 m de diámetro por 0,3 m de altura, con una capacidad aproximada de 5,35 L, fabricado con material acrílico., una bomba centrífuga de 0,5 kW que permite la circulación del fluido del circuito cerrado, válvulas de control de flujo (V1, V2, V3), bridas para acomodar la placa de orificio, una línea principal y una línea de derivación. Las válvulas manuales de control (V1, V2, V3) se proporcionan en los lugares apropiados para controlar el flujo y la presión a través de la tubería principal. La válvula V4 es usada para la descarga de la solución de carbonato de calcio producida y lavado del tanque. Un tanque de acero inoxidable con contenido de dióxido de carbono que se alimenta cerca a la placa de orificio a través de un tubo venturi. Una placa de orificio de material de acero inoxidable con un diámetro de orificio de 1,3 mm cuyas características se observan en la Tabla 1.

Dos manómetros digitales de rango ( 0 a 100 psi ) con caja de acero inoxidable, que permite la medición de la presión de entrada y salida de la solución . Un tubo Venturi de material de plástico con entrada y salida de 0,5 pulgadas de diámetro que permite la alimentación del dióxido de carbono.



**Figura 10**

*Reactor de cavitación hidrodinámica*



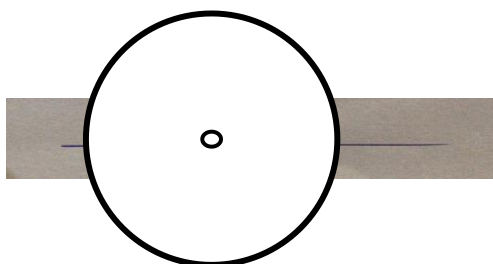
:

#### **4.5.2. Placa de orificio**

La placa de orificio está fabricada de acero inoxidable 316. El diámetro es de 1,3 mm, la disposición del agujero en la placa se muestra en la Figura 11 y las características en la tabla 7.

**Figura 11**

*Esquema de la placa de orificio*





**Tabla 7**

*Características del Orificio*

N° de orificios	Forma	Diámetro orificio	Área
1	Circular	1,3 mm	1,327mm <sup>2</sup>

**4.5.3. Metodología**

En esta investigación, la solución modelo fue preparada usando sales de cloruro de sodio y cloruro de calcio químicamente puros disueltos en agua desionizada cuyas soluciones experimentales fueron de concentraciones semejantes al agua de mar, para cada experiencia se ha preparado 3 litros de solución electrolítica.

El flujo del gas de dióxido de carbono de 99,9% se mantuvo constante en todas las experiencias, fue regulado con una válvula incorporada al tanque de dióxido de carbono cuya lectura fue directa mediante un rotámetro y ajustado todas las experiencias a 2 L/ min. El pH de la



solución fue ajustado a 10 adicionando hidróxido sodio de una concentración de 0,5 N a la solución modelo.

La conductividad de la mezcla fue monitoreada a intervalos de 5 min durante toda la experimentación.

La suspensión obtenida de carbonato de calcio fue filtrada después de cada experiencia mediante un papel filtro y luego fue secado mediante una estufa da 105 °C hasta obtener un peso constante. en cada experiencia.

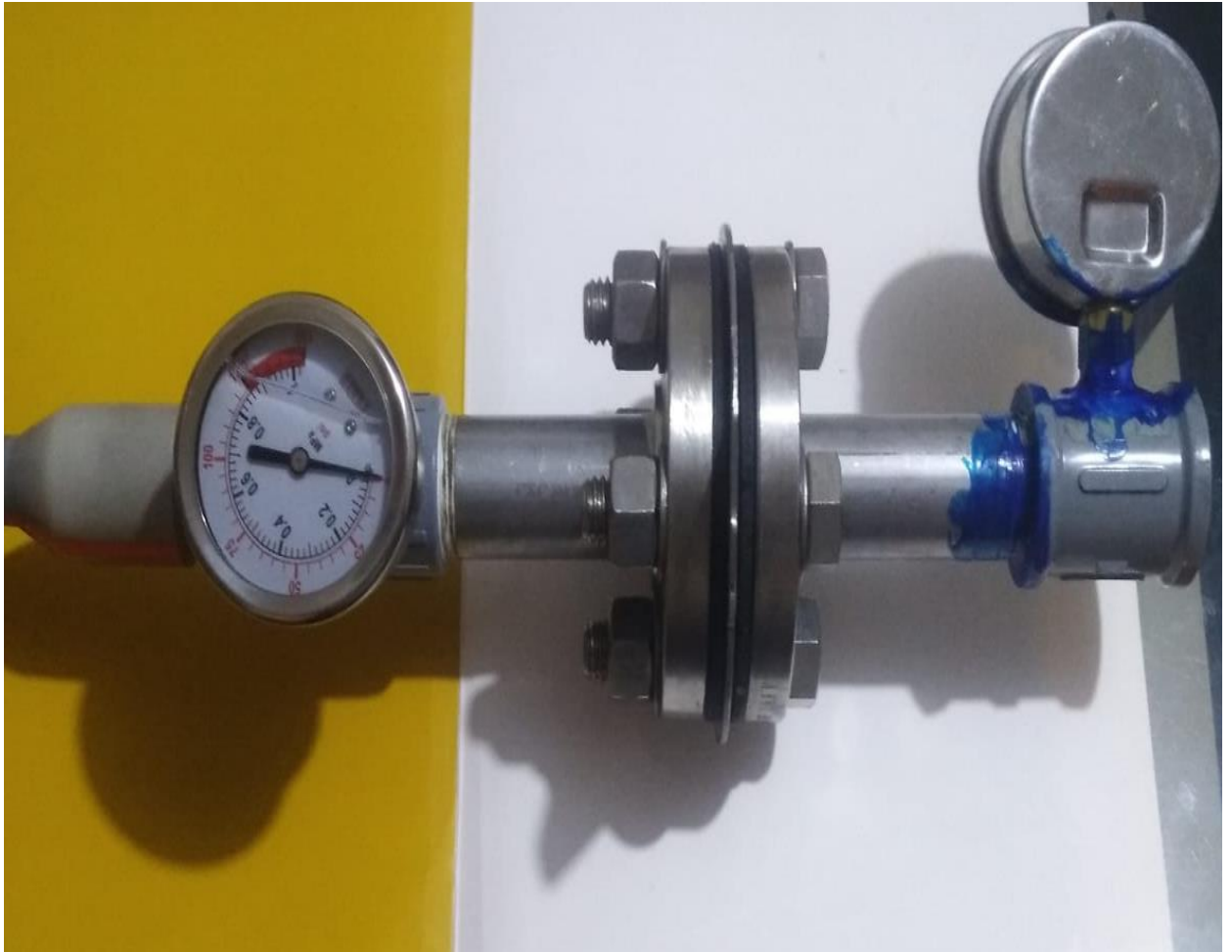
El pH, temperatura de reacción, y sólidos totales disuelto (TDS) de la mezcla fue monitoreado en función del tiempo.

En la figura 12 se muestra el diagrama de la instalación de la placa de orificio incorporado sus dos manómetros para monitorear la presión de entrada y salida de la solución electrolítica al equipo experimental construido a nivel de laboratorio.



