



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

**Unidad Profesional Interdisciplinaria de
Ingeniería Campus Zacatecas**

Ingeniería Metalúrgica

**“EFECTO DE LA CAVITACIÓN HIDRODINÁMICA
EN LA DESTRUCCIÓN DE CIANURO CON
AGENTES REDUCTORES”**

Curricular

**Que para obtener el título de Licenciatura en Ingeniería
Metalúrgica**

Presenta

CÉSAR CABRAL BAÑUELOS

Director

DR. HORACIO INCHAUREGUI MÉNDEZ



ZACATECAS, ZAC. 01 OCTUBRE, 2020



Folio
UPIIZ/ESA/035/2021

Asunto
DESIGNACIÓN
CÉSAR CABRAL BAÑUELOS
INGENIERÍA METALÚRGICA
BOLETA: 2016670008
GENERACIÓN: 2016-2020

Zacatecas, Zac., a 05 de febrero de 2021

C. CÉSAR CABRAL BAÑUELOS
PRESENTE

Mediante el presente se hace de su conocimiento que este Departamento acepta que el **Dr. en C. Horacio Inchaurregui Méndez**, sea **Asesor** en el tema que propone usted a desarrollar como prueba escrita de la opción Curricular, con el título y contenido siguiente:

"Efecto de la cavitación hidrodinámica en la destrucción de cianuro con agentes reductores"

Se concede un plazo de máximo de un año, a partir de esta fecha, para presentarlo a revisión por el jurado asignado.


M. EN C. JULIA JANETH ROSALES MARES
Jefa del Departamento de Evaluación y
Seguimiento Académico




EN C. JUAN ALBERTO ALVARADO OLIVARES
Director de la UPÍIZ
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA
INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA
DE INGENIERÍA CAMPUS ZACATECAS
DIRECCIÓN





Folio

UPIIZ/ESA/051/2021

Asunto

AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN
CÉSAR CABRAL BAÑUELOS
INGENIERÍA METALÚRGICA
BOLETA: 2016670008
GENERACIÓN: 2016-2019

Zacatecas, Zac., a 9 de febrero de 2021

El suscrito tengo el agrado de informar a usted, que habiendo procedido a revisar el trabajo de titulación que presenta con fines de titulación denominada

"Efecto en la cavitación hidrodinámica en la destrucción de cianuro con agentes reductores"

Encontré que el citado **Trabajo de Titulación**, reúne los requisitos para **autorizar** la impresión y proceder a la presentación del Examen Profesional debiendo tomar en consideración las indicaciones y correcciones que al respecto se hicieron


Dr. en C. Horacio Inchuarregui Méndez



Autorización de uso de obra
Instituto Politécnico Nacional
P r e s e n t e

Bajo protesta de decir verdad *el* que suscribe **César Cabral Bañuelos**, estudiante del programa de **Ingeniería Metalúrgica** con numero de boleta **2016670008**, adscrito a la Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería campus Zacatecas; manifiesto ser autor y titular de los derechos morales y patrimoniales de la obra titulada "**Efecto de la cavitación hidrodinámica en la destrucción de cianuro con agentes reductores**" en adelante "El Trabajo de Titulación" y de la cual se adjunta copia, por lo que por medio del presente y con fundamento en el artículo 27 fracción II, inciso b) de la Ley Federal del Derecho de Autor, otorgo a el Instituto Politécnico Nacional, en adelante El IPN, autorización no exclusiva para comunicar y exhibir públicamente total o parcialmente en medios digitales, "El Trabajo de Titulación" por un periodo de **indefinido** contado a partir de la fecha de la presente autorización, dicho periodo se renovará automáticamente en caso de no dar aviso expreso a "El IPN" de su terminación.

En virtud de lo anterior, "El IPN" deberá reconocer en todo momento mi calidad de autor de "El Trabajo de Titulación".

Adicionalmente, y en mi calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales de "El Trabajo de Titulación", manifiesto que la misma es original y que la presente autorización no contraviene ninguna otorgada por el suscrito respecto de "El Trabajo de Titulación", por lo que deslindo de toda responsabilidad a El IPN en caso de que el contenido de "El Trabajo de Titulación" o la autorización concedida afecte o viole derechos autorales, industriales, secretos industriales, convenios o contratos de confidencialidad o en general cualquier derecho de propiedad intelectual de terceros y asumo las consecuencias legales y económicas de cualquier demanda o reclamación que puedan derivarse del caso.

Zacatecas, Zac., a 01 de octubre del 2020.

Atentamente



Nombre y firma del alumno

Agradecimientos

Primeramente, agradezco a Dios por permitirme llegar a la culminación de nuestro proyecto; de igual manera, a mis familiares y amigos, por su apoyo incondicional durante la realización del presente trabajo.

Agradezco a la Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería Campus Zacatecas del Instituto Politécnico Nacional, por el conocimiento adquirido. A los profesores, por su instrucción y enseñanzas personales, a los compañeros de clases y de otras carreras que me brindaron apoyo y motivación.

Agradezco especialmente al Dr. Horacio Inchaurregui Méndez por su solidaridad y apoyo incondicional, sus conocimientos y consejos compartidos. Por su motivación del día a día hacia la realización de este proyecto, la experiencia y dedicación entregada para la culminación de este.

De igual manera agradezco la atención y apoyo otorgado por mis revisores, los doctores Luis Mario González Rodríguez y Oscar Joaquín Solís Marcial por la retroalimentación brindada.

Asimismo, a la I.Q Araceli Núñez Contreras encargada del área de laboratorio metalúrgico, que nos brindó su apoyo de manera incondicional ante las necesidades presentadas para el desarrollo del presente trabajo.

Agradezco a mi familia, en especial y de todo corazón a mis padres por la paciencia, dedicación y amor brindado con el que cada día formaron la motivación para concretar el avance y desarrollo del presente trabajo. Por creer en mí y otorgarme su confianza en cualquier momento y convertirse en la inspiración para poder superarme personal y profesionalmente.

Resumen

Para el desarrollo de sus procesos la industria minera ocupa grandes cantidades de agua, a la que se le incluyen una variedad de reactivos, de acuerdo con el esquema químico desarrollado para el proceso. Entre los reactivos más utilizados se encuentra el cianuro, que permite la recuperación de los metales valiosos como oro y plata. Las altas concentraciones ocupadas para el proceso generan un efluente altamente tóxico, que requiere de un tratamiento previo a su liberación en el medio ambiente (presa de jales). El tratamiento más empleado para la destrucción de cianuro por las unidades mineras es la destrucción química; sin embargo, esta resulta altamente costosa y con largos periodos de reacción. El uso de procesos más eficientes y económicos como los de oxidación avanzada hacen de la cavitación hidrodinámica una alternativa muy prometedora; ya que sólo se requiere de aprovechar la hidrodinámica del flujo para la generación del fenómeno de la cavitación y por ende la formación de microburbujas que implosionan, de esta manera, se forman radicales hidroxilos capaces de degradar los compuestos cianurados presentes en los efluentes. En el presente proyecto se plantea la realización de pruebas para la destrucción de cianuro por oxidación química y cavitación hidrodinámica. Para obtener un análisis representativo del proceso evaluado en mina con el uso de reductores químicos (Neutralite) se trabajó el desarrollo de un prototipo con la implementación de un tubo Venturi como cámara de cavitación, con el monitoreo de variables como la temperatura, el pH, el oxígeno disuelto, la agitación y la presión en el sistema.

Al realizar el análisis correspondiente de los datos obtenidos para cada prueba se muestran valores con un alto consumo de reactivos en la destrucción química y, valores promedio de destrucción en las diferentes presiones 1, 2 y 3 bares de 25%, 35% y 45%, respectivamente. Se presentan algunos efectos influenciados conforme a la modificación de la presión de trabajo como aumento de temperatura y disminución del pH, esto a una presión de 3 bares. Con ello, se plantea la presión a 2 bares como una buena condición, ya que las variables como la temperatura se encuentran en un rango de trabajo adecuado, el pH y OD se mantienen de forma constante, por lo que señalan un sistema estable, con un buen porcentaje de destrucción.

Palabras Clave: Procesos de oxidación avanzada, tratamiento de efluentes mineros, destrucción de cianuro, cavitación hidrodinámica, agentes reductores.

Abstract

For the development of its processes, the mining industry occupies large quantities of water, which includes a variety of reagents, according to the chemical scheme developed for the process. Among the most toxic reagents is found the cyanide, it this allows the recovery of valuable metals such as gold and silver. The high concentrations occupied for the process generate a highly toxic effluent, requiring treatment prior to its release into the environment. Chemical destruction, however, is highly expensive and with long reaction periods. The use of advanced oxidation techniques proposes more efficient and economic processes such as hydrodynamic cavitation; that only requires taking advantage of the hydrodynamics of a flow for the generation of hydroxyl radicals that allow the oxidation of the cyanide present in the effluent. In the present project, it is proposed to carry out tests for the destruction of cyanide by both chemical oxidation and hydrodynamic cavitation. For obtain the representative analysis of the process evaluated in the mine with the use of chemical reducers (Neutralite) and the development of a prototype with the implementation of a venturi tube as a cavitation chamber, with the monitoring of variables such as; temperature, pH and pressure.

When performing the corresponding analysis of the data obtained for each test, values are shown with a high consumption of reagents in the chemical destruction and, average values of destruction in the different pressures 1, 2 and 3 bars of 25%, 35% and 45%, respectively. There are some effects influenced according to the modification of the working pressure as temperature increase and pH decrease in by a pressure of 3 bars. With this, the pressure at 2 bars is considered like optimal, since the variables such as temperature are in an optimal working range, the pH and OD are maintained constant thorough the experiment, indicating a stable system, with a good percentage of destruction.

Key Words: Advanced oxidation processes, mining effluent treatment, cyanide destruction, hydrodynamic cavitation, reducing agents.

Índice General

Agradecimientos.....	I
Resumen.....	II
Palabras Clave	III
Abstract	III
Key Words	III
Índice de Figuras.....	VI
Índice de tablas.....	IX
Nomenclatura.....	XI
Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1 Justificación.....	3
1.2 Hipótesis.....	4
1.3 Objetivos	4
1.3.1 General.....	4
1.3.2 Específicos	4
Capitulo II. Marco teórico	5
2.1 Normatividad para el agua.....	5
2.2 Cianuro.....	6
2.3 Cavitación hidrodinámica (CH).....	8
2.4 Antecedentes o estado del arte	11
2.5 Diseño del Cavitador propuesto por Varela (2019).....	18
Capitulo III. Metodología	21
3.1 Diseño experimental	21
3.1.1 Destrucción de cianuro con reductores químicos (Reactor batch).....	22
3.1.2 Destrucción de cianuro por cavitación hidrodinámica	23
3.2 Desarrollo de pruebas	24

3.2.1 Toma de muestra.....	24
3.2.2 Destrucción de cianuro con reductores químicos (Reactor Batch)	24
3.2.3 Destrucción de cianuro por cavitación hidrodinámica	27
3.3 Análisis de muestras	29
3.3.1 Análisis por espectrofotometría.	29
3.3.2 Análisis por Volumetría.....	33
Capítulo IV. Análisis de resultados y discusión	37
4.1 Valores de caracterización del efluente minero.....	37
4.2 Destrucción de cianuro con reductores químicos (Reactor batch)	38
4.3 Destrucción de cianuro por cavitación hidrodinámica	44
Capítulo V. Conclusiones.....	50
5.1 Trabajo a futuro.....	52
Bibliografía.....	53
Anexos	56

Índice de Figuras

Figura 1. Principio de la cavitación al ocupar un tubo Venturi.....	8
Figura 2. Formación de burbujas y fenómeno de implosión.....	9
Figura 3. Componentes del sistema de Cavitación y Fenton heterogéneo, adaptada de (Anand et al, 2009).....	13
Figura 4. Sistema experimental del reactor de cavitación hidrodinámica para destrucción de diclorvos, adaptada de (Ravi & Parag, 2012)	14
Figura 6. Configuración del tubo Venturi propuesto por (Varela, 2019)	18
Figura 7. Perfiles transversales de: a) velocidad junto a sus líneas de corriente; y, b) concentración en el Venturi en la cámara divergente obtenidos por (Varela, 2019).....	20
Figura 8. Cuadro de diseño experimental para las pruebas de destrucción con reductor químico.....	22
Figura 9. Cuadro de diseño experimental para pruebas de cavitación hidrodinámica	23
Figura 10. Reactor batch.....	26
Figura 11. Dispositivo de reacción par cavitación Hidrodinámica.	29
Figura 12. Solución muestra antes y después de la titulación.....	36
Figura 13. Sistema de titulación.....	36
Figura 14. Perfiles de concentración de cianuro en función del tiempo, con relaciones 1:1 y 2:1 para 250 ppm.....	39
Figura 15. Perfiles de concentración de cianuro en función del tiempo, con relaciones 1:1 y 2:1 para 500 ppm.....	40

Figura 16. Perfiles de concentración de cianuro en función del tiempo, con relaciones 1:1 y 2:1 para 1000 ppm.....	42
Figura 17. Comparación de perfiles de porcentaje de destrucción de las diferentes concentraciones con relación 1:1.....	42
Figura 18. Comparación de perfiles de porcentaje de destrucción de las diferentes concentraciones con relación 2:1.....	43
Figura 19. Perfiles promedio de concentración de cianuro conforme al tiempo para las diferentes presiones.....	45
Figura 20. Perfiles promedio de pH en las diferentes presiones conforme al tiempo de interacción.....	46
Figura 21. Perfiles promedio de concentración de OD en solución de cada presión conforme al tiempo.....	47
Figura 22. Perfiles promedio de temperatura en cada presión conforme al tiempo.....	48
Figura 23. Perfiles de porcentaje de destrucción de cianuro de cada concentración evaluando 1 bar de presión.....	48
Figura 24. Perfiles de porcentaje de destrucción de cianuro de cada concentración evaluando 2 bar de presión.....	49
Figura 25. Perfiles de porcentaje de destrucción de cianuro de cada concentración evaluando 3 bar de presión.....	50
Figura 26. Perfiles de concentración de cianuro conforme al tiempo en las diferentes presiones para 250 ppm.....	57
Figura 27. Perfiles de pH en las diferentes presiones conforme al tiempo de interacción para 250 ppm.....	58
Figura 28. Perfiles de concentración de OD en solución de cada presión conforme al tiempo para 250 ppm.....	58

Figura 29. Perfiles de temperatura en cada presión conforme al tiempo para 250ppm.....	59
Figura 30. Perfiles de concentración de cianuro conforme al tiempo en las diferentes presiones para 500 ppm.	61
Figura 31. Perfiles de pH en las diferentes presiones conforme al tiempo de interacción para 500 ppm	61
Figura 32. Perfiles de concentración de OD en solución de cada presión conforme al tiempo para 500 ppm.....	62
Figura 33. Perfiles de temperatura en cada presión conforme al tiempo para 500ppm.....	62
Figura 34. Perfiles de concentración de cianuro conforme al tiempo en las diferentes presiones para 1000 ppm.	64
Figura 35. Perfiles de pH en las diferentes presiones conforme al tiempo de interacción para 1000 ppm	64
Figura 36. Perfiles de concentración de OD en solución de cada presión conforme al tiempo para 250 ppm.....	65
Figura 37. Perfiles de temperatura en cada presión conforme al tiempo para 250ppm.....	65

Índice de tablas

Tabla 1. Potenciales Redox de algunos agentes oxidantes, adaptada de (Domenech, 2001).....	10
Tabla 2. Resultados destacados para el efecto de cada variable en la destrucción compuesta por cavitación hidrodinámica y Fenton heterogénea.....	13
Tabla 3. Valores obtenidos de cada una de las variables evaluadas para la destrucción por cavitación hidrodinámica para el efluente con diclorvos.....	15
Figura 5. Sistema de cavitación hidrodinámica empleado para la destrucción del $K_4Fe(CN)_6$, adaptada de (Rajashree et al, 2014).....	16
Tabla 4. Resultados para cada variable evaluada en la destrucción del $K_4Fe(CN)_6$ por cavitación hidrodinámica.....	16
Tabla 5. Resultados más significativos de cada una de las variables evaluadas en la degradación de cianatos en efluentes procesados en la industria.....	17
Tabla 6. Relación de dosificación ppm vs mL para Neutralite.	26
Tabla 7. Valores de las diferentes concentraciones de cada elemento en el efluente.	37
Tabla 8. Valores de las diferentes concentraciones de cada elemento en el efluente.	37
Tabla 9. Prueba 1; destrucción con Neutralite relación 1:1 para 250 ppm.	38
Tabla 10. Prueba 2; destrucción con Neutralite relación 2:1 para 250 ppm.....	38
Tabla 11. Prueba 3; destrucción con Neutralite relación 1:1 para 500 ppm.....	40
Tabla 12. Prueba 4; destrucción con Neutralite relación 2:1 para 500 ppm.....	40
Tabla 13. Prueba 5; destrucción con Neutralite relación 1:1 para 1000 ppm.....	41

Tabla 14. Prueba 6; destrucción con Neutralite relación 2:1 para 1000 ppm.....	41
Tabla 15. Promedio de los valores en las pruebas evaluadas en 1 bares de presión.	44
Tabla 16. Promedio de los valores en las pruebas evaluadas en 2 bares de presión.	44
Tabla 17. Promedio de los valores en las pruebas evaluadas en 3 bares de presión.	45
Tabla 18. Prueba 1; destrucción por cavitación hidrodinámica 1bar para 250 ppm.	56
Tabla 19. Prueba 2; destrucción por cavitación hidrodinámica 2 bar para 250 ppm	56
Tabla 20. Prueba 3; destrucción por cavitación hidrodinámica 3 bar para 250 ppm	57
Tabla 21. Prueba 4; destrucción por cavitación hidrodinámica 1bar para 500 ppm	59
Tabla 22. Prueba 5; destrucción por cavitación hidrodinámica 2bar para 250 ppm	60
Tabla 23. Prueba 6; destrucción por cavitación hidrodinámica 3bar para 250 ppm	60
Tabla 24. Prueba 7; destrucción por cavitación hidrodinámica 1bar para 1000 ppm	63
Tabla 25. Prueba 8; destrucción por cavitación hidrodinámica 2bar para 1000 ppm	63
Tabla 26. Prueba 9; destrucción por cavitación hidrodinámica 3bar para 1000 ppm	63

Nomenclatura

Abreviaturas

ONU	Organización de las Naciones Unidas
CAV	Cavitación
Redox	Oxido-reducción
POA	Procesos de oxidación avanzada
NOM	Norma Oficial Mexicana
UNESCO	Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura
EPA	Environmental Protection Agency
WAD	Débil-ácido-disociable
IIMC	Instituto Internacional para el Manejo del Cianuro
CH	Cavitación Hidrodinámica
OD	Oxígeno Disuelto

Símbolos y variables

pH	Potencial de hidrógeno
L	Litros
PSI	Libras por pulgada cuadrada
KPa	Kilo Pascales
°C	Grados Celsius
min	Minutos
kW	Kilo-watts

V_i	Válvula
Bar	Bares
ppm	Partes por millón
h	Horas
mg	Miligramos
ρ	Densidad
∇	Operador nabla
∂	Derivada parcial
P	Presión
μ	Viscosidad
c	Concentración
t	Tiempo
R	Velocidad de reacción
u	Vector velocidad
M	Molaridad
k	Constante cinética
g	Gramos
mol	Moles
V	Volumen
m	Masa
mL	Mililitros
nm	Nanómetros
K	Grados kelvin

Capítulo 1. Introducción

Uno de los principales retos para la industria en general es hoy en día conseguir abordar de forma efectiva la explotación y contaminación insostenible de los recursos de agua dulce en el mundo. En comparación con otros sectores, la industria utiliza relativamente poca proporción de agua a escala global, el 20% de la extracción total de agua dulce. Aun así, la cantidad de agua utilizada anualmente por la industria va en aumento, por lo que el sector pasará a competir cada vez con más fuerza por unos recursos hídricos limitados junto a las demandas del crecimiento urbano y de la agricultura. El sector industrial es uno de los mayores contaminantes de los recursos hídricos, anualmente vierte entre 300 y 500 millones de toneladas de metales pesados, disolventes, lodos tóxicos y otros residuos sobre las diversas fuentes de agua dulce (ONU, 2011).

Características como la toxicidad, movilidad y carga de los contaminantes industriales pueden tener consecuencias más graves en los recursos hídricos, la salud humana y el medio ambiente que los grandes volúmenes de aguas residuales en sí, por ello, se requiere un control sobre las altas concentraciones de los propios componentes y toxicidad de los contaminantes, procurando mantener la contaminación en los niveles más bajos posibles marcados por la normatividad vigente (Bokova, 2017).

En México, las descargas de aguas residuales se clasifican en municipales (abastecimiento público urbano y rural) y no municipales (otros usos como industria autoabastecida). De acuerdo con cifras oficiales, se trata el 52.7% de las aguas municipales que se generan, y el 32% de las aguas no municipales (Cuevas, 2018). En el estado de Zacatecas los cuerpos de agua presentes de uso humano como mantos acuíferos y represas no son expuestas a contaminantes directos; sin embargo, el desarrollo de la industria y en especial la minera realiza un consumo en

constante aumento sobre estos cuerpos, que para algunos casos ha desarrollado problemas serios con una imperante solución, por la alta presencia de metales pesados, así como el uso de diferentes compuestos químicos para la recuperación de minerales (Cuevas, 2018).

