

**APROVECHAMIENTO DE LA PRESIÓN OSMÓTICA, PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA
ELÉCTRICA MEDIANTE EL USO DE AGUAS SINTÉTICAS CIANURADAS UTILIZANDO
MEMBRANAS POLIMERICAS.**



**Universidad
de Cartagena**
Fundada en 1827



**Facultad de
Ingeniería**
Fundada en 1949

CARLOS EDUARDO BUSTOS BLANCO

LUIS DANIEL MARRUGO TORRES

UNIVERSIDAD DE CARTAGENA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL

CARTAGENA DE INDIAS D. T. y C.

2016

**APROVECHAMIENTO DE LA PRESIÓN OSMÓTICA, PARA LA GENERACIÓN
DE ENERGÍA ELÉCTRICA MEDIANTE EL USO DE AGUAS SINTÉTICAS
CIANURADAS UTILIZANDO MEMBRANAS POLIMERICAS.**

Autores:

Carlos Eduardo Bustos Blanco

Luis Daniel Marrugo Torres

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TITULO DE INGENIERO CIVIL

Director

Edgar Eduardo Quiñones Bolaños, PhD

Grupo de investigación:

Grupo de investigación en modelación ambiental (GIMA)

Línea de investigación:

Saneamiento Ambiental

**UNIVERSIDAD DE CARTAGENA
FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL
CARTAGENA D. T. y C.**

2016

Nota de aceptación:

Firma del presidente del Jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Cartagena de Indias D. T. y C., Enero de 2016

Cartagena, 21 de Enero de 2016

Comité

INVESTIGACION Y PROYECTOS DE GRADO

E. S. D.

Cordial saludo,

Muy respetuosamente me remito a ustedes con el objetivo de presentar el Trabajo de Grado titulado ***“APROVECHAMIENTO DE LA PRESIÓN OSMÓTICA, PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA MEDIANTE EL USO DE AGUAS SINTÉTICAS CIANURADAS UTILIZANDO MEMBRANAS POLIMERICAS”***, elaborado por los estudiantes Carlos Eduardo Bustos Blanco y Luis Daniel Marrugo Torres, a quienes he dirigido durante todo el estudio, para la aprobación, corrección y evaluación por parte del presente comité.

Atentamente,

EDGAR QUIÑONES BOLAÑOS, Ph. D.

Docente Programa de Ingeniería Civil

Cartagena, 21 de Enero de 2016

Comité

INVESTIGACION Y PROYECTOS DE GRADO

Facultad de Ingeniería

Programa de Ingeniería Civil

E. S. D.

Cordial saludo,

Muy respetuosamente pedimos a este comité la evaluación de nuestro Trabajo de Grado titulado ***“APROVECHAMIENTO DE LA PRESIÓN OSMÓTICA, PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA MEDIANTE EL USO DE AGUAS SINTÉTICAS CIANURADAS UTILIZANDO MEMBRANAS POLIMERICAS”***.

Esperamos su respuesta pronto.

Atentamente,

CARLOS EDUARDO BUSTOS BLANCO

Código: 0211110055

LUIS DANIEL MARRUGO TORRES

Código: 0211110011

DEDICATORIA

Le dedico este logro a Dios porque siempre ha estado a mi lado apoyándome y guiándome en cada instante de la vida. A mis padres y hermanas por ser mis ejemplos de vida, por darme la fortaleza en cada momento difícil y motivarme a siempre alcanzar lo que deseo, sin importan cuán difícil sea. Le agradezco a mis amigos, esos que estuvieron en esta larga travesía, sorteando cada peripecia de esta carrera inclemente y también a toda mi familia que me acompañó en cada instante.

Carlos Eduardo Bustos Blanco

A Dios por todas las bendiciones recibidas, la inteligencia y sabiduría brindada y su continua presencia en cada momento de mi vida.

A mis padres por su apoyo, atención, consejo y amor.

A mis amigos por hacer que estos cinco años fuesen inolvidables

Luis Daniel Marrugo Torres

AGRADECIMIENTOS

DOCENTES

Edgar Quiñones Bolaños, MSc, PhD. Profesor Asociado, Director de Grupo de Modelación Ambiental ,GIMA. Director de Tesis de Grado.

Dr Mehrab Mehrvar, PhD. Profesor titular del departamento de Ingeniería Química, Universidad de Ryerson.

Ciro Bustillo Lepcamte Rosario Muñoz, MSc, candidato a Ph.D, Catedrático del programa de Salud Pública y Ocupacional., Universidad de Ryerson.

Javier Mouthon Bello, PhD .Profesor Asociado del programa de Ingeniería Civil. Evaluador.

Calendaria Tejada Tova, M.Sc. Docente del Programa de Ingeniería Química. Evaluadora.

Dalia Moreno Egel, M.Sc. Vicedecana Facultad de Ingeniería.

COLABORADORES

Carlos Bustos Reyes. Ingeniero Mecánico

Jorge Marrugo Cervantes. -Administrador de Empresas.

Nikita Kuzmin, Publicista y Diseñador gráfico, Universidad de Ryerson.

FAMILIARES Y AMIGOS

Nuestros familiares y amigos.

RESUMEN

Sustancias como el cianuro de sodio, altamente tóxicas, son vertidas indiscriminadamente por la actividad artesanal y las industrias mineras en ríos y cuencas de agua exponiendo a las comunidades a un alto riesgo ambiental. En la búsqueda de alternativas para mitigar el impacto, aprovechar esta agua contaminadas y brindar oportunidades de generación de energía el objetivo de la presente fue Estimar la variación de la potencia eléctrica en un generador de energía, en función de la presión osmótica, utilizando membranas poliméricas a escala de laboratorio y utilizando aguas sintéticas para diferentes concentraciones de cianuro. Durante el proceso de estimación del potencial eléctrico, se realizaron 60 ensayos en total, 30 en un reactor de membrana con configuración vertical y las restantes en un reactor con configuración horizontal, siguiendo un proceso de llenado bajo el fenómeno de contraflujo de fluidos, los ensayos se desarrollaron entre los meses de Agosto y Diciembre de 2015 en los laboratorios de modelación de la Universidad de Ryerson y de saneamiento de la Universidad Cartagena, donde se modificaron concentraciones de NaCN en la solución de (25, 50, 100, 200, 500 y 700 mg/l). Al utilizar la solución de 700 mg/l, concentración más elevada y representativa de los relaves en el Sur de Bolívar, la membrana GE Osmonics SE permitió desarrollar una densidad de poder de $6.36 \times 10^{-3} \text{ W/m}^2$, representado este potencial en una cabeza de agua de 1.9 cm en el reactor de configuración vertical, considerado el más significativo. También se realizaron ensayos con agua de mar, donde se obtuvo con una concentración de cien veces más es decir 71 g/l, una densidad de poder de $1.66 \times 10^{-3} \text{ W/m}$ y una cabeza de 3.3 cm, en la misma configuración. Todo esto nos lleva a concluir que existe un potencial para generar electricidad, a su vez que las aguas cianuradas presentan un potencial mayor que las aguas de mar y que la configuración vertical es la más adecuada para ser implementada en los procesos de osmosis retardada.

ABSTRACT

Substances such as sodium cyanide, are highly toxic, and are indiscriminately dumped into rivers and watersheds by the craft and mining industries, exposing communities to a high level of environmental risk. Looking for alternatives to mitigate the impact, draw on cyanide contaminated water and provide opportunities for power generation, the objective of this research was to estimate the variation of the electric power in a power generator, according to the osmotic pressure, using lab scale polymeric membranes and *synthetic* water for different concentrations of cyanide. During the estimation process of the electric potential, 60 assays were performed in total, 30 within the membrane reactor with vertical configuration and the other 30 within the reactor with horizontal configuration. Following a filling process under the phenomenon of counterflow of fluids, the tests were conducted between August and December 2015 in the laboratories of Chemical Modeling at the University of Ryerson and Sanitation of Cartagena University, where concentrations of sodium cyanide were modified in the solution of (25, 50, 100, 200, 500 and 700 mg/l). By using the solution of 700 mg/l, higher concentration and representative of the tailings in the South of Bolivar, the GE Osmonics SE membrane allowed to develop a power density of $6.356 \times 10^{-5} \text{ W/m}$ represented this potential in a head of water of 1.9 cm in the reactor with the vertical configuration, considered to be most significant. Tests with seawater were also performed in the same configuration. Seawater tests were conducted with concentrations hundred times the concentration of cyanide, at 71 g/l, a power density of $1.66 \times 10^{-3} \text{ W/m}$ and a head pressure of only 3.3 cm, All this leads us to conclude that there is a potential to generate electricity, cyanide water have a higher potential than seawater and vertical configuration is the most suitable to be implemented in delayed osmosis processes.

TABLA DE CONTENIDO

1) INTRODUCCIÓN	1
2) OBJETIVOS Y ALCANCES	6
2.1) OBJETIVO GENERAL	6
2.2) OBJETIVOS ESPECÍFICOS	6
2.3) ALCANCES	7
2.3.1) Delimitación temporal	8
2.3.2) Delimitación espacial	8
3) MARCO DE REFERENCIA	9
3.1) MARCO TEÓRICO	9
3.1.1) Clasificación de procesos osmóticos	9
3.1.2) Membranas osmóticas	10
3.1.3) Energía osmótica	15
3.1.4) Cianuro	17
3.1.5) Microscopia Electrónica de Barrido [MEB]	18
3.2) ESTADO DEL ARTE	19
3.3) ANTECEDENTES	23
3.4) MARCO LEGAL	24
3.4.1) Leyes y decretos que rigen el abastecimiento de agua potable	25
3.4.2) Leyes y decretos que rigen el abastecimiento de energía eléctrica	25
3.4.3) Normas que rigen la calidad del agua	26
4) METODOLOGÍA	27
4.1) Primera fase: Selección y caracterización de membrana polimérica.	28
4.1.1) Caracterización de membrana	28
4.2) Segunda fase: Diseño y caracterización de aguas sintéticas:	30
4.3) Tercera fase: Diseño, implementación y monitoreo del montaje experimental	32
4.3.1) Calibración de montaje de configuración horizontal	34
4.3.2) Calibración de montaje de configuración vertical	36
4.3.3) Cuarta fase: sistema de conversión de energía eléctrica	41

5) ANALISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	43
5.1) <i>Selección de membrana</i>	43
5.2) <i>Caracterización de la membrana</i>	44
5.3) <i>Diseño del montaje final</i>	47
5.4) <i>Calibración de conductímetros</i>	48
5.5) <i>Pruebas de calibración del sistema</i>	50
5.6) <i>Pruebas finales en reactores</i>	56
5.6.1) Aguas frescas	57
5.6.2) Sal común (NaCl)	59
5.6.3) Cianuro (NaCN)	64
5.7) <i>Optimización sistema generación de energía</i>	72
5.8) <i>Ingeniería Aplicada</i>	75
6) CONCLUSIONES	77
7) RECOMENDACIONES	79
8) . REFERENCIAS	82
ANEXOS	86
Análisis de elementos internos membranas	86
Vista microscópica de estructura interna de membranas	87

LISTA DE FIGURAS

FIGURA.1.MEMBRANA TUBULAR	11
FIGURA. 2 MEMBRANA ARROLLADA EN ESPIRAL.	12
FIGURA. 3 MEMBRANA DE HOJA PLANA.	13
FIGURA. 4 PROCESO BÁSICO DE ENERGÍA OSMÓTICA	16
FIGURA. 5 PROCESO METODOLÓGICO.	27
FIGURA. 6 PROCEDIMIENTO DE SECADO DE MEMBRANAS DE REFERENCIA	29
FIGURA. 7 ANÁLISIS MICROSCÓPICO DE MEMBRANAS DE REFERENCIA	30
FIGURA. 8 PREPARACIÓN DE AGUAS SINTÉTICA PARA ENSAYOS.	31
FIGURA. 9 MODELO DE REACTOR OSMÓTICO	33
FIGURA. 10 CAMBIOS EN EL MONTAJE EXPERIMENTAL ESTUDIADO	36
FIGURA. 11 CAMBIOS EN CONFIGURACIÓN DEL REACTOR, PARA LIBERACIÓN DE AIRE INTERNO.	37
FIGURA. 12 CONFIGURACIÓN DE SOPORTE PARA MEMBRANA.	38
FIGURA. 13 ESQUEMAS DEL PROCESO GENERAL DEL SISTEMA	42
FIGURA. 14 MEMBRANAS EMPLEADAS EN EL PROCESO DE EXPERIMENTACIÓN.	43
FIGURA. 15 ESCÁNER MICROSCÓPICO Y ESPECTROSCOPIA DE RAYOS X DE ENERGÍA DISPERSIVA PARA MUESTRAS DE REFERENCIA, CARA ACTIVA DE LA MEMBRANA.	44
FIGURA. 16 ESCÁNER MICROSCÓPICO Y ESPECTROSCOPIA DE RAYOS X DE ENERGÍA DISPERSIVA PARA MUESTRAS DE REFERENCIA, CARA NO ACTIVA DE LA MEMBRANA.	45
FIGURA. 17 DISEÑO FINAL CONFIGURACIÓN VERTICAL	47
FIGURA. 18 DISEÑO FINAL CONFIGURACIÓN HORIZONTAL	48
FIGURA. 19 . RESULTADOS PRUEBAS DE CALIBRACIÓN EN REACTOR DE CONFIGURACIÓN VERTICAL	51

FIGURA. 20 RESULTADOS PRUEBAS DE CALIBRACIÓN EN REACTOR DE CONFIGURACIÓN HORIZONTAL	53
FIGURA. 21 PRUEBAS EN CONDUCTÍMETROS PARA LAS DIFERENTES CONCENTRACIONES	53
FIGURA. 22 TUBOS DE ENSAYOS PARA PRUEBA DE EVAPORACIÓN	56
FIGURA. 23 REFERENCIAS DE ALTURAS EN EL SISTEMA DE CONFIGURACIÓN VERTICAL	57
FIGURA. 24 PRUEBAS DE CIANURO EN REACTOR DE CONFIGURACIÓN VERTICAL.	65
FIGURA. 25 COMPONENTES DEL SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA	73
FIGURA. 26 PLANTEAMIENTOS DE SISTEMAS PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA	74

LISTA DE TABLAS

TABLA 1. PRUEBAS EXPERIMENTALES EN LOS REACTORES.	40
TABLA 2 PRUEBAS AGUA DESTILADA REACTOR VERTICAL.	58
TABLA 3 PRUEBAS AGUA DE GRIFO REACTOR HORIZONTAL.....	58
TABLA 4 PRUEBAS AGUA SALADA REACTOR VERTICAL.....	59
TABLA 5 PRUEBAS AGUA SALADA REACTOR HORIZONTAL.....	60
TABLA 6 POTENCIA ELÉCTRICA AGUA SALADA REACTOR VERTICAL Y HORIZONTAL.....	61
TABLA 7 PRUEBAS AGUAS CIANURADAS REACTOR VERTICAL.	67
TABLA 8 PRUEBAS AGUAS CIANURADAS REACTOR HORIZONTAL.	68
TABLA 9 POTENCIA ELÉCTRICA AGUAS CIANURADAS REACTOR VERTICAL Y HORIZONTAL.....	69
TABLA 10 CONSUMO ELÉCTRICO DE UN HOGAR MENSUAL.	75

LISTA DE GRAFICAS

GRAFICA 1. CALIBRACIÓN DE CONDUCTÍMETROS, MUESTRAS DE NACN	49
GRAFICA 2 CALIBRACIÓN DE CONDUCTÍMETROS, MUESTRAS DE NACL	49
GRAFICA 3 COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD MEMBRANA NACL	63
GRAFICA 4 RELACIÓN PRESIÓN OSMÓTICA – POTENCIA NACL	64
GRAFICA 5 COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD MEMBRANA NACN..	70
GRAFICA 6 RELACIÓN PRESIÓN OSMÓTICA – POTENCIA NACL	71

Lista de Abreviaturas

A Coeficientes de permeabilidad del agua

AL-DS Active layer facing draw solution

AL-FS Active layer facing feed solution orientation

B Coeficientes de permeabilidad del soluto

C Concentración

CREG Comisión de regulación de energía y gas

CTA Membranas osmóticas de triacetato de celulosa hoja plana

CTA-NW Membranas osmóticas triacetato de celulosa hoja plana de fabricación no tejida

CTA-P Membranas osmóticas de celulosa triacetato de fabricación tejida

CTA-W Membranas osmóticas de celulosa triacetato de fabricación tejida

D Difusividad del soluto

FNCE Fuentes No Convencionales de Energía

FO Ósmosis forzada

HTI Hydration Technology Inc.