**Figura 12**

*Esquema de la placa de orificio*



*Figura 13*

*Esquema de un tubo Venturi*



**Figura 14**

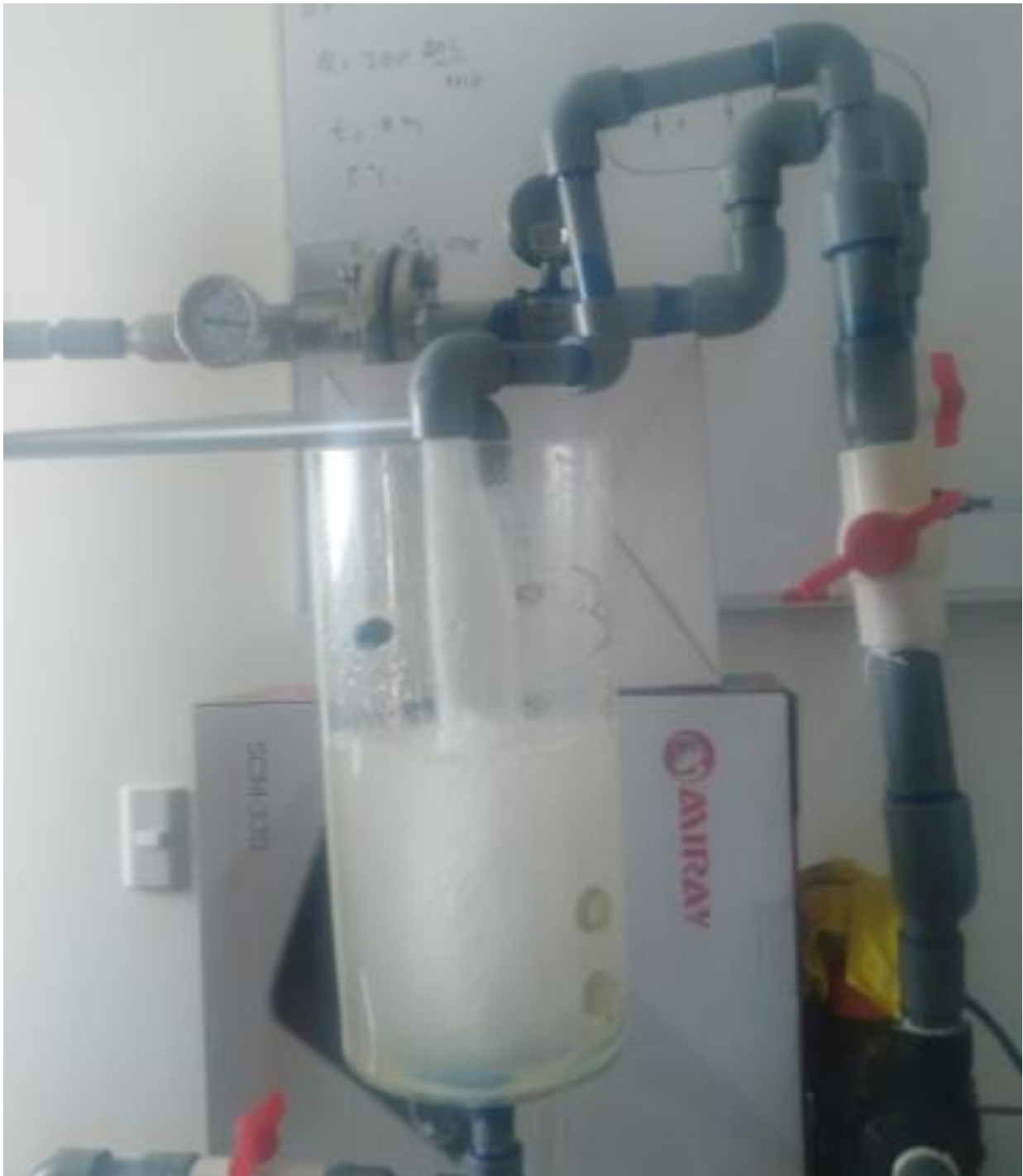
*Tanque de dióxido de carbono*



— 15 —

**Figura 15**

*Diagrama del diseño experimental*



A horizontal line with a handwritten signature or mark in the center.

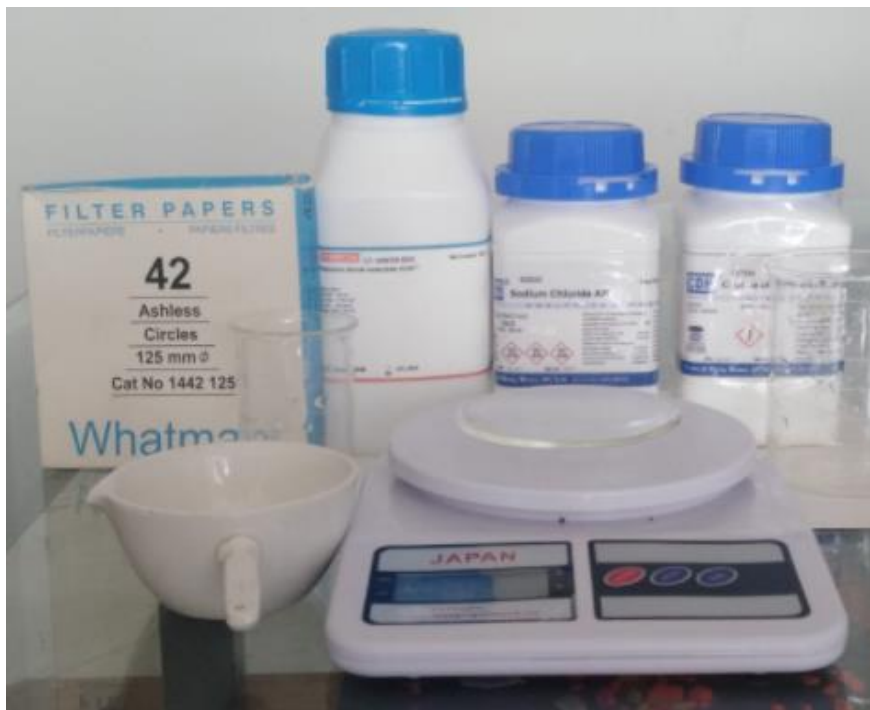
#### 4.6. Análisis y procesamiento de datos

##### 4.6.1. Reactivos

Para la preparación de las soluciones sintéticas se utilizaron reactivos químicos puros de cloruro de sodio y cloruro de calcio e hidróxido e sodio, como se muestra en la siguiente figura.

**Figura 16**

*Diagrama del diseño experimental*



##### 4.6.2. Método de análisis

La síntesis de carbonato de calcio se hizo un seguimiento a través de las variables independientes de la presión con un par de manómetros, y el tiempo usando un cronometro y se midió la



conductividad a través de un conductímetro, la temperatura promedio de la experimentación fue 25 °C puesto que se incrementa en el tiempo de reacción. En la figura 15 se muestra el conductímetro usado en la experimentación.

**Figura 17**  
*Conductímetro*



#### **4.6.3. Procesamiento de datos**

Para el procesamiento de los datos obtenidos, se usó el software minitab de la parte de diseño experimental, se obtuvo gráficas y regresión lineal del comportamiento de las variables, se efectuó graficas usando Excell

## CAPITULO V

### RESULTADOS

#### 5.1. Equipo experimental

En la figura se muestra el equipo experimental construido que consiste una placa de orificio, que permite la cavitación hidrodinámica,

#### **Figura 18**

*Equipo experimental*





## 5.2. Resultados del diseño experimental

En la tabla 8 se presenta el diseño del experimento y respuesta medida en dos niveles de los parámetros estudiados.