Los efluentes obtenidos en los diferentes procesos de la industria minera, para los que se involucran reactivos tóxicos que permiten la recuperación de minerales de acuerdo al esquema químico empleado, se convierten en las actividades de restablecimiento con mayor enfoque para el área ambiental. La mayoría de los compuestos tóxicos generados industrialmente, particularmente los biorefractarios, son sustancias que representan una preocupación significativa (Dash et al, 2009). El cianuro es un contaminante biorefractario que se encuentra comúnmente en aguas residuales de diversas industrias, incluida la limpieza de metales, placas, galvanoplastia, procesamiento de metales, etc. Como una consecuencia natural de sus propiedades químicas el ion cianuro CN^- expresa una importancia relevante tanto para la industria como para el medio ambiente. En la industria minera, el empleo de cianuros reviste particular importancia debido a la capacidad del ion cianuro CN^- para formar complejos con metales de transición como el oro y la plata (Linarte, 2006).

Es posible que no se conozcan por completo los efectos de diferentes formas de cianuros en los microorganismos, en particular las exposiciones a largo plazo y en bajos niveles de concentración. La eliminación de contaminantes biorefractarios de los efluentes industriales es un problema práctico importante. Para ello, se ha incluido diferentes métodos de tratamiento de aguas residuales existentes, como la adsorción sobre carbón activado, la extracción con solventes y la oxidación química, como en todos los procesos cada uno de estos métodos tienen ciertas limitaciones, como la aplicabilidad limitada y la baja eficiencia (Dash et al, 2009).

Es necesaria la investigación de tecnologías de tratamiento de aguas residuales nuevas o más eficientes para degradar las moléculas refractarias complejas en moléculas más simples como sales minerales, CO_2 y agua, lo cual es vital para mejorar el deterioro de la calidad del agua. La creciente demanda de la sociedad para la descontaminación de aguas contaminadas de diversos orígenes,

materializada en regulaciones cada vez más estrictas, ha impulsado, en la última década, al desarrollo de nuevas tecnologías de purificación (Marchegaini, 2006).

Los procesos de oxidación avanzada (POA), los cuales se basan en procesos fisicoquímicos capaces de producir cambios profundos en la estructura química de los contaminantes, que involucran la generación y uso de especies transitorias poderosas, principalmente el radical hidroxilo (HO^\cdot) (Domenech, 2001). En los últimos años, los procesos avanzados de oxidación (POA) se han desarrollado ampliamente como métodos prometedores para el tratamiento de aguas residuales que contienen contaminantes orgánicos tóxicos (Rajashree et al, 2014). Entre las que destacan, fotocátalisis heterogénea y homogénea, procesos biológicos y una tecnología económica y prometedora la cavitación hidrodinámica.

Debido a esto, en el presente trabajo se busca utilizar una técnica de oxidación avanzada de bajo coste que permita la generación del fenómeno de cavitación para la formación de microburbujas y por ende la formación de radicales hidroxilos capaces de degradar a los compuestos contaminantes (Rajashree et al, 2014) tales como los complejos de cianuro, como primera etapa se analiza el efecto de la cavitación sobre soluciones sintéticas. La cavitación hidrodinámica destaca sobre otras técnicas de oxidación avanzada por emplear sólo métodos físicos, lo que hace que el desarrollo de esta técnica resulte muy económica y viable a largo plazo, como acoplamiento para reducir costos en otras técnicas como la oxidación química a través de agentes reductores.

1.1 Justificación

Actualmente el cianuro es uno de los reactivos de mayor práctica para el beneficio y concentración de metales en la industria minera. Aplicado directamente en las operaciones unitarias de trituración y molienda como agente depresor y en los procesos de lixiviación para la recuperación de metales preciosos por medio de un intercambio iónico. Sin embargo, los altos niveles de toxicidad que representa para el humano y medio ambiente lo catalogan como un reactivo peligroso, por lo que es imperante un tratamiento para la eliminación del mismo antes de ser desechado en los jales de proceso. Los tratamientos empleados por las unidades mineras son

basados en la oxidación química, que requiere de el alto consumo de reactivos para obtener una eficiencia significativa a corto tiempo, con lo que resulta un proceso costoso.

Es por ello, que con el desarrollo de este trabajo se podrá reducir un porcentaje considerable de los efectos tóxicos del cianuro de una manera práctica, con métodos físicos, aprovechando la hidrodinámica de un flujo que al ser sometido a una cámara de cavitación incitará la generación de microburbujas y a su vez radicales hidroxilo con los que se realizará la destrucción de cianuro. Impactando directamente sobre el consumo de reactivos empleados en el proceso de destrucción por oxidación química, logrando de manera económica y simple obtener un efluente con mejores condiciones ambientales de acuerdo a la normatividad vigente.

1.2 Hipótesis

La cavitación hidrodinámica con la generación de radicales hidroxilos favorecerá la eficiencia en la destrucción de cianuro en muestras en blanco y por consiguiente en efluentes mineros o industriales.

1.3 Objetivos

1.3.1 General

Determinar la eficiencia de la cavitación hidrodinámica junto con reductores químicos para la destrucción de cianuros en efluentes mineros e industriales.

1.3.2 Específicos

- Caracterizar los efluentes mineros para establecer necesidades de tratamiento.
- Desarrollar cinéticas de destrucción de cianuros en un sistema Batch con agitación controlada y de oxígeno a través de reductores químicos (Neutralite).
- Desarrollar un prototipo del sistema de reacción por cavitación para llevar a cabo las pruebas experimentales de destrucción.
- Realizar pruebas con CAV para muestras sintéticas de cianuro.
- Realizar pruebas de degradación de cianuro en el sistema CAV/Redox.

Capítulo II. Marco teórico

2.1 Normatividad para el agua

Las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) son ordenaciones técnicas expedidas por dependencias competentes, que tienen como fin establecer características que deben reunir los procesos y servicios cuando estos puedan constituir un riesgo para la seguridad de las personas o dañar la salud humana (ONU, 2011). En materia de que se genere un agua residual (efluente minero) se cuenta con tres normas, (NOM-001-SEMARNAT-1996, NOM-002-SEMARNAT-1996, NOM-003-SEMARNAT-1997) las cuales marcan los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas y/o reusó de aguas residuales.

La NOM-001-SEMARNAT-1996 define al agua residual como aguas de composición variada provenientes de las descargas de usos municipales, industriales, comerciales, de servicios, agrícolas, pecuarios, domésticos, incluyendo fraccionamientos y en general de cualquier otro uso, así como la mezcla de ellas. Asimismo, se considera como contaminantes básicos a aquellos compuestos y parámetros que se presentan en las descargas de aguas residuales y que pueden ser removidos o estabilizados mediante tratamientos convencionales, los cuales son: cianuros, grasas y aceites, materia flotante, sólidos suspendidos totales, demanda bioquímica de oxígeno 5, temperatura y pH. Así como también la presencia de metales pesados (arsénico, cadmio, cobre, cromo, mercurio, níquel, plomo, zinc), coliformes fecales y totales, y huevos de helminto.

Los contaminantes del agua en función a la calidad o las características del agua se clasifican en físicos, químicos y biológicos (Raffo & E., 2014). Entre los contaminantes más importantes del agua creados por las actividades humanas se encuentran microbios patógenos, nutrientes, sustancias que consumen el oxígeno del agua, metales pesados, cianuros y materia orgánica persistente, así como

sedimentos en suspensión y pesticidas, los cuales, en su mayoría, provienen de fuentes difusas (no localizadas). El calor, que eleva la temperatura de las aguas receptoras de vertidos también puede ser considerado un contaminante (UNESCO, 2009)

La Norma Mexicana NMX-AA-058-SCFI-2001 establece dos métodos de análisis para la determinación de cianuros en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas. Estos métodos son el método espectrofotométrico y potenciométrico que están referenciados en los estándares de la Agencia de Protección Ambiental (EPA por sus siglas en inglés) 9010A y 4500-CN-E respectivamente, ambos métodos son utilizados para determinar cianuro total.

Es importante mencionar que el estándar de la EPA 9014 establece el método de determinación de cianuro libre mediante el método de titulación empleando AgNO_3 como agente valorante y rodamina como indicador (EPA, 2014)

El monitoreo del cianuro y otros contaminantes en efluentes es importante, por los posibles impactos que puede ocasionar su liberación al medio ambiente y además porque, en México, el agua es un asunto estratégico y de seguridad nacional que se considera como un elemento central de políticas ambientales y económicas, así como un factor clave del desarrollo social. Lograr que todos los cuerpos de agua superficiales y subterráneos del país recuperen su salud, aporten caudales para satisfacer las necesidades de la población y contribuyan al crecimiento económico y calidad de vida de la población (Peña, et al., 2013) requiere mantener un estricto control de las descargas de aguas residuales urbanas, industriales y agrícolas que los contaminen y afecten más allá de su capacidad natural de asimilación y dilución.

2.2 Cianuro

El cianuro es una sustancia química formada por un triple enlace entre el carbono y nitrógeno (CN) que se combina con una gran mayoría de compuestos orgánicos e inorgánicos (Guerrero, 2013). Su capacidad de combinación con metales como el Fe, Ag, Au, Ni, Zn, Cd, Hg, entre otros, es la clave para comprender la toxicidad y la utilidad del cianuro. Dentro de las distintas formas en las que se puede encontrar

el cianuro se encuentra el ion cianuro que se refiere únicamente al anión CN^- en solución, el ácido cianhídrico o cianuro de hidrógeno (HCN) es un ácido débil, altamente soluble en agua, los compuestos simples de CN son compuestos iónicos que se disocian directamente en el agua liberando un catión y un cianuro, estos provienen de sales como NaCN o KCN . Los cianuros libres y simples pueden convertirse en cianatos (compuestos que contienen un grupo CNO^-) cuando se les somete a procesos de oxidación, además, pueden formar tiocianato (SCN^-), en cambio los organocianuros son compuestos orgánicos que contienen el grupo $-\text{C}=\text{N}$, por ejemplo, las cianhidrinas ($\text{R}_2\text{C}(\text{OH})\text{CN}$), el acrilonitrilo (CH_2CHCN) y el acetonitrilo (CH_3CN) (Fernandez, 2007).

Se le llama cianuro libre al HCN molecular y el ion cianuro (CN^-), el Cianuro Disociable como Ácido Débil (WAD por sus siglas en inglés) son el conjunto de compuestos de cianuro que se disocian bajo reflujo de un ácido débil. Proceden de cianuros de cadmio, cobre, níquel, oro, plata, zinc, entre otros y (Fernandez, 2007) finalmente es nombrado cianuro total a todos los compuestos de cianuro existentes en una solución acuosa. El Instituto Internacional para el Manejo del Cianuro (IIMC, 2012) afirma que el cianuro total es la medida de concentración de cianuro que incluye todo el cianuro libre y todos los complejos de cianuro WAD.

El cianuro es uno de los principales reactivos actualmente usados en mayor proporción para el beneficio y concentración de metales para la industria minera. Aplicado directamente en las operaciones unitarias de trituración y molienda como agente depresor, en los procesos de lixiviación para la recuperación de metales por medio de un intercambio iónico, para la concentración de los mismos (Nava et al, 2007). Sin embargo, los altos niveles de toxicidad que representa para el humano y medio ambiente lo catalogan como un reactivo peligroso, por lo que es imperante un tratamiento para la eliminación del mismo antes de ser desechado en los jales de proceso.

La determinación de cianuro libre presente en el efluente no es suficiente para aseverar que no representa un peligro para el medio ambiente. Existen cianuros complejos formados con los principales cianicidas presentes en las plantas

de lixiviación como el zinc y hierro, que al estar en contacto con la luz ultravioleta de los rayos del sol o la exposición al ácido carbónico producto de la absorción de CO_2 presente en el aire (Nava et al, 2007). Con el tiempo estas exposiciones generan concentraciones de cianuro peligrosas para la vida acuática y humana. Por ello es importante tener en cuenta el análisis del cianuro total (CN_{TOT}); compuesto por cianuro libre (CN) y los complejos débilmente asociados disociables por ácidos, (CN_{WAD}).

La eliminación de cianuro libre no se lleva a cabo en la misma tasa de destrucción que para los complejos de cianuro, los complejos de cianuro oponen una mayor resistencia dependiendo del tipo de metales con los que se encuentra asociado y esto influye directamente en la toxicidad del efluente ante la exposición al medio con el tiempo. Entre los principales compuestos relacionados con el cianuro aparte de la interacción con iones metálicos destacan; el tiocianato, cianato y el amoníaco (Nava et al, 2007).

2.3 Cavitación hidrodinámica (CH)

La cavitación es un fenómeno que aparece en líquidos cuando la presión disminuye por debajo de la presión del vapor líquido a la temperatura existente. Como consecuencia de la cavitación aparecen núcleos de vaporización que pueden presentarse en forma de burbujas, bolsas o ambos. Las burbujas de vapor son arrastradas con el líquido hasta una región donde se alcanza una presión más elevada y allí desaparecen (Martínez, 2006).

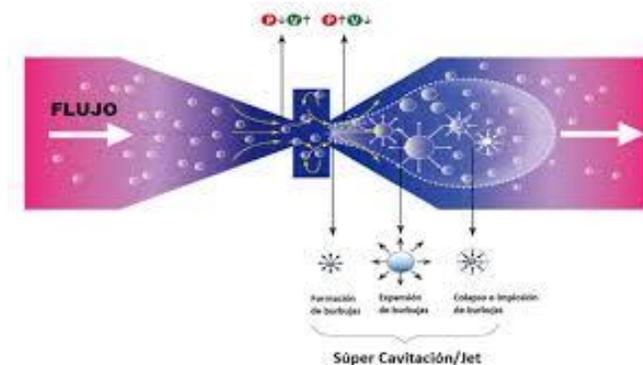


Figura 1. Principio de la cavitación al ocupar un tubo Venturi.

Bajo tensiones de tracción un líquido generalmente se separa a la presión de vapor. La formación de cavidades se presenta a partir de una ruptura de líquidos y las fuerzas de tensión necesarias para romper el líquido. A estas fracturas previas se las denomina “núcleos de cavitación”, estos núcleos son diminutas burbujas de gases adheridas a materiales sólidos presentes en los líquidos o burbujas retenidas en fisuras en los conductos de transporte del mismo (Marchegaini, 2006). La presión de vapor permite el crecimiento de estas micro-burbujas hasta una forma visible de las mismas.

Una vez que la burbuja se condensa, se produce un desplazamiento de las partículas de fluido que la rodean y que se precipitan para colmar el vacío, produciéndose un impacto localizado conocido como golpe de ariete (Marchegaini, 2006). La sobrepresión, consecuencia de este fenómeno, se propaga en el seno del fluido provocando la condensación de la burbuja siguiente y el fenómeno se repite sucesivamente. El proceso de generación y desaparición de las burbujas de vapor tienen periodos de duración muy pequeños, lo que produce cambios violentos en la presión y en la temperatura, de allí la gran energía liberada con la que se alcanzan temperaturas y presiones locales muy altas (4.000-10.000 K y 1.000-10.000 bares en el centro de las burbujas colapsadas (Domenech, 2001).

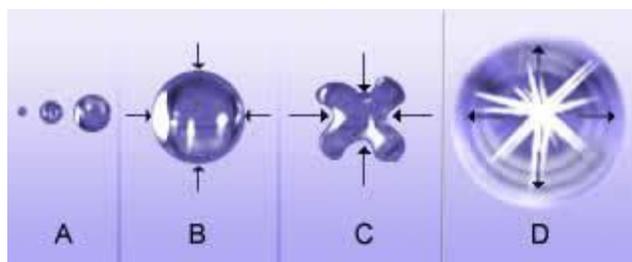


Figura 2. Formación de burbujas y fenómeno de implosión.

Dados estos periodos de tiempo y las condiciones de cavitación, el agua se descompone en elementos extremadamente reactivos: átomos de hidrógeno (H) y radicales hidroxilo (OH). El radical hidroxilo es uno de los agentes oxidantes más potentes encontrado en la naturaleza, con un potencial de oxidación de 2,8 volts, solo después del flúor (Tabla 1).

Tabla 1. Potenciales Redox de algunos agentes oxidantes, adaptada de (Domenech, 2001)

Especie	E° (V, 25°C)
Flúor	3.03
Radical hidroxilo	2.80
Oxígeno atómico	2.42
Ozono	2.07
Peróxido de hidrógeno	1.78
Radical perhidroxilo	1.70
Permanganato	1.68
Dióxido de cloro	1.57
Ácido hipocloroso	1.49
Cloro	1.36

La generación de los diferentes radicales ocurre a través de tres procesos: reacciones de H_2O supercrítica, pirólisis directa, y reacciones con los radicales generados por la reacción térmica (1), o por las reacciones (3)-(5) en presencia de oxígeno, durante el enfriamiento rápido, los átomos de hidrógeno y radicales hidroxilo se recombinan a peróxido de hidrogeno H_2O_2 (2) (Domenech, 2001).



Se distinguen cuatro diferentes tipos de cavitación de acuerdo de cómo las burbujas son generadas (como la energía es absorbida en el líquido) (Carrillo, et al., 2012)

- **Cavitación hidrodinámica:** se produce por variaciones de presión debido a los cambios de geometría del sistema que contiene un flujo de algún líquido.
- **Cavitación Acústica:** se enfocan ondas acústicas en un líquido que producen cambios de presión local.
- **Cavitación Óptica:** es producida por la ruptura del líquido por fotones de alta intensidad (láser enfocado en el interior de un líquido).
- **Cavitación por Partículas:** es producida por el bombardeo de partículas elementales enfocadas al interior de un líquido.

Actualmente han tenido un mayor desarrollo en investigación y aplicación las dos primeras. Sin embargo, la cavitación hidrodinámica resulta mucho más efectiva para el uso industrial que la acústica. Al no requerir (Martínez, 2006):

- La distribución espacial de los centros de cavitación no está limitada a la capa límite adyacente al transductor ultrasónico.
- El volumen expuesto es comparativamente más grande.
- Vida de la burbuja más larga.
- Mezcla más intensa.
- Mayor eficiencia energética.

La cavitación hidrodinámica es una técnica económica y competitiva por su simplicidad y gran poder de destrucción en tiempos breves. Su eficiencia recae en el diseño del sistema y el control de las diferentes variables que se presentan, siendo la presión inicial o de trabajo la que representa mayor valor. Además, la recesión en el uso de reactivos para la destrucción provoca una alta reducción de costos a nivel industrial.

2.4 Antecedentes o estado del arte

Con el objetivo de reducir al máximo el riesgo potencial que representa el cianuro en efluentes mineros, se han desarrollado diferentes procesos para la

destrucción de cianuro, con el uso de diferentes elementos como agentes químicos, reductores electrolíticos, técnicas de adsorción y procesos de oxidación avanzada. Como ya se ha mencionado existe una variedad de métodos desarrollados para la destrucción de cianuro, sin embargo, las técnicas de oxidación avanzada presentan una notable eficiencia en comparación a otras.

La cavitación hidrodinámica a pesar de tener una ventaja en simplicidad y costo beneficio sobre otras técnicas de oxidación avanzada no ha concretado un escalamiento a nivel industrial, ya que el desarrollo de estudios previos sobre la misma es poco extenso. A la fecha solo se han expuesto estudios sobre el tratamiento de efluentes con contaminantes orgánicos, como aguas residuales, pesticidas, o colorantes en el agua, pero no directamente con el efecto de cianuro, excepto por algunos en los que se analiza la destrucción de ferrocianuro de potasio o cianatos. A pesar de esto los efectos por cavitación hidrodinámica para los contaminantes orgánicos son muy similares a los evaluados en cianuro, puesto que para el desarrollo de los trabajos se manejen sistemas parecidos y se controlan las mismas variables.

En el trabajo realizado por (Anand et al, 2009) para el “tratamiento de aguas residuales industriales mediante cavitación hidrodinámica y procesamiento Fenton heterogéneo avanzado”, se expone la combinación de ambas técnicas con el objetivo de reducir costos para el proceso Fenton mencionando el acoplamiento de la cavitación hidrodinámica como tratamiento preliminar. Para el desarrollo del trabajo experimental se consideran condiciones de inicio con un volumen de 25 L, la modificación de variables como el pH y temperatura, además, de la determinación del tiempo de residencia y la presión necesaria para obtener una mejor eficiencia del proceso, con base al sistema expresado en la Figura 3. Integrado por un tanque de alimentación, una bomba centrífuga, una serie tubular que contiene un controlador de flujo un manómetro digital previo a la cámara de cavitación, un manómetro analógico en la cámara de cavitación, el reactor Fenton y un flujo de retorno al tanque de alimentación.

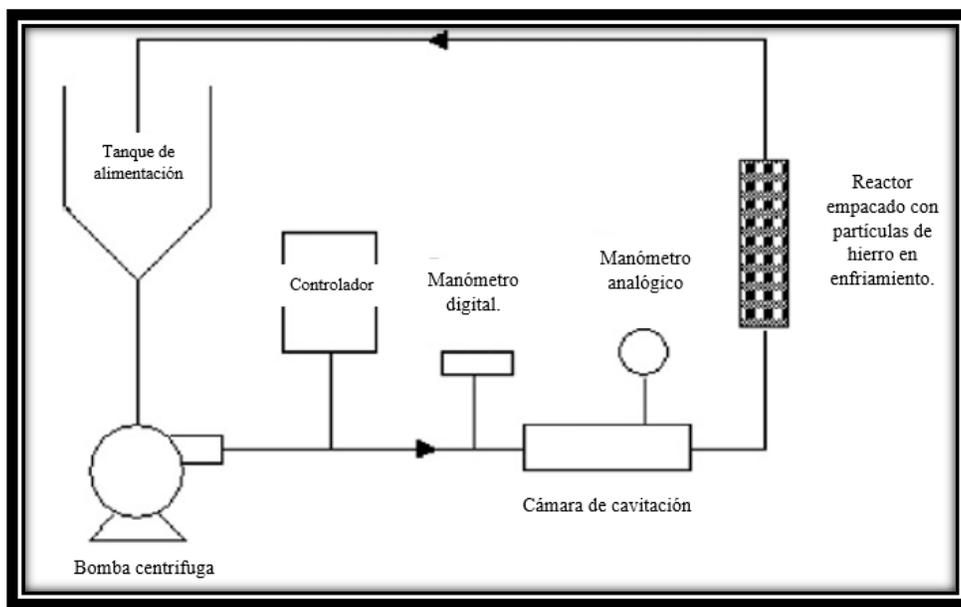


Figura 3. Componentes del sistema de Cavitación y Fenton heterogéneo, adaptada de (Anand et al, 2009)

Tabla 2. Resultados destacados para el efecto de cada variable en la destrucción compuesta por cavitación hidrodinámica y Fenton heterogénea

Variable	Resultados
Presión	Los valores de presiones altas favorecen la degradación por el aumento de la cantidad de burbujas generadas. La eficiencia más alta se destacó a 1500 psi (10340 KPa) con aproximadamente un 60% de destrucción.
Temperatura	El proceso de cavitación hidrodinámica tiene una mayor eficiencia con bajas temperaturas, se evalúa el rango de 20°C a 30°C, y elige la mayor por el proceso Fenton que requiere una mayor temperatura.
Tiempo de residencia	Los tiempos evaluados manejan rangos de 15 a 60 min. Se obtuvo que a tiempos cortos (15min) se obtiene una mejor eficiencia energética.