J_s Flujo inverso de soluto (M/L^2t)

J_w Flujo de agua (m^3/m^2t)

K Coeficiente de transferencia de masa (m/s)

M Peso molecular (kg/mol)

MDL Mecanismo de Desarrollo Limpio

MEB Microscopia Electrónica de Barrido

MET Microscopio Electrónico de Transmisión

P Presión osmótica

PRO Ósmosis de presión retardada

R Constante ideal de los gases

RO Ósmosis inversa

S Parámetro estructural de la membrana de capa de soporte porosa

SIN Sistema Interconectado Nacional de energía eléctrica

T Temperatura absoluta

UPME Unidad de Planeación Minero Energética

URE Uso Racional y Eficiente de la Energía

W Densidad de energía

ZNI Zonas No Interconectadas

β Coeficiente de Van't Hoff

ΔP Presión hidráulica efectiva aplicada a la solución de empate

π_d Presión osmótica de la solución de empate

π_f Presión osmótica de alimentación

1) INTRODUCCIÓN

Con los cambios abruptos que nuestro planeta ha sufrido en los últimos años el aprovechamiento de energías alternativas se ha convertido en la solución más eficaz y desde el punto de vista ecológico la más viable, por emplear recursos continuos y cotidianos, es por ello que fuentes de generación de energía, como la solar y la eólica son acogidas por el mundo por el hecho que su aprovechamiento no representa daño alguno al medio, pero si son beneficiosas para nuestro diario vivir. El agua es un recurso que también ha sido aprovechado para la generación de energía eléctrica como es el ejemplo de las hidroeléctricas, que se han convertido en fuentes sostenible de energía en el mundo entero, aunque en algunos casos cuestionadas por cambios ambientales que provocan. En Colombia gracias a la gran cantidad de ríos con que cuenta, este tipo de energía representan el 65% del suministro, más de la mitad de abastecimiento nacional, (Ministerio de Minas y energía, 2011- 2012). Por otra parte, aunque el uso de otro tipo de energía son empleadas, los combustibles fósiles hoy siguen siendo la alternativa más económica y desafortunadamente más común y contaminante para el medio ambiente, razón por la cual se hace necesario la búsqueda de nuevas formas de producción de energía sostenibles, renovables y sobre todo limpias, una de ellas es la energía osmótica, que aprovecha la salinidad de las aguas como la de los océanos un recurso inagotable, para generar energía. Si consideramos la creciente población en el mundo que demanda más agua y energía, y teniendo en cuenta que algunas de las soluciones en las que se avanza para cambiar los combustibles fósiles como la implementación de la energía eólica está limitada por los grandes espacios con que se debe contar para mayores producciones de energía y la solar por otra parte, por la gran inversión inicial que se requiere para poner en funcionamiento un sistema en general, brindan razones que estimulan a la exploración de alternativas no convencionales para la satisfacción de tales necesidades de manera sostenible. Basado en lo anterior, la creación de plantas de energía osmótica, que aprovechen el potencial del gradiente de salinidad de las aguas se pueden considerar una solución viable, ya que existe según los estudios la oportunidad de aprovechar con solo el 10 % de la energía disponible en las desembocaduras de ríos que corren hacia el mar, cubrir la

demanda de electricidad de 520 millones de personas, sin emitir gases contaminantes, ni alterar las condiciones de ecosistemas próximos al sistema, por lo contrario una planta de carbono emitiría más de mil millones de toneladas métricas de gases del efecto invernadero cada año (Elimelech, Yin Yip, Hoover, Phillip, & Tiraferri, 2011), que se verían reflejado en el aumento de la temperatura, el aumento del nivel del mar , la destrucción de las capa de ozono y el aumento de las enfermedades como el cáncer de piel, entre otras.

Colombia es ejemplo de la necesidad de la creación de este tipo de plantas ya que existen zonas que han sido marginadas y por el mismo hecho de estar apartadas, no poseen servicio de energía eléctrica y el abastecimiento de agua potable es costoso, y en ocasiones el agua no es suministrada debidamente o llega a los hogares contaminada, por el tipo de actividades que realizan las mismas poblaciones en las fuentes de suministro, casos específicos son los que ocurre en poblaciones del sur de Bolívar donde se desarrollan actividades artesanales de minería, que corresponden al 25% de las actividades mineras generales de todo el país (De La Hoz, 2009), estas actividades producen aguas residuales contaminadas con porcentaje de concentraciones de sales de cianuros entre 700 a 800 mg/ L siendo valores que permiten el desarrollo de energía osmótica por su grado de salinidad y por ende el potencial que se podría producir, aunque perjudiciales desde el punto de vista de la salud para el hombre (Ramos Avilez, 2012).

Cabe resaltar que esas poblaciones que se consideran marginadas hacen parte del área donde aún hoy, se presentan problemas con fuerzas al margen de la ley y este factor junto con la lejanía de las cabeceras municipales, hacen que se consideren en su mayoría zonas no interconectadas [ZNI]. Las demandas no atendidas de energía en las ZNI en 2011 ascendieron a 65,0 GWh con un índice de crecimiento del 35,6% con respecto al 2010, lo que indica que para el año 2014 se estimó que esta demanda no atendida llegó a 80 GWh (Ministerio de Minas y energía, 2011- 2012). Aunque existe cierta variabilidad en estas estimaciones debido a diferentes factores que rodean el incremento de la demanda de energía en ciertas zonas, y establecer que la cobertura total de la población en servicios públicos domiciliarios es una de las principales preocupaciones para los países en vía de desarrollo, plantearse una alternativa

no convencional para esta creciente demanda de energía y agua potable, puede ser la vía que conduce a la solución de estos dos problemas, y más aún, cuando Colombia inicio a pesar en este tipo de energía al expedir la Ley 697 de 2001, Ley de Uso Racional y Eficiente de la Energía [URE], donde brindan los lineamientos para implementar el uso de las fuentes no convencionales de energía en la generación de electricidad con incentivos claros para las áreas rurales, además cabe resaltar que Colombia es un país rico en recursos hídricos con gran cantidad de ríos, y a pesar de muchos también un gran extensión de zonas donde no existen controles estrictos sobre actividades mineras, y mucho menos sobre el vertimiento de concentraciones de sustancias tóxicas como el de cianuros en aguas que suelen ser del consumo humano.

Sin embargo, todos los problemas planteados con anterioridad pueden ser cubiertos en cierta medida, si se logra potencializar la implementación de las tecnologías de reactores de membranas osmóticas, utilizando aguas contaminadas de las actividades mineras, tratando de minimizar la vulnerabilidad que estas representan y ayudando a su vez a las poblaciones a mejorar la accesibilidad a la luz eléctrica. Por ello el objetivo de este proyecto es estimar la variación de la potencia eléctrica en un generador de energía, en función de la presión osmótica, utilizando membranas poliméricas a escala de laboratorio y aguas sintéticas para diferentes concentraciones de cianuro, referenciadas en las características de las aguas residuales resultantes de la actividad minera del sur de Bolívar.

De acuerdo a la investigación realizada y coordinada por el Grupo de Investigación Modelación Ambiental (GIMA) de la Universidad de Cartagena, en la línea de investigación de gestión ambiental, y un grupo docente del programa de ingeniera química de la Universidad de Ryerson sobre los reactores de membranas osmóticas y sus distintas configuraciones nos llevan a formularnos las siguientes preguntas de investigación:

¿El potencial que genera el gradiente de salinidad entre el agua cianuradas y potable es suficiente para la producción energía eléctrica? y de ser posible ¿Cuál es la magnitud de dicho potencial?

La implementación de la planta piloto haciendo uso de aguas cianuradas permitió evaluar el potencial que este tipo de aguas puede brindarnos, el experimento tuvo lugar en el laboratorio de saneamiento de ingeniería civil de la Universidad de Cartagena y laboratorio de modelación de ingeniería química de la Universidad de Ryerson, se desarrolló haciendo uso de dos reactores en acero inoxidable, el primero de ellos con una configuración horizontal y capacidad de 16 litros y el segundo con una configuración vertical con capacidad de 10 litros respectivamente, un juego de membranas poliméricas GE Osmonics SE que permitieron la generación de la presiones requeridas y un tubo medidor que indicaba el potencial generado por las aguas empleadas en cada uno de los ensayo. Durante las pruebas realizadas se consiguió un potencial de 1.9 cm de cabeza de agua en el reactor de configuración vertical, mediante una concentración de 700 mg/l. Estos resultados dan un idea del potencial que se puede obtener de las aguas cianuradas y además se consolidan como una fuente importante para el avance en este tipo de energía, en primera instancia permitirá el desarrollo de la línea de investigación de gestión ambiental de la Universidad de Cartagena, por cuanto se brinda una alternativa de solución al problema energético en la zona del sur de Bolívar y a la contaminación de las aguas por parte de la actividad minera, además será la base para futuros trabajos de investigación llevando a la Universidad de Cartagena a ser pionera en Colombia en el desarrollo de este tipo de energía alternativas y a nivel internacional se abrirá un campo más amplio al aprovechamiento de las aguas cianuradas, como base para la obtención de energía a partir de reactores osmóticos, a su vez este proyecto será el punto de partida para futuros ingenieros civiles interesados en las línea ambiental y permitirá a su vez crear interés en ingenieros ya consolidados a buscar soluciones de tipo eco-amigables para resolver los problemas que el mundo hoy padece .

En últimas las investigaciones a nivel internacional desarrolladas abren un panorama positivos por el hecho de que se encuentran potencias comprendidas entre 2,7 y 5,1 W/m² para aguas con concentraciones de sal entre 35 y 60 g/l utilizando membranas de celulosa de hoja plana (Achilli, Cath, & Childress, 2009), y se ha llegado por parte de otras a la conclusión que para producir energía a un precio competitivo se debe llegar a una potencia mínima de 5 W/m² (Klaysom, Cath, Depuydt, & Vankelecom, 2013), incentivando por tanto

a continuar con los estudios de este tipo de energía con el fin de que se pueda alcanzar lo anteriormente propuesto y de esta forma utilizar este tipo de energía en actividades cotidianas.

2) OBJETIVOS Y ALCANCES

2.1) OBJETIVO GENERAL

Estimar la variación de la potencia eléctrica en un generador de energía, en función de la presión osmótica, utilizando membranas poliméricas a escala de laboratorio y aguas sintéticas para diferentes concentraciones de cianuro, referenciadas en las características de las aguas residuales resultantes de la actividad minera del sur de Bolívar.

2.2) OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar las características físico-químicas de las membranas osmóticas, que muestren un mejor potencial de uso basados en las aguas residuales y permitan una mejor eficiencia en el sistema.
- Construir una planta piloto de osmosis inversa, en el laboratorio de saneamiento de la universidad de Cartagena, que permita aprovechar la presión osmótica para la generación de energía eléctrica utilizando membranas poliméricas.
- Monitorear el funcionamiento de la planta piloto, para diferentes condiciones de operación, variando las concentraciones de las aguas cianuradas.
- Identificar el mejor sistema de conversión de energía eléctrica basados en el rango de presiones osmóticas estudiadas, a través de pruebas con distintas configuraciones realizadas en el sistema.

2.3) ALCANCE

En esta investigación se evaluó la incidencia de las presiones osmóticas en la generación de un potencial de energía, mediante la construcción de una planta piloto que permitió de forma experimental determinar las concentraciones y el tipo de membrana, que favorecieron a la generación de dicho potencial. El proyecto solo abarcará la construcción de la planta piloto y la evaluación de presiones en el sistema, basado en la variación de las concentraciones de las aguas cianuradas sintéticas.

La construcción de la planta piloto se planteó para realizar experimentos de obtención de presiones a partir de reactores de membranas osmóticas. Esto con el propósito de conocer la capacidad de sostenimiento, el manejo del sistema en términos reales y la eficiencia de producción de energía basada en las presiones obtenidas. De esta forma, se pudo identificar las implicaciones de un proyecto a escala.

El producto que se obtuvo fueron gráficas donde se muestran la proporcionalidad entre la presión osmótica y la densidad de poder, además de tablas donde se relacionarán las variaciones de las presiones osmóticas, y las diferentes concentraciones de las aguas de cianuro con respecto al potencial energético, representado en cabeza de presión. De lo anterior se llegó a la conclusión de la factibilidad al utilizar aguas cianuros para la generación de energía eléctrica.

A si mismo los resultados de la investigación son en primera instancia una tesis de pregrado, que servirá como base para el afianzamiento de línea de gestión ambiental, e incluso el desarrollo de una nueva línea en la Universidad de Cartagena, teniendo en cuenta que las aguas cianuradas, no presentan antecedentes en la misma para su utilización en la generación de energía. Del mismo modo, se publicarán dos artículos a nivel nacional o internacional, con el fin de mostrar los avances que se desarrollaron y el potencial que sean los resultados.

2.3.1) Delimitación temporal

El periodo de estudio que abarcó el proyecto de investigación fue durante un año, que corresponde a los dos semestres académico del año 2015, en el cual se hizo una revisión y clasificación de información secundaria a través de las bases de datos científicas y aquellas disponibles en la Universidad de Cartagena y la Universidad de Ryerson, y se determinaron los métodos, es decir cada uno de los pasos a seguir durante el desarrollo de la investigación, los procesos que permiten establecer precedentes para la ejecución de cada actividad de la forma adecuada y el sistema empleado que a través de la información secundaria se alcanzó proximidad y resultados fehacientes para alcanzar los objetivos propuestos.

Este proyecto hizo parte de la línea de investigación de gestión ambiental, por lo cual el producto complementario es el punto de partidas para investigaciones futuras que pretendan la obtención de energía mediante el uso de membranas osmóticas. Los estudios y experimentos que se lograron en la planta piloto permitieron definir el potencial de las aguas cianuradas en la generación de energía y a su vez son un gran aporte para la comunidad científica que tiene grandes expectativas en el desarrollo de la energía osmótica y su incorporación como fuente alternativa de energía eléctrica.

2.3.2) Delimitación espacial

Nuestro proyecto se desarrolló en las instalaciones de la Universidad de Cartagena, específicamente en los laboratorios de sanitaria y ambiental de la sede piedra de Bolívar, y paralelamente se avanzaron otros estudios en el laboratorio de modelación de la Universidad de Ryerson en Toronto, Canadá, en ambos laboratorios fue posible ensamblar los sistemas diseñados, ya que existía espacio disponible suficiente para su desarrollo, además de contar con recursos básicos de apoyo.

3) MARCO DE REFERENCIA

A continuación, se expondrán los conceptos básicos que son necesarios para el desarrollo de la investigación y además son cruciales para la comprensión de los procesos que esta involucra.