Como se muestra en la Tabla 8 , la mejor combinación de los factores para la síntesis de carbonato de calcio ocurre en la ejecución 8 , presión de alimentación en la placa de orificio de 40 Psi, concentración de alimentación de 35 g/L y tiempo de operación de 40 min

**Tabla 8**

*Resultados del Diseño Experimental*

N°	Variables independientes			Variable dependientes
	Presión de alimentación (Psi)	Concentración ( g/L)	Tiempo (min)	Peso de carbonato (g)
1	40	25	30	2,8
2	60	25	30	3,1
3	40	35	30	2,85
4	60	35	30	6,5
5	40	25	40	2,75
6	60	25	40	3,9
7	40	35	40	6,2
8	60	35	40	8,3



### 5.3. Numero de cavitación

El número de cavitación fue evaluada mediante la ecuación y los resultados se muestra en la tabla 9.

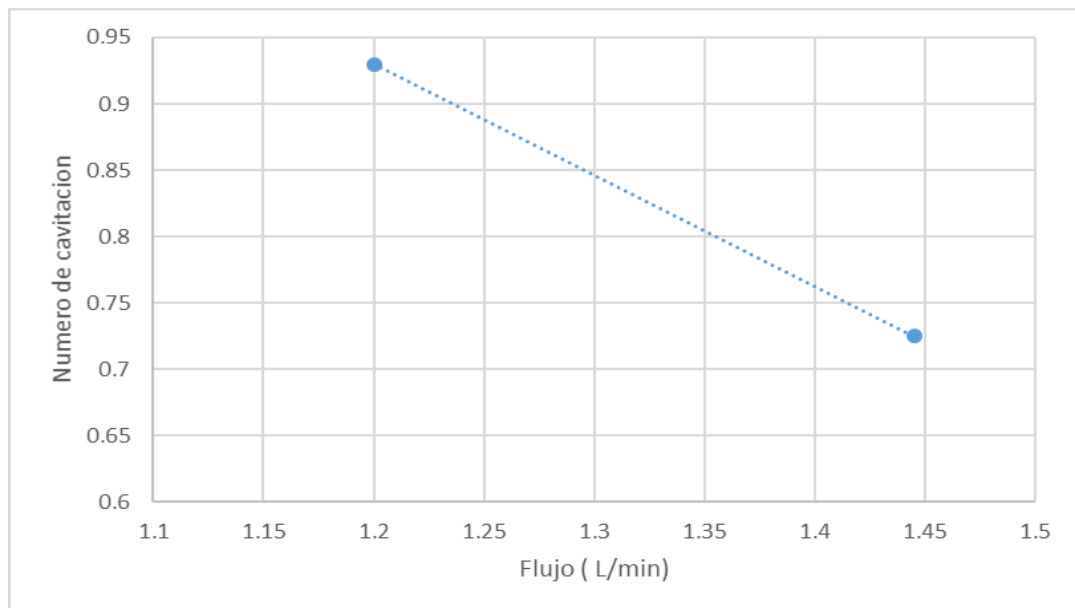
**Tabla 9**

*Cálculo de Número de Cavitación*

N°	Presión entrada( psi)	presión de Salida	flujo (mL/min)	diámetro de orificio (mm)	velocidad (m/s)	Numero de cavitación
1	40	16	1200	1,3	15,07	0,93
2	60	18	1445	1,3	18,14	0,725

**Figura 19**

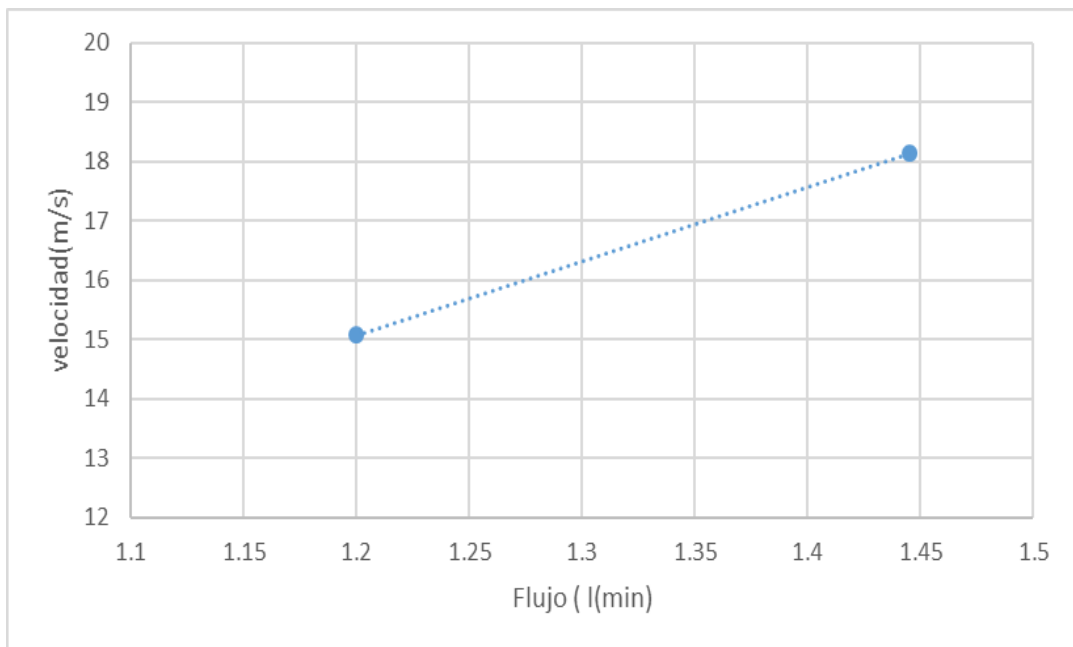
*Efecto del flujo vs número de cavitación*



En la figura 20 se muestra la velocidad lineal en la placa de orificio en función del flujo de recirculación.