En el estudio de (Ravi & Parag, 2012), para la degradación de un pesticida altamente tóxico usado en la India por cavitación hidrodinámica, se destacan buenos resultados sobre la eficiencia obtenida para el tratamiento de este efluente. Donde se evalúan presión inicial, concentración, efecto del pH, temperatura, además del acoplamiento de catalizadores como H_2O_2 y CCl_4 .

El tratamiento del pesticida (diclorvos) es obligatorio debido a su alto nivel de toxicidad y contaminación, en el desarrollo del estudio realizado para la degradación por medio de cavitación hidrodinámica se trabajaron con muestras de 20ppm en concentración, parámetros de 3 a 6 bares de presión inicial, efectos del pH con valores ácidos, temperaturas bajas y efectos de varios catalizadores.

En la Figura 4 se muestra el sistema empleado para el desarrollo de las pruebas, que consiste en un sistema de circuito cerrado, que incorpora un tanque de alimentación, una bomba nominal de 1.1 kW, una línea de by-pass, un componente en paralelo de dos cámaras de cavitación, un flujo-metro, tres manómetros analógicos.

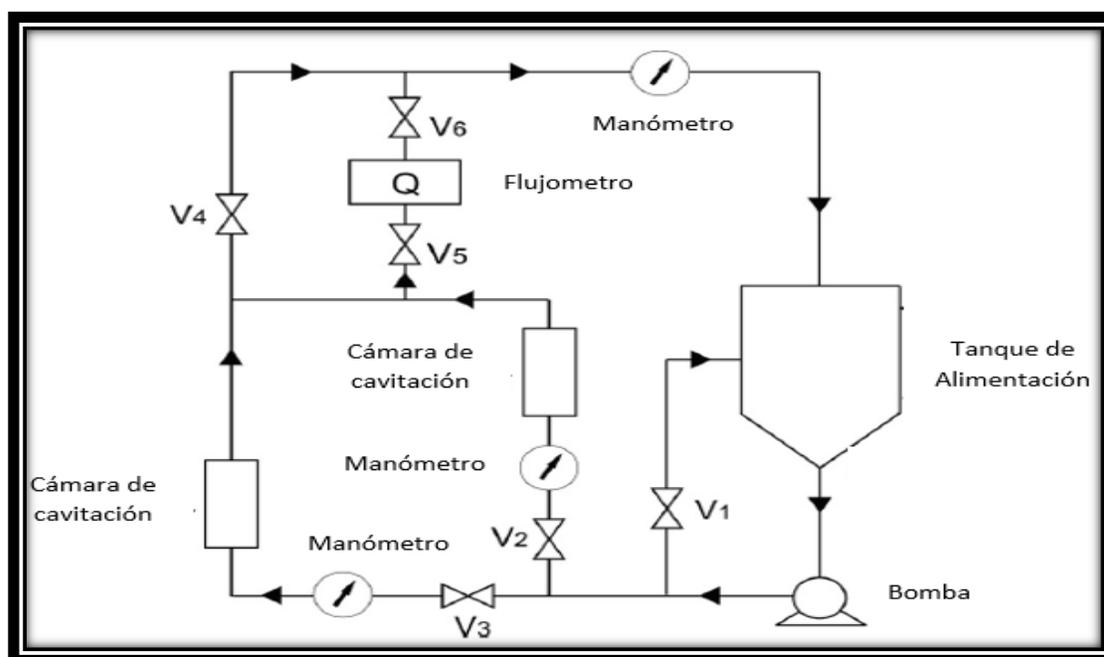


Figura 4. Sistema experimental del reactor de cavitación hidrodinámica para destrucción de diclorvos, adaptada de (Ravi & Parag, 2012)

Tabla 3. Valores obtenidos de cada una de las variables evaluadas para la destrucción por cavitación hidrodinámica para el efluente con diclorvos.

Variable	Resultados
Presión	La presión es una de las variables con mayor influencia sobre el efecto de cavitación, el valor ideal de presión es de 5 bares en el rango de trabajo, en este valor el proceso de cavitación demuestra una mejor eficiencia. El colapso de la cavidad depende de la velocidad de recuperación de la presión en la sección de expansión. Con presiones mayores el colapso de la cavidad es más violento, con ello un aumento en el grado de disociación de las moléculas de agua que generan más radicales hidroxilo.
Temperatura	La temperatura influye directamente sobre la presión y crecen exponencialmente, por ello con temperaturas bajas se obtienen mejores resultados en la destrucción, por ello es necesario tener un monitoreo para su control.
Tiempo de residencia	Los tiempos evaluados para las pruebas se extendieron alrededor de 30 a 60 min, pero con un mayor efecto en el tiempo de 60 min. Con un aumento de destrucción.
pH	Se favorece la destrucción de efluentes con valores de pH menores para el fenómeno de cavitación hidrodinámica, con un rango de evaluación de 6 a 3, destacando un aumento de 18% con valores de 3.

El tratamiento de efluentes con especies de cianuro por medio de la cavitación hidrodinámica como menciona (Rajashree et al, 2014), resulta potencialmente viable con concentraciones no tan elevadas de cianuro.

Sin embargo, los efectos siempre están en función de las especies, en el tratamiento de aguas con cianuro, evalúan un complejo de cianuro; ferrocianuro de potasio $K_4Fe(CN)_6$, trabajando con las variables de concentración en un rango de 20 a 200ppm, presiones de 3 a 7 bares, aplicación de pH bajos y tiempos de residencia constantes de 2 horas.

En la Figura 5, se representa el sistema empleado para el desarrollo experimental de las pruebas trabajadas en la destrucción del $K_4Fe(CN)_6$, en un circuito cerrado; conformado por un tanque de alimentación, 3 válvulas de control, 1 bomba centrípeta de 1kw, una cámara de cavitación (tubo Venturi), dos manómetros para el control de presión.

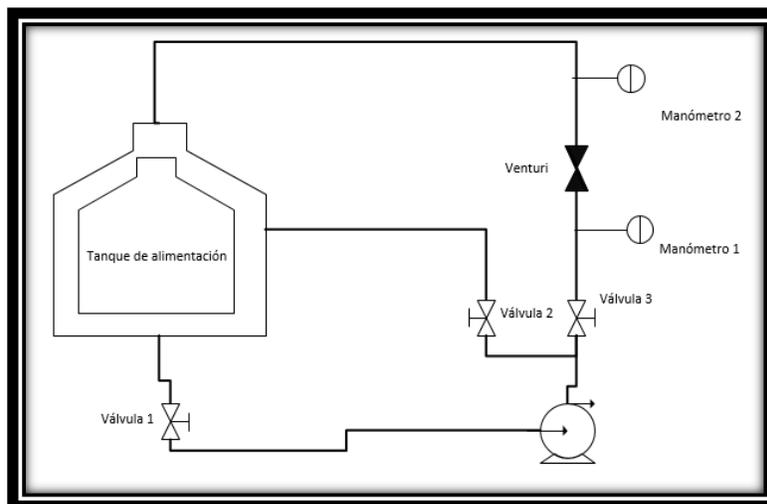


Figura 5. Sistema de cavitación hidrodinámica empleado para la destrucción del $K_4Fe(CN)_6$, adaptada de (Rajashree et al, 2014)

Tabla 4. Resultados para cada variable evaluada en la destrucción del $K_4Fe(CN)_6$ por cavitación hidrodinámica.

Variable	Resultados
Presión	Los valores de presiones altas favorecen la degradación por el aumento de la cantidad de burbujas generadas. La eficiencia más alta se destacó a 6 bares, previo a la formación de la nube de burbujas que crea el efecto de cavitación ahogada con aproximadamente un 60% de destrucción.
Temperatura	El proceso de cavitación hidrodinámica tiene una mayor eficiencia con bajas temperaturas, se evalúa el rango de 20°C a 30°C, y elige la mayor por el proceso Fenton que requiere una mayor temperatura.
Tiempo	Los tiempos evaluados manejan rangos de 15 a 60 min. Se obtuvo que a tiempos cortos (15min) se obtiene una mejor eficiencia energética.

La aplicación de la cavitación hidrodinámica en el trabajo de (Jawale & Gotate, 2018) para la degradación de cianatos en efluentes procesados de la industria, se desarrolló evaluando varios parámetros como presión de inicio, efecto del pH, uso de algunos agentes oxidantes como H_2O_2 y O_3 , y catalizadores de CuO , ZnO y TiO_2 .

Tabla 5. Resultados más significativos de cada una de las variables evaluadas en la degradación de cianatos en efluentes procesados en la industria.

Variable	Resultados
Presión	El rango de trabajo establecido para el desarrollo de las pruebas fue de 2 a 5 bares, determinando 4 bares como el valor de presión óptima. Sin, embargo se hace notar que la mejor degradación ocurre con los incrementos de presión por la formación de nubes de burbujas, antes de llegar a una sobre formación que crea un colapso amortiguado.
pH	Los valores bajos de pH favorecen la generación de radicales hidroxilo, para este estudio se usaron valores de 2 a 10, encontrando como óptimo 2, de acuerdo con las pruebas y la literatura reportada.
Agentes oxidantes (H_2O_2 y O_3).	El uso de H_2O_2 , contribuye con la generación de radicales hidroxilos de manera significativa, el valor de consumo estequiométrico con relación 1:1, muestra valores de 74% de degradación, con el aumento en las relaciones se crea un exceso de reactivo que provoca el mismo efecto de acuerdo con la cinética de reacción. La adición de O_3 por inyección, desarrolla una disociación que genera un aumento en la concentración de radicales hidroxilos. Sin embargo, su alto poder de oxidación contribuye en la degradación sin el efecto de disociación. El valor máximo de degradación alcanzado es de 72%, poco menor a el H_2O_2 , pero de igual manera significativo.
Catalizadores (CuO, ZnO y TiO_2)	El catalizador con la mejor interacción de ozono en condiciones determinadas como ideales; de presión y pH constantes, fue el CuO , alcanzando valores de 88.1% en degradación con un tiempo de 120 min.

Los valores de concentración, volumen y tiempo se evalúan como constantes; 20 mg/L, 4 L y 120 min respectivamente. Para el desarrollo de las pruebas se trabaja un dispositivo con circuito cerrado de un tanque de alimentación, bombeando un flujo con una bomba de 1.1 kW a la cámara de cavitación (tubo Venturi) por tuberías directas, el control de presión con el uso de manómetros, en entrada y salida de la cámara.

Las pruebas con el uso de diferentes agentes oxidantes y catalizadores se evalúan por separado y en combinación, pero con concentraciones constantes, para su posterior comparación en el análisis de resultados (Tabla 5).

2.5 Diseño del Cavitador propuesto por Varela (2019)

En el siguiente apartado se muestra el diseño desarrollado por (Varela, 2019) y, es en el que se basa el prototipo CAV utilizado en este trabajo para llevar a cabo las pruebas de destrucción de cianuro en muestras en blanco. El diseño propuesto por (Varela, 2019) es representado bajo una configuración en forma de Venturi el cual consta de: 1) un volumen efectivo (dominio) para el transporte de los contaminantes; 2) una garganta (cambio de presión); 3) dos cámaras una convergente y otra divergente; 4) una alimentación del influente y, 5) una salida. La Figura 6 presenta el Cavitador que diseñaron para la degradación de compuestos contaminantes del agua.

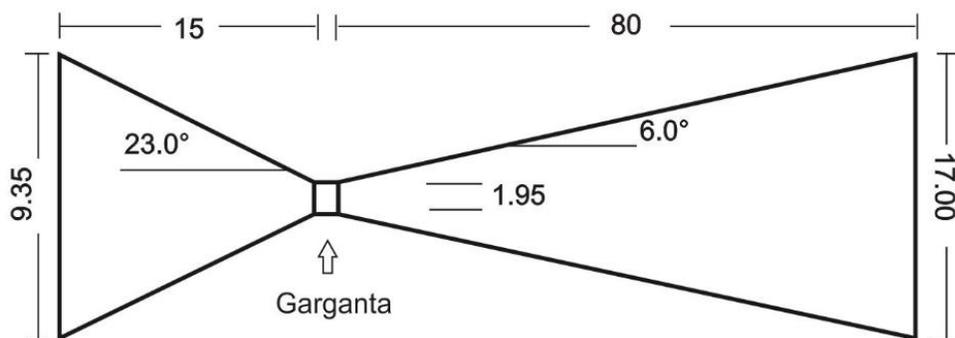


Figura 6. Configuración del tubo Venturi propuesto por (Varela, 2019)

En la misma Figura 6 se muestran las dimensiones en *mm* utilizadas en su configuración. Cabe destacar que para el desarrollo de su configuración abordaron un estudio teórico para la degradación de un fármaco analgésico desinflamatorio (diclofenaco). El modelo matemático que utilizaron para la obtención de los perfiles de velocidad, presión y concentración de su contaminante problema en su Cavificador constaron de las ecuaciones típicas de transporte de momentum y convección-difusión para el transporte de masa. Esto es, ecuaciones para fluidos incompresibles de Navier-Stokes en estado estacionario, la ecuación de continuidad y la ecuación de convección-difusión.

Cabe destacar, que para el transporte de masa consideran la influencia de un coeficiente de difusión molecular del contaminante problema, D , debido a que en su sistema el fluido fue agua contaminada con un contaminante; sin embargo, en este trabajo el término convectivo fue mucho mayor en magnitud al término difusivo. En su primera etapa, sólo consideran la influencia de los cambios de presión en su sistema como indicativo del fenómeno de cavitación. Además, despreciaron la dispersión axial debido a que es mucho menor en magnitud al término convectivo (Varela, 2019). En seguida se muestran las ecuaciones que consideraron:

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u}) = -\nabla \left[-P\mathbf{I} + \mu(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) - \frac{2}{3}\mu(\nabla \cdot \mathbf{u})\mathbf{I} \right] + \mathbf{F} \quad (6)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (7)$$

$$\nabla \cdot (-D\nabla c) + \mathbf{u} \cdot \nabla c = R \quad (8)$$

La Figura 7a y b se presentan los perfiles transversales de velocidad obtenidos por (Varela, 2019) junto a sus líneas de corriente en el Venturi mientras que la Figura 7b los perfiles de concentración de diclofenaco. Se puede observar en la Figura 7a un aumento en la velocidad en la garganta del equipo, lo que hace pensar en un descenso en su presión (ver Figura 6).

Esta variación muestra la generación del fenómeno de cavitación. En la Figura 7b obtuvieron la variación de la concentración del contaminante que utilizaron; además, observaron la concentración más alta a la entrada de la cámara

divergente del Venturi y conforme avanzaba el flujo a través de la cámara perciben un descenso en su concentración. Es necesario mencionar que en la entrada convergente no muestran perfiles de concentración, esto debido a que en esta zona no tienen generación del fenómeno de cavitación, por lo que la concentración en esta zona corresponde a la inicial.

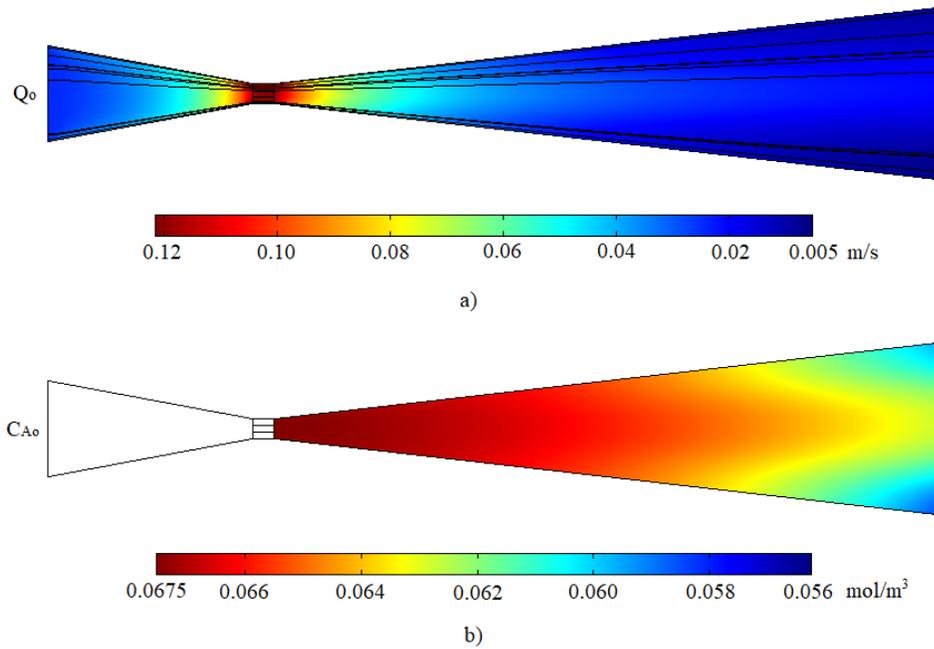


Figura 7. Perfiles transversales de: a) velocidad junto a sus líneas de corriente; y, b) concentración en el Venturi en la cámara divergente obtenidos por (Varela, 2019)

Finalmente, este diseño realizado por (Varela, 2019) fue el utilizado en el siguiente trabajo terminal para llevar a cabo la construcción del prototipo CAV y que más adelante en el siguiente capítulo se mostrará con más lujo de detalle.

Capítulo III. Metodología

3.1 Diseño experimental

En la Figura 8 se encuentra descrito el diagrama para el desarrollo de las pruebas en la destrucción de cianuro con reductores químicos (Reactor Batch), para el que se establecieron 3 diferentes concentraciones de cianuro (250, 500, 1000 ppm) para evaluar un rango que sea representativo al proceso ocupado por la unidad minera. Se propuso la evaluación de dos relaciones molares; 1:1 y 2:1 para el análisis del efecto generado por el reductor químico Neutralite en intervalos cortos de tiempo (1, 3, 5, 10, 20, 40 min) para evaluar su eficiencia durante los primeros minutos del muestreo con un pH constante. La relación 2:1 considera un exceso de agente químico para la destrucción de cianuro.

Para las pruebas experimentales de destrucción por cavitación hidrodinámica, se plantea el siguiente esquema observado en la Figura 7, se puede observar que se va a trabajar con las mismas concentraciones que en el proceso de oxidación química. Además, se desea evaluar tres diferentes presiones de 1, 2, y 3 bares, para 4 intervalos de 30 min completando un tiempo de tratamiento de 120 min; de acuerdo con la bibliografía revisada, manteniendo el pH y temperatura constantes.