3.1) Marco teórico

La obtención de energía eléctrica mediante los sistemas convencionales utilizados a nivel mundial en la actualidad ha generado impactos ambientales negativos sobre el planeta, además la limitación que se presentan en la implementación de otros sistemas no convencionales como el solar o eólico, permiten explorar y desarrollar nuevas técnicas para el desarrollo de una nueva forma de generación de energía, una de las ideas más investigadas en la actualidad es la generación de electricidad mediante el uso de membranas de presión osmóticas.

3.1.1) Clasificación de procesos osmóticos

La ósmosis es el transporte de disolvente (principalmente agua) a través de una membrana semipermeable a partir de una corriente de alimentación de disolvente de alta concentración (es decir, baja concentración de soluto) a una corriente de baja concentración de disolvente (es decir, alta concentración de soluto). La solución receptora se denomina solución de extracción, inclusive se puede conocer como agente osmótico, medio osmótico o salmuera, pero el nombre que le corresponde es solución de extracción. Cuando se utiliza la ósmosis en sistemas de ingeniería, dos procesos de membrana osmótica básicos son practicados: Ósmosis Inversa y Ósmosis Retardada por sus siglas en inglés [RO] y [PRO] respectivamente (Quintana Portilla, 2013).

La osmosis inversa [RO] es un proceso en donde el agua se desmineraliza al ser inyectada a altas presiones sobre un conjunto de membranas semipermeable como las que son usadas en una planta de desalación. Este proceso está basado en las propiedades de la membrana semipermeable de dejar pasar con más facilidad el agua dulce que el agua salada, creándose

una diferencia de potencial hidráulico entre esos dos líquidos cuando cada uno se sitúa a un lado de la membrana.

Aumentando convenientemente la presión en el lado del agua salada se puede hacer pasar el agua al compartimiento menos salino, dejando atrás parte de las sales. El principal problema se presenta en la obtención de membranas baratas y resistentes a la presión diferencial generada, campo en el cual se están realizando muchas investigaciones actuales.

La presión que obliga al agua a atravesar la membrana es la diferencia entre la presión aplicada en el lado de alimentación y del permeado se denomina presión neta de trabajo, si existe mayor presión en el lado de la alimentación de la membrana el agua pasara hacia el lado del permeado, si la presión total es mayor en el lado del permeado el agua seguirá otro camino.

Por otra parte, la Osmosis por Presión Retardada [PRO], es un proceso mediante el cual se obtiene energía debido al gradiente de salinidad obtenido por la diferencia de concentración salina entre agua salada (generalmente agua de mar) y agua dulce (generalmente agua de río), este método fue inventado hacia el año 1973 por el profesor Sidney Loeb en la Universidad Ben-Gurion del Negev. La presión aproximada fue de 26.000 kPa para aguas con disoluciones de cloruro de sodio, lo que equivale a una columna de agua de 270 m de altura (Loeb, Van Hessen , & Shahaf, 1976).

La primera planta osmótica del mundo con capacidad de 4 kW fue inaugurada por Statkraft el 24 de noviembre de 2009 en Tofte, Noruega. Se estima que cada año 1.600 TWh se podría generar en todo el mundo, y con tan solo 12 TWh en Noruega, sería suficiente para satisfacer el 10% de la demanda total de electricidad (Statkraft Company, 2009).

3.1.2) Membranas osmóticas

Las membranas pueden definirse como un film delgado que separa dos fases y actúa como una barrera selectiva al transporte de materia. Esta definición incluye la de membranas preselectiva e implica que existe una diferencia de potencial químico entre 2 fases. Es muy importante puntualizar aquí que la membrana no se define como un material "pasivo", sino

como un material funcional. En otras palabras, el rendimiento de las membranas en términos de caudales y selectividades depende principalmente de la naturaleza de los elementos contenidos en las dos fases y de la fuerza directora que se aplica.

3.1.2.1) Configuración de las membranas

Existen cuatro configuraciones típicas de membranas: Configuración capilar, configuración tubular, configuración arrollada en espiral y la configuración de placa y bastidor.

Las membranas capilares son membranas delgadas cilíndricas con diámetro interior de 500 a 200 μm . El diámetro interior de estas membranas puede ser del 25 al 40 % del diámetro exterior. Estas permiten mayores velocidades a presiones de entrada alrededor de 2 bar, pero la mayor desventaja de estas membranas es la restricción de la presión limita la velocidad de flujo cruzado por el interior de las luces de las membranas.

Por otra parte, las membranas tubulares son de alguna forma la configuración más simple en que la membrana se moldea sobre la pared o cara interior del tubo soporte poroso. Las membranas poseen folículos de 13nm. Entre sus ventajas están las operacionales siendo capaces de tolerar grandes cargas, pero presentan desventajas en su corte y baja densidad de empaquetado.

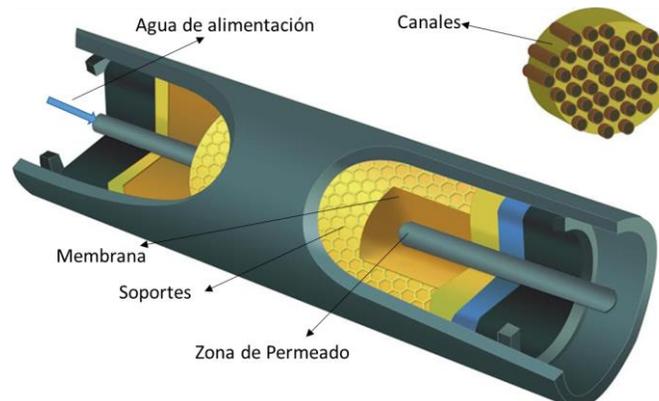


Figura.1.Membrana Tubular

Fuente: Autores.

A su vez la configuración arrollada en espiral, son esencialmente una hoja plana arrollada en una configuración de rollo de gelatina o rollo suizo. Una envoltente de dos membranas incluyendo o encerando un espaciador de permeado que esta sellado a lo largo de tres lados y el cuarto lado está conectado y laminado dentro de un tubo perforado que lleva el agua producto.

La configuración arrollada en espiral suele ser uno de los módulos menos costoso por unidad de área de membrana, Figura 2. Otras ventajas son los perfiles de concentración-polarización, velocidades lineales de flujo de (5 a 10 cm/s) y caídas de presión (ósmosis inversa kg/ cm²), que son bajos comparados con las otras configuraciones. Sin embargo, estos elementos tienden más al ensuciamiento que los de soporte tubular y que algunas unidades de plato bastidor, además que no es posible retrolavar la configuración.

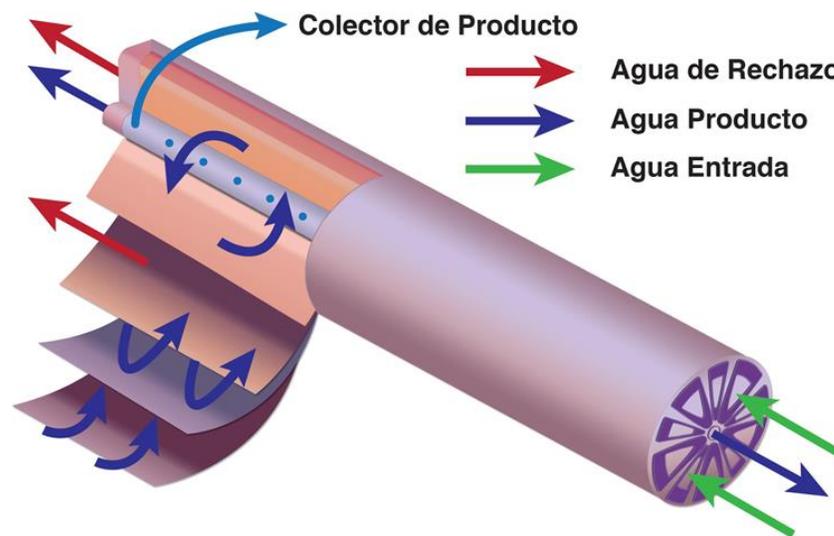


Figura. 2 Membrana arrollada en espiral.

Fuente: Autores.

En últimas las membranas planas, son las utilizadas en la configuración de placa y bastidor en estas la solución de alimentación fluye a lo largo de estrechos pasajes, atravesando las membranas o los conjuntos de membranas que puedan ensamblarse a partir de las membranas individuales intercambiable o paquetes se membranas.

La construcción tiene ciertas ventajas. Los costos de reemplazo de membranas son bajos, pero los costos de trabajo reemplazado, es decir, mano de obra requerida para cambiar el juego de membranas, son altos. Las unidades pueden desmontarse para permitir el acceso para limpieza manual. En algunos de los diseños, el permeado se recolecta de las placas de membranas individuales, lo que hace que la tarea de detección de las membranas sea más sencilla, en la Figura 3 se ilustra una configuración básica de este tipo de membranas. (Lara Borrero, 2002).

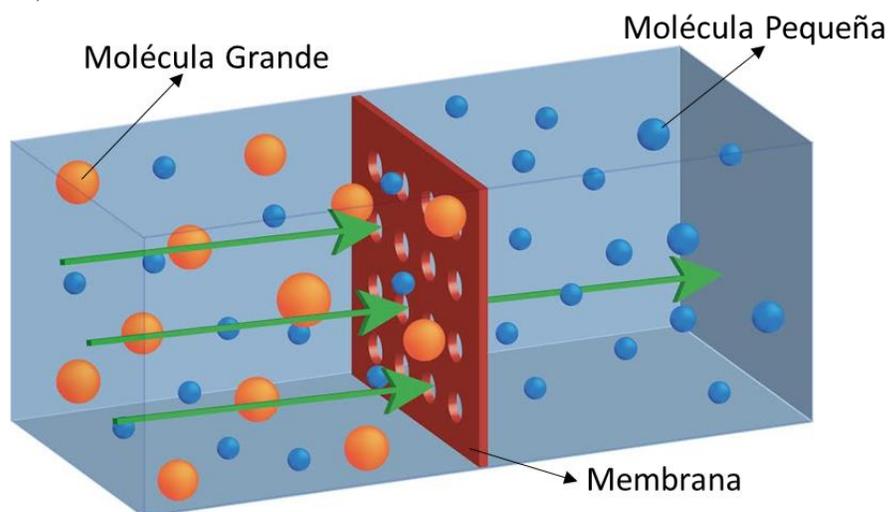


Figura. 3 Membrana de hoja plana.

Fuente: Autores.

3.1.2.2) Determinación del flujo de agua a través de la membrana

Entre las investigaciones realizadas recientemente que tuvieron como objeto investigar los efectos de las condiciones de operación en la producción de energía a partir del gradiente de salinidad por presión de ósmosis retardada. El rendimiento del proceso de PRO se mejoró mediante varias pruebas tales como la disminución de la concentración en la solución de alimentación, el incremento de la concentración en la solución de extracción, orientando la membrana con la capa de revestimiento activa denominada [AL-DS], de cara a la solución de extracción y aumentando la temperatura. No obstante, las densidades de energía obtenidas

experimentalmente fueron bajas con respecto a las predicciones del modelo usado que asume que los parámetros de las membranas son constantes en el proceso de PRO (Qianhong, Xue, & Chuyang Y, 2012).

La actuación de las membranas PRO, es usualmente evaluada en términos de la densidad de energía W , que está definida como la fuerza de salida por unidad de área de membrana (W/m^2). Una membrana PRO con un alto W es esencial en gran parte porque esto determina los requerimientos entre el área de la membrana y el tamaño de la planta PRO para garantizar una capacidad de producción de energía. Matemáticamente, W está determinada por el producto de la presión hidráulica efectiva aplicada a la solución de empuje ΔP (bar) y el permeado del flujo de agua J_w ($m\ s^{-1}$) a través de la membrana

$$W = J_w \Delta P \quad (1)$$

Sin considerar el efecto de paralización, el ideal J_w a través de una membrana semipermeable perfecta puede ser calcula por la ecuación, como:

$$J_w = A(\Delta\pi - \Delta P) \quad (2)$$

Donde A ($m\ s^{-1}bar^{-1}$) que es el coeficiente permeabilidad intrínseco de la membrana, $\Delta\pi$ (bar) es la diferencia de presión entre las dos. Por tanto, la ideal fuerza de salida es:

$$W = A(\Delta\pi - \Delta P)\Delta P \quad (3)$$

Para soluciones diluidas la presión osmótica $\Delta\pi$, aproximadamente utilizando la ecuación Van't Hoff es:

$$\pi = V_i C_i RT \quad (4)$$

Donde V_i es el número de iones formados con la solución de soluto (V_i es 2 para NaCl y NaCN), C_i la concentración molar de soluto, R constante de los gases and T temperatura absoluta (K), $V_i C_i$ es el total de la concentración de iones en $kmol/m^3$. Por otra parte, empleando ecuaciones diferenciales la ecuación 3 respecto a ΔP , tenemos que el máximo

poder de densidad (W_{max}) ocurre cuando ΔP es igual a la mitad de la diferencia de presión osmótica ($\Delta\pi/2$) a través de la membrana.

$$W_{max} = A \times \frac{\Delta\pi^2}{4} \quad (5)$$

3.1.3) Energía osmótica

El principio de este tipo de energía se basa en el aprovechamiento de la presión generada en el fenómeno natural del osmosis. Para tener una idea este fenómeno se puede considerar como un proceso inverso de la energía de separación que utilizan las plantas desalinizadoras, es decir en lugar de utilizar energía para separar una mezcla en sus elementos constitutivos, la energía en este caso se libera cuando los elementos se combinan. Cuando dos soluciones con diferente grado de salinidad (gradiente de salinidad) se mezclan, se libera lo que se conoce como energía libre de mezcla (Elimelech, Yin Yip, Hoover, Phillip, & Tiraferri, 2011).

Si la concentración de partículas no es uniforme, se produce un flujo de material desde la zona de mayor concentración hacia donde esta es más baja hasta alcanzar un equilibrio. Lo anterior es la razón por la cual, si se introduce una celda hecha de una membrana semipermeable que contenga cierta dispersión coloidal, en un líquido puro, este trata de introducirse dentro de ella para establecer una concentración uniforme, diluyendo la dispersión coloidal y produciendo una elevación de líquido dentro de la celda. El incremento de volumen produce una presión llamada Presión Osmótica. (Valencia, 1981)

Van't Hoff encontró una expresión donde define la presión osmótica P, que es directamente proporcional a la concentración C (g/l) y la temperatura absoluta T y es inversamente proporcional al peso molecular M. así:

$$P = \frac{CRT}{M} \quad (6)$$

Donde R es la constante ideal de los gases igual a 0,082 litros atm/mol grado.

3.1.3.1) Proceso básico de energía osmótica

Para entender el proceso que se lleva a cabo para la producción de energía eléctrica, consideremos el diagrama de la Figura 4. Inicialmente tenemos el agua salada suministrada a las membranas con una bomba de alta presión, mientras que el agua dulce se hace a baja presión. Luego en el proceso de osmosis utilizando bombas, el agua dulce a través de la membrana se mezcla con el agua salada ocasionando un aumento en el caudal, posteriormente el agua diluida se libera a través de una turbina que mueve un generador. La bomba de alta presión consume electricidad y la turbina produce electricidad. Debido a que el caudal a través de la turbina es mayor que el caudal a través de la bomba de alta presión, el proceso tiene el potencial para producir más energía que la que consume.