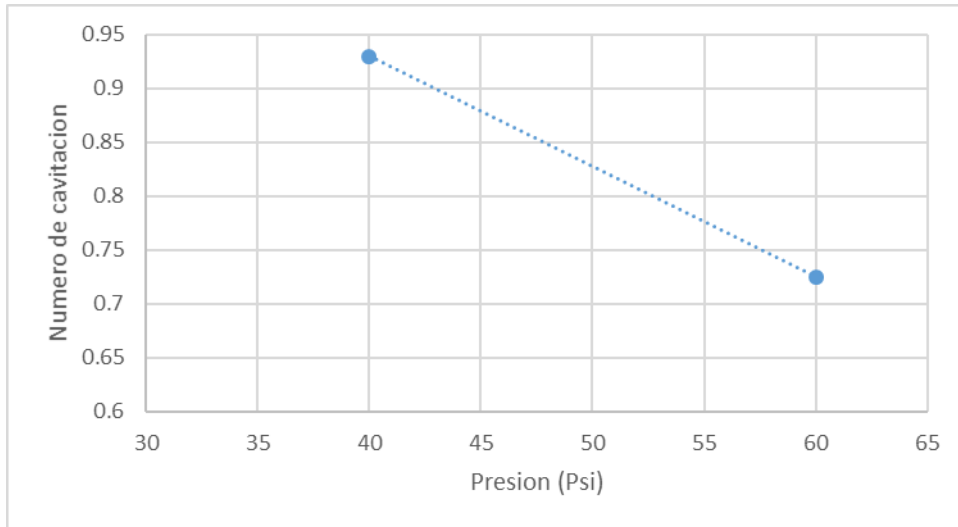
**Figura 20**

*Efecto del flujo sobre velocidad del fluido en la placa de orificio*



**Figura 21**

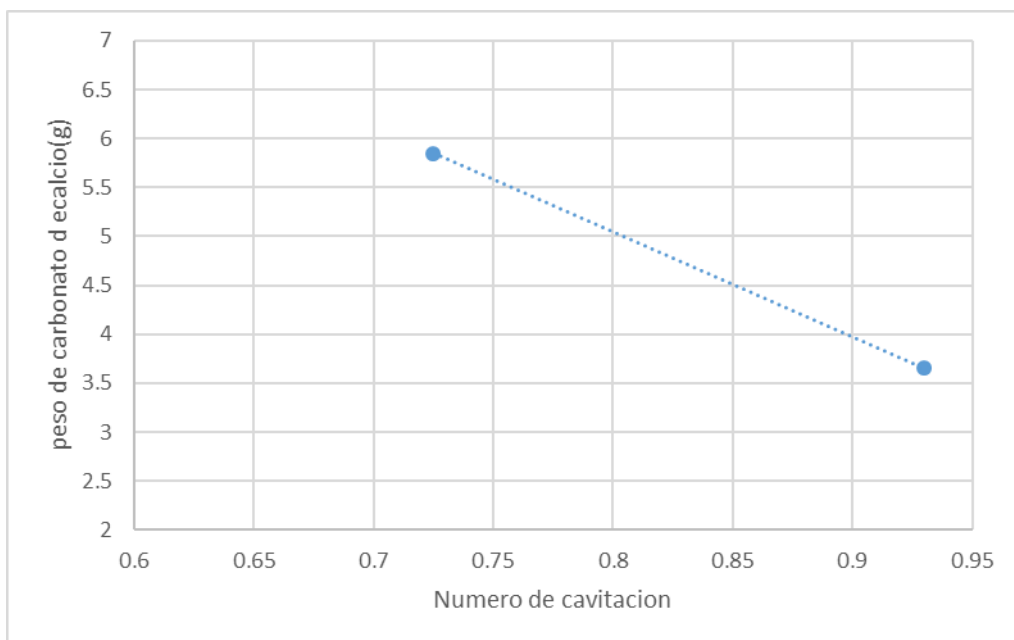
*Efecto de la presión sobre el número de cavitación*



De la gráfica 22 se observa el peso de carbonato de calcio respecto al número de cavitación

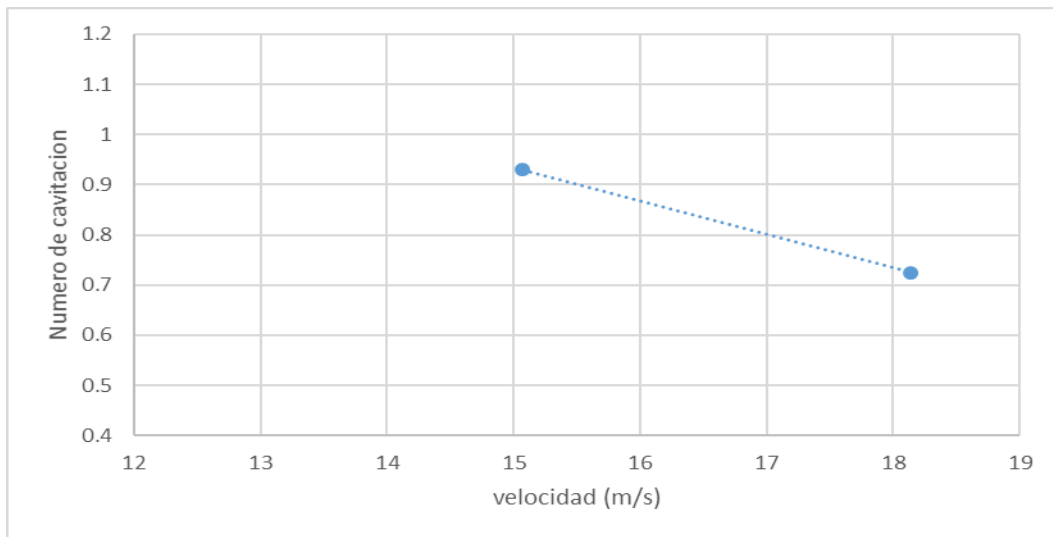
**Figura 22**

*Efecto de cavitación sobre peso de carbonato de calcio*



**Figura 23**

*Efecto de la velocidad sobre el número de cavitación*



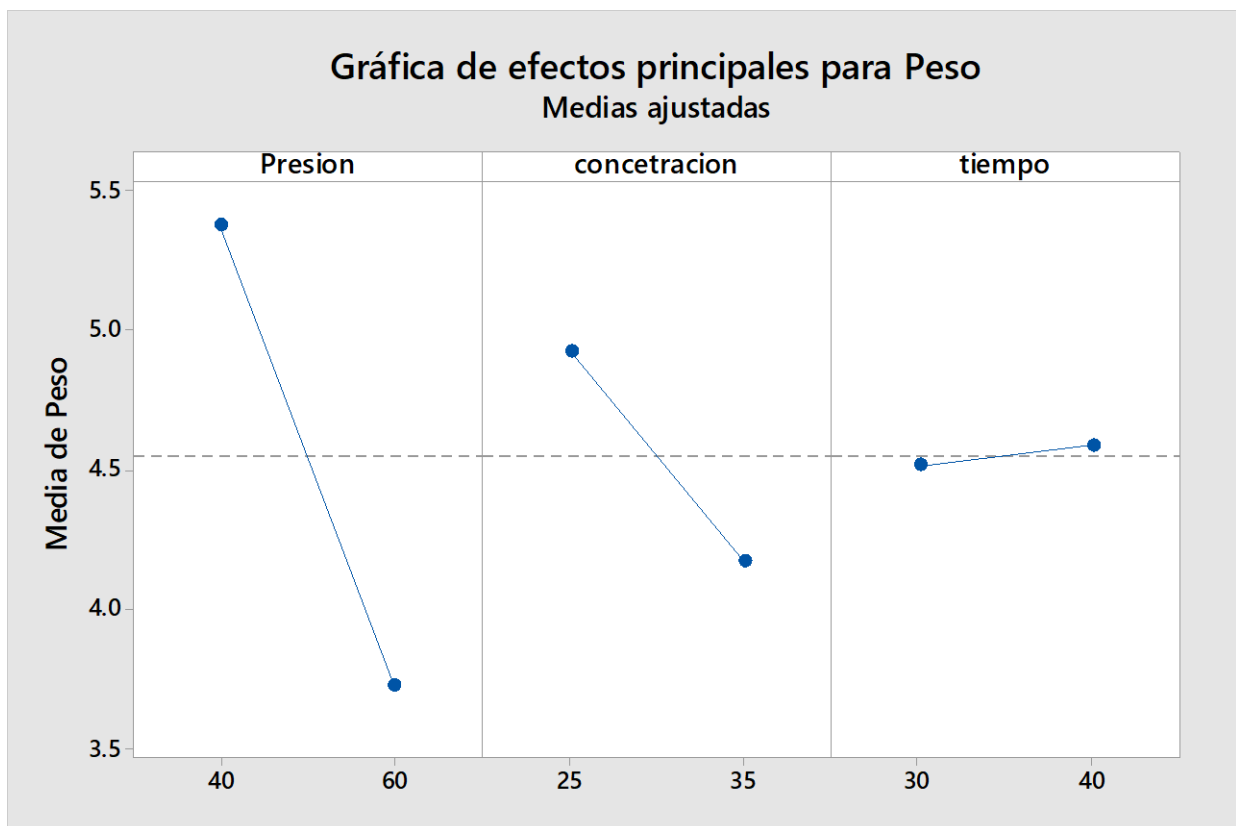
#### 5.4. Media de la variable respuesta

En la figura 24 se muestra la media de la variable respuesta en función de las variables independientes.