3.1.1 Destrucción de cianuro con reductores químicos (Reactor batch)

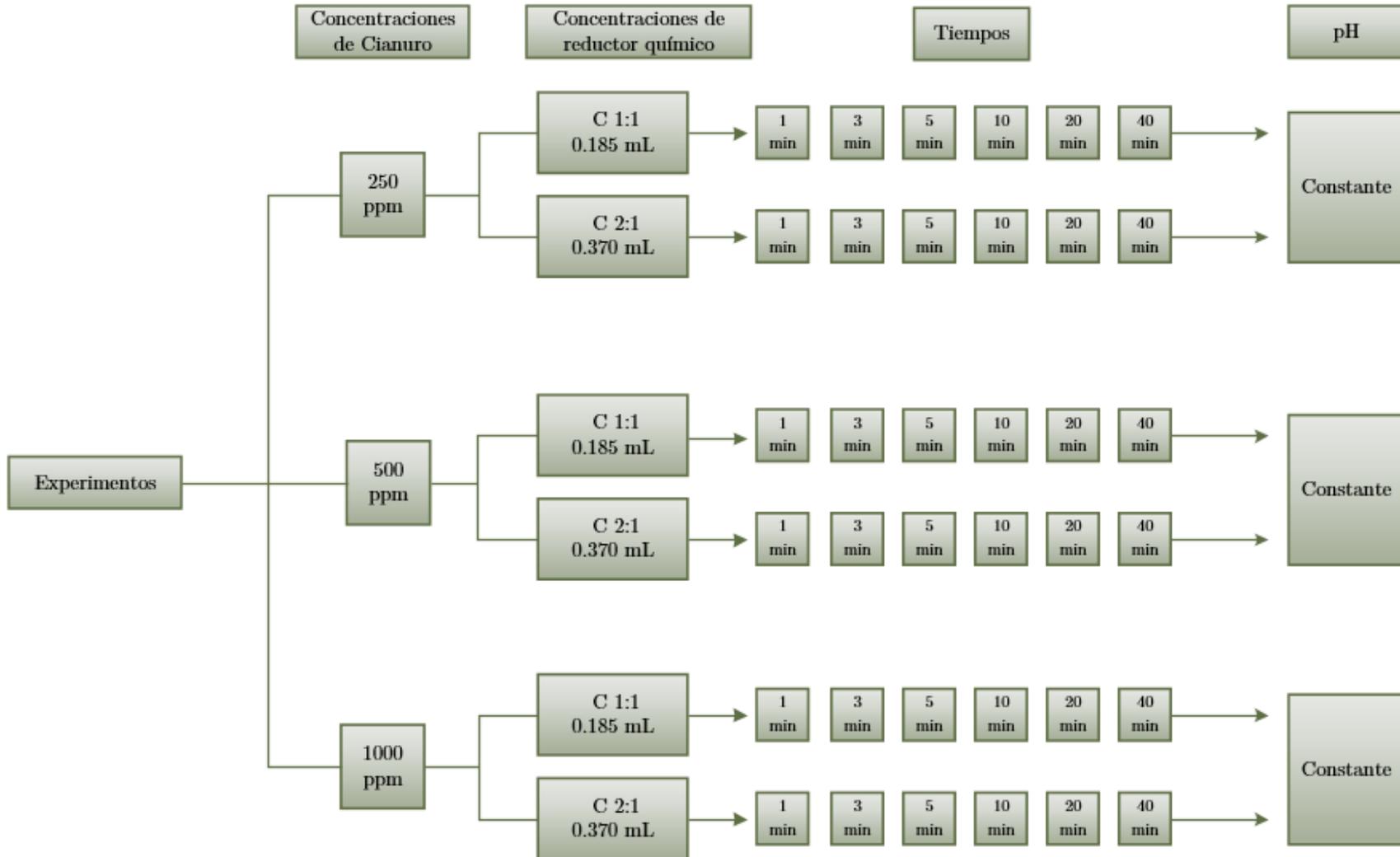


Figura 8. Cuadro de diseño experimental para las pruebas de destrucción con reductor químico

3.1.2 Destrucción de cianuro por cavitación hidrodinámica

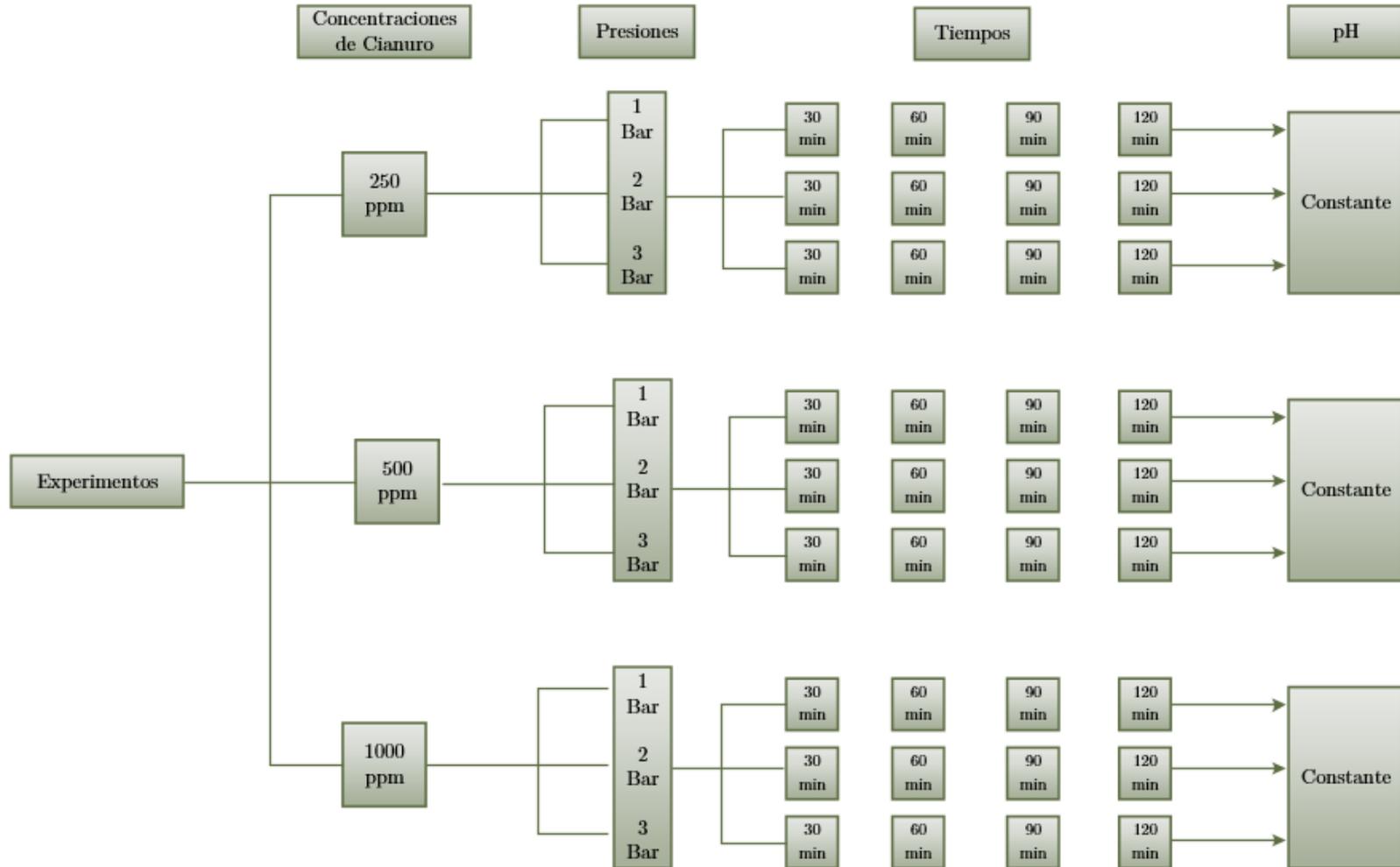


Figura 9. Cuadro de diseño experimental para pruebas de cavitación hidrodinámica

3.2 Desarrollo de pruebas

3.2.1 Toma de muestra.

La importancia de una muestra representativa es fundamental para la cuantificación de las propiedades del analito. Todas las interacciones con el medio, así como la conservación de la misma pueden influir directamente para la creación de interferencias que afectan en la precisión y exactitud de los valores determinados (Keith, 1991).

1. Se recolectó 1L de muestra para cada análisis, en recipientes de plástico.
2. Se modificó el pH de las muestras subiéndolo hasta valores de entre 11 y 12 con la adición de hidróxido de sodio 1M, se almacenaron las muestras en refrigeración a 4°C.
3. Las muestras sólo se conservaron por un periodo de 14 días, previo al análisis.
4. Al término de este período se depositaron en un contenedor de residuos.

3.2.2 Destrucción de cianuro con reductores químicos (Reactor Batch)

El reactor tipo Batch o por lotes, es un reactor donde no existe flujo de entrada ni de salida, es simplemente un reactor con un agitador que homogeneiza la mezcla. Una vez que se ha tratado un lote, se vacía el reactor, y se puede entonces tratar un segundo lote, con el previo lavado correspondiente. Por la falta de flujos de entrada y salida la ecuación del balance de masa se simplifica de la siguiente manera:

$$V \frac{dC}{dt} = V \frac{dC}{dt} \rightarrow \frac{dC}{dt} = \frac{dC}{dt} \quad (9)$$

Con ello se evalúa el cambio de concentración a lo largo del tiempo, en pocas palabras el resultado de la reacción química. Aplicando el modelo de una cinética de primer orden.

$$\frac{dC}{dt} = -kC \quad (10)$$

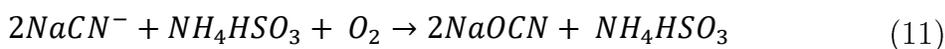
Varios compuestos químicos, principalmente residuos o efluentes de la industria son degradados a partir de cinéticas de primer orden, generando un gráfico con una tendencia en decrecimiento o reducción, de C_0 a C_f . (M. Iborra, 2013)

Soluciones madre cianuro de sodio (250, 500, 1000 ppm)

1. Se pesaron 0.25g y 0.5g de cianuro de sodio para cada solución respectivamente.
2. Se midió 1L de agua destilada en una probeta para cada solución.
3. Se calibro el potenciómetro con los estándares de 7 y 10.
4. Se determinó el pH del agua y elevo a 10.5 con hidróxido de sodio 1M.
5. Se agregó el cianuro de sodio y disolvió en el volumen de 1L con un agitador magnético y parrilla de agitación.
6. Se cubrieron los vasos de precipitado con parafilm.

Procedimiento

1. Se agregó la solución madre al reactor de 1L para cada una de las concentraciones.
2. Se instalaron las diferentes conexiones, para poder utilizar el software (Armfield: Reactor Batch, isotérmico).
3. Se instalaron el electrodo del potenciómetro y la inyección de aire con una bomba (Evans).
4. Se inició la operación de agitación desde el software.
5. Se agregó a el reactor, el reductor químico (Neutralite) con una relación 1:1 y 2:1 de acuerdo con la estequiometria y prueba.



$$Moles_{NaCN} = \frac{0.250g}{98g/mol_{NaCN}} = 2.55 \times 10^{-3} mol$$

$$Gramos = 2.55 \times 10^{-3} mol * 99g/mol = 0.252g NH_4HSO_3$$

$$\rho = 1.36$$

$$V = m/\rho = \frac{0.252}{1.36} = 0.185\text{mL}$$

Tabla 6. Relación de dosificación ppm vs mL para Neutralite.

[ppm]	[mL]
250 ppm	0.185
500 ppm	0.375
1000 ppm	0.750

6. Se tomaron muestras en distintos tiempos; 1,3,5, 10 y 20 min.
7. Se realizó la determinación de la concentración de cianuro por titulación con nitrato de plata y espectrofotometría.
8. Se realizó un análisis de datos correspondiente.

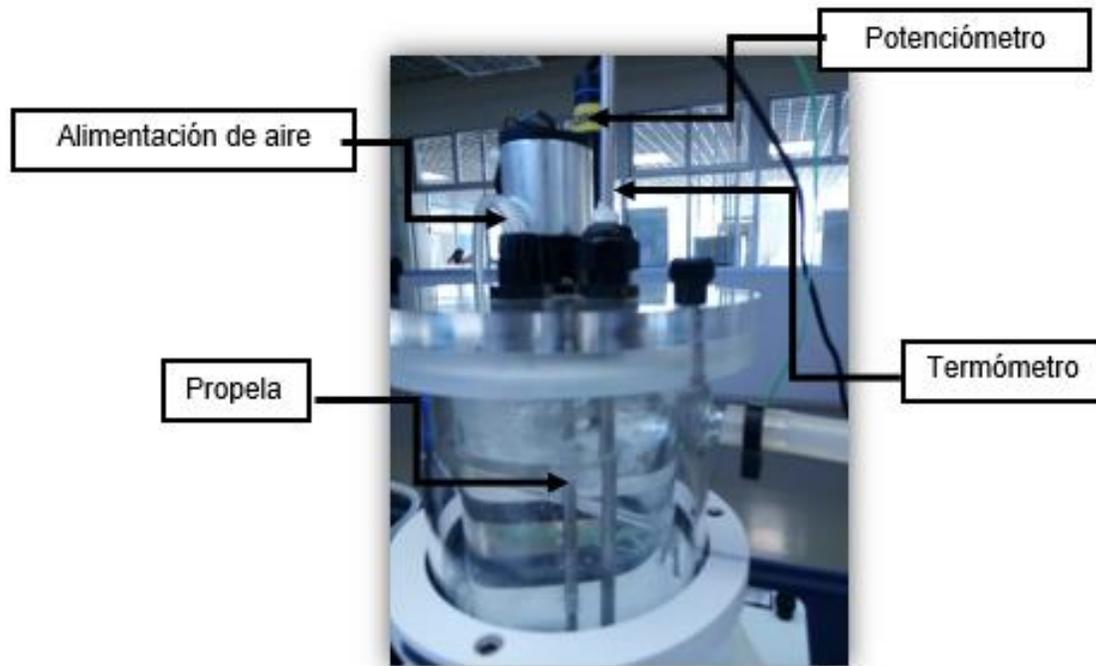


Figura 10. Reactor batch

3.2.3 Destrucción de cianuro por cavitación hidrodinámica

Se define como cavitación hidrodinámica a la ruptura del líquido, la cual da paso a la formación de burbujas de gas (cavidades) que crecen y posteriormente colapsan (implosionan) a una velocidad mayor que la del sonido, emitiendo ondas de choque (ondas de presión abrupta) (Marchegaini, 2006).

En contraste con la ebullición, la cual puede ser causada por la introducción de calor o por una reducción de la presión estática ambiente del líquido, la cavitación es una vaporización local del líquido, inducido por una reducción hidrodinámica de la presión. La condición física fundamental para la aparición de la cavitación es que la presión en el punto de formación de estas bolsas caiga hasta la tensión de vapor del fluido en cuestión (Marchegaini, 2006).

Soluciones madre cianuro de sodio (250, 500, 1000 ppm)

1. Se pesaron 1.75g, 3.5g y 7g de cianuro de sodio para cada solución respectivamente.
2. Se midieron 7L de agua destilada en una probeta para cada solución.
3. Se calibró el potenciómetro con los estándares de 7 y 10.
4. Se determinó el pH del agua y elevo a 10.5 con hidróxido de sodio 1M.
5. Se agregó el cianuro de sodio y disolvió en el volumen de 7L con una varilla por agitación manual.
6. Se agregaron los 7L al tanque de alimentación de 20 litros y cerro el tanque.

Procedimiento

1. Se diseñó el prototipo del sistema de destrucción por cavitación hidrodinámica.
2. Se realizó la construcción de la cámara de cavitación (tubo Venturi) con datos de transferencia de masa, flujos y presiones. Este modelo se imprimió en una impresora 3D.

3. Se trabajó el acoplamiento de la cámara de cavitación a un sistema de flujo continuo, con tubos de $\frac{3}{4}$ de pulgada.
4. Se conectaron los tubos por medio de reducciones a la bomba de alimentación, al tanque de alimentación.
5. Se instalaron 2 manómetros en la entrada y salida respectivamente.
6. Se agregó un flujómetro en el circuito de tubos, conectado a un software para su monitoreo (Arduino).
7. Se completó la conexión del sistema de destrucción de cianuro en continuo con la integración de una salida y una descarga en un tanque de 20 litros.
8. Se evaluaron los valores óptimos de presión, a partir de pruebas experimentales alcanzado la máxima presión de 3 bares.
9. Se evaluó el efecto de le pH en la destrucción de cianuro (10.5).
10. Se trabajó el sistema de destrucción de cianuro por cavitación hidrodinámica en diferentes pruebas para las concentraciones mencionadas (250, 500, 1000 ppm).
11. Se muestreó la descarga del tanque a los diferentes tiempos; 30, 60, 90 y 120 min.
12. Se realizó la determinación de cianuro libre por volumetría, para valores bajos se aplicó el análisis por espectrofotometría.

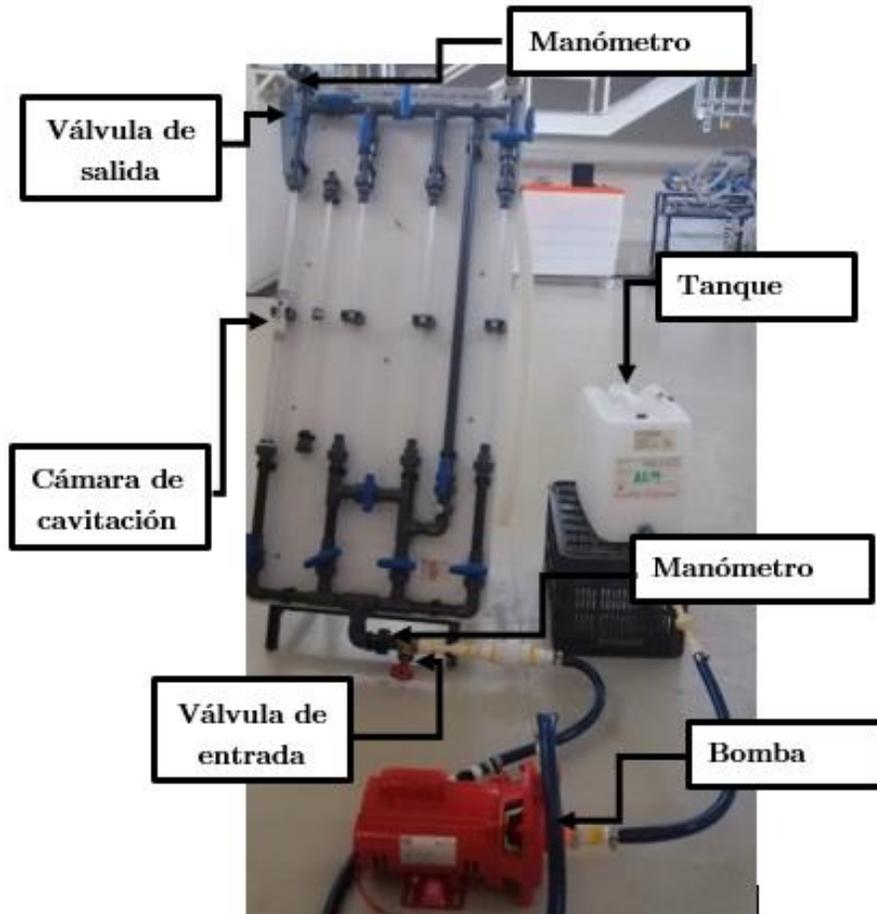


Figura 11. Dispositivo de reacción por cavitación Hidrodinámica.

3.3 Análisis de muestras

3.3.1 Análisis por espectrofotometría.

La espectrofotometría estudia los fenómenos de interacción de la luz con la materia. En esta interacción la luz puede ser emitida, reflejada, transmitida o absorbida. De acuerdo a la ley de conservación de la energía, se puede determinar la luz total como un 100%, por lo tanto, ante una interacción es posible calcular las fracciones de radiación transmitida o reflejada y con ello estimar por diferencia cuanta fue absorbida (Arenas Sosa & López Sánchez, 2004).

Un espectrofotómetro es un instrumento utilizado para determinar a qué longitud de onda la muestra absorbe la luz y la intensidad de absorción. Pese a la existencia de la variación de los modelos, en todos se incluye una fuente de luz, un selector de longitud de onda, un contenedor para la muestra, un detector de luz y un medidor.

El método de espectrofotometría se utiliza en la determinación de la concentración de cianuros inorgánicos en aguas residuales, potables y naturales. Este método puede evaluar la concentración de cianuros inorgánicos presentes en forma de sales simples solubles o como radicales complejos de acuerdo con la norma mexicana para la determinación de cianuros totales, (NMX-AA-058-SCFI-2001).

En el desarrollo de este trabajo las soluciones madre se elaboraron con cianuro de sodio a diferentes concentraciones (250, 500, 1000 ppm). A continuación, se describen los reactivos y el procedimiento que se llevó a cabo.

Reactivos

- Cianuro de potasio (KCN)
- Hidróxido de sodio (NaOH)
- Cloramina-T soluble en polvo
- Ácido clorhídrico concentrado (HCl)
- Ácido acético glacial (CH₃COOH)
- Piridina (C₅H₅N)
- Ácido barbitúrico (C₄H₄N₂O₃)
- Acetato de sodio trihidratado (NaC₂H₃O₂ • 3H₂O)

Preparación de soluciones

- **Cloramina-T soluble en polvo**
 1. Se pesó 1 g de cloramina.
 2. Se disolvió el gramo en 70 mL de agua destilada.
 3. Se aforó en 1 matraz volumétrico a 100 mL.
- **Ácido barbitúrico ($C_4H_4N_2O_3$)**
 1. Se pesaron 15 g de ácido barbitúrico.
 2. Se agregaron a un matraz y lavaron las paredes con 5mL de agua.
 3. Se agregaron 75 mL de piridina y agito.
 4. Se agregaron 15 mL de ácido clorhídrico concentrado y agito.
 5. Se aforó en un matraz volumétrico de 250 mL.
 6. Se almacenó en frascos ámbar y refrigeración
- **Acetato de sodio trihidratado ($NaC_2H_3O_2 \cdot 3H_2O$)**
 1. Se pesaron 410 g de acetato de sodio.
 2. Se disolvieron en 500 mL de agua destilada.
 3. Se agregó ácido acético glacial para llevar a un pH de 4.5 (aproximadamente 500 mL).
- **Solución de hidróxido (0.04N)**
 1. Se pesó 1.6 g de hidróxido de sodio.
 2. Se hirvió aproximadamente 1L de agua.
 3. Se aforó en un matraz volumétrico de un litro con el agua hervida.

- **Soluciones madre de cianuro**
 1. Se pesaron 1.6 g de hidróxido de sodio y 2.510 g de cianuro de potasio.
 2. Se disolvieron en 500 mL de agua.
 3. Se aforó en un matraz volumétrico de 1L.
- **Soluciones estándar de cianuro**
 1. Se tomaron 10 mL de solución madre.
 2. Se aforó en matraz de 1L con la solución de hidróxido de sodio, para obtener una solución de 10 ppm de CN^- .
 3. Se tomó una alícuota de 10 mL de la solución de 10 ppm de CN^- , se aforó a 100 mL con la solución de hidróxido de sodio.

Calibración

1. Se tomaron diferentes alícuotas de 10 mL, entre 1 a 10 ppm de CN^- ,
2. Se aforó cada una en un matraz volumétrico de 50 mL con 40 mL de hidróxido de sodio.
3. Se utilizaron 40 mL de hidróxido de sodio como blanco.
4. Se midió la absorbancia a 578 nm en celdas de 1cm de paso óptico de luz.
5. Se graficaron los valores de absorbancia obtenidos contra la concentración de las soluciones estándar.
6. Se determinó el coeficiente de correlación para evaluar la calidad.

Procedimiento

1. Se tomó una alícuota de un matraz de 50 mL y diluyó en 40 mL de hidróxido de sodio.
2. Se añadió 1 mL de acetato de sodio y 2 mL de Cloramina-T.
3. Se mezcló la solución por inmersión un par de veces.
4. Se dejó estabilizar por 2 min.
5. Se añadieron 5 mL de ácido piridín-barbitúrico y se aforo.
6. Se mezcló y dejó estabilizar por 8 min.
7. Se midió la absorbancia utilizando el blanco de calibración a 578 nm.