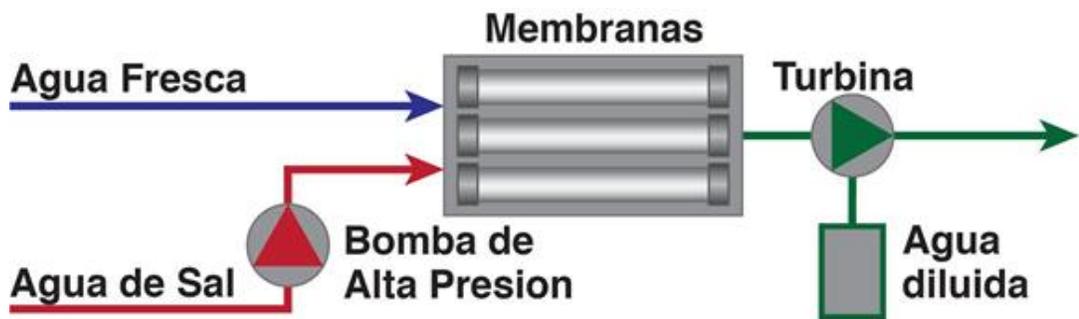


Figura. 4 Proceso básico de energía osmótica

Fuente: Autores.

Investigaciones recientes y diferentes pruebas a escala en el laboratorio han arrojado resultados que muestran la existencia de problemas fundamentales que evitan que el proceso anteriormente descrito no sea una forma práctica de producir energía, entre estos tenemos, con una menor presión osmótica, la fuerza motriz que mueve el permeado a través de las membranas es reducida. Por lo tanto, el agua salada debe ser suministrada a alta presión para

mantener el flujo de permeado y mantener la alta presión en el flujo de agua diluida y otro sería las. Pérdidas mecánicas en la bomba, turbina y el generador. Incluso los grandes dispositivos modernos, experimentan algunas pérdidas cuando convierte la energía eléctrica a energía hidráulica, o viceversa. Un diseño de proceso más viable sería eliminar la bomba de alta presión y reducir al mínimo el flujo de agua a través de la turbina a lo necesario para producir energía neta. (Statkraft, 2008).

3.1.4) Cianuro

El término cianuro hace referencia a todos los compuestos que contienen el ion CN⁻ (Donato, y otros, 2007) es encontrado en la naturaleza en una amplia variedad de compuestos orgánicos e inorgánicos, como cianuro de hidrógeno, sales inorgánicas simples (NaCN, KCN), complejos metálicos de cianuro, tiocianatos y cianuros orgánicos o nitrilos (Huertas *et al.*, 2010). La forma más común, es el cianuro de hidrógeno que es un líquido o gas incoloro con un ligero olor a almendras amargas.

El cianuro, en algunas formas, es un tóxico muy potente y de acción rápida, esta toxicidad se relaciona con su especificación fisicoquímica (Hilson & Monhemiusb, 2006) y depende de su forma particular. Así, mientras que el cianuro libre es un veneno metabólico muy peligroso, los complejos metálicos de cianuro varían en toxicidad en función de la facilidad con la que el cianuro sea liberado de ellos.

Los síntomas de envenenamiento por cianuro incluyen latido irregular del corazón, convulsiones, dolores en el pecho y vómitos. Los signos de intoxicación aguda del ganado, incluyen temblores musculares, salivación, lagrimeo, defecación, micción y dificultad para respirar, por lo general, esto ocurre en 10 minutos, la muerte puede seguir rápidamente (Hilson & Monhemiusb, 2006).

3.1.4.1) Cianuro y la minería

El oro es un metal utilizado ampliamente en diversas industrias (por ejemplo, sistemas eléctricos, pilas de combustible, catalizadores, área biomédica, etc.), debido a sus propiedades físicas y químicas (Bulgariu & Bulgariu, 2011). El oro es generalmente lixiviado empleando una solución acuosa de cianuro alcalino, el proceso es basado en el hecho de que el oro se disuelve en soluciones de cianuro aireados para producir el complejo de cianuro de oro.

Grandes cantidades de cianuro son producidas para la extracción de minerales metálicos, el proceso fotográfico, la fabricación de fibras sintéticas, la producción de productos químicos orgánicos, la fabricación de acero, etc. Unas 80000 ton de CN/año son consumidas en la minería de oro en América del Norte. (Ramos Avilez, 2012).

3.1.5) Microscopia Electrónica de Barrido [MEB]

Es una técnica de análisis superficial, que consiste en enfocar sobre una muestra electro-densa (opaca a los electrones) un fino haz de electrones acelerado con energías de excitación desde 0.1kV hasta 30kV. Esta técnica nos permitirá, visualizar el deterioro morfológico que podría sufrir las membranas, en cada una de las pruebas que se desarrollaran, con el fin de tener rasgos cualitativos que o no los resultados cuantitativos.

El haz de electrones se desplaza sobre la superficie de la muestra realizando un barrido que obedece a una trayectoria de líneas paralelas. La variación morfológica de la muestra entrega diversas señales (electrones secundarios, electrones retrodispersados, emisión de rayos X, etc.) que son recogidas por distintos detectores; los cuales permiten la observación, caracterización y microanálisis superficial de materiales tanto orgánicos como inorgánicos.

Entre las ventajas obtenidas por este sistema encontramos:

- Su gran profundidad de campo que le da apariencia tridimensional a las imágenes permitiendo enfocar y observar amplias zonas de la muestra al mismo tiempo.

- Puede producir imágenes de alta resolución (de hasta 3 nm), es decir, que detalles muy cercanos en la muestra pueden ser observados separadamente a alta magnificación.
- La relativamente sencilla preparación de las muestras.
- Se pueden observar muestras de tamaños desde centímetros hasta muestras del orden de nanómetros.

Sin embargo, el sistema posee a su vez algunas limitaciones como las que presentan a continuación:

- Las muestras deben ser conductoras.
- Las muestras deben estar libres de humedad.
- No es posible observar la estructura interna y detalles ultra estructurales de las muestras, para esto se requiere un Microscopio Electrónico de Transmisión MET. (Universidad de los Andes. Colombia, s.f.).

3.2) Estado del arte

La primera idea relacionada con la generación de energía mediante el proceso de osmosis fue presentada en el año de 1954 cuando Richard Pattle en sus investigaciones obtuvo que era posible utilizar las fuerzas osmóticas y membranas permeables para generar energía mediante la mezcla de agua dulce y salada, sin embargo esta publicación no tuvo una gran acogida a nivel mundial debido a la falta de publicaciones relacionadas con este tema (Achilli & Childress, 2010). No fue sino hasta la década de los setenta cuando se retomaron las investigaciones relacionadas con la energía azul debido a la crisis en los precios del petróleo, a pesar de todos los adelantos científicos no fue sino tan solo hace algunos años, a partir del 2009 cuando la empresa StarKraft se evaluó y planteó la implementación a gran escala de una planta en Noruega (Statkraft Company, 2009).

Así es como la planta osmótica desarrollada por la compañía StarKraft, abre las puertas a esta nueva forma de energía y permite que en el mismo año las investigaciones adelantas, obtengan resultados, basados en las características de las membranas disponibles para ese

entonces, estos analizaron la FO de triacetato de celulosa hoja plana [CTA] con resultados de potencias máximas entre los 2,7 y 5,1 W/m² para una concentraciones de NaCl de 35 y 60 g/L respectivamente, de esta forma se encontró que debido a la polarización de la concentración interna en las membranas se presenta un menor paso de sal por tanto la efectividad de las mismas disminuyen, siendo estos datos de gran importancia debido que se debe tener en cuenta los factores que ocasionen este fenómeno y eviten el desarrollo del potencial de la membrana (Achilli, Cath, & Childress, 2009). Con el fin de que estas últimas desarrollen su potencial es importante tener en cuenta la variedad y las características de las que se dispone el mercado, es por ello que en investigaciones siguientes se buscó encontrar, específicamente la mejor membrana desarrollada para ese entonces, los autores compararon tres tipos de membranas osmóticas de celulosa triacetato, dos de fabricación tejida [CTA-W y CTA-P] y otra de fabricación no tejida [CTA-NW] con estructura asimétrica, arrojando un potencial de 4,5 W/m² [CTA-P], 3,8 W/m² [CTA-W] y 3,2 W/m² [CTA-NW] siendo esta última de menor eficiencia debido a que es más propensa a la polarización interna (Qianhong, Xue, & Chuyang, 2012).

En el año 2013 se analizaron distintos tipos de escenarios para la generación del gradiente de salinidad utilizando agua de mar y salmuera productos de la desalinización junto con agua salobre que resulta de los procesos de tratamientos de aguas residuales domésticas, este estudio muestra que los procesos osmóticos mejoran sus resultados cuando las soluciones están a una temperatura de 30°C, dato a tener en cuenta para nosotros debido que esta es la temperatura ambiente promedio presente en nuestro medio, además se demuestra que la generación de energía por la presión osmótica osmosis retardada usando agua de mar como una solución de alimentación es potencialmente viable a través de la introducción de un proceso híbrido de desalinización FO y la generación de energía osmótica PRO, sin embargo las membranas utilizadas eran muy susceptibles al fenómeno de polarización interna lo que ocasiona una disminución en su eficiencia generando cantidades de energías poco rentables para el proceso (Chang Kim & Elimelech, 2013).

De igual se tienen registros a nivel nacional que solo hasta estos últimos años se han desarrollado proyectos donde estudian aspectos generales sobre las características necesarias

que deben tener una planta que funciona con sistemas de membranas osmóticas la Universidad Autónoma de Occidente en Cali, Colombia desarrolló proyectos donde estudiaban aspectos generales sobre las características necesarias que debe tener una planta que funciona con sistemas de membranas osmóticas, y fueron capaces de diseñar las etapas de pre tratamiento de aguas, necesidades y requerimientos para el correcto funcionamiento de la planta, además de la automatización y visualización del proceso general de la misma, sin embargo su alcance estuvo limitado al diseño y creación de un planta piloto para establecer los sistemas electrónicos para la automatización, evitando de alguna forma conocer si el diseño en general es viable desde el punto de vista de remoción de partículas que era su propósito, su idea radicaba en convertir el agua que se capta comúnmente en fuentes naturales en un agua purificada para el consumo humano, de esta forma dejan un amplio interrogante en el potencial de generación de energía que se puede lograr implementando la ósmosis (Moreno Benavides, 2011) .

Un estudio más minucioso y visionario de los procesos con membranas osmóticas para la generación de energía eléctrica es presentado en 2013 (Klaysom, Cath, Depuydt, & Vankelecom, 2013), donde exponen que a pesar de la tendencia a disminuir los costos de las membranas utilizadas en los procesos PRO con el paso de los años, esta investigación se centró en realizar comparaciones entre los distintos tipo de membranas RO, FO Y PRO utilizadas durante las últimas dos décadas para determinar los efectos en condiciones de operación teniendo en cuenta el transporte del soluto (sales) bajos los efectos de polarización y predecir la viabilidad de las mismas en base a ello, resaltan que para los procesos donde se utilizan las membranas PRO son comúnmente fallidos, en el sentido que las tecnología para este tipo de membranas nos ha adelantado, y el proceso de paralización ocasiona obstrucción en la membrana y evita el proceso de osmosis por ellos afirman que en actualidad teniendo en cuenta la eficiencia de la membrana, este sistema parecería ser incapaz de producir energía a un precio competitivo y rentable, para llegar a esto se recomienda que se debe lograr una potencia mínima de 5 W/m², asimismo se reafirmó que entre las ventajas más importantes de esta tecnología es su capacidad de generar un suministro constante de energía en

comparación con otras fuentes renovables como la eólica y solar e incluso presentar impactos ambientales bajos.

Se evidencia que con el transcurrir de los años se han ido desarrollado experimentaciones que con vistas a una mejora del proceso de generación de energía mediante la osmosis inversa, empezando con estos estudios la empresa Starkraft en el año 2009 utilizó membranas de triacetato de celulosa hoja plana [CTA] generando un rango de potencias máximas entre 2,7 y 5,2 W/m² y la principal ventaja de este estudio fue la identificación de factores que afectan el rendimiento de las mismas como es la polarización interna, así mismo en 2012 los investigadores Qianhong, Xue & Chuyang utilizaron membranas del mismo tipo pero esta vez dos de fabricación tejida [CTA-W y CTA-P] y otra de fabricación no tejida [CTA-NW] arrojando valores de potencia comprendidos dentro del mismo intervalo obtenido por la empresa Noruega, 4,5 W/m² [CTA-P], 3,8 W/m² [CTA-W] y 3,2 W/m² [CTA-NW] a diferencia del estudio anterior se pudo evidenciar que la membranas de fabricación no tejidas son más susceptibles a la polarización interna y se reafirmó que este fenómeno disminuye la eficiencia del proceso osmótico, en 2013 estudios paralelos se basaron en la relación presente entre la generación de energía y la rentabilidad del proceso, Chang Kim & Elimelech determinaron que para la mejora de los resultados anteriores del procesos osmótico la solución de debe estar alrededor de los 30°C sin embargo la principal desventaja de este estudio se obtuvo en las membranas utilizadas debido a que eran muy susceptibles a la polarización arrojando cantidades de energía poco rentables, Klaysom, Cath, Depuydt, & Vankelecom, concluyeron que a pesar de disminuir los costos de las membranas a utilizar para que el sistema sea rentable la potencia minima de energia a obtener debe ser de 5 W/m² valor muy cercano al extremo superior del intervalo arrojado en 2009 por Starkraft, además en este estudio se resaltó la ventaja que se tiene esta forma con respecto a las otras formas de energía no renovable.

Estos estudios muestran una contribución importante al suministro de energía y para la mitigación del cambio climático en las próximas décadas, siempre y cuando los desafíos

técnicos identificados se puedan superar, así mismo como la reducción de los costos, para esto es necesario seguir con las investigaciones de esta prometedora forma de energía.

3.3) Antecedentes

Con la continua degradación que ha tenido el ambiente, a razón de los combustibles fósiles y la actual escases de los mismo, ha sido necesarias las investigaciones en todo el mundo sobre nuevas técnicas de generación de energía; tesis de diferentes universidades, artículos científicos, estudios o ensayos se enfocan principalmente en indagar acerca de alternativas sostenible que impliquen la utilización de recursos asequibles.

Hoy entre todas las alternativas existentes, la energía azul se ha posicionado como una solución confiable ya que el potencial de generación de energía osmótica a través de los sistemas PRO, así como determinar los equipos y esquemas más eficientes nos dan soluciones a los problemas de energía actuales, además los procesos RO cada vez más usados aprovechando la osmosis son implementados en la desalinización de aguas con altas concentraciones de sales y la obtención de agua pura y ultra demandando menos cantidad de energía en estos procesos.

A nivel internacional se halló una investigación desarrollada por el Instituto Tecnológico de la India, New Delhi, donde se muestra la posibilidad de rechazo del cianuro de sodio mediante membranas poliméricas, al aumentar la presión en el reactor hasta un intervalo de 15-20 atm; la separación máxima obtenida fue de alrededor de 95% (remoción de cianuro). Basado en lo anterior tenemos que en primera instancia aunque los estudios sean un poco antiguos a través de las presiones obtenidas marcaban una pauta en la posibilidad obtención de energía mediante cianuro de sodio, sin embargo cabe resaltar que aunque dicha investigación está basada en modelos físicos computacionales, limitándola de cierta forma por el hecho de no poder comprobar los resultados presentados aunque permiten abrir el camino hacia un nuevo segmento donde las membranas poliméricas pueden ser empleadas para tal fin (Murthy & Gupta, 1999).

Así mismo encontramos compañías que en los últimos años se han dedicado a la investigación práctica y teórica de los sistemas osmóticos para la producción de energía azul, Statkraft AS empresa noruega pionera desde hace 10 años, ha creado las primeras plantas que generan energía mediante membranas osmóticas haciendo uso de aguas dulces y saladas. Así mismo PURE AQUA, Inc. “water treatment and reverse osmosis systems”, empresa abanderada en Estados Unidos, en la desalinización del agua de mar, presentan plantas de osmosis inversa de diferentes capacidades de producción, y con tecnología completamente automatizada que son utilizadas en diferentes proyectos a pequeñas escalas.