**Figura 24**

*Efecto principal para las medias de los datos*



### 5.5. Modelo de regresión Lineal

La ecuación lineal de regresión basada en el modelo de primer orden con tres parámetros y todos sus términos de interacción se indica en la siguiente ecuación.

$$Y = 189,4 - 4,026X_1 - 4,385X_2 - 5,782X_3 + 0,09875X_1X_2 + 0,1270X_1X_3 + 0,1435X_2X_3 - 0,003250X_1X_2X_3$$

$Y$ : variable respuesta

$X_1$ : Presión de alimentación

$X_2$ : Concentración de alimentación

$X_3$ : Tiempo

El efecto de la interacción de los tres factores que son estadísticamente insignificantes se descartaron. El modelo final en términos de parámetros estudiados viene dada por la Ec. (6):

$$Y = 189,4 - 4,026X_1 - 4,385X_2 - 5,782X_3 + 0,09875X_1X_2 + 0,1270X_1X_3 + 0,1435X_2X_3$$

### 5.6. Diagrama de Pareto

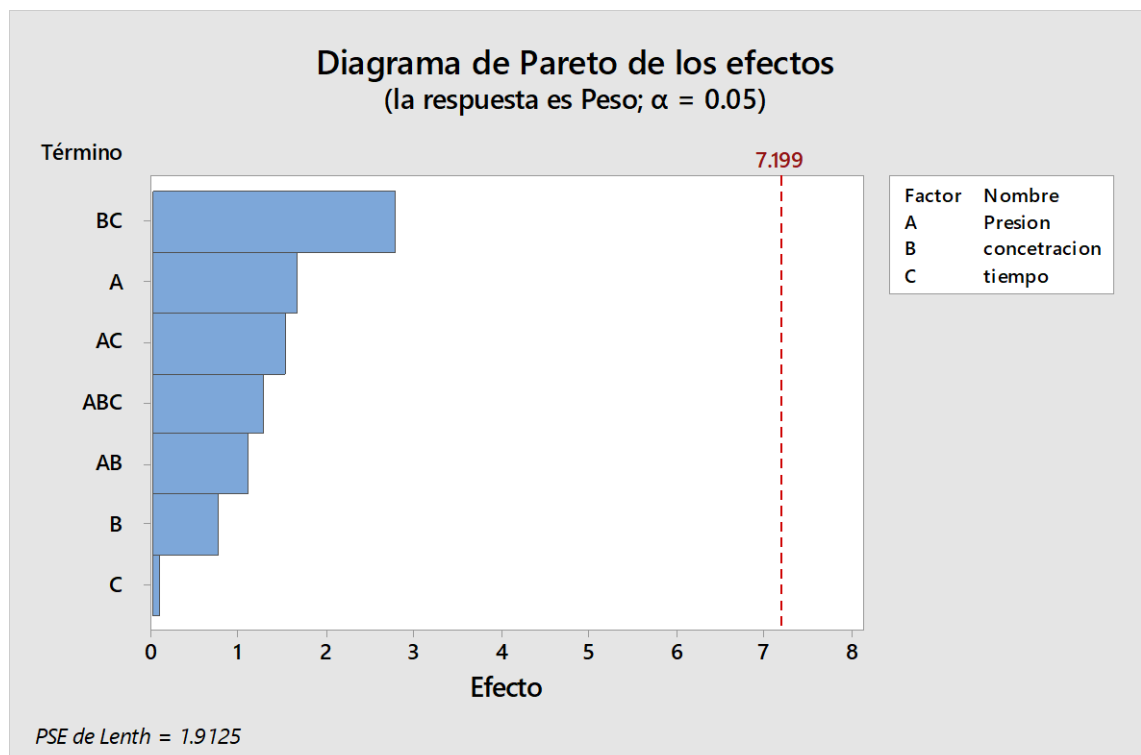
Los efectos de los parámetros en estudio y su la interacción en la respuesta se presentan en un diagrama de Pareto. El diagrama presenta los valores absolutos de los efectos de los parámetros principales y los efectos de la interacción de los factores con respecto a la variable respuesta y se ilustra como barras horizontales. De la figura 21 , la



presión es el parámetro más influye seguido de la interacción en tres las variables de concentración de alimentación y tiempo . El error pseudoestándar de Lenth para esta respuesta es 1,9125 y esto establece el nivel máximo de parámetros de proceso, el valor alfa es 0,05.