Cálculos

Calcular la concentración de CN^- utilizando la siguiente ecuación:

$$CN^-_{\left(\frac{\mu g}{mL}\right)} = \frac{A * B}{C * D} \quad (12)$$

Donde:

- **A** son los μg CN^- obtenidos (50 mL de volumen final), calculados con la ecuación de la recta de la curva de calibración;
- **B** es el volumen de la disolución adsorbente en la destilación, en mL;
- **C** es el volumen original de la muestra usado en la destilación, en mL,
- **D** es el volumen de la disolución adsorbente usada para realizar el desarrollo de color, mL.

Reportar los resultados en mg de CN^- /L con la precisión correspondiente

3.3.2 Análisis por Volumetría

Consiste en la determinación de la concentración de una sustancia mediante una valoración, que es el cálculo de volumen necesario de una sustancia de

concentración conocida (solución patrón) que ha de reaccionar completamente con la sustancia a analizar.

Para el caso de cianuro este método es aplicado para concentraciones mayores a 5 ppm, en soluciones claras. La técnica se desarrolla en base a la reacción entre nitrato de plata con el ion cianuro en condiciones alcalinas formando un complejo soluble $Ag(CN)_2^-$. De acuerdo con la reacción:



Cuando el titulante se encuentre en exceso tiende a precipitarse como $AgCN$, sin embargo, el punto final de la titulación se expresa con el vire y una turbidez permanente (Nava et al, 2007).

En el desarrollo de este trabajo las soluciones madre se elaboraron con cianuro de sodio a diferentes concentraciones (250, 500, 100 ppm). A continuación, se describen los reactivos y el procedimiento que se llevó a cabo.

Reactivos

- **Solución de hidróxido de Sodio (1M)**
 1. Se pesaron 40 g de hidróxido de sodio.
 2. Se agregó agua destilada en un vaso precipitado de 1L (aproximadamente 800 mL).
 3. Se disolvieron los 40 g con un agitador magnético en una parrilla de agitación.
 4. Se agregó la solución en un matraz volumétrico de 1L y se aforó con agua destilada.
 5. Se depositó la solución en un frasco ámbar de 1L de volumen.

- **Solución de nitrato de plata (4.3329g)**
 1. Se pesaron 4.3329 g en peso seco, con una temperatura de 40°C en el horno.

2. Se agregó agua destilada en un vaso precipitado de 1L (aproximadamente 800 mL).
 3. Se disolvieron los 4.3329 g con un agitador magnético en una parrilla de agitación.
 4. Se agregó la solución en un matraz volumétrico de 1L y se aforó con agua destilada.
 5. Se depositó la solución en un frasco ámbar de 1L de volumen.
- **Solución de Rodamina.**
 1. Se pesaron 5 g de rodamina.
 2. Se midió un volumen de aproximadamente 80 mL de Acetona.
 3. Se disolvieron los 5 g con un agitador magnético en una parrilla de agitación.
 4. Se agregó la solución a un matraz volumétrico de 100 mL y aforo con acetona.
 5. Se depositó la solución en dos goteros de 75 mL y 25 mL respectivamente.

Procedimiento

1. Se montó el sistema de titulación; soporte universal, bureta, pinza de bureta).
2. Se cargó la bureta con el nitrato de plata hasta que el menisco quedara en cero.
3. Se tomó un volumen de 10 mL de muestra con una pipeta.
4. Se depositaron los 10 mL en vaso de precipitado.
5. Se agregaron tres gotas de indicador de rodamina y agito.
6. Se inició la titulación lentamente hasta un vire de amarillo a salmón.
7. Se anotó el valor de volumen gastado.

Cálculos

De acuerdo con la determinación de cianuro libre o cianuro de sodio se expresan las siguientes formulas:

$$ppm CN^- = \frac{(306.3)(V_g)[AgNO_3]}{V_a}$$

$$ppm NaCN = \frac{(577)(V_g)[AgNO_3]}{V_a}$$

Donde:

- V_g = Volumen gastado de nitrato de plata (mL).
- V_a Volumen tomado de solución problema (mL).
- $[AgNO_3]$ Concentración de la solución de nitrato de plata (g/L).

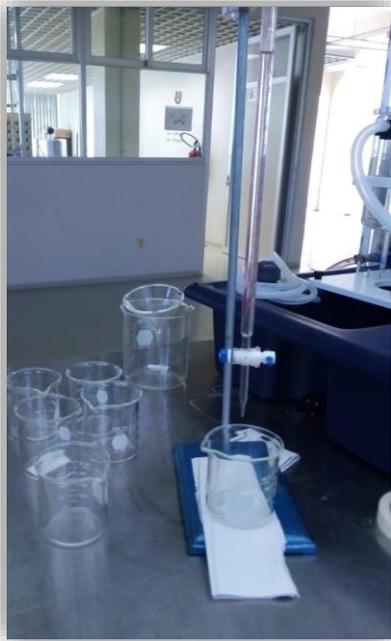


Figura 13. Sistema de titulación

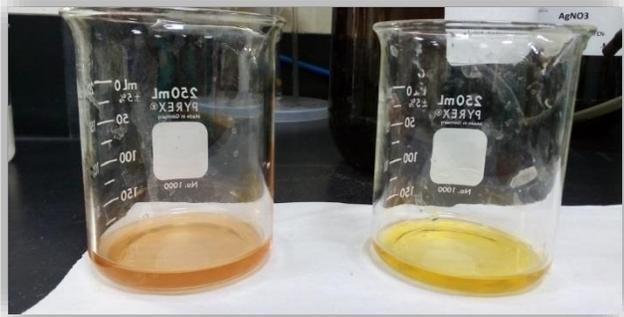


Figura 12. Solución muestra antes y después de la titulación

Capítulo IV. Análisis de resultados y discusión

4.1 Valores de caracterización del efluente minero

Se presentan los resultados del muestreo aplicado para la caracterización del efluente generado por la industria minera Saucito. En las tablas 7 y 8 se observan los valores de las concentraciones encontradas en el efluente minero, para los diferentes elementos que constituyen la solución a tratar. En muestras de alimentación y descarga del reactor de destrucción química, así como los valores en el agua de proceso para revisar la influencia sobre las concentraciones requeridas para el proceso de lixiviación.

Tabla 7. Valores de las diferentes concentraciones de cada elemento en el efluente.

	Fe	K	Mg	Na	Pb	Zn
Muestra	g/L	mg/L	mg/L	mg/L	g/L	g/L
Agua de proceso	0.001	349.2	83.02	1018	0.001	0.002
Agua alimentación détox	0.003	321	6.85	2568	0.001	0.677
Agua descarga détox	0.001	406.8	41.01	2595	0.001	0.085

Tabla 8. Valores de las diferentes concentraciones de cada elemento en el efluente.

	Ag	Au	Ca	Cl	CN Libre	CN Total	Cu	F
Muestra	mg/L	mg/L	g/L	g/L	mg/L	mg/L	g/L	g/L
Agua de proceso	0.05	0.05	0.534	0.219	4.15	18.47	0.001	0.018
Agua alimentación détox	0.92	0.05	0.718	2.358	662.3	373.1	0.05	0.011
Agua descarga détox	0.05	0.09	0.556	1.596	16.2	33.86	0.001	0.015

Debido al objetivo general planteado para el desarrollo de este proyecto, en el que solo se busca analizar el efecto de cavitación hidrodinámica sobre soluciones sintéticas de cianuro como primera etapa. Se elige como referencia la concentración de cianuro libre presente, que da la pauta en el diseño experimental a desarrollar, lo que permitió establecer un intervalo de concentraciones a tratar, obteniendo resultados que se puedan comparar con la aplicación de destrucción química a nivel industrial.

4.2 Destrucción de cianuro con reductores químicos (Reactor batch)

A continuación, se presentan los resultados obtenidos tras la realización de las pruebas para el reactor Batch en diferentes concentraciones (250, 500, 1000 ppm). Evaluando intervalos de tiempo cortos, por la alta eficiencia presentada en los primeros minutos de exposición con el efluente. Con variables de potencial de hidrogeno y temperatura constante; 11 y 27°C respectivamente, considerando las propiedades del cianuro y su capacidad de generar ácido cianhídrico en bajos valores de pH, además, de la relación inversa entre ambas variables.

En las Tablas 9 y 10 se presentan los valores obtenidos con la realización de las pruebas de oxidación química con las relaciones molares de 1:1 y 2:1, para la concentración de 250 ppm de cianuro y un porcentaje de destrucción para un mejor análisis del proceso, con diferentes relaciones de acuerdo con la estequiometria.

Tabla 9. Prueba 1; destrucción con Neutralite relación 1:1 para 250 ppm.

[CN ⁻] ₀ (ppm)	250 ppm								[Neutralite]	1:1 (0.185mL)								
Tiempo (min)	0	1	3	5	10	20	40	120										
[CN ⁻] _f (ppm)	250	200	150	140	100	84	70	22										
% Destrucción	0	20	40	44	60	66.4	72	91										

Tabla 10. Prueba 2; destrucción con Neutralite relación 2:1 para 250 ppm

[CN ⁻] ₀ (ppm)	250 ppm								[Neutralite]	2:1 (0.37mL)								
Tiempo (min)	0	1	3	5	10	20	40	120										
[CN ⁻] _f (ppm)	250	132	110	70	57	41	32	0										
% Destrucción	0	47.2	56	72	77.2	83.6	87.2	100										

En la Figura 14 se observan las tendencias de descenso, corroborando una destrucción de cianuro con alta eficiencia en los primeros minutos. Para ambas relaciones (1:1 y 2:1), se esperaría que para el caso donde la cantidad estequiométrica más alta tuviera un efecto de mayor en la destrucción de cianuro, pero no es así, ya que no revela una diferencia considerable entre ambas, por lo que resulta recomendable trabajar la relación 1:1 en concentraciones relativamente bajas para evitar un alto consumo de reactivos, considerando tendencias muy similares conforme al tiempo.

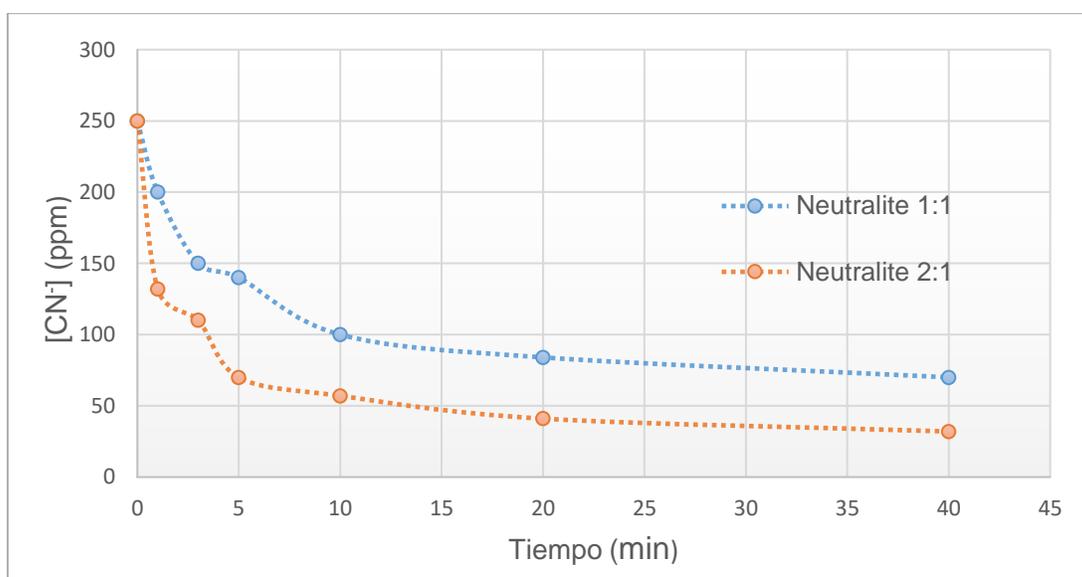


Figura 14. Perfiles de concentración de cianuro en función del tiempo, con relaciones 1:1 y 2:1 para 250 ppm.

Las Tablas 11 y 12 expresan valores de la concentración conforme al tiempo para la concentración de 500 ppm de cianuro, replicando las condiciones que se emplearon en las pruebas con concentración de 250 ppm de cianuro, con las diferentes relaciones (1:1 y 2:1) de acuerdo a la estequiometría y su porcentaje de destrucción.

Tabla 11. Prueba 3; destrucción con Neutralite relación 1:1 para 500 ppm.

[CN]⁻₀ (ppm)	500ppm							
[Neutralite]	1:1 (0.185mL)							
Tiempo (min)	0	1	3	5	10	20	40	120
[CN⁻]_f (ppm)	500	275	275	267	225	225	220	196
% Destrucción	0	45	45	46.6	55	55	56	61

Tabla 12. Prueba 4; destrucción con Neutralite relación 2:1 para 500 ppm.

[CN⁻]₀ (ppm)	500ppm							
[Neutralite]	2:1 (0.37mL)							
Tiempo (min)	0	1	3	5	10	20	40	120
[CN⁻]_f (ppm)	500	235	185	160	120	98	90	30
% Destrucción	0	53	63	68	76	80.4	82	94

En la Figura 15 se presenta el cambio de concentración de cianuro con el tiempo utilizando 500 ppm de cianuro a diferentes relaciones estequiométricas de Neutralite. Observando tendencias de destrucción de cianuro con las mismas relaciones; 1:1 y 2:1, sin embargo, existe un comportamiento diferente al cambio de concentración.

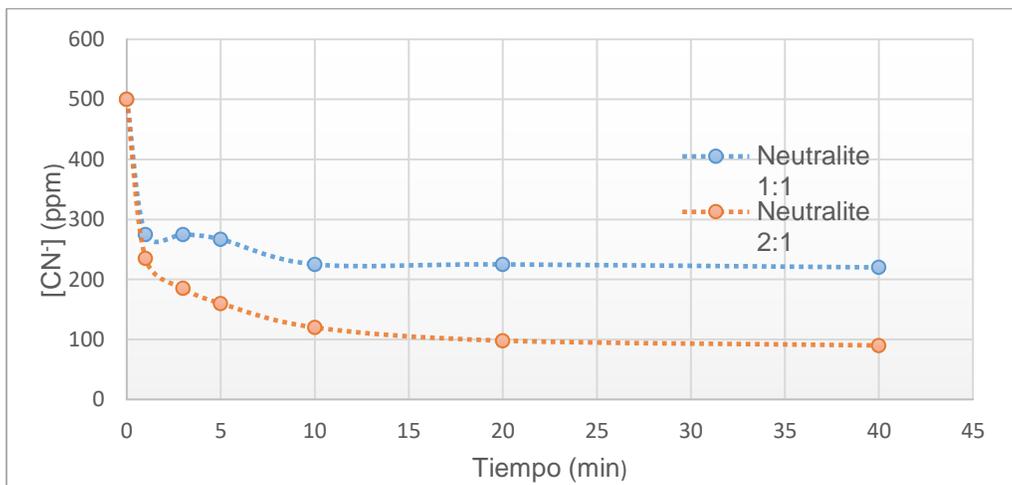


Figura 15. Perfiles de concentración de cianuro en función del tiempo, con relaciones 1:1 y 2:1 para 500 ppm.

En la primera relación expresa una destrucción importante, pero se mantiene constante al paso del tiempo, por lo que se muestra una diferencia significativa entre ambas concentraciones, por lo que resulta mejor trabajar con el doble de concentración considerando su alta eficiencia en un menor tiempo.

En las Tablas 13 y 14 se presentan los valores obtenidos con las pruebas a una concentración de 1000 ppm de cianuro en los diferentes intervalos de tiempo, además de un porcentaje de destrucción para un mejor análisis de datos, en diferentes relaciones de acuerdo con la estequiometría.

Tabla 13. Prueba 5; destrucción con Neutralite relación 1:1 para 1000 ppm.

[CN ⁻] ₀ (ppm)	1000ppm								[Neutralite]	1:1 (0.185mL)								
Tiempo (min)	0	1	3	5	10	20	40	120										
[CN ⁻] _f (ppm)	1000	757	680	557	476	412	400	244										
% Destrucción	0	24.3	32	44.3	52.4	58.8	60	76										

Tabla 14. Prueba 6; destrucción con Neutralite relación 2:1 para 1000 ppm.

[CN ⁻] ₀ (ppm)	1000ppm								[Neutralite]	2:1 (0.37mL)								
Tiempo (min)	0	1	3	5	10	20	40	120										
[CN ⁻] _f (ppm)	1000	400	350	275	245	190	175	87										
% Destrucción	0	60	65	72.5	75.5	81	82.5	91										

La Figura 16 muestra las tendencias en una concentración de 1000 ppm para la destrucción de cianuro, con relaciones 1:1 y 2:1. Donde se observa un comportamiento similar con las pruebas anteriores en diferentes concentraciones, comprobando la alta eficiencia en los primeros minutos. Considerando esto se puede observar que en altas concentraciones resulta más eficiente trabajar con una relación mayor.

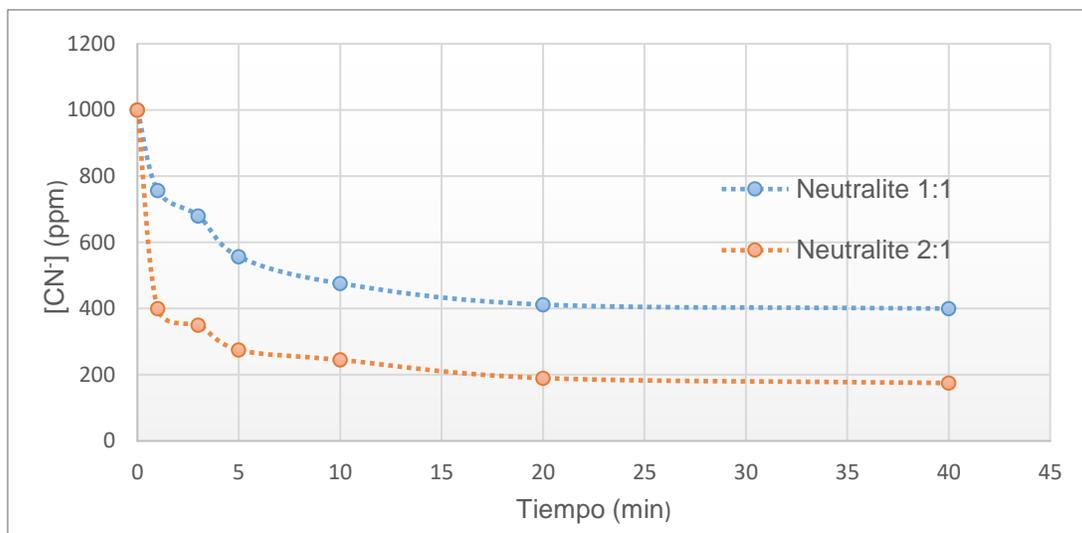


Figura 16. Perfiles de concentración de cianuro en función del tiempo, con relaciones 1:1 y 2:1 para 1000 ppm.

En las Figuras 17 y 18 se presentan los gráficos del porcentaje de destrucción de cianuro, con los diferentes perfiles de concentración de forma comparativa por cada relación. Se puede observar que en la relación 1:1 es aplicable para bajas concentraciones demostrando un mayor porcentaje de destrucción, alcanzando valores de 72% en los primeros 40 min de interacción, considerando las altas eficiencias del reactivo desde el minuto 1.

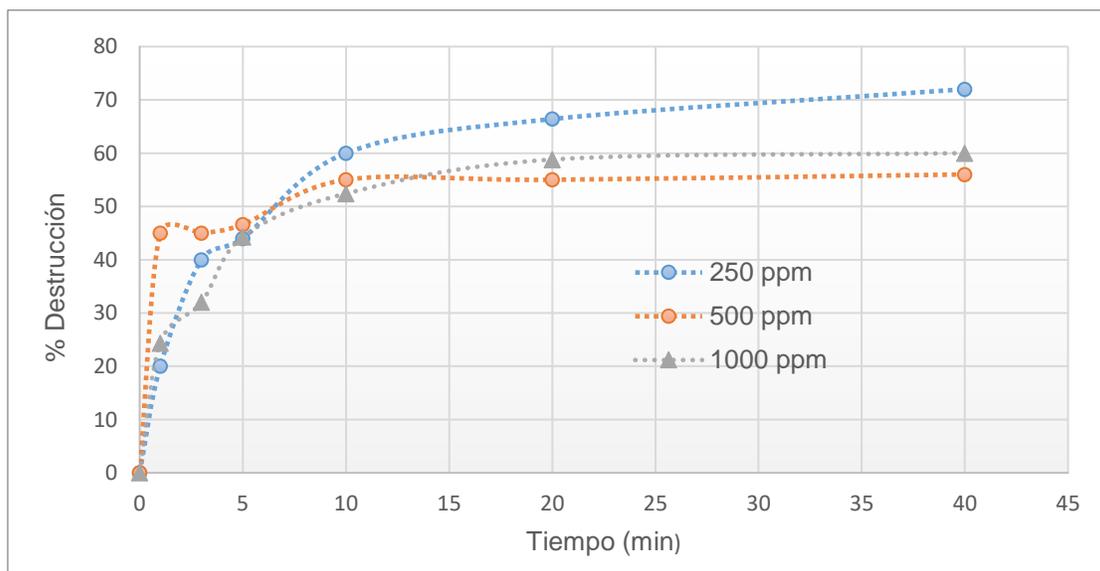


Figura 17. Comparación de perfiles de porcentaje de destrucción de las diferentes concentraciones con relación 1:1.

Además, en este gráfico se observó que con un mayor tiempo de residencia se logra la destrucción en un 100%. Para este proyecto se trabajó como tiempo máximo 120 min, con el que se alcanza un 91% de destrucción, de acuerdo con los valores de la Tabla 5.