Por otro lado en la ciudad de Cartagena, en sintonía con los avances en procesos energéticos se han propuesto estudios basados en los mismos, (Carreño Rivera & Garces Yepes, 2014) (Salinas Cesar & Ortiz Laza, 2010) nos dieron la base para determinar la factibilidad técnica y económica de una planta piloto para la potabilización del agua y generación de energía eléctrica a través de sistemas de presión osmótica, sin embargo su sistema tuvo un alcance solo en la utilización de agua de mar y en el diseño conceptual pero no práctico de los procesos a implementar. A su vez en la universidad de Cartagena se tienen investigaciones desarrolladas por docentes relacionadas con el tema, donde se emplearon aguas residuales con soluciones de cianuro de sodio utilizando membranas elastoméricas con el fin de remover las partículas de sal disueltas en el agua, no obstante los resultados generados en estas aun siendo satisfactorios en la obtención del subproducto no son correlacionales con parámetros necesarios para la generación de energía con membranas osmóticas aun sabiendo que es posible con estas aguas conseguir un gradiente salino (Quiñones Bolaños, 2005).

3.4) Marco legal

Es nuestro objetivo cumplir con el marco legal vigente y en especial con las leyes que se mencionan a continuación:

3.4.1) Leyes y decretos que rigen el abastecimiento de agua potable

La Ley 373 de 1997 decreta que para toda gestión de manejo del recurso agua se debe velar por el uso eficiente y el ahorro de la misma.

La Ley 79 de 1986 decreta que las áreas de bosques y extensiones naturales dentro del territorio nacional están protegidas ante la mano del hombre para garantizar la armonía natural del ciclo del agua y consecuentemente el abastecimiento de la población Colombiana.

El decreto 2105 de 1983 reglamenta la potabilización y suministros de agua para consumo humano.

3.4.2) Leyes y decretos que rigen el abastecimiento de energía eléctrica

Con la expedición de la Ley 697 de 2001, Ley de Uso Racional y Eficiente de la Energía [URE], se dan lineamientos para implementar el uso de las fuentes no convencionales de energía en la generación de electricidad con incentivos claros para las áreas rurales no interconectadas cabe resaltar que no todos los tipos de energía NO convencionales están sujetos a esta ley, esta se limita a la energía solar, eólica y geotérmica. Sin embargo, se Avanzar hacia la identificación y cuantificación de proyectos potenciales en el país, el Plan propone la promoción del Mecanismo de Desarrollo Limpio [MDL]. Adicionalmente, en Colombia existen una serie de exenciones para proyectos que contribuyen a la eficiencia energética, de tal manera que para aprovechar estos mecanismos se requiere mayor coordinación interinstitucional tanto pública como privada. Sin embargo, cabe anotar que desde el 2010 se han evidenciado avances en el tema. En junio de 2010, el Ministerio de Minas y Energía determinó a través de la resolución 180919, la implementación del Programa de Uso Racional de energía, el cual, en el tema de generación con FNCE establece metas de participación tanto para el Sistema Interconectado Nacional como para las Zonas no Interconectadas y establece otras metas de eficiencia energética en diferentes sectores de demanda.

3.4.3) Normas que rigen la calidad del agua

El RAS 2000, es una guía que indica de acuerdo a el tipo de fuente y la calidad del agua que se exige en Colombia cuales son las características organolépticas, fisicoquímicas y microbiológicas esenciales, los estudios de tratabilidad para seleccionar los procesos de potabilización, el procedimiento de muestreo para el control de calidad, las características de producción que debe cumplir la fuente para el abastecimiento que se requiere, en especial nuestro proyecto se centrará en revisar el límite máximo de sales de cianuros que puede contener el agua para el consumo humano y partir de ellos plantear las condiciones de sanidad a tratar en nuestro problema.

Resolución No. 0631, esta es la última emitida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible en la cual establecen los parámetros y los valore límites permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público, para nuestro soporte técnico existe un aparte solo que puntualiza en los vertimientos mineros.

4) METODOLOGÍA

Para el cumplimiento de los objetivos planteados en este proyecto, se llevó a cabo una investigación cuantitativa de tipo experimental, puesto que se manipularon concentraciones de cianuros, para medir el efecto de esta variable en presiones osmótica generadas por membranas poliméricas con el fin comprobar el potencial eléctrico que estas podrían tener para la generación de energía. El proyecto se desarrolló durante el segundo semestre académico del año 2015 en el laboratorio de saneamiento de la Universidad de Cartagena y el laboratorio de la facultad de Ingeniería Química de la Universidad de Ryerson. Para su desarrollo se implementaron cuatro fases descritas a continuación:

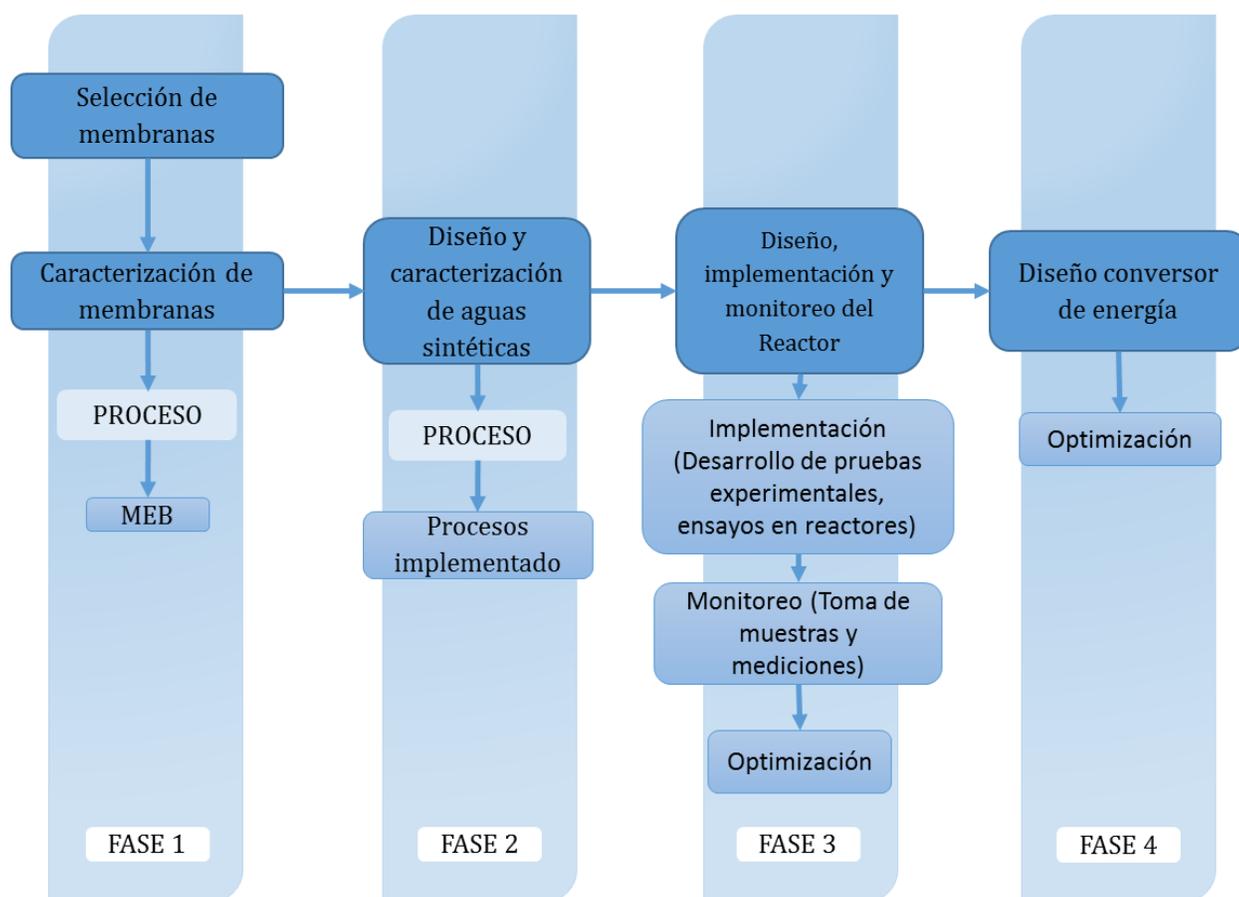


Figura. 5 Proceso metodológico.

Fuente: Autores.

4.1) Primera fase: Selección y caracterización de membrana polimérica.

la selección de la membrana se realizó teniendo en cuenta las características físico-químicas, como el tamaño del poro, resistencia a ataques químicos y resistencia mecánica, específicamente se buscaba que la membrana soportara presiones superiores a los 60 MPa, concentraciones de cianuro de como mínimo 1000 mg/l, tuviera un rango de pH amplio y además que el porcentaje de remoción fueran al menos 98%. La búsqueda se realizó basados en los prototipos más recomendados de investigaciones recientes, dentro de un marco científico, además se tuvo en cuenta la disponibilidad de las mismas en el mercado de acuerdo a las empresas comercializadoras, distribuidoras y productoras, como Aexon, Filmtec, Ge Osmonics Desal y Toray. La membrana seleccionada fue GE Osmonics SE.

4.1.1) Caracterización de membrana

Con el propósito de saber a priori, que tipo de problemas se podían presentar en las membranas bajo la acción del cianuro, cuan hidrofílica estas eran y además para comprobar lo dicho en la ficha técnica del vendedor, se sometieron a la acción del cianuro utilizando cuatro concentraciones distintas, estas fueron de 25, 50, 100 y 200 mg/l. Cuatro muestras de membranas para caracterización bajo sumersión de cianuro fueron cortadas en rectángulos de 3cm x 1cm, luego se depositaron en recipientes de 2” de diámetro con un volumen de 100 ml, en estos se vertieron 30 ml de cada una de las disoluciones preparadas y se mantuvieron durante 24 horas en inmersión.

Las muestras sumergidas se trasladaron a nuevos recipientes, platos de aluminio de 2” de diámetro, el proceso de disposición se realizó con pinzas para evitar contaminación de las muestras, luego estos contenedores se introdujeron dentro de un disecador al vacío 2047DE04150001 con volumen de 1.5 l para su secado, se empleó un disecador en lugar de un horno por la peligrosidad que representaban los gases de cianuro. El procedimiento con el disecador de vacío se realizó cuidadosamente, en primer lugar como este se encontraría bajo la absorción de vacío, se adhirió alrededor del vaso de vidrio una cinta en cruz que

evitaría implosión en caso de generarse una situación extrema de succión ver Figura 6, además a la manguera entre la conexión del sistema de vacío y el desecador se le adicionó un sujetador de control, que permitió regular el vacío generado internamente; luego de 24 horas, se extrajeron las muestras, el siguiente paso fue pesar cada una de ellas para determinar si estas presentaban absorción.



a) Corte de membrana de referencia; b) Cinta se seguridad para evitar implosión; c) Sujetador de control de vacío; d) Platos contenedores de aluminio.

Figura. 6 Procedimiento de secado de membranas de referencia

Fuente: Autores

Con el fin de determinar cada una de las características propias de la membrana y su comportamiento frente a la exposición de cianuro se sometieron a una evaluación mediante la prueba MEB, para ello se utilizó un Escáner Microscópico de Electrón JSM-6380LV provisto por la Universidad de Ryerson, en este se realizó un escaneen a magnificaciones de 100x, 1000x, 10000x, 100000x, estas aproximaciones son una ampliación de la coordenada x, que se refiere al área de visión del equipo, x para nuestro caso corresponde a 7mm, con estas aproximaciones se pretendía obtener vistas de las condiciones internas de las membranas y la composición de las mismas para identificar el deterioro interno y variaciones en su estructura. Para poder realizar la prueba anteriormente mencionada fue necesario que se produjeran contrastes, para ellos las muestras fueron sometida a un bombardeo de iones metálicos (oro) en un Denton Vacuum Desk IV durante dos minutos ver Figura 7, por otra parte, además del estudio de la superficie se determinó la composición química de las membranas haciendo uso del escáner microscópico y además de espectroscopia de rayos X

de energía dispersiva. En total se obtuvieron 40 imágenes de reconocimiento en 32 de ellas se logra visualizar la estructura interna de las muestras estudiadas; cabe resaltar que dentro del análisis se tuvieron en cuenta las dos caras de las membranas realizándoles cuatro aproximaciones a cada una de ellas, a su vez las ocho restantes corresponden a graficas que muestran la composición interna de las membranas haciendo uso de la espectroscopia de rayos X .Algunas imágenes arrojadas en esta fase se muestran en los anexos.



a) Membrana sometida a bombardeo de iones metálicos de oro; b) Denton Vaccum Deskk IV; c) Escáner Microscópico de Electrón JSM-6380LV.

Figura. 7 Análisis microscópico de membranas de referencia

Fuente: Autores

4.2) Segunda fase: Diseño y caracterización de aguas sintéticas:

Las aguas sintéticas para los ensayos se prepararon a diferentes concentraciones de cianuro de sodio, estas fueron de 25, 50, 100, 200 y 700 mg/l, para cada concentración se llevaron a cabo tres pruebas, dando una total de 15 ensayos. Todas las muestras de agua siguieron el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (Water Environment Federation, American Public Health Association , & American Water Works Association , 2015). Cabe resaltar que se contó con el apoyo de los laboratorios en la facultad de ingeniería de la Universidad de Cartagena y de la Universidad de Ryerson. Ver figura 8.

Para la caracterización físico - química de las aguas sintéticas se tuvo como guía la norma SM 4500 CN – F (Cyanide-Selective Electrode Standard Method), utilizando el método de ion selectivo para ello se emplearon los conductímetros 3200 YSI y Consort C5010 en la

Universidad de Ryerson y Universidad de Cartagena respectivamente, estas mediciones se tomaron antes y después de ser empleadas en el reactor, como medio que permitiera determinar la conductividad y por ende la concentración de cianuro en las aguas.

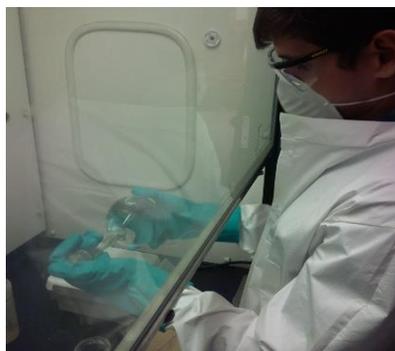
Para la preparación de las aguas requeridas para los ensayos, además de la norma SM 4500 CN – F, se tuvo en cuenta la capacidad de los reactores, el volumen muerto de los tanques y el de las tuberías empleadas. En el caso del reactor con configuración vertical el volumen de diseño fue de 8 l, para ello las cantidades requeridas de NaCN con el fin de cumplir las concentraciones antes mencionadas fueron de 200, 400, 800, 1600, 5600 mg, de la misma forma para el reactor con configuración horizontal el volumen fue mucho mayor, alrededor de 25 l las cantidades de cianuro necesarias fueron 625, 1250, 2500, 5000 y 17500 mg.



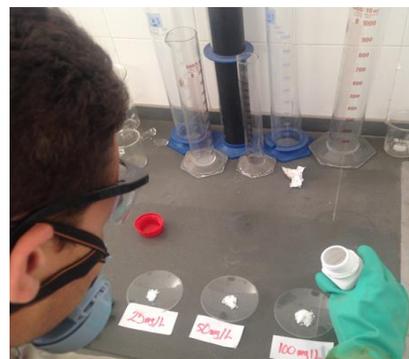
a)



b)



c)



d)

a y b) Equipos e instrumentos utilizados en la preparación de aguas; c y d) Proceso de preparación de aguas.