**Figura 25**

*Influencia de los factores con respecto a la respuesta*

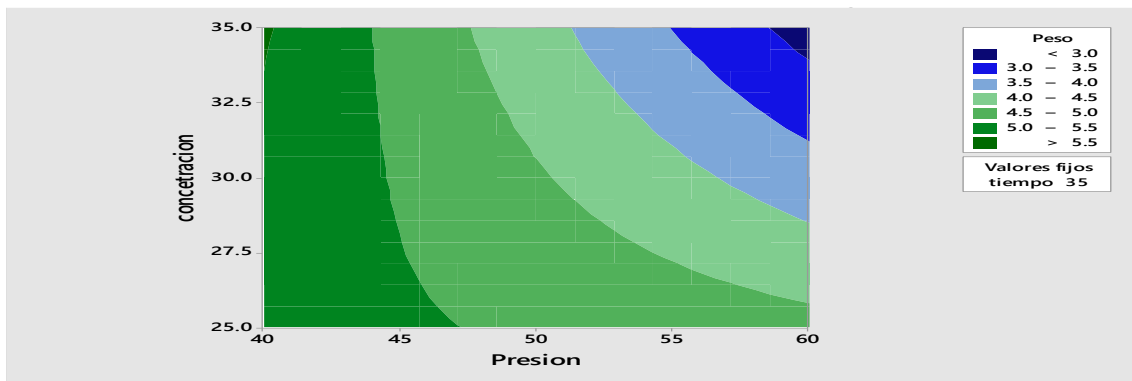




5.7. Grafica de contornos

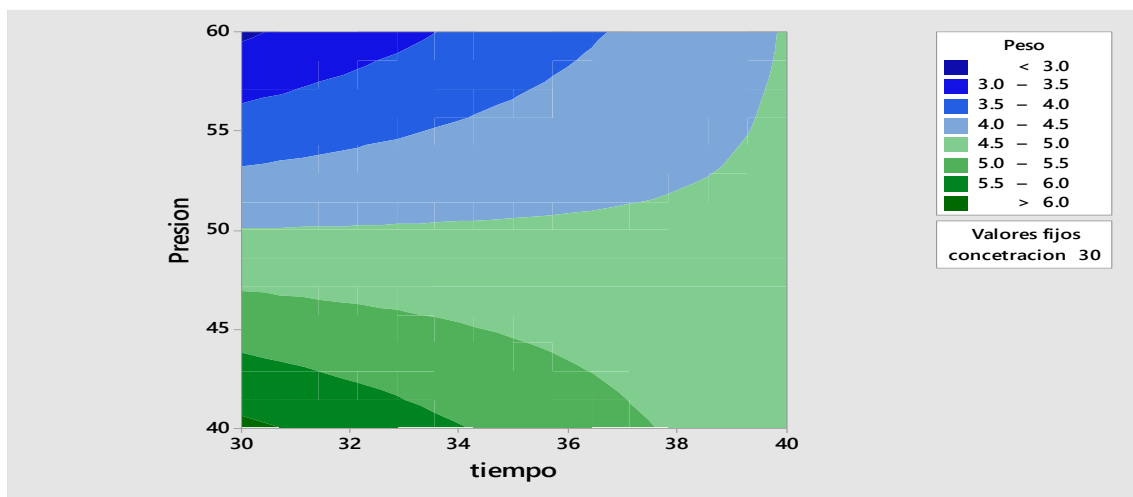
**Figura 26**

*Contorno peso vs concentración; presión*



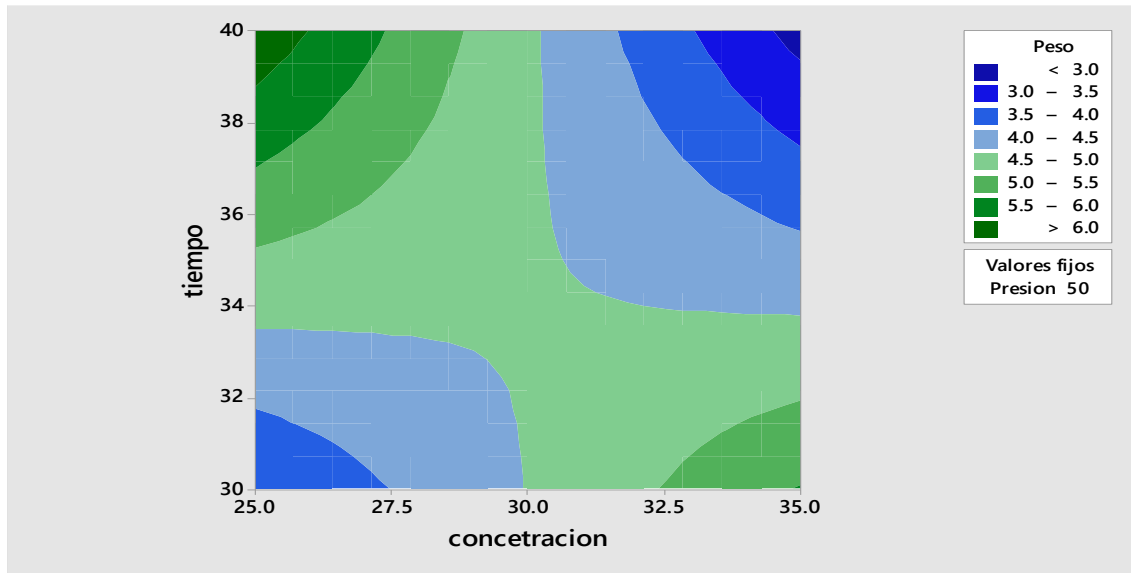
**Figura 27**

*Contorno peso vs tiempo; presión*



**Figura 28**

*Contorno peso vs tiempo; concentración*



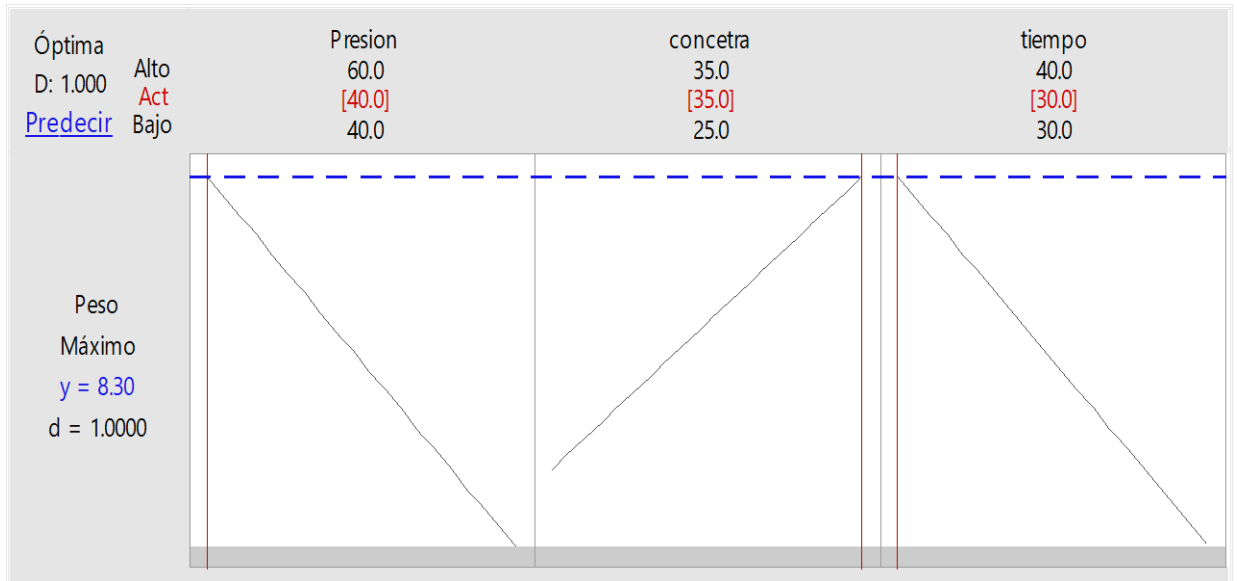
### 5.8. Optimización de variables

En la figura 25 se muestra el gráfico del optimizador de respuesta, donde el valor de la variable respuesta es de 8,3 para los valores de entrada al proceso de 40 Psi, concentración de 35 g/L y 30 min



**Figura 29**

*Optimización de variables*



## CAPITULO VI

### DISCUSION DE RESULTADOS

#### 6.1. Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados

##### 6.1.1. Contrastación de las hipótesis con el diseño del reactor

Para la síntesis de carbonato de calcio se ha construido el reactor con cavitación hidrodinámica, en el cual se comprueba la hipótesis que es posible la síntesis mediante esta técnica y su evaluación de los diferentes parámetros de operación

##### 6.1.2. Contrastación de la hipótesis con los parámetros

El Efecto de la presión se muestra en la figura 20 en donde se observa que la presión de entrada a la placa de orificio , a medida que aumenta la presión, el promedio de masa obtenida de carbonato disminuye en forma lineal.

De la tabla 8 se puede apreciar que a 60 psi se obtiene la mayor masa de carbonato de calcio .

De la figura 19 se observa que el número de cavitación disminuye en forma lineal con el aumento de la presión de ingreso a la placa de orificio, esto es debido al aumento de la velocidad en la placa de orificio.

Efecto de la concentración se puede observar en la figura 20 se muestra el efecto de la concentración de alimentación de la



solución electrolítica, se observa que a menor concentración se obtiene un peso de carbonato de calcio por encima de la media.

De la figura 25 se obtiene el valor óptimo de carbonato de calcio es de 8,3 g a 35 g/L de carbonato de calcio.

Efecto del tiempo de la figura 20 se observa que el peso promedio obtenido de carbonato de calcio no tiene una variación significativa en el intervalo de tiempo de experimentación, sin embargo, se observa un ligero aumento de la formación de carbonato de calcio con el incremento del tiempo de tiempo.

#### 6.1.3. Contratación de la hipótesis del número de cavitación .

De la figura 20 se observa que el peso de carbonato de calcio obtenido aumenta conforme disminuye el número e cavitación, esto es debido a que la velocidad en el orificio aumenta como se observa en la figura 21

#### 6.2. Contratación de los resultados con otros estudios similares

En el trabajo de investigación cuyo título es Almacenamiento de CO<sub>2</sub> y producción de CaCO<sub>3</sub> utilizando agua de mar y un álcali industrial cuyo autor es ( Junhyeok Jeon, 2019 ), En este estudio, llevaron a cabo varios experimentos sobre la carbonatación con agua de mar , el caudal óptimo de CO<sub>2</sub> y NaOH La dosis para la reacción de carbonatación (1L de capacidad) fue de 2,2 L / min y 0,0875 M, respectivamente.