La relación 2:1 es la más eficiente con concentraciones altas de acuerdo con lo mostrado en la Figura 18, donde se observan valores que superan el 80% de destrucción en 40 minutos. Para las concentraciones de 500 y 1000 ppm de cianuro se observa una tendencia muy similar, por lo que con un tiempo mayor a 120 min de residencia se completa el 100 % de destrucción.

Desde una perspectiva industrial el consumo de reactivos para lograr una eficiente destrucción se mantendrá elevado, por las altas concentraciones que contienen los efluentes. Por ello, es necesario la implementación de otras técnicas que permitan una disminución en el consumo de reactivos (Neutralite), para de esta manera realizar una reducción de costos.

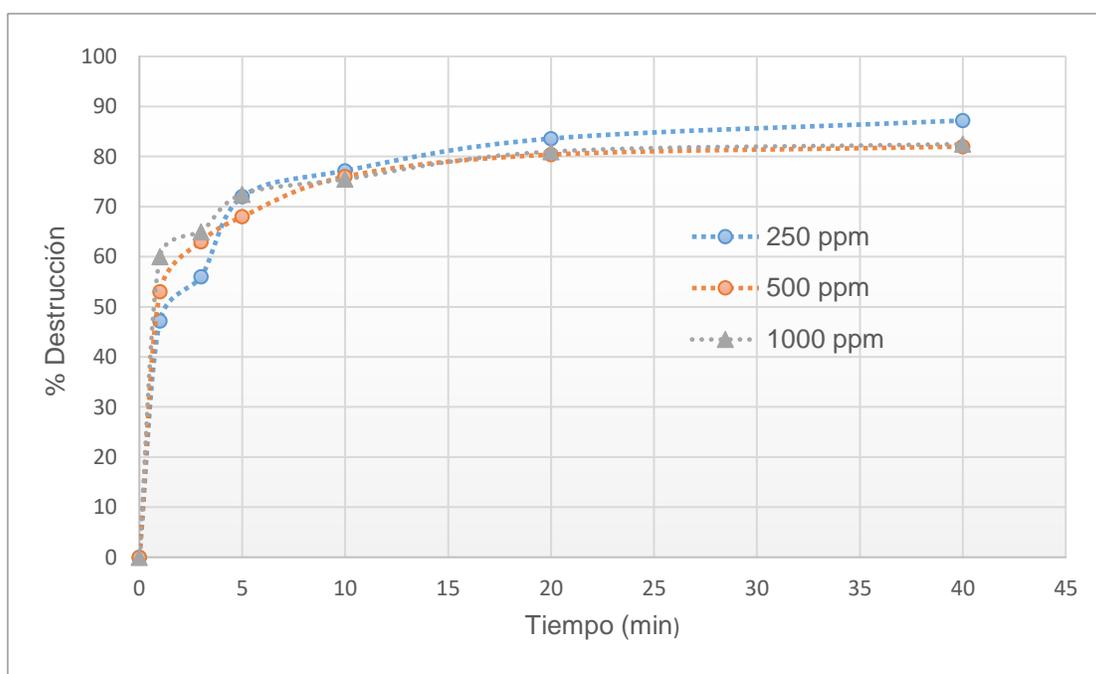


Figura 18. Comparación de perfiles de porcentaje de destrucción de las diferentes concentraciones con relación 2:1

4.3 Destrucción de cianuro por cavitación hidrodinámica

A continuación, se presentan los resultados obtenidos con la realización de las pruebas por cavitación hidrodinámica para las diferentes concentraciones (250, 500 y 1000 ppm). Cada concentración fue evaluada por tres presiones (1,2 y 3 bares), con intervalos de 30 minutos para muestreo y un tiempo de residencia de 2 horas. Con un control de potencial de hidrógeno, oxígeno disuelto y temperatura.

En las Tablas, 15, 16 y 17 se muestran los valores obtenidos con las diferentes variables y el porcentaje de destrucción conforme al tiempo, evaluando de manera independiente cada una de las diferentes presiones con una concentración de 250ppm.

Tabla 15. Promedio de los valores en las pruebas evaluadas en 1 bares de presión.

Promedio de presiones					
[CN] ^o (ppm)	583.33				
Presión (bar)	1				
Tiempo (min)	[CN] ^f (ppm)	% Destrucción	pH	[OD] (ppm)	Temperatura (°C)
0	583.33	0.00	10.80	7.11	22.00
30	523.33	11.63	10.94	7.56	24.33
60	491.00	16.80	11.05	7.76	26.80
90	482.00	19.27	11.13	8.19	28.00
120	448.67	23.27	11.23	8.57	28.53

Tabla 16. Promedio de los valores en las pruebas evaluadas en 2 bares de presión.

Promedio de presiones					
[CN] ^o (ppm)	583.33				
Presión (bar)	2				
Tiempo (min)	[CN] ^f (ppm)	% Destrucción	pH	[OD] (ppm)	Temperatura (°C)
0	583.33	0.00	11.10	6.57	25.33
30	515.00	12.00	11.21	7.14	28.40
60	481.00	17.77	11.26	7.44	31.97
90	449.00	25.13	11.35	7.95	33.10
120	410.33	32.30	11.47	8.13	33.87

Tabla 17. Promedio de los valores en las pruebas evaluadas en 3 bares de presión.

Promedio de presiones					
[CN] ^o (ppm)	583.33				
Presión (bar)	3				
Tiempo (min)	[CN] ^f (ppm)	% Destrucción	pH	[OD] (ppm)	Temperatura (°C)
0	583.33	0.00	10.83	6.88	24.67
30	460.00	20.67	10.67	7.92	31.00
60	407.00	30.53	10.45	12.11	35.97
90	363.33	37.77	10.50	15.07	40.20
120	324.33	44.87	10.50	16.87	42.35

En la Figura 18 se observan las tendencias de concentración de cada presión, donde la concentración promedio inicial es de 583.3 ppm, todas las tendencias están en descenso y con un comportamiento similar. Sin embargo, se muestra que, a mayor presión inicial se alcanza una destrucción mayor.

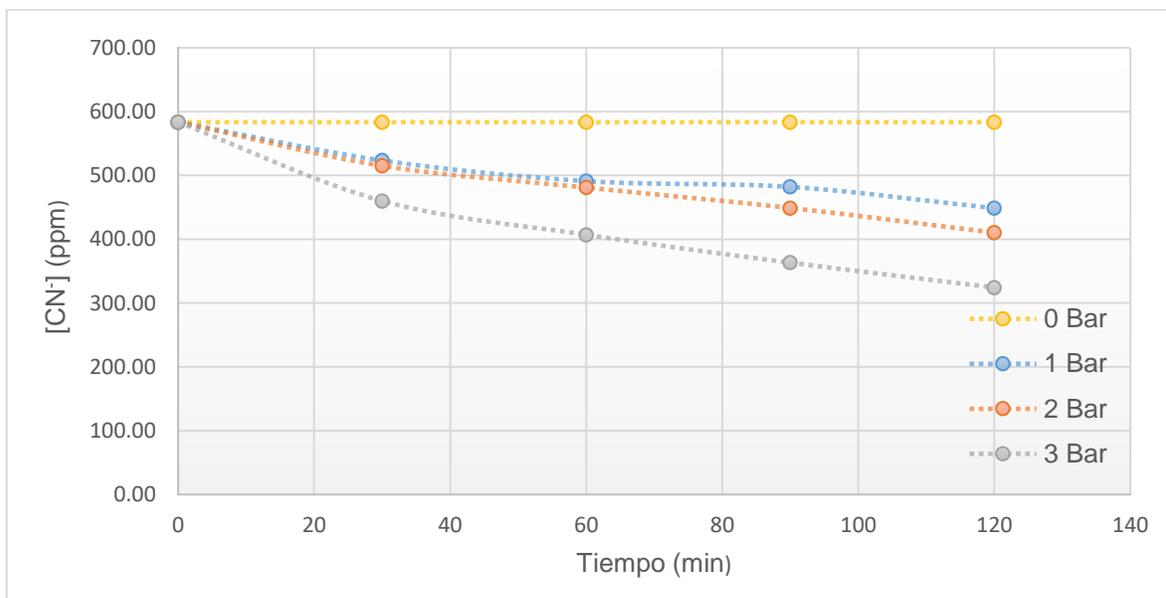


Figura 19. Perfiles promedio de concentración de cianuro conforme al tiempo para las diferentes presiones.

Las presiones de 1 y 2 bares, aunque en menor porcentaje, también generan destrucción con valores promedio de 23% y 32% respectivamente. Estas tendencias demuestran un aumento proporcional entre el porcentaje de destrucción alcanzado con forme al aumento en las presiones de trabajo. Además, se observan pequeños aumentos en las variables de pH y temperatura lo que mantiene al OD con perfiles constantes, concretando un sistema relativamente estable.

Con una presión de 3 bares se obtuvo el máximo valor evaluado de un 45% de destrucción, lo cual es mostrado en la Tabla 17. Sin embargo, cuando se aumentó la presión se mostró un aumento significativo en la destrucción de cianuro, así mismo se generó un aumento de temperatura, como se observa en la Figura 21, lo que produce un efecto inverso con el pH reduciéndolo paulatinamente, ya que el aumento de temperatura en el agua provoca una disociación de sus moléculas liberando más átomos de hidrógeno lo que promueve la acides en la solución reduciendo los valores de pH.

Es necesario mantener un control de la temperatura, con un sistema de enfriamiento para el tanque de alimentación y poder evitar la reducción de pH y una posible formación de ácido cianhídrico.

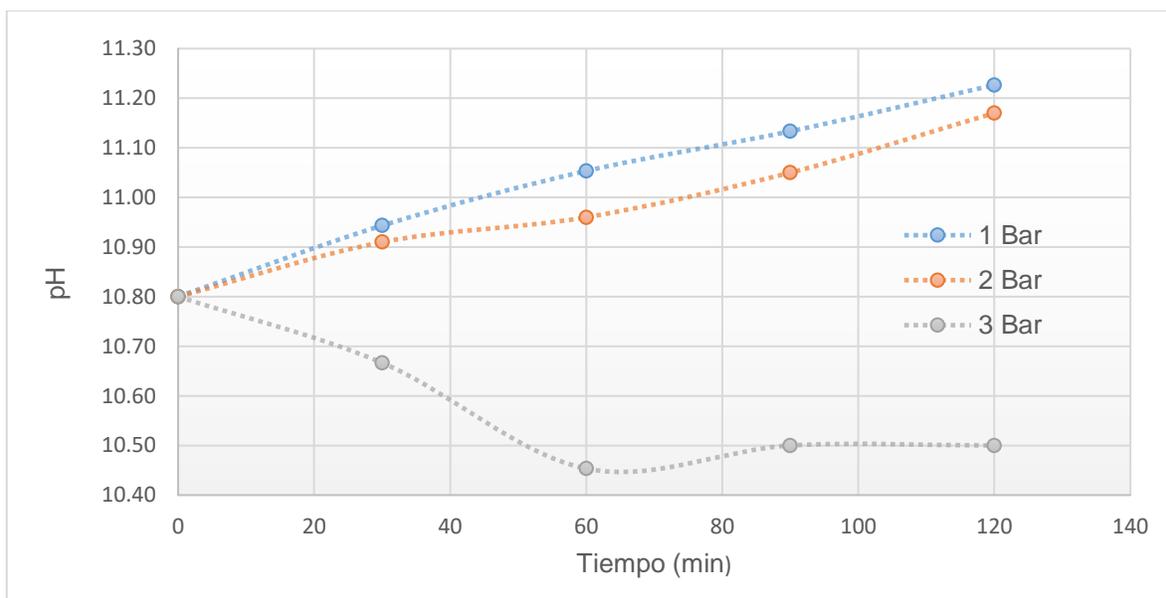


Figura 20. Perfiles promedio de pH en las diferentes presiones conforme al tiempo de interacción.

Los valores de OD en las presiones 1 y 2, se mantienen relativamente constantes durante la realización de las pruebas, al realizar el cambio a una presión de 3 bares los valores de OD aumentan significativamente a partir de los primeros 30 min como se observa en la Figura 20.

La cantidad de oxígeno presente en solución se encuentra directamente relacionada con la formación de micro burbujas creadas en el tubo Venturi. Con el aumento de presión el aumento de estas burbujas se manifiesta en algo conocido como nube de burbujas (Rajashree et al, 2014) donde es posible observar a simple vista este fenómeno de cavitación en comparación con la presión 1 y 2.

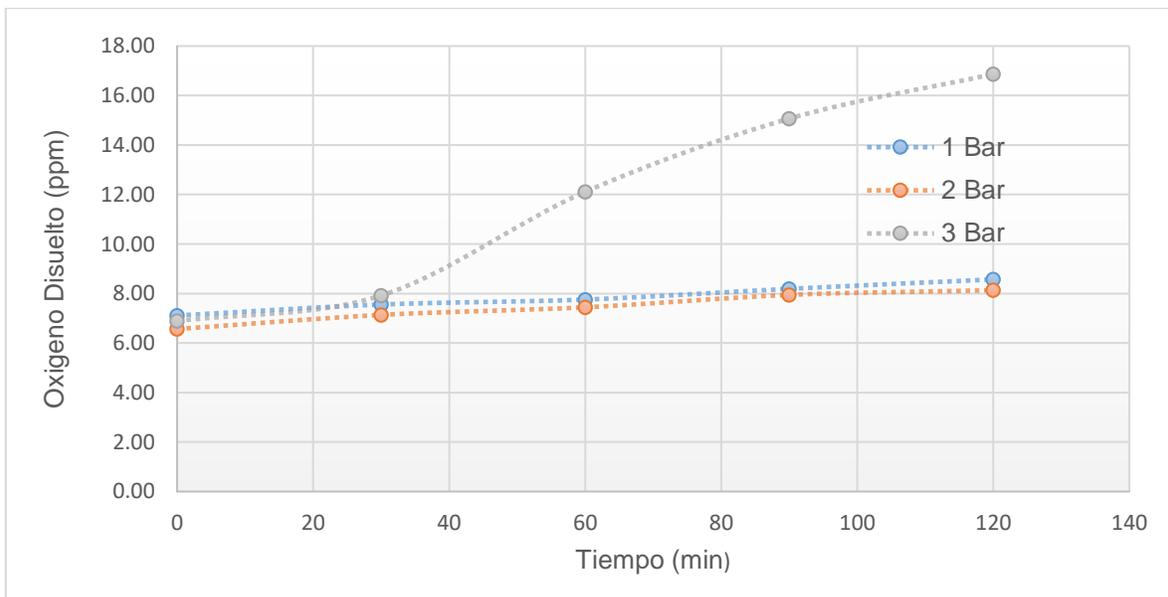


Figura 21. Perfiles promedio de concentración de OD en solución de cada presión conforme al tiempo

El proceso de cavitación tiene como variable más importante la presión de inicio aplicada al flujo, a su vez está ligada con la temperatura que es modificada por la fuerza cinética empleada para generar la circulación del efluente con la bomba. Además, por el propio proceso de cavitación genera burbujas, que en determinadas condiciones el colapso de estas resulta implosivo provocando picos de temperatura de orden 10^4 K (Jawale & Gotate, 2018). El aumento en la generación de estas burbujas es proporcional con el incremento de presión, lo que hace necesario controlar esta variable para la evaluación de presiones mayores.

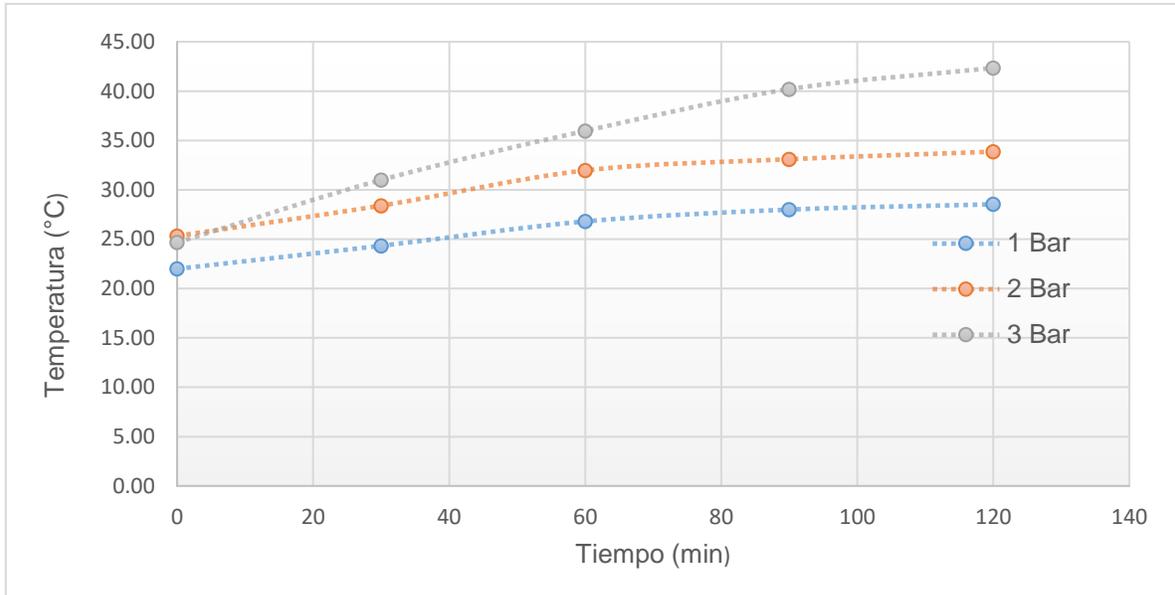


Figura 22. Perfiles promedio de temperatura en cada presión conforme al tiempo

Las líneas en el gráfico muestran el porcentaje de destrucción para cada concentración con comportamientos muy similares, independientemente de la presión evaluada, concretando que conforme al aumento de concentración el efecto de destrucción se reduce en pequeñas cantidades sin importar la presión de trabajo evaluada.

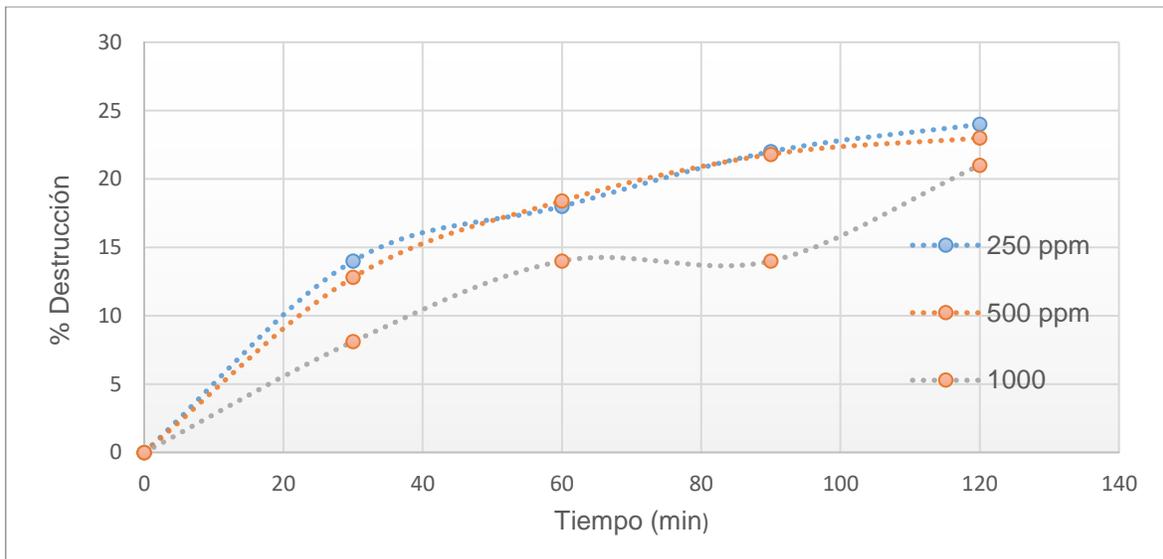


Figura 23. Perfiles de porcentaje de destrucción de cianuro de cada concentración evaluando 1 bar de presión.

Para la presión de 1 bar se obtienen valores máximos de destrucción cercanos al 24% con las diferentes concentraciones (250 y 500 ppm), mostrando un comportamiento similar, sin embargo, existe una pequeña disminución de porcentaje final conforme aumenta la concentración (Figura 24).

Al analizar los valores máximos de porcentaje de destrucción con las diferentes concentraciones se presenta una constante; existe un aumento de aproximadamente el 10% de destrucción por el aumento de 1 bar a la presión anterior.

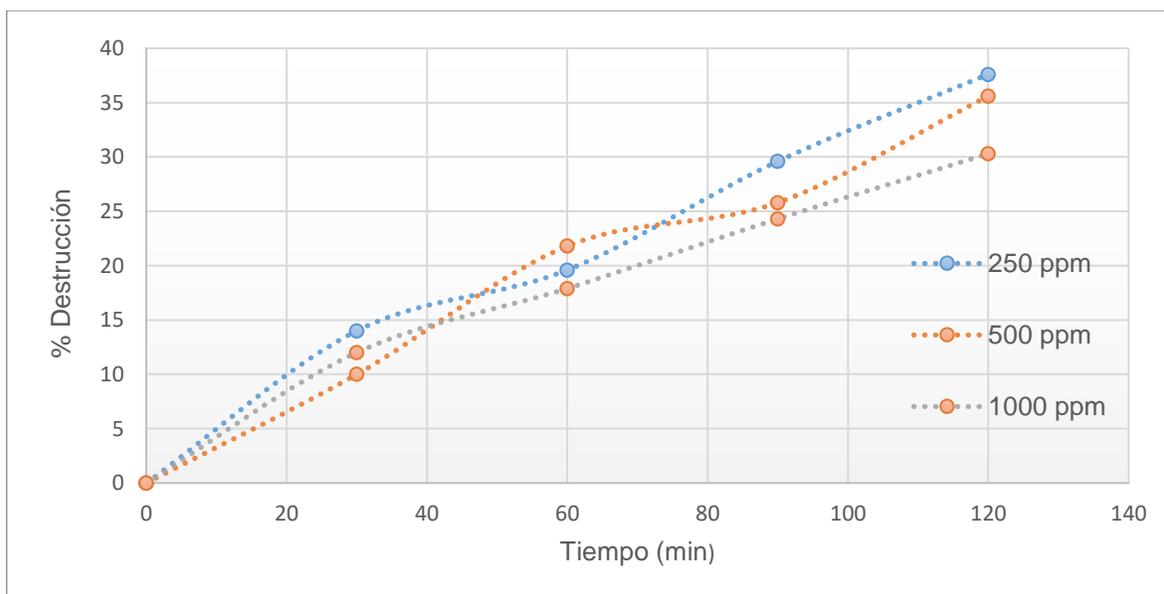


Figura 24. Perfiles de porcentaje de destrucción de cianuro de cada concentración evaluando 2 bar de presión.