Figura. 8 Preparación de aguas sintética para ensayos.

Fuente: Autores

Por otra parte para la preparación de soluciones sintéticas para las muestras de referencias (rectángulos de 3cm x 1cm) se tomaron 200 g de muestra de cianuro, y se diluyeron en un biker de 300 ml con agua destilada, la dilución se realizó a través del agitador magnético VWR 365 durante 15 min a 100rpm, para nuestro caso fue suficiente teniendo en cuenta que el coeficiente de dilución de cianuro es de 76.5 g/100 ml, estando este alejado de las concentraciones que se prepararon, una vez terminado el proceso de mezclado, la mezcla se llevó a un balón aforado de 1000 ml al cual se adicionó agua destilada hasta reboce; el propósito era obtener cuatro disoluciones de agua cianuradas a diferentes concentraciones, por ende se tomó la mezcla inicialmente preparada como base para obtener las otras disoluciones, Las concentraciones preparadas fueron de 200, 100, 50 y 25 mg/l.

4.3) Tercera fase: Diseño, implementación y monitoreo del montaje experimental

Se diseñó y construyó dos reactores basados en las características de operación de la información secundaria analizada (Hernandez Sanchez, Rios Ponce, & Vicencio Medina, 2010) ver figura 9. con algunas modificaciones en materiales y forma, el material final empleado fue el acero inoxidable y se decidió por razones físicas construir contenedores que al unirlos lucieran como una cápsula, por otro lado, se pensó a su vez en realizar diferentes tipos de configuraciones para comparar y de esta forma conocer cuál de ellos ofrecía un mejor potencial de energía, la primera de las configuraciones empleadas fue de flujo horizontal y la segunda de flujo vertical.

El reactor de configuración horizontal tenía un diámetro 10" por 9" de largo para cada uno de sus contenedores (2 en total), estos contenedores se encontraban unidos por un sistema de flanches en lámina de acero inoxidable de 3/8", con diámetro exterior de 34.5 cm e interior de 27.5 cm, además de 12 orificios pasantes de 1/2" con el fin de sellar el punto de unión de los dos contenedores se adiciono una lámina de neopreno en el perímetro de los flanches, como sistema de protección se adicionó al interior de reactor a 10 cm de los flanches una malla de acero inoxidable de 6 x 0,047" y una lámina de teflón con un espesor de 1/4", un área de 35cm x 35cm y 98 perforaciones de 1/2" El segundo reactor poseía 8" de diámetro por 6" y 3" de largo (2 contenedores diferentes), unidos por un sistema de flanches en lámina

de acero inoxidable de 3/8", además de 8 orificios pasantes de 1/2", adicionalmente como medio de protección se colocó entre las láminas antes mencionadas una membrana de teflón de 1/2" con 98 perforaciones de 1/2" en el área de flujo del reactor junto con una malla de acero inoxidable de 6 x 0,047" del diámetro del área del flujo, la orientación del reactor fue vertical; el sistema sigue los principios de conservación de energía y las características de la membrana que se utilizó.

Como características adicionales al reactor se agregaron conductos de salidas regulados por válvulas, estos elementos son mangueras rígidas de 1/4" que fueron utilizados como medidores de cabeza de presión y de determinación del tiempo de ósmosis, indicando las presiones generadas del lado de las aguas con disoluciones de cianuro.

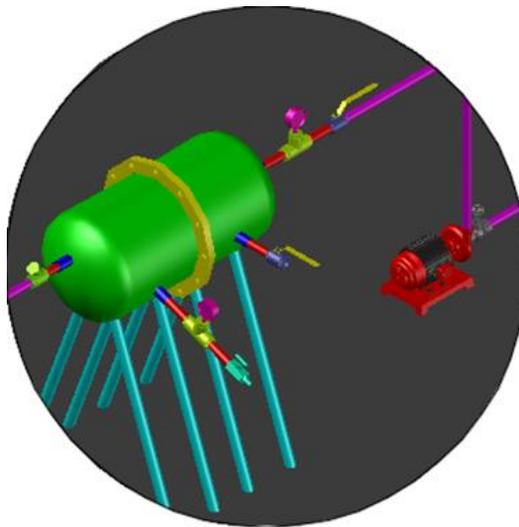


Figura. 9 Modelo de reactor osmótico

Fuente: Autores

En el proceso de implementación en primera instancia se pretendió conocer el comportamiento del reactor y los cambios que se debían realizar para el buen funcionamiento del sistema, monitoreando las condiciones de flujo, rigidez de la membrana y el chequeo de filtraciones en las diferentes válvulas y pasantes, además se inspeccionó las características de permeado en la membrana utilizando agua potable para los dos reactores de la investigación. Cabe resaltar además que los procesos de llenados se debía realizar bajo el

fenómeno de contraflujo de fluidos, permitiendo que cada una de las aguas fluyera en la misma dirección pero en sentido opuesto, ayudando a que se adelantara el proceso de ósmosis y el paso de las aguas fresca hacia el contenedor de aguas saladas (Jaramillo, 2007).

4.3.1) Calibración de montaje de configuración horizontal

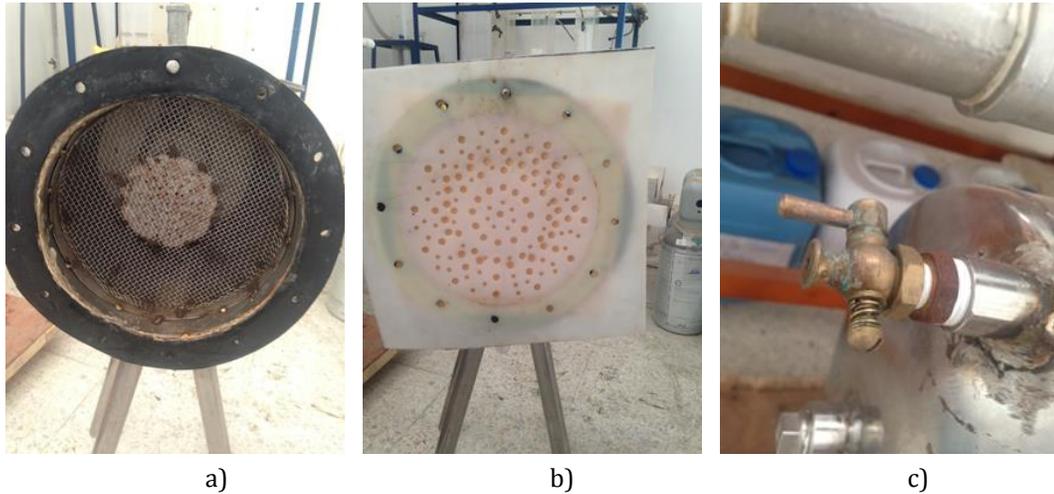
La primera prueba consistió en realizar con agua fresca un llenado completo del reactor para identificar posibles filtraciones durante este proceso y evitar inconvenientes en los ensayos con aguas saladas (NaCl y NaCN). En primera instancia se identificaron pequeñas filtraciones de agua en los accesorios de las tuberías, en la zona de conexión de entrada de los accesorios con el reactor en cada uno de sus lados y en la zona de contacto de los flanches que unían las dos partes. Las fugas en las tuberías fueron solucionadas de manera inmediata realizando cambios en ellas y en el sistema de adhesión, a la vez se decidió anexar empaques de neopreno a cada uno de los flanches para garantizar un selle hermético en la zona de contacto evitando que, en esta, la zona de más importancia existiera filtraciones, el sistema resultante fue un soporte de sellado que consistía en el neopreno y en el medio de ellos la membrana polimérica.

Habiendo solucionado los problemas de fuga, se procedió al llenado completo del reactor, durante este se evidenció un serio problema en el mismo comprometiendo su buen funcionamiento, ninguno de los contenedores se llenaban a su capacidad, inicialmente porque los niveles de entrada del agua en el tanque se ubicaban a la mitad del diámetro del reactor y por ser llenado a gravedad el nivel del agua solo llegaba a un punto determinado, por tal motivo se decidió realizar cambios, se trasladaron los ductos de entra a la parte superior del casquete con el fin de garantizar el completo llenado. Posteriormente se intentó repetir la prueba, con el fin de determinar si los cambios realizados fueron suficientes para permitir el correcto funcionamiento del reactor, sin embargo mientras se realizaba este proceso se evidenció algo curioso en el conducto medidor ubicado en el tubería inmediata a la entrada del reactor, a través de este conducto el sistema liberaba burbujas, es decir que en el interior del sistema había aire atrapado, impidiendo el llenado completo del contenedor, del mismo

modo no se tenía certeza del llenado a capacidad máxima del otro lado del reactor, para resolver el interrogante se realizaron pruebas de verificación dejando la entrada de agua completamente abierta durante 2 horas, luego se cerró la válvula que controlaba la entrada y se procedió a abrir la válvula de drenado, el agua de salida fue recolectada en un contenedor con el fin de determinar si el volumen correspondía al del contenedor, sin embargo al realizar la medición los resultados fueron desalentadores, hacía falta alrededor del 10 % de su totalidad. La solución planteada fue adicionar válvulas de purga en las partes superiores de cada uno de los casquetes, con el fin de liberar el vacío que se generaba dentro del sistema y permitir el correcto llenado del mismo.

Se verifico que los cambios anteriormente realizados permitieran el ingreso de agua en la totalidad de la capacidad del contenedor para ello primeramente se dejaron abiertas las válvulas de purga permitiendo la salida del aire hasta que se evidenciara salida de gotas de aguas, la válvula fue cerrada y se dejó una entrada continua de agua por un tiempo determinado, teniendo la certeza que el aire interior en el sistema fue evacuado completamente por estas. Finalmente se realizó la medición de los volúmenes de cada uno de los contenedores con el fin de corroborar el correcto y completo llenado de los mismos.

Adicionalmente se realizaron dos perforaciones en la parte inferior de cada contenedor con el fin de permitir el drenado del agua y garantizar su completo vaciado, a su vez para dar mayor rigidez a la membrana y evitar una posible rotura se implementó una lámina de teflón con 98 perforaciones de $\frac{1}{2}$ " para permitir el paso del flujo de agua, así mismo se procedió a retirar los dos manómetros instalados en el sistema, uno de ellos ubicado en la entrada del contenedor para reemplazarlo por un conducto medidor y el localizado en la salida del mismo debido a que en el sistema no se trabajaría a altas presiones como se tenía estipulado inicialmente. En la figura 10 se muestran algunos cambios descritos anteriormente y el montaje experimental finalizado.



a) Malla interna del reactor y empaque de neopreno; b) Membrana de Teflón; c) Válvula de Purga.

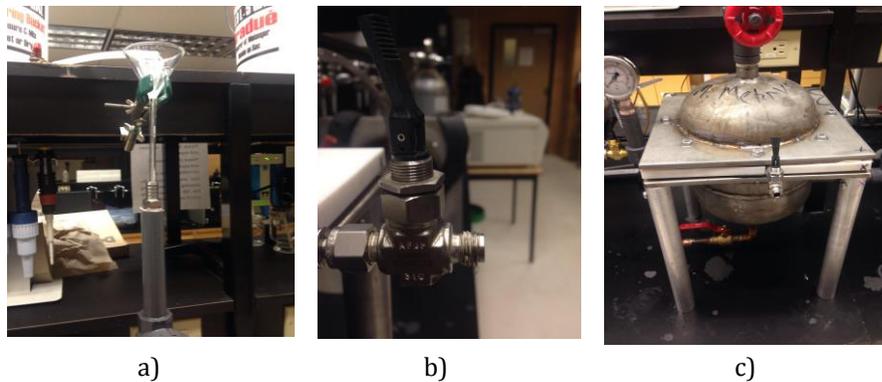
Figura. 10 Cambios en el montaje experimental estudiado

Fuente: Autores

4.3.2) Calibración de montaje de configuración vertical

En la prueba de reconocimiento del reactor se intentó llenar completamente y se observó con detenimiento cada una de las instalaciones realizadas. Durante la inspección se identificaron ligeras filtraciones en los acoples de las tuberías y en los empalmes realizados con soldaduras, las cuales tuvieron que ser arregladas inmediatamente; a su vez se verificó el sellado entre membrana, lamina de teflón y empaques punto que se pensaba que tendría problemas, pero este tuvo un excelente comportamiento. Por otra parte, se presentaron problemas con el paso de agua, un retroceso en las burbujas de agua, nos indicó que había vacío, y este impedía que el agua drenara continuamente en él, esto llevo a realizar ligeros cambio del sistema que inicialmente se tenía pensado. En primera instancia para el sistema de entrada del agua fresca

(contenedor superior), se reemplazó la manguera que conectaba directamente el tanque con el reactor por un embudo que permite las salidas de aire en el contenedor superior, este junto con un pequeño conducto que dirigía el flujo desde el tanque hasta el embudo. El mismo problema fue visualizado en el contenedor inferior, sin embargo para este se diseñó otro sistema que consistió en una válvula que penetraba a través de la membrana de teflón hasta el área donde la lámina de aire quedaba atrapada, con el fin de permitir el contacto del agua salada con la superficie activa de la membrana y evitar sobre presiones ver figura 11 Cabe resaltar que se empleó la membrana para esta prueba inicial.



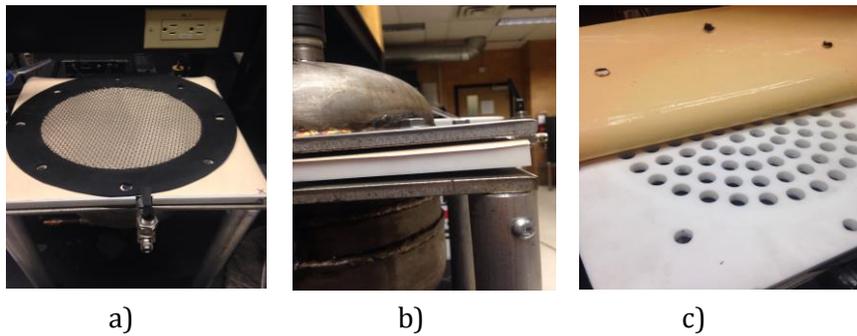
a) Embudo de vidrio para permitir la salida del aire en contenedor superior; b) Válvula de liberación de vacío en contenedor inferior; c) Vista general de válvula y membrana de teflón.

Figura. 11 Cambios en configuración del reactor, para liberación de aire interno.

Fuente: Autores

Una segunda prueba fue realizada, buscando esta vez evaluar si el empleo del soporte membrana de teflón y malla eran suficientes para proteger de la presión del agua cuando esta caía por gravedad y no sufriera ruptura alguna, ver figura 12. El proceso en el sistema consistió en llenar casi por completo el contenedor inferior para que brindara apoyo a la membrana, una vez hecho esto se abrió la válvula del contenedor superior para permitir el paso del agua y se controló que este fuese moderado, es importante puntualizar que en los últimos litros del llenado se abrió por completo la válvula por que se observó que la membrana era capaz de soportar sin duda alguna la presión ejercida. Se identificó además en esta prueba con la membrana que era necesario un cierre del sistema hacia las aguas saladas

para evitar que las presiones que podrían generar en el sistema devolvieran el agua hasta el tanque y por ende las mediciones que se tomaran en el conducto guía destinado para este propósito no fueran correctas, este fenómeno se presentó por que las aguas saldas no poseían presión alguna, por tanto se adicono una válvula que facilitara el cierre rápido y hermético del sistema para las pruebas subsiguientes. Nuevamente se verificó filtraciones, pero todas habían sido reparadas con éxito previamente.



a) Configuración final de soporte para membrana; b) Vista lateral de sistema de sellado en el reactor; c) Membrana de teflón de soporte

Figura. 12 Configuración de soporte para membrana.