### 6.3. Responsabilidad ética

El presente trabajo de investigación realizado cumple con lo estipulado en el código de ética de investigación de la Universidad Nacional del Callao, según Resolución N° 210-2017-CU.



## CONCLUSIONES

De los resultados de la presente investigación se concluye:

1. El diseño del equipo de reactor de cavitación hidrodinámico presenta ventajas con respecto a otras tecnologías convencionales, el diámetro en la placa de orificio es un factor importante puesto que en ese espacio se produce un a alta velocidad del fluido y se provoca una disminución de la presión del fluido por consecuencia favorece las reacciones químicas en el tiempo y las condiciones operativas.

Se ha construido un reactor de cavitación hidrodinámica con una placa de orificio de un diámetro de 1,3 mm y la instalación de la red hidráulica de tuberías incorporado un tubo Venturi para la alimentación del gas dióxido de carbono, para la recirculación de la solución se instaló una bomba y un tanque de acrílico. Para verificar la viabilidad del reactor se efectuó un diseño factorial y se obtuvo una suspensión de carbonato de calcio y posteriormente se filtró y se secó en una estufa a 105 °C.

2. Se ha evaluado los factores de operación del reactor de cavitación hidrodinámica, presión de ingreso a la placa de orificio, concentración inicial de la solución modelo y tiempo de reacción a dos niveles de experimentación, para la formación de carbonato de calcio, el mejor valor para la síntesis fue a la presión de 40 psi,



concentración de 35 g/L y tiempo de 40 min. obteniendo un peso de 8,5 g de carbonato de calcio.

3. Se ha evaluado el número de cavitación, en el cual se observa que a menor número e cavitación favorece la formación del carbonato de calcio, el incremento del flujo y presión favorece el peso de formación de carbonato de calcio





## RECOMENDACIONES

1. Se recomienda efectuar el estudio de la influencia de otras variables operativas como flujo de dióxido de carbono, Ph inicial de la solución electrolítica y flujo de la solución, así como variables de diseño el diámetro del orificio para ver la influencia en a la formación del carbonato de calcio.
2. Evaluar el grado de conversión de iones calcio en la formación de carbonato de calcio.
3. Investigar la pureza y el tamaño de partículas del carbonato de calcio obtenido mediante DRX.
4. Hacer un estudio de la evaluación a las variables operativas a tres niveles de experimentación para tener una tendencia más exacta en la formación del carbonato de calcio



## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Amin, A., Karaei, M., Hamidi, H., Erfan, M., y Bizhan, H. (2018). CO<sub>2</sub> sequestration through direct aqueous mineral carbonation of red gypsum. *Petroleum*, 4, 398-407.
- Agarwal, A., Wun, J., y Liu, Y. (2011). Principle and applications of microbubble and nanobubble technology for water treatment. *Chemosphere*, 84, 1175-1180.
- Balasundaram B., Harrison S.T.L.(2006) Disruption of brewers' yeast by hydrodynamic cavitation: process variables and their influence on selective release. *Biotechnol. Bioeng.* 94 , 303-310.
- Dongwoo Kang, Yunsung Yoo, Jinwon Park, (2020) Accelerated chemical conversion of metal cations dissolved in seawaterbased reject brine solution for desalination and CO<sub>2</sub> utilization . desalinization .
- Fleischer, C., Becker, S., Eigenberger, G., ( 1996) Detailed modeling of the chemisorptions of CO<sub>2</sub> into NaOH in a bubble column. *Chem. Eng. Sci.* 51, 1715-1724
- Junhyeok Jeona , Myoung-Jin Kimb (2019) CO<sub>2</sub> storage and CaCO<sub>3</sub> production using seawater and an alkali industrial by-product Chemical Engineering Journal Volume 378, 15 December 2019, 122180



- Mahmut, A., Soner, T., Burcin, K., Seckn, I., y Vapur, H. (2019). Production of precipitated calcium carbonate particles from gypsum waste using venture tubes as a carbonation zone. *Journal of CO<sub>2</sub> utilization*, 29, 117-125.
- Mahmut, A. (2018). Influences CO<sub>2</sub> bubbling types on preparation of calcite nanoparticles by carbonation process. *Periodica polytechnic chemical engineering*, 62(2), 209-214.
- Miran Yoo, Sang-Jun Han, Jung-Ho Wee ( 2013 )Carbon dioxide capture capacity of sodium hydroxide aqueous solution *Journal of Environmental Management* 114 512-519
- Nakayama F. S. (1968) Calcium activity, complex and ion-pair in saturated CaCO<sub>3</sub> solutions. *Soil Sci.* 106, 429--434.
- Pawar S.K., Mahulkar A.V., Pandit A.B., Roy K., Moholkar V.S ( 2017). Sonochemical effect induced by hydrodynamic cavitation: comparison of venturi/orifice flow geometries. *AIChE J.* 63 , 47054716.
- PiaLipp ,Andreas Schmitt ,GüntherBaldau ( 1997) Treatment of soft reservoir water by limestone filtration in combination with ultrafiltration , *Desalination* 113 285-292
- Simpson A., Ranade V.V.(2018) Modelling of hydrodynamic cavitation with orifice: Influence of different orifice designs. *Chem. Eng. Res. Des.* 136 , 698-711



## **Anexos**

A1. Placa de orificio y bridas

A2. Placa de orificio

A3. Placa de orificio y manómetro

A4. Equipo experimental

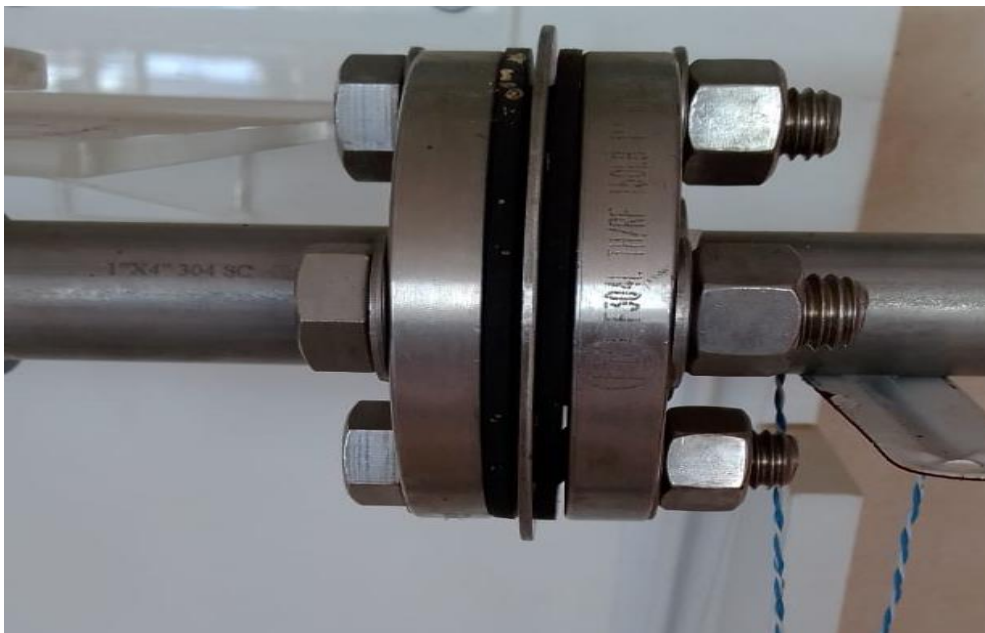
A5. Muestra de carbonato de calcio

A6. Conductividad y Ph en la precipitación del carbonato de calcio

A7. Matriz de consistencia

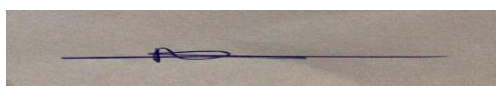


A1: Placa de orificio y bridas



A handwritten signature in blue ink on a piece of paper. The signature is stylized and appears to be a name followed by a surname.