Los valores máximos de porcentaje para cada concentración también muestran que conforme al aumento de presión inicial se obtiene un porcentaje de destrucción más elevado. Para la presión máxima de trabajo en este proyecto de 3 bares se obtuvo en promedio un 45% de destrucción a una exposición de 120 minutos de tratamiento.

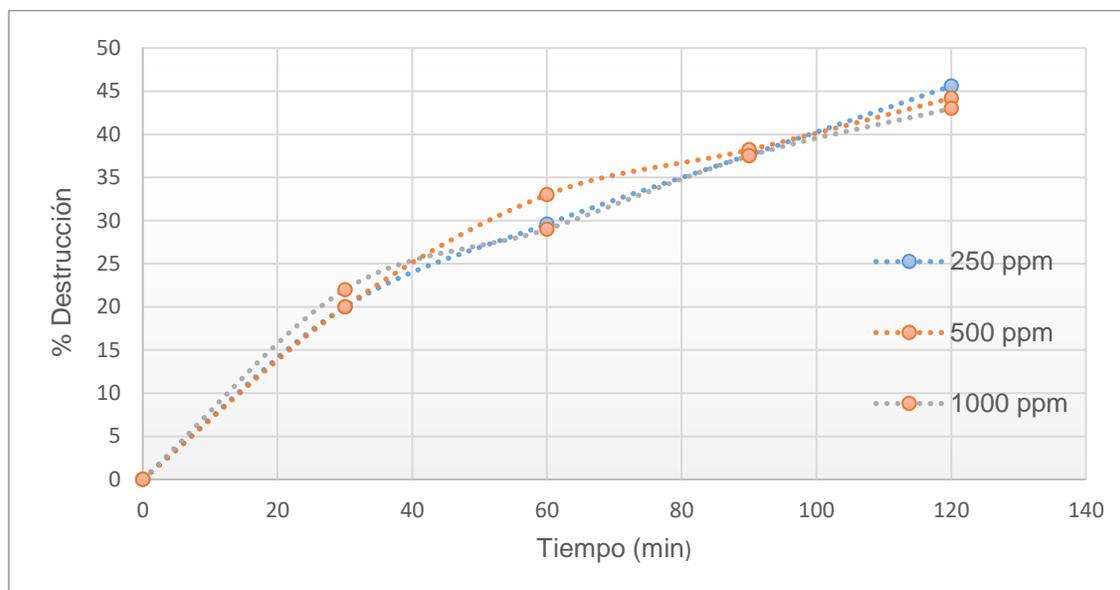


Figura 12. Perfiles de porcentaje de destrucción de cianuro de cada concentración evaluando 3 bar de presión

Capítulo V. Conclusiones

Conforme a los resultados obtenidos se puede concluir que los objetivos planteados fueron alcanzados:

La caracterización de los efluentes permitió determinar los parámetros a evaluar en las diferentes pruebas de destrucción; la química en batch y la generada por cavitación hidrodinámica, principalmente estableciendo los intervalos de concentraciones para la obtención de resultados representativos conforme al proceso de destrucción implementado en la unidad minera.

La construcción del prototipo para el sistema de cavitación hidrodinámica con diferentes los diferentes componentes permitió el monitoreo y control de las variables de interacción. Encontrando como variable más importante la presión de trabajo para el control del sistema, al determinar la eficiencia, por la relación proporcional entre el aumento de presión y el incremento de destrucción de acuerdo con los resultados obtenidos.

Los resultados obtenidos con la cavitación hidrodinámica demuestran un efecto significativo en la destrucción de cianuro en soluciones sintéticas del mismo. Destacando una eficiencia de destrucción de cianuro a las diferentes presiones 1, 2 y 3 bares, de alrededor de 25%, 35% y 45% respectivamente.

Conforme a las condiciones de pH requeridas por las características del cianuro en su proceso de tratamiento, se destaca la presión a 2 bares como óptima, por los valores obtenidos de las variables como; la temperatura que se mantiene dentro del rango óptimo de trabajo, el pH y OD que muestran un ligero aumento con tendencia constante durante el tiempo de residencia, además, de obtener un buen porcentaje de destrucción.

Es importante cuidar la presión ya que se encuentran directamente relacionadas con las variables, como lo es la temperatura que al ser modificada con un aumento por la presión y afectar de manera inversa el pH del sistema.

La factibilidad de acoplamiento del sistema de cavitación hidrodinámica como un proceso de tratamiento previo a la destrucción química es claramente posible por la reducción en el consumo de reactivos que esta representa, además, de ser una técnica muy simple y económica que solo requiere el aprovechamiento de la hidrodinámica generada en un proceso de bombeo. De acuerdo a esto es necesario realizar un análisis costo beneficio que permita el desarrollo de un escalamiento industrial.

5.1 Trabajo a futuro

Al concluir que la cavitación hidrodinámica tiene un efecto significativo para la destrucción de cianuro. Se genera la pauta para el desarrollo experimental de pruebas donde se evalúen los efectos de destrucción en el tratamiento de un efluente minero que representa un reto más grande y la oportunidad de alcanzar un área de aplicación a nivel industrial.

Para obtener un mejor porcentaje de destrucción se plantea realizar un análisis sobre el sistema propuesto que permita el desarrollo de las adaptaciones para mejorar la eficiencia de destrucción sin cambiar la presión de trabajo. Como la reconfiguración del sistema de tuberías empleadas o la inclusión de más cámaras de cavitación para la adaptación de un circuito en serie o paralelo.

Así como analizar el efecto de destrucción de cianuro en un efluente minero creado por la combinación de dos técnicas de oxidación avanzada; la cavitación hidrodinámica y la fotocatalisis heterogénea.

Bibliografía

Anand et al, G., 2009. Industrial wastewater treatment using hydrodynamic cavitation and heterogeneous advanced Fenton processing. *Chemical Engineering Journal*, Issue 152, pp. 498-502.

Arenas Sosa, I. & López Sánchez, J. L., 2004. *Espectrofotometría de absorción*, s.l.: s.n.

Bokova, I., 2017. *Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos*. [En línea]
Available at: <http://aneas.com.mx/wp-content/uploads/2017/03/247647S.pdf>
[Último acceso: 5 abril 2019].

Carrillo, O., Galindo, G. & García, I., 2012. *Reproducción de cavitación hidrodinámica luminiscente para la limpieza de agua a nivel terciario*. 5 ed. Mexico, D.F.: Charles print..

Cuevas, A., 2018. *Agua, Org. mx*. [En línea]
Available at: <https://agua.org.mx/actualidad/aguas-residuales-contaminacion-en-mexico/>
[Último acceso: 6 abril 2019].

Dash et al, R., 2009. Cyanide in industrial wastewaters and its removal: a review on biotreatment.. *Chemosphere*, pp. 1-11.

Domenech, X., 2001. Procesos avanzado de oxidación para la eliminación de contaminantes. *Ciencia Jazz-tertulias sobre ciencia en clasijazz*, 2(3), pp. 3-21.

EPA, 2014. *Cyanide in waters and extracts using titrimetric and manual spectrophotometric procedures*. [En línea]
Available at:
<http://ctntes.arpa.piemonte.it/Raccolta%20Metodi%202003/pdf/Metodi%20EPA/9014.pdf>
[Último acceso: 16 Marzo 2019].

Fernandez, B., 2007. *Desarrollo de un nuevo método para la eliminación de cianuro en aguas residuales de minas*. 40 ed. Austria: Universidad de ovideo.

Guerrero, J., 2013. *Cianuro: Toxicidad y Destrucción Biológica.* [En línea]
Available at:
https://www.researchgate.net/publication/258499252_Cianuro_Toxicidad_y_Destruccion_Biologica
[Último acceso: 6 Abril 2019].

IIMC, 2012. *Definiciones y siglas para el Código Internacional para el Manejo de Cianuro.* [En línea]
Available at:
https://www.cyanidecode.org/sites/default/files/sppdf/DefinitionsSpanish2_13.pdf
[Último acceso: 13 Abril 2019].

Jawale, R. & Gotate, P., 2018. Novel approaches based on hydrodynamic cavitation for treatment of wastewater containing potassium thiocyanate. *Ultrasonics- Sonochemistry*.

Keith, L., 1991. *Environmental Sampling and Análisis, A practical guide.* s.l.:Lewis Publisher.

Linarte, R., 2006. Destrucción de cianuros en efluentes de la industria minera mediante el empleo de reductores químicos. pp. 285-287.

M. iborra, J. T., 2013. *Reactores Multifásicos.* 1 ed. Barcelona: s.n.

Marchegaini, A., 2006. *Cavitación.* 1.2 ed. Argentina: s.n.

Martínez, G., 2006. cps.unizar. En: *Aplicación de Fenómenos de Transporte.* s.l.:s.n., pp. 1-16.

Nava et al, A., 2007. Análisis químico del cianuro por el proceso de cianuración: revisión de los principales métodos*. *Revista metalurgica*, Volumen 41, pp. 20-28.

ONU, 2011. *Agua e industria en la economía verde.* [En línea]
Available at:
https://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/green_economy_2011/pdf/info_brief_water_and_industry_spa.pdf
[Último acceso: 2 abril 2019].

Pankaj et al, 2014. Degradation of imidacloprid using combined advanced oxidation processes based on hydrodynamic cavitation. *Ultrasonics Sonochemistry*, Issue 21, pp. 1170-1777.

Peña, M., Ducci, J. & V, Z., 2013. *Tratamiento de aguas residuales en México. Banco Iberoamericano de Desarrollo.* [En línea]

Available at:

http://www.siagua.org/sites/default/files/documentos/documentos/tratamiento_de_aguas_residuales_en_mexico.pdf

[Último acceso: 12 Marzo 2019].

Raffo, E. & E., R., 2014. Caracterización de las aguas residuales y la demanda bioquímica de oxígeno. *Industrial*, 2(13), pp. 71- 80.

Rajashree et al, H., 2014. Treatment of cyanide containing wastewater using cavitation based approach. *Ultrasonics Sonochemistry*, Volumen 21, pp. 1392 - 1399.

Ravi, J. & Parag, G., 2012. Degradation of dithiols using hydrodynamic cavitation based treatment strategies. *Ultrasonics Sonochemistry*, Issue 19, pp. 532-539.

UNESCO, 2009. *Resumen del 2do informe de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los Recursos Hídricos en el mundo.* [En línea]

Available at:

http://www.unesco.org/new/fileadmin/MULTIMEDIA/HQ/SC/pdf/WWAP_WWDR2_Hechos_y_Cifras_2006.pdf

[Último acceso: 10 Abril 2019].

Varela, M. I. H. G., 2019. *Modelamiento de un venturi para la eliminación de compuestos orgánicos por cavitación hidrodinámica a través de CFD.* Zacatecas, Congreso AMIDIQ.

Anexos

A continuación, se presentan las tablas y graficas de las pruebas 1 a la 9 por cavitación hidrodinámica, donde se expresan los valores de concentración y porcentaje de destrucción conforme al tiempo. Además, del control de las variables de pH, temperatura y OD en cada intervalo de tiempo.

Tabla 18. Prueba 1; destrucción por cavitación hidrodinámica 1bar para 250 ppm.

[NaCN] ₀ (ppm)	250 ppm				
Presión (bar)	1				
Tiempo (min)	[NaCN] _f (ppm)	% Destrucción	pH	[OD] (ppm)	Temperatura (°C)
0	250	0	10.7	6.65	22
30	215	14	10.85	7.18	24
60	205	18	10.96	7.2	27
90	195	22	11.1	8.05	28
120	195	22	11.22	8.4	28.9

Tabla 19. Prueba 2; destrucción por cavitación hidrodinámica 2 bar para 250 ppm

[NaCN] ₀ (ppm)	250 ppm				
Presión (bar)	2				
Tiempo (min)	[NaCN] _f (ppm)	% Destrucción	pH	[OD] (ppm)	Temperatura (°C)
0	250	0	11.1	7.1	26
30	215	14	11.18	7.33	28.2
60	211	15.6	11.21	7.4	31.9
90	176	29.6	11.26	7.6	32.2
120	156	37.6	11.43	7.9	33

Tabla 20. Prueba 3; destrucción por cavitación hidrodinámica 3 bar para 250 ppm

[NaCN] ₀ (ppm)	250 ppm				
Presión (bar)	3				
Tiempo (min)	[NaCN] _f (ppm)	% Destrucción	pH	[OD] (ppm)	Temperatura (°C)
0	250	0	11.2	7.2	26
30	200	20	11	7.6	32
60	176	29.6	10.7	12.36	36.7
90	156	37.6	10.5	15.3	40
120	136	45.6	10.5	16	41

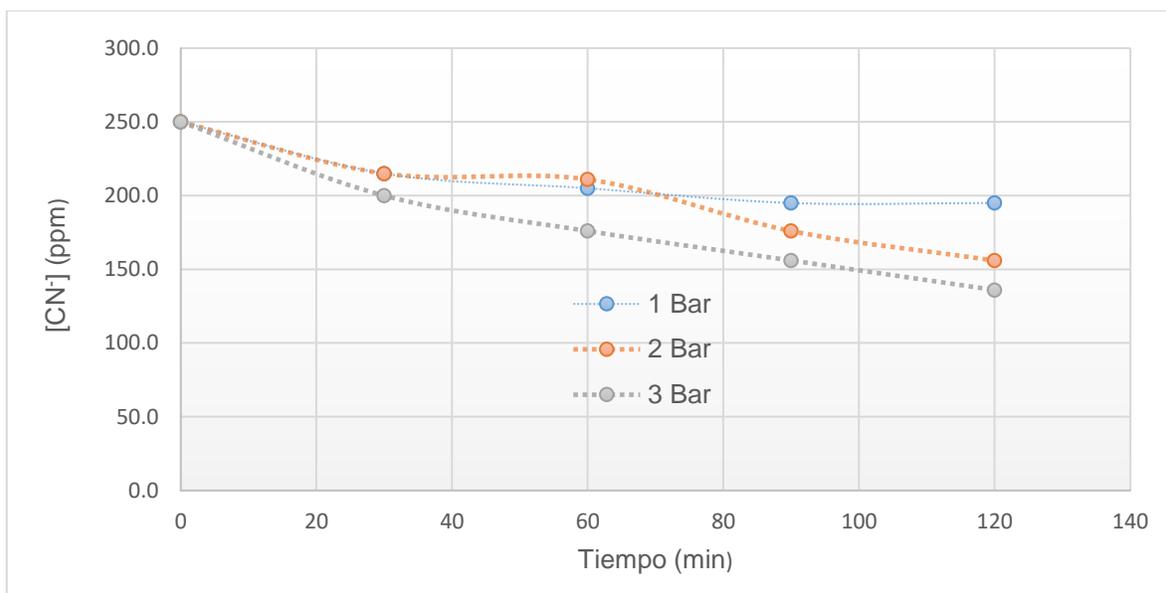


Figura 25. Perfiles de concentración de cianuro conforme al tiempo en las diferentes presiones para 250 ppm.

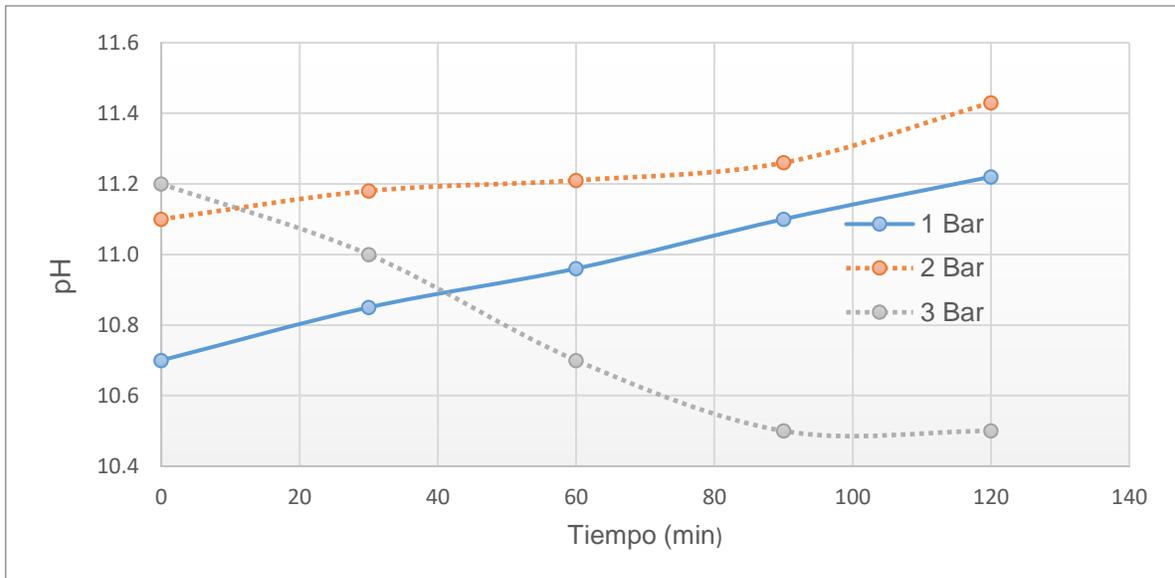


Figura 26. Perfiles de pH en las diferentes presiones conforme al tiempo de interacción para 250 ppm

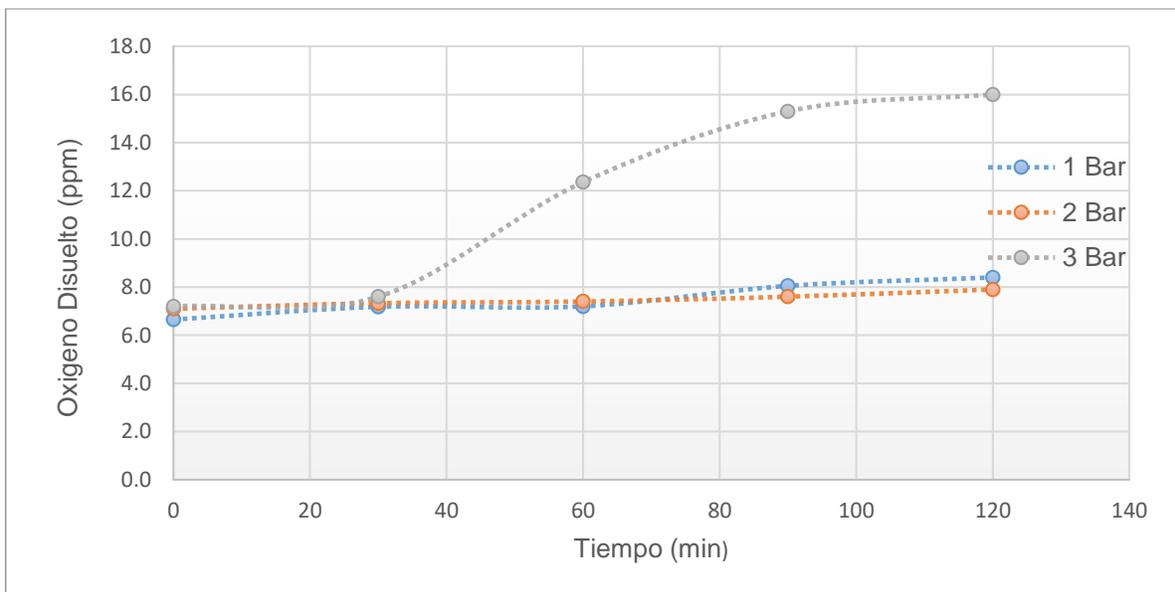


Figura 27. Perfiles de concentración de OD en solución de cada presión conforme al tiempo para 250 ppm

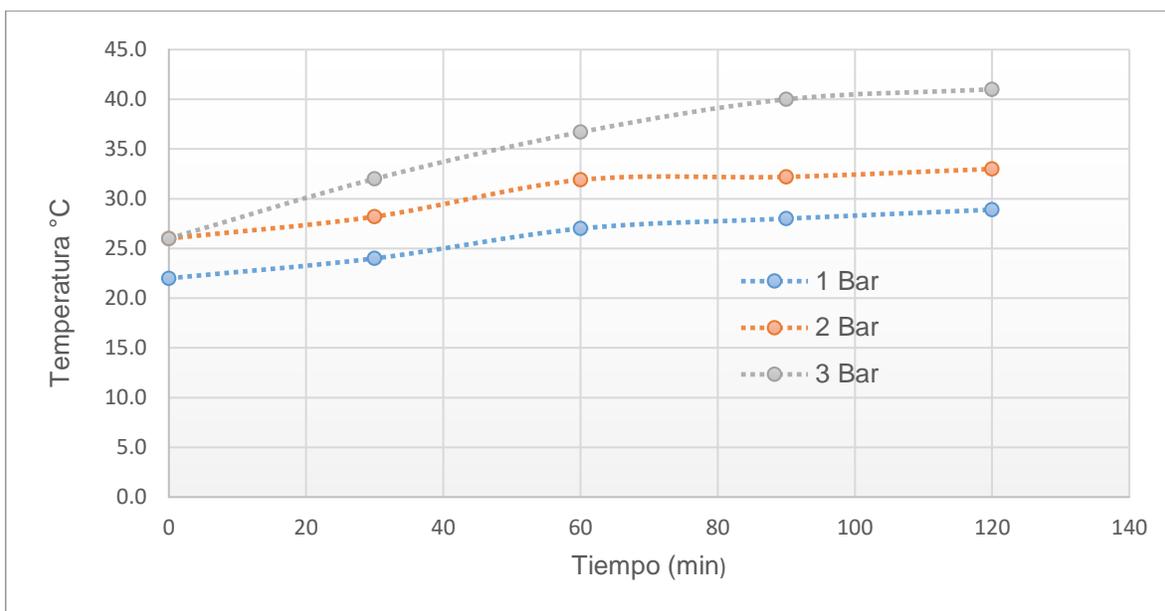


Figura 28. Perfiles de temperatura en cada presión conforme al tiempo para 250ppm