Fuente: Autores

El primer proceso que se realizó antes de emplear el sistema con cualquier tipo de agua luego de la verificación de su correcto funcionamiento, mediante la calibración de los conductímetros 3200 YSI y Consort C5010, permitiendo tener confiabilidad en los valores arrojados durante las pruebas. La calibración consistió en utilizar 15 concentraciones de sal y siete de cianuro, a partir de ellas construir una gráfica que relacionara la conductividad y la concentración, permitiendo establecer equivalencias de salinidad y relación entre sal común y cianuro.

Una vez realizado todos los cambios necesarios, garantizando el buen funcionamiento y la seguridad de los laboratoristas, y calibrados todos los equipos, se procedió a realizar las pruebas planeadas con anterioridad. En los dos reactores se llevaron a cabo pruebas inicialmente con agua potable con el fin de determinar el comportamiento de las membranas frente a esta y de esta forma tener un punto de comparación (Blanco) y realizar comparaciones valiosas para la investigación, el número total de pruebas realizadas con agua fresca fue de seis. Por otra parte se decidió realizar también pruebas con agua sintéticas preparadas con sal de cocina (NaCl), que permitieran tener otro punto de comparación con el tipo de agua que normalmente es utilizado en las investigaciones (agua de mar), para evitar cualquier tipo de accidente fatal como consecuencia del cianuro, antes de que no se conociera el comportamiento del reactor durante el proceso de osmosis, para estas pruebas se decidió tomar la salinidad característica del agua de mar y simular esta mismas condiciones, es por ello que se preparan las aguas sintéticas con concentraciones de 35 g/l NaCl, a su vez se pensó que no era suficiente con este solo valor y adicionalmente se realizaron disoluciones con valores de 17.5 g/l y 70 g/l, que son la mitad y el doble de la concentración común, tres pruebas para cada una de las concentraciones mencionadas fueron realizadas, en general se desarrollaron 12 pruebas representativas para las condiciones de sal común. Por último, se empleó el cianuro para las pruebas, como se tenía planeado se tomaron 5 concentraciones diferentes y cada una de ellas fue repetida tres veces, con el fin de tener un valor confiable para los resultados, las concentraciones fueron de 700, 200, 100, 50 y 25 mg/l. En la tabla 1. Se resume las pruebas realizadas en el proceso de experimentación

Tabla 1. Pruebas experimentales en los reactores.

Prueba	No. de repeticiones	Agua Potable	Concentración (mg/l)							
			Sal (NaCl)				Cianuro (NaCN)			
			17.5	35	71	25	50	100	200	700
1	6	X								
2	3		X							
3	3			X						
4	3				X					
5	3					X				
6	3						X			
7	3							X		
8	3								X	
9	3									X

Fuente: Autores

El siguiente paso consistió en la determinación del parámetro de permeabilidad de la membrana y la determinación del tiempo aproximado de inicio de la osmosis, para ello se llenaron los dos lados del reactor completamente; del lado del agua fresca se dejó la válvula de paso abierta con el fin de que el flujo fuese regulado por el cheque de un solo paso, en el otro lado con las aguas de sal (NaCl y NaCN) se hizo una adición especial a la configuración del reactor agregando un tubo de inspección que indicaba a través del principios básicos de flujo el inicio del proceso de osmosis, este poseía una escala que ayudaba a conocer cuánto de caudal pasaba por la membrana en un determinado tiempo (coeficiente de permeabilidad de la membrana), los datos fueron tabulados y graficados con el fin de realizar una regresión lineal y hallar el coeficiente que era representativo para la membrana seleccionada. Para el monitoreo del sistema, se realizó un control constante de las condiciones de flujo y presiones; en cuanto a las verificaciones de las concentraciones de cianuro se realizaron mediante la toma de muestras en dos puntos (entrada y salida), el análisis de dichas muestras se hizo a través del método de ion selectivo, haciendo uso de los conductímetros 3200 YSI y Consort C5010 con el fin de realizar la verificación mediante pruebas de conductividad de la salida

de las aguas y además tener un parámetro de referencia que permitiera determinar las condiciones internas en los reactores.

4.3.3) Cuarta fase: sistema de conversión de energía eléctrica

El sistema se desarrolló con el fin de aprovechar de manera efectiva el potencial energético producido por los reactores, teniendo en cuenta el rango de presiones osmóticas estudiadas y por ende el máximo potencial esperado a producir que está entre 5 a 10 W, se utilizó como generador de energía eléctrica un sistema compuesto principalmente por un rodete de plástico negro de 25 cm de diámetro con una serie de aspas curvas, un eje de aluminio de 14 cm de diámetro que permitió la transmisión de las revoluciones y un dinamo de 12V de PML FlightLink Ltd color negro, apoyado en un soporte de acrílico rectangular de 80 cm de largo por 60 cm de ancho que permitió un mejor apoyo y por ende su mejor funcionamiento. Junto a este sistema se empleó un inyector regulador que consiste en una válvula de aguja en acero inoxidable de alta presión de 3" de longitud y un diámetro de entrada $\frac{1}{2}$ " y de salida variable, que se ajustó a las condiciones ideales del sistema, el propósito de esta válvula es direccionar el flujo de agua a las aspas del rodete anteriormente mencionado y producir el movimiento.

Para la generación de energía se direccionó el flujo de agua del inyector al rodete con el fin de que este gane energía cinética viéndose reflejada en movimiento que mediante el eje de aluminio se transmitió al dinamo, encargado de la transformación de energía mecánica a eléctrica, posteriormente esta energía obtenida se vio reflejada en un voltímetro digital ubicado en un tablero de acrílico de 20 cm de altura con 28 cm de ancho situado en la parte trasera del sistema, al mismo tiempo se evidenció el potencial en el encendido de una serie de bombillos eléctricos Led 2.5 W para hacer el sistema mucho más didáctico. Paralelamente se decidió anexar una pequeña estructura en acetato de 14 cm de ancho, 30 cm de largo y 24 cm de altura con el fin que el chorro de agua haga contacto con el rodete y evite la salpicadura de agua afuera del sistema y se proteja de esta manera toda la parte eléctrica, además se evitó el contacto con el agua de cianuro que salía del sistema. En la figura 13, se esquematiza el montaje general de ambos. Reactores.



Figura. 13 Esquemas del proceso general del sistema

Fuente: Autores

5) ANALISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1) Selección de membrana

Para el proceso de selección de la membrana se tuvieron en cuenta las características planteadas con anterioridad, la disponibilidad, la resistencia ataques químicos (cianuro) y a presiones de 60 MPa, se tomó la decisión de adquirir la membrana GE SE Reverse Osmosis (RO) con un tamaño de 305 x 305 mm cuyas características se muestran en la tabla siguiente. Ver figura 14

Serie	SE
Agua de alimentación	Residual industrial
Tipo	Resistente al cloruro y altas presiones
Rango de Ph (25°C)	1-11
Flujo (gfd)/psi	22/425
Remoción NaCl	98.9%
Polímero	Capa delgada

Tabla 2. Características de la membrana



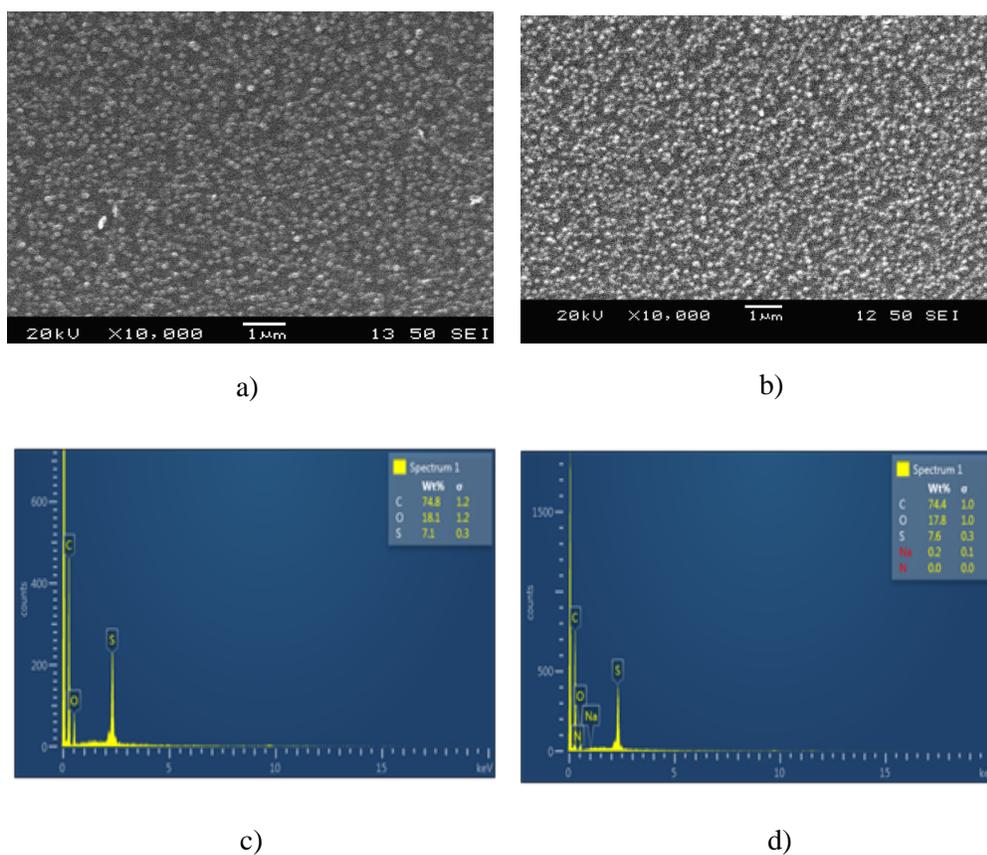
a) Compañía distribuidora; b) Presentación de la membrana.

Figura. 14 Membranas empleadas en el proceso de experimentación.

Fuente: Autores

5.2) Caracterización de la membrana

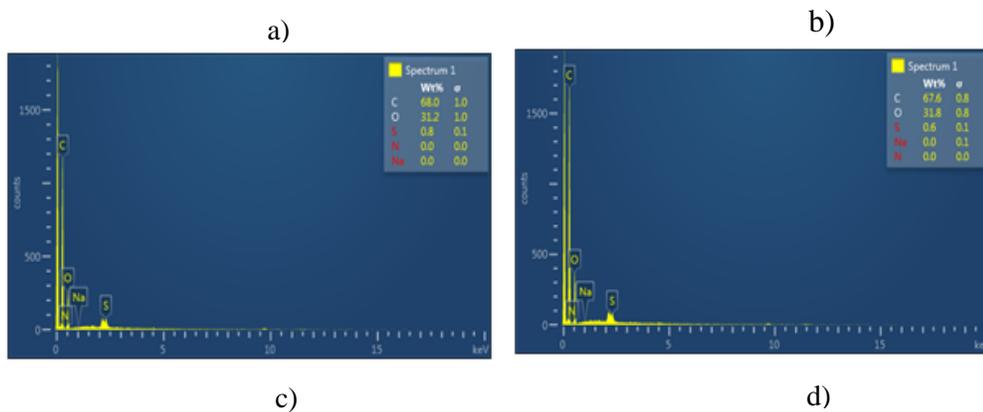
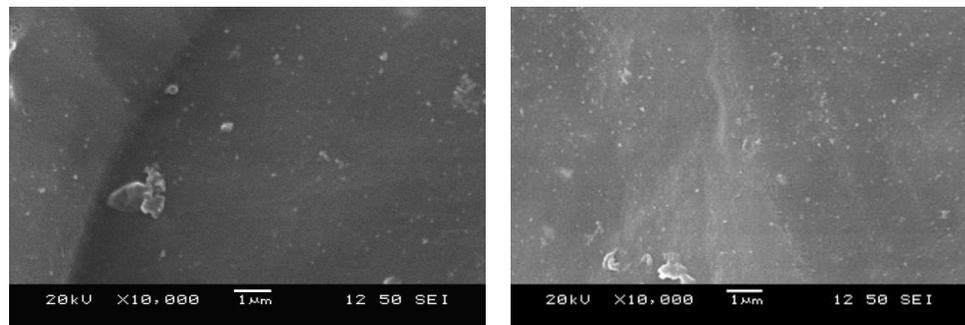
Con ayuda del Escáner Microscópico de Electrón y específicamente con la prueba espectroscopia de rayos X, se puede obtener una serie de imágenes que permitieron realizar el análisis físico químico de las membranas de acuerdo a las distintas concentraciones a las cuales estuvieron expuestas las muestras.



Aproximación 10000x; a) Blanco, b) Concentración de cianuro 200mg/L, Espectroscopia rayos X; c) Blanco, d) Concentración de cianuro 200mg/L.

Figura. 15 Escáner microscópico y Espectroscopia de rayos X de energía dispersiva para muestras de referencia, cara activa de la membrana.

Fuente: Autores



Aproximación 10000x; a) Blanco, b) Concentración de cianuro 200mg/L, Espectroscopia rayos X; c) Blanco, d) Concentración de cianuro 200mg/L.

Figura. 16 Escáner microscópico y Espectroscopia de rayos X de energía dispersiva para muestras de referencia, cara NO activa de la membrana.

Fuente: Autores

En las figuras 15 y 16 se observó que no hubo un cambio significativo entre el blanco y la composición de la membrana al ser expuesta a las diferentes concentraciones de sales que se platearon en las pruebas, lo que significa que esta no es hidrofílica como se tenía pensado, por otra parte cabe resaltar que estas muestras solo fueron sumergidas a las sales de cianuro y no sometidas a presiones, fenómeno adicional que no se tuvo en cuenta en esta etapa de la investigación pero al cual tienen que ser expuestas la membranas, en primera instancia al no ser expuesta las membranas a presiones nos permite pensar que por ello estas conservaron sus propiedades, en los anexos (Análisis de elementos internos membranas y vistas microscópicas de estructuras internas de membranas) en la primera de ellas se encuentran

imágenes a distintas aproximaciones y otra se muestran la composición de las membranas bajo todas las concentraciones manejadas en la investigación. Por otra parte al hacer el análisis de espectro arrojado por el escáner se encontraron altos contenidos de carbonos y oxígeno por tratarse de un poliamida (polímero), sin embargo también se encontraron porcentaje bajos de azufre esto es debido a que en los últimos adelantos conseguidos en investigaciones para mejorar las propiedades de los polímeros se agregan cantidades de azufre entre 5 al 10 % permitiéndole a las poliamidas desarrollar características de termoestabilidad, además de ayudarles con las propiedades elásticas y permeables, se ha establecido que con esta adición la estructura aromática del polímero podría soportar 70 °C, de un 42 a 68% más de lo que normalmente podrían ser expuestas, es decir que las hace más resistente alta temperaturas (Shockravi, Abouzari, & Javadi, 2009) (EE.UU Patente n° US2430859 A, 1947).

Durante los acercamientos más profundo realizados y comparando la estructura de la membrana no se notó ningún cambio o anomalía en los poros de la misma (No adhesión de partículas), caso que es apoyado por los resultados obtenidos en el espectro al solo arrojar los tres elementos que se mencionaron anteriormente

Del mismo modo se verifico si la superficie no activa de la membrana sufriría alguna anomalía al ser expuesta al cianuro, sin embargo, el escáner de las mismas nos indica que ese lado es similar a un papel, pero no sufre ningún tipo de cambio, es decir variación o adhesión de material que comprometa al desarrollo de la investigación.