A2: placa de orificio



A3. Placa de orificio con bridas y manometro



A4: Equipo experimental



A5: Muestra de carbonato de calcio







A6: Conductividad y Ph en funcion del tiempo en la prescipitacion del carbonato de calcio (PCC)

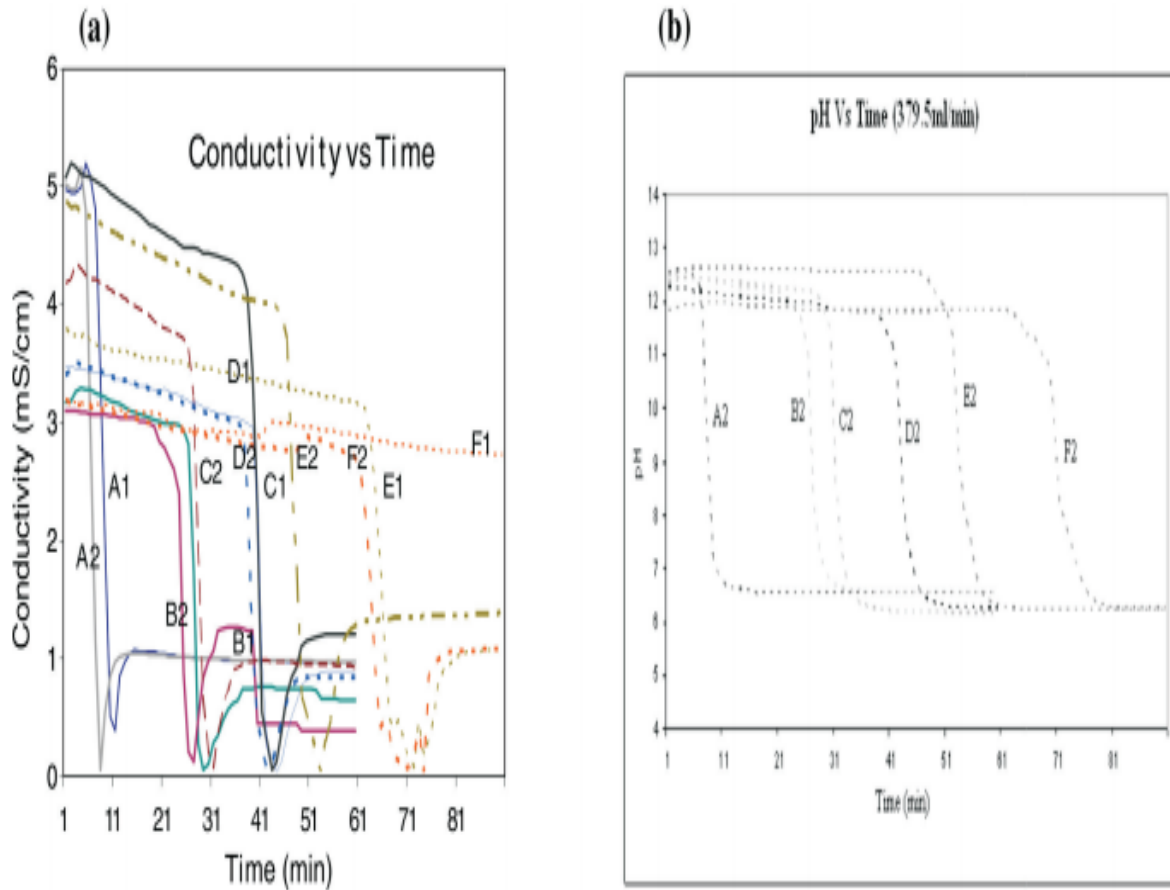


Figure 2 The changes in trend of (a) conductivity labelled A-F and (b) pH labelled A-F during the course of PCC precipitation process.



**ANEXOS: MATRIZ DE CONSISTENCIA**

Título : “**SÍNTESIS DE CARBONATO DE CALCIO MEDIANTE UN SISTEMA COMBINADO DE REACTOR DE CAVITACIÓN HIDRODINÁMICA Y ULTRAFILTRACIÓN A PARTIR DE AGUA DE MAR**”.

<p><b>PROBLEMA GENERAL</b> <i>Principal</i> ¿Cómo se efectuará la síntesis de carbonato de calcio mediante un sistema combinado de reactor de cavitación hidrodinámica y filtración a partir de agua de mar?</p> <p><b>Problemas específicos</b> ¿El diseño efectuado del reactor de cavitación hidrodinámico permite la síntesis de carbonato de calcio a partir de una solución electrolítica? ¿Cuáles serán los factores y niveles de operación de la del reactor de cavitación hidrodinámica para la formación del carbonato de calcio ? ¿Qué influencia existe entre el numero de cavitación con respecto a la formación de ecarbonato de calcio?</p>	<p><b>OBJETIVOS</b></p> <p><b>Objetivo General</b> sintetizar carbonato de calcio mediante un sistema combinado de reactor de cavitación hidrodinámica y ultrafiltración a partir de agua de mar.</p> <p><b>Objetivos Específicos</b></p> <p>Diseñar el reactor de cavitación hidrodinámico para la síntesis de carbonato de calcio a partir de una solución electrolítica Evaluar la influencia de los factores de operación de la del reactor de cavitación hidrodinámica en la formación de carbonato de calcio. Evaluar la influencia del número de cavitación con respecto a la formación del carbonato de carbonato de calcio</p>	<p><b>HIPÓTESIS.</b> <b>Hipótesis General</b> Con la evaluación de los factores de operación del sistema combinado de reactor de cavitación hidrodinámica y ultrafiltración, obtendremos carbonato de calcio a partir de agua de mar</p> <p><b>Hipótesis Específicas</b></p> <p>Al diseñar el reactor de cavitación hidrodinámico en forma adecuada para la síntesis de carbonato de calcio a partir de una solución electrolítica se logrará la síntesis de carbonato de calcio. Al seleccionar en forma adecuada los parámetros de operación (presión de alimentación a la placa de orificio, concentración de alimentación y tiempo de operación ) del sistema combinado de reactor de cavitación hidrodinámica y filtración se logrará alcanzar la síntesis de carbonato de calcio.</p> <p>Al obtener el número de cavitación en la placa de orificio nos permitirá evaluar su influencia respecto a la formación del carbonato de carbonato de calcio</p>	<p><b>VARIABLES DE OPERACIÓN</b> <i>X = Variable Independiente</i> Presión de alimentación a la placa de orificio (<math>X_1</math>) Concentración de la solución modelo (<math>X_2</math>) Tiempo de operación (<math>X_3</math>) <i>Y=Variable dependiente</i> Peso de carbonato de calcio y</p>	<p><b>Operacionalizacion de las variables independientes</b></p> <p><b>Presión</b> Presión de alimentación a la placa de orificio. Lectura directa en psi manómetro</p> <p><b>Concentración</b> Concentración de la solución modelo (g/L)</p> <p>Balanza , bureta</p> <p><b>Tiempo de reacción cronometro</b></p>
--	---	--	--	---