Tabla 21. Prueba 4; destrucción por cavitación hidrodinámica 1bar para 500 ppm

[NaCN] ₀ (ppm)	500 ppm				
Presión (bar)	1				
Tiempo (min)	[NaCN] _f (ppm)	% Destrucción	pH	[OD] (ppm)	Temperatura (°C)
0	500	0	10.7	7.83	22
30	436	12.8	10.76	8.49	25
60	408	18.4	10.85	8.59	27
90	391	21.8	10.91	8.79	28
120	371	25.8	11.02	9.26	28.7

Tabla 22. Prueba 5; destrucción por cavitación hidrodinámica 2bar para 250 ppm

[NaCN] ₀ (ppm)	500 ppm				
Presión (bar)	2				
Tiempo (min)	[NaCN] _f (ppm)	% Destrucción	pH	[OD] (ppm)	Temperatura (°C)
0	500	0	11.2	6	24
30	450	10	11.34	7.1	27
60	391	21.8	11.4	7.33	31
90	371	25.8	11.4	7.6	32.2
120	332	33.6	11.53	7.6	33

Tabla 23. Prueba 6; destrucción por cavitación hidrodinámica 3bar para 250 ppm

[NaCN] ₀ (ppm)	500 ppm				
Presión (bar)	3				
Tiempo (min)	[NaCN] _f (ppm)	% Destrucción	pH	[OD] (ppm)	Temperatura (°C)
0	500	0	10.7	6	24
30	400	20	10.5	7.8	30
60	335	33	10.35	11.9	36
90	309	38.2	10.5	14.8	41
120	273	45.4	10.5	17.7	44

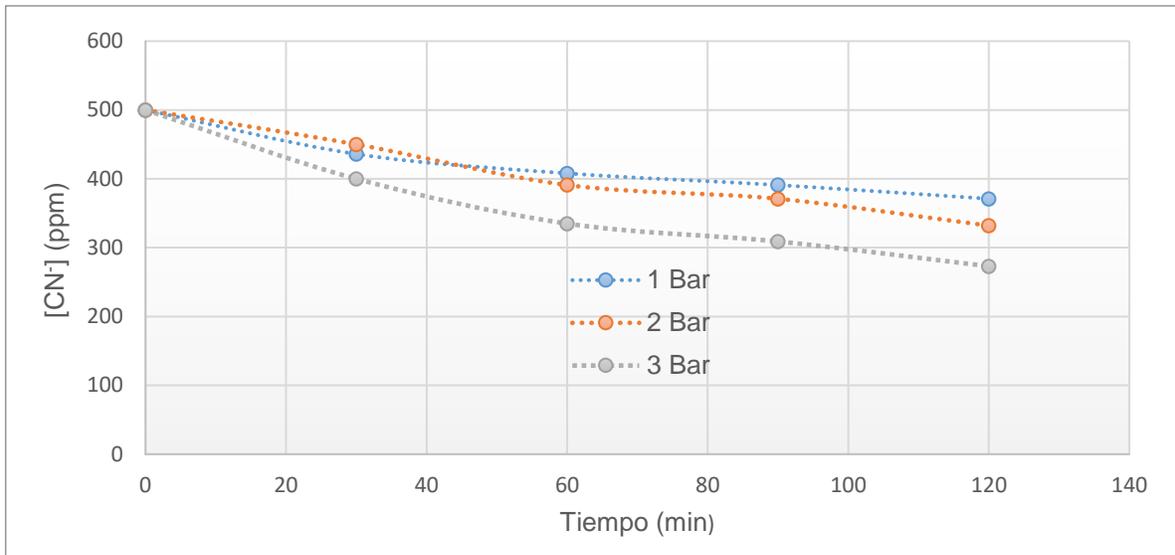


Figura 29. Perfiles de concentración de cianuro conforme al tiempo en las diferentes presiones para 500 ppm.

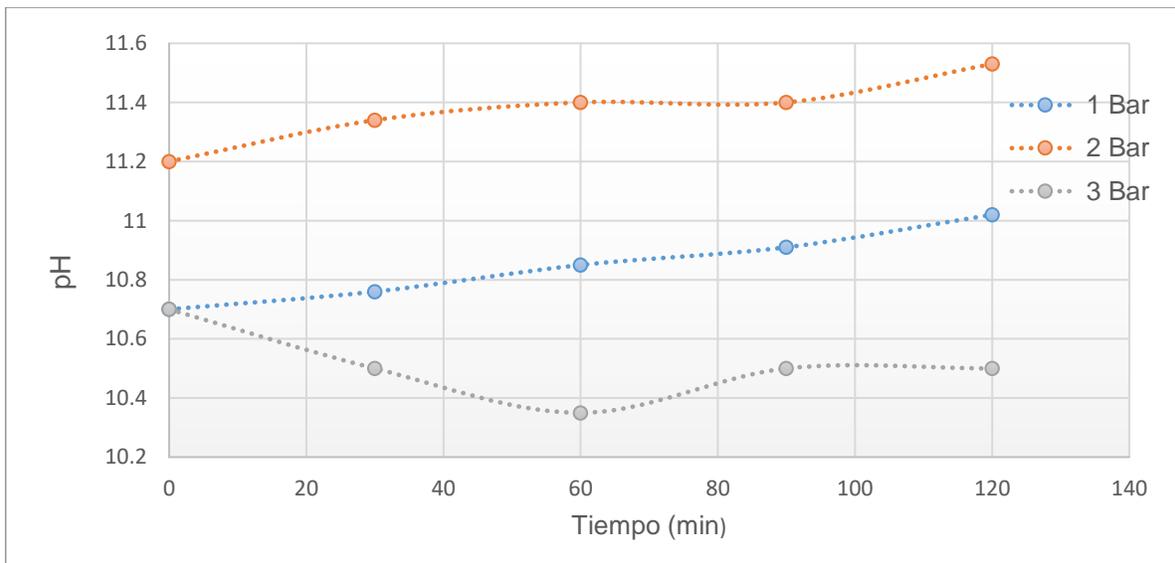


Figura 30. Perfiles de pH en las diferentes presiones conforme al tiempo de interacción para 500 ppm

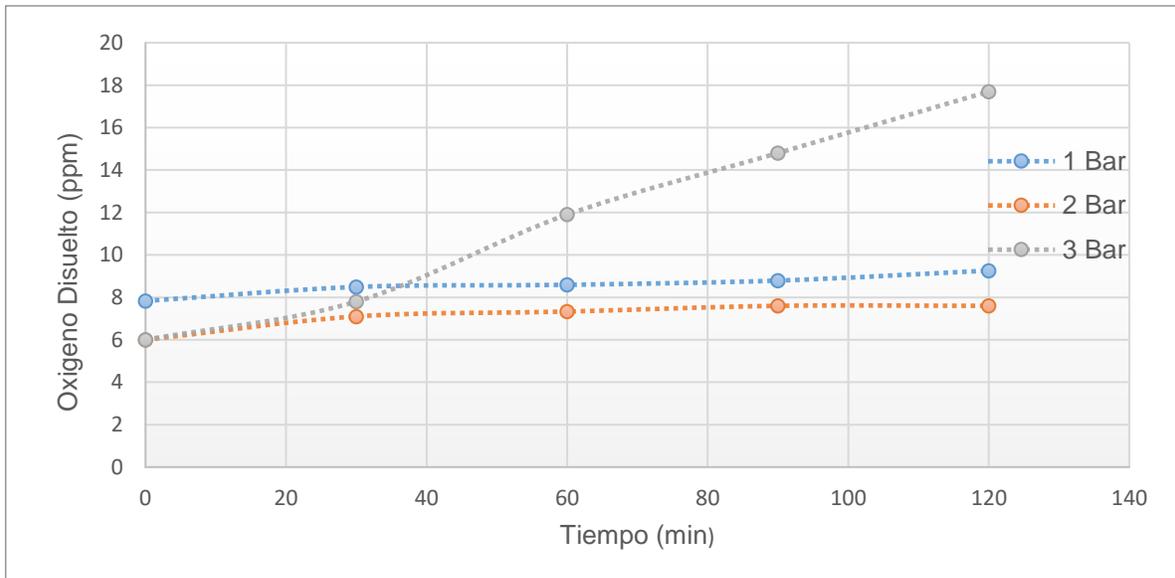


Figura 31. Perfiles de concentración de OD en solución de cada presión conforme al tiempo para 500 ppm

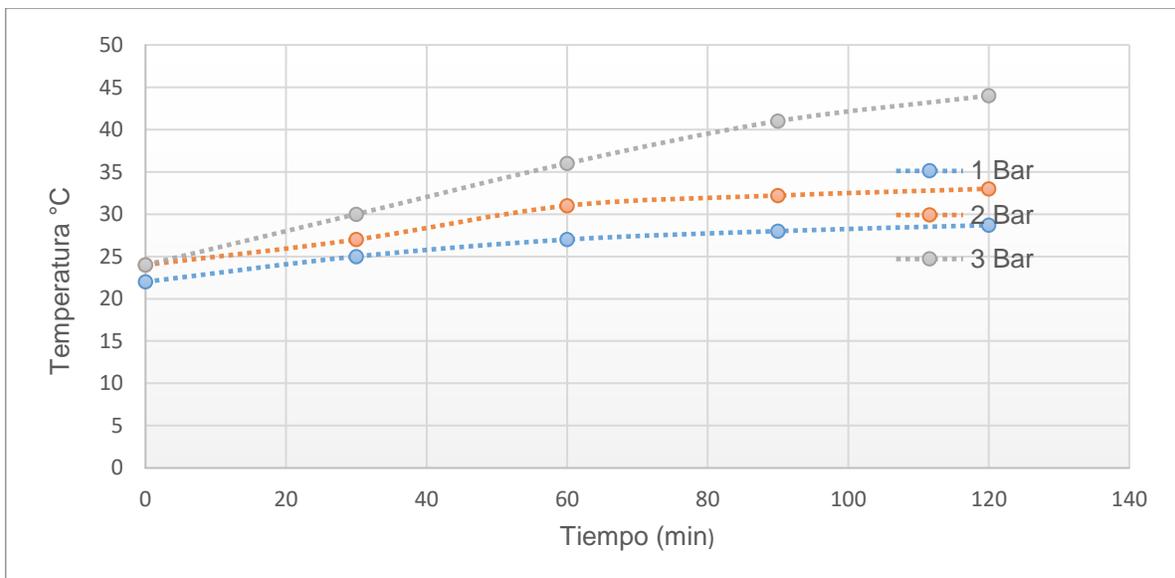


Figura 32. Perfiles de temperatura en cada presión conforme al tiempo para 500ppm

Tabla 24. Prueba 7; destrucción por cavitación hidrodinámica 1bar para 1000 ppm

[NaCN] ₀ (ppm)	1000ppm				
Presión (bar)	1				
Tiempo (min)	[NaCN] _f (ppm)	% Destrucción	pH	[OD] (ppm)	Temperatura (°C)
0	1000	0	11	6.86	22
30	919	8.1	11.22	7	24
60	860	14	11.35	7.48	26.4
90	860	14	11.39	7.73	28
120	780	22	11.44	8.05	28

Tabla 25. Prueba 8; destrucción por cavitación hidrodinámica 2bar para 1000 ppm

[NaCN] ₀ (ppm)	1000 ppm				
Presión (bar)	2				
Tiempo (min)	[NaCN] _f (ppm)	% Destrucción	pH	[OD] (ppm)	Temperatura (°C)
0	1000	0	11	6.6	26
30	880	12	11.1	6.98	30
60	841	15.9	11.17	7.6	33
90	800	20	11.39	8.64	34.9
120	743	25.7	11.45	8.9	35.6

Tabla 26. Prueba 9; destrucción por cavitación hidrodinámica 3bar para 1000 ppm

[NaCN] ₀ (ppm)	1000 ppm				
Presión (bar)	3				
Tiempo (min)	[NaCN] _f (ppm)	% Destrucción	pH	[OD] (ppm)	Temperatura (°C)
0	1000	0	10.6	7.45	24
30	780	22	10.5	8.36	31
60	710	29	10.31	12.07	35.2
90	625	37.5	10.5	15.1	39.6
120	564	43.6	10.5	16.9	42.05

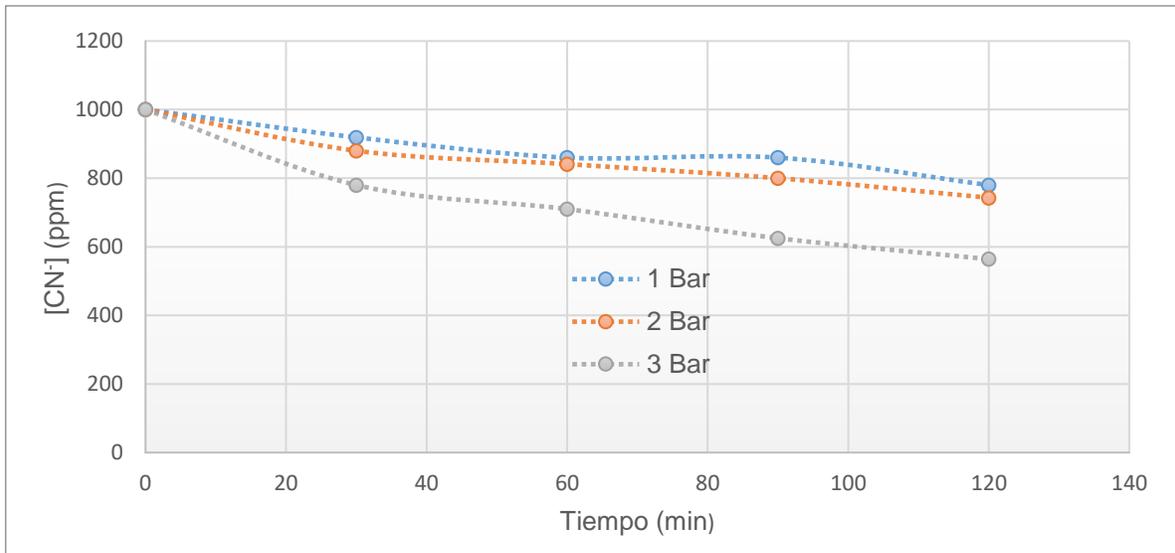


Figura 33. Perfiles de concentración de cianuro conforme al tiempo en las diferentes presiones para 1000 ppm.

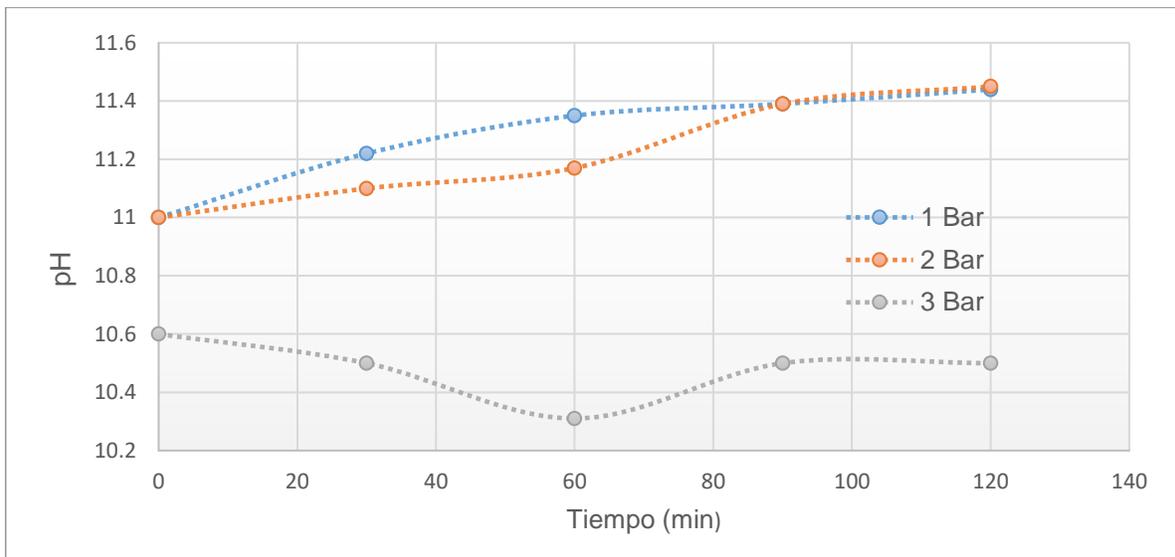


Figura 34. Perfiles de pH en las diferentes presiones conforme al tiempo de interacción para 1000 ppm

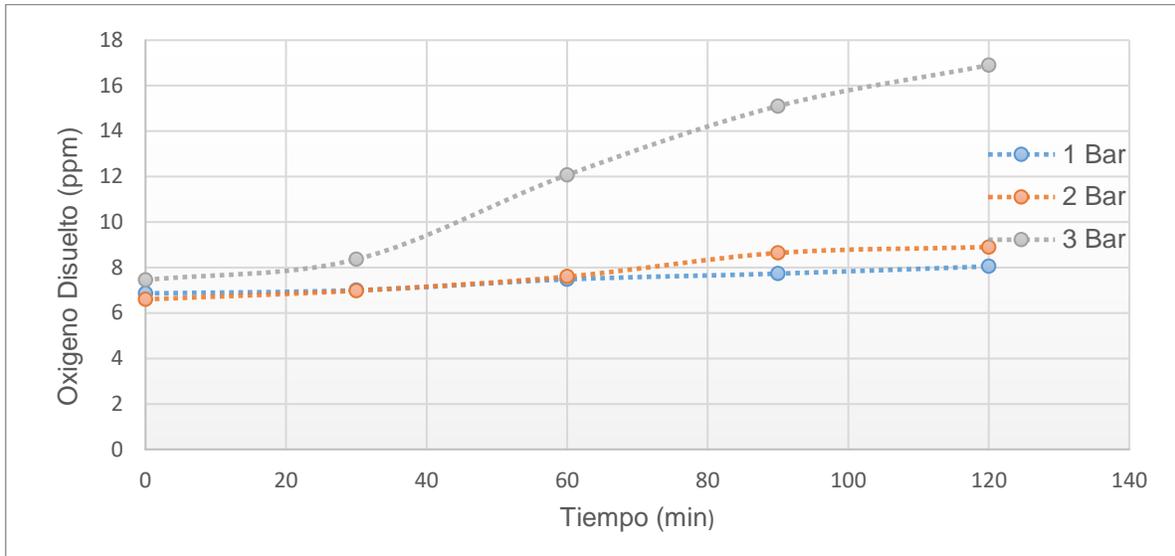


Figura 35. Perfiles de concentración de OD en solución de cada presión conforme al tiempo para 250 ppm

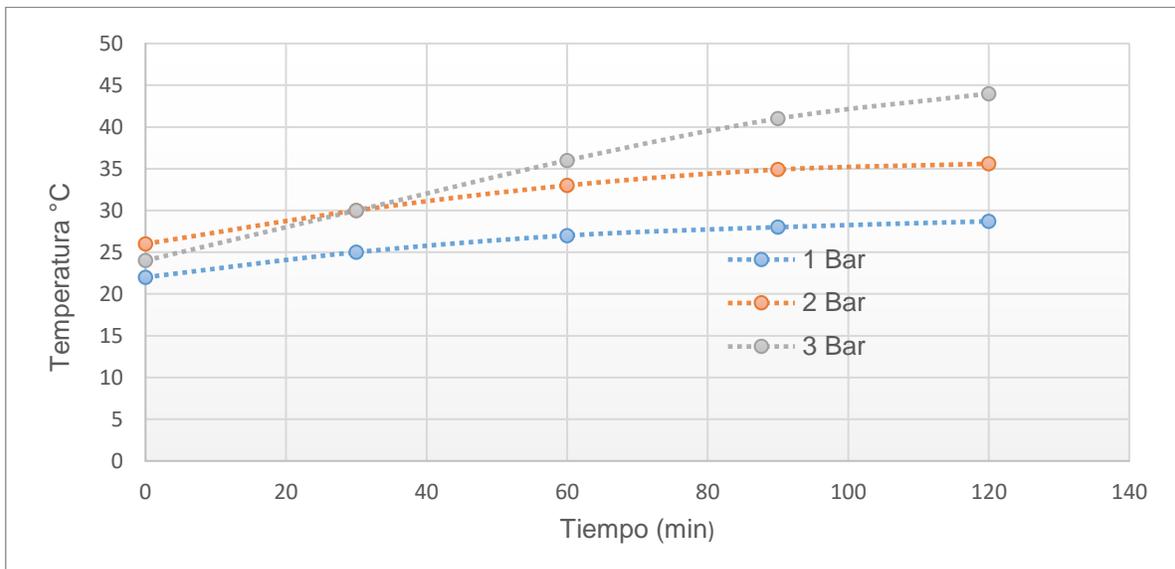


Figura 36. Perfiles de temperatura en cada presión conforme al tiempo para 250ppm