5.3) Diseño del montaje final

A continuación, se muestran en detalle cada uno de los componentes que conforman el montaje final.

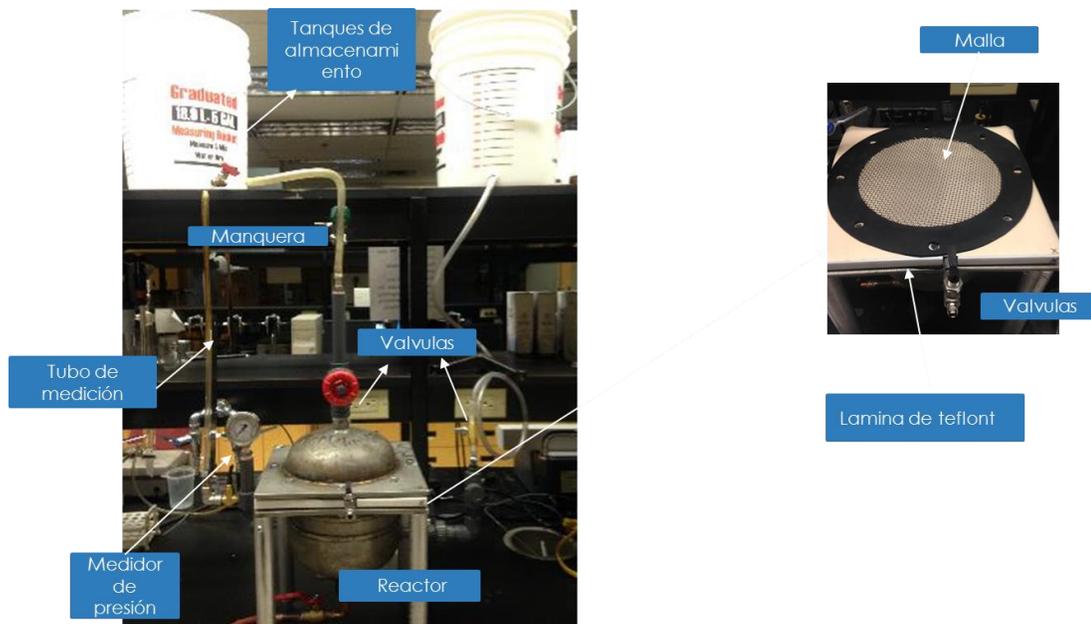


Figura. 17 Diseño final configuración Vertical

Fuente: Autores

La figura 17 Representa el reactor de configuración vertical, este fue diseñado con este sentido, en primera instancia porque se penso que de esta forma el llenado de los contenedores se podria realizar de manera homogenea, es decir la lamina de agua en contacto con la membrana llegaria a su superficie en un mismo delta de tiempo, por otra parte tambien se tuvo en cuenta la presión que se podria generar al tener el suministro de agua a una altura determinada (cabeza de agua) con el fin de mejorar el proceso de llenado y las presiones requeridas para la osmosis, de la misma forma se trato de que el volumen de este no fuese tan grande debido al gran interrogante de la influencia de la cantidad de requerida para el el proceso de generar el potencial de energia, mientras que la figura 18 representa el reactor de

configuración horizontal este sigue las características convencionales empleadas en los reactores osmóticos (Hernandez Sanchez, Rios Ponce, & Vicencio Medina, 2010), además una de las razones de este tipo de configuración es la estabilidad de la membrana durante el proceso ya que al mantener un balance entre las aguas de los dos lados del contenedor se puede prevenir la ruptura de la misma, se optó realizar el reactor con grandes dimensiones porque inicialmente además de seguir a (Hernandez,2010) se pretendía generar un mayor potencial energético basado en el área activa de la membrana



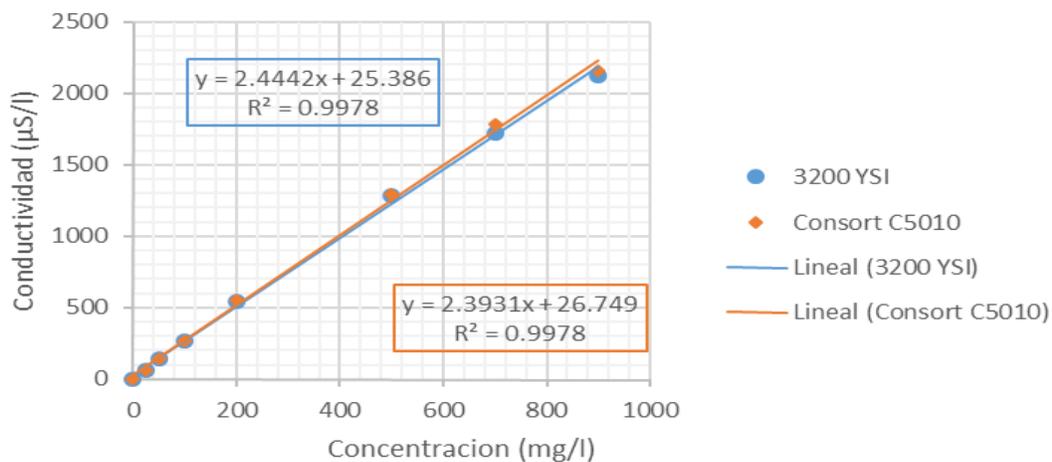
Figura. 18 Diseño final configuración Horizontal

Fuente: Autores

5.4) Calibración de conductímetros

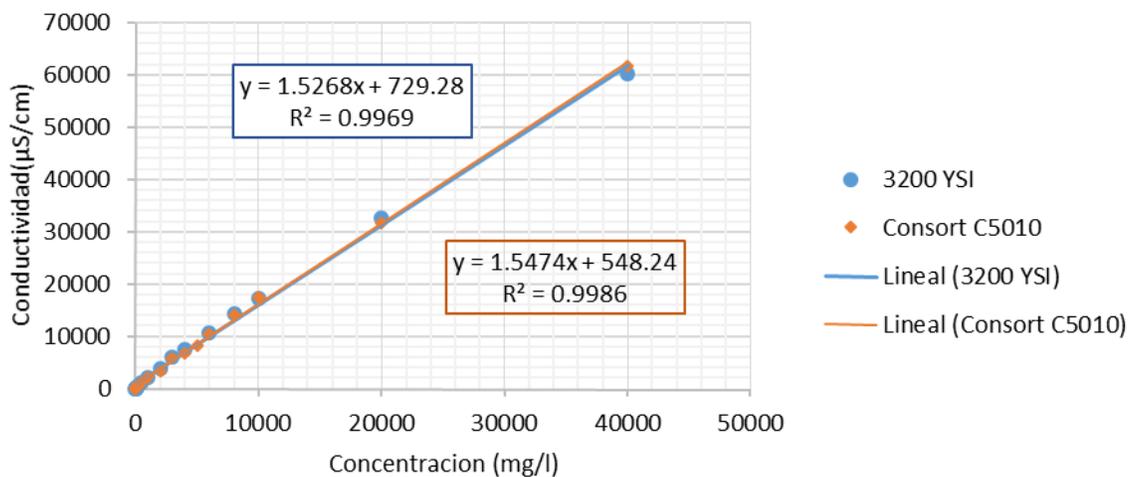
Dadas las concentraciones se procedieron a realizar las mediciones de las aguas y determinar los valores aproximados de conductividad y por ende de salinidad de las muestras estudiadas. Ver gráfica 1 y 2.

Grafica Calibracion Conductimetro NaCN



Grafica 1. Calibración de conductímetros, muestras de NaCN

Grafica Calibración Conductímetros NaCl



Grafica 2 Calibración de conductímetros, muestras de NaCl

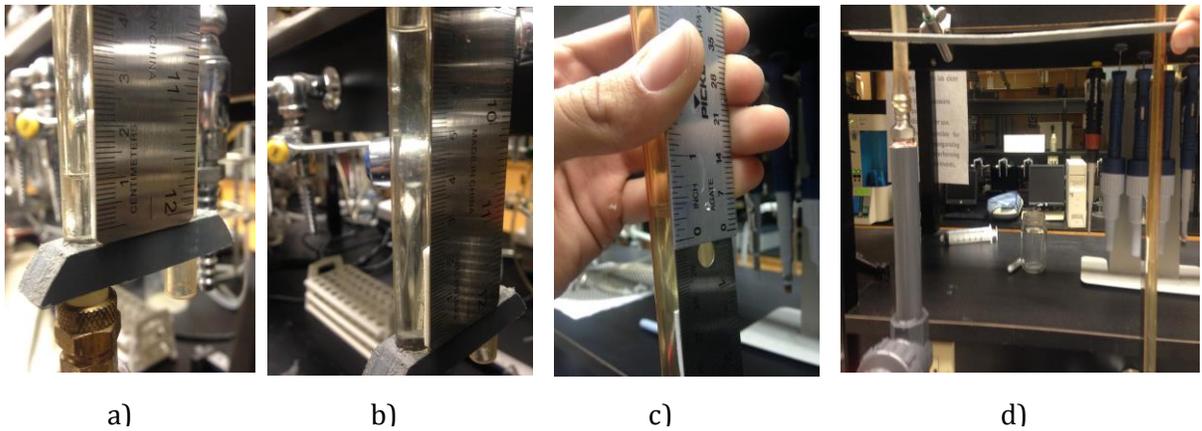
Como se muestra en las gráficas 1 y 2 se tomaron quince concentraciones de sal y tan solo seis para el cianuro por el riesgo con su manipulación, sin embargo, en el caso de los dos ajustes se tomaron los rangos en los que se manejarían cada una de las muestras a evaluar,

además cabe resaltar que la escala para las sales es mayor en el sentido de que las concentraciones del mar son considerablemente más altas en comparación en un relave aurífero en el sur de Bolívar. Los puntos dados por las gráficas no deben ser exactamente los arrojados en las pruebas solo funcionan como una guía, ya que los valores por el equipo también están sujetos a la temperatura interna del agua que es variable.

Por otra parte yendo a los detalles en las gráficas tenemos que al comparar las conductividades de las muestras de NaCN son un poco más altas que las de las de NaCl, tomando un valor cualquiera por ejemplo 500 mg/l tenemos que para aguas cianuradas la conductividad es 1283 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y para las saladas 1023 $\mu\text{S}/\text{cm}$ alrededor de un 20% mayor para el caso de la configuración vertical, tomando la misma concentración para la configuración horizontal se tiene para las aguas cianuradas la conductividad es 1291 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y para las saladas 1060 $\mu\text{S}/\text{cm}$ alrededor de un 18% mayor. Estas dos situaciones brindan un panorama positivo para la obtención de buenos resultados en las experimentaciones ya que el proceso de osmosis depende de las diferencias de concentraciones, es decir entre mayor sea las diferencias de las concentraciones el potencial generado podría ser mayor. Por otra parte, a pesar de haber utilizado diferentes conductímetros los resultados obtenidos se encuentran en un rango de confiabilidad aceptable brindando soporte al análisis realizado.

5.5) Pruebas de calibración del sistema

Para la primera prueba de calibración del sistema se empleó agua salada con el fin de conocer el comportamiento de la membrana frente a las sales y tener referentes para realizar comparaciones posteriores, además que al utilizar aguas de cianuro podría tornarse peligrosa por no saber que esperar de estas. Las concentraciones que se prepararon para esta prueba fueron tomadas de las características del agua mar dadas por Cardique Cartagena, el punto de referencia fueron 35.5 g/L.



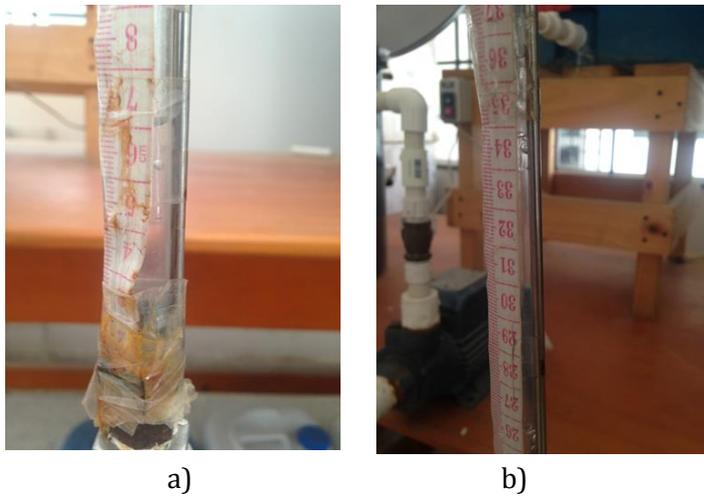
a) Nivel de agua de 1.1 cm en 24 horas; b) Nivel de aguas de 7.7 luego de 5 horas de haber alcanzado el máximo de 8.2, primera prueba; c) Nivel de agua de 40.1 máximo alcanzado segunda prueba; d) Delta alcanzado de 1.5 cm (osmosis).

Figura. 19 . Resultados pruebas de calibración en reactor de configuración vertical

Fuente: Autores

El proceso de llenado del reactor de configuración vertical se realizó de acuerdo a las pruebas de calibración teniendo en cuenta la seguridad de la membrana, para ello se procedió con el llenado del agua salada que se encuentran en las bases del reactor con el fin de que estas funcionaran como soporte a las aguas dulces. al momento de hacer el llenado del agua fresca se observó que el nivel en el tubo de medición incrementaba, la medición máxima fue de 8,2 cm, cuando el contenedor se encontraba completamente lleno. Inmediatamente se hizo el cierre de las válvulas dejando como única salida el conducto de medición. Al esperar cambios se obtuvo que después de una hora y treinta minutos la cabeza de agua en el conducto medidor bajo 1,4 cm es decir hasta 6,8 cm; el proceso se dejó hasta el día siguiente en miras de nuevos cambios, luego de catorce horas y media se midió un valor de columna de agua de 1,1 cm queriendo decir que se redujo 5,7 cm. Como esta fue la primera prueba donde como tal se emplearon en el reactor las aguas con diferentes concentraciones no se pudo justificar la caída de cabeza de agua y tampoco el incremento dramático que se presentó al inicio del experimento,

En la segunda prueba para la configuración vertical se presentó el mismo fenómeno al hacer el llenado del agua fresca que en la prueba anterior a diferencia que en esta se registró una cabeza de agua mucho más elevadas en las mismas condiciones iniciales, en tan solo cinco minutos en el nivel ascendió 6,2 cm y para el tiempo final de llenado alrededor de seis minutos y medio se obtuvo un nivel máximo de 40,1 cm. Para esta prueba se dejó la válvula de las aguas frescas abierta porque se pensó en la prueba anterior que al cerrarla luego del llenado se crea un vacío que evitaba el paso del agua de un contenedor a otro, este proceso se registró durante tres horas y no hubo cambio alguno en el nivel de agua en el conducto medidor, para este caso además se instaló una manguera en la zona de entrada del contenedor de aguas dulce que sirviera como guía para saber si el agua se permeaba a través de la membrana, por ende se dejó una pequeña lámina de agua para medición, esta fue de 8.3 cm desde el tubo de PVC del sistema, al igual que el otro nivel de agua no hubo cambio alguno. Lo que causó curiosidad era que las medidas de las 2 columnas de aguas es decir conducto de medición y manguera de agua, la primera de ellas presentaba alrededor de 1.5 cm más que el otro conducto. Esto nos hizo pensar que la presión osmótica era la causante de ese delta, ya que las dos alturas de lo contrario estarían al mismo nivel, buscando el equilibrio dado al inesperado comportamiento de la membrana de permitir el paso casi inmediato del agua entre contenedores.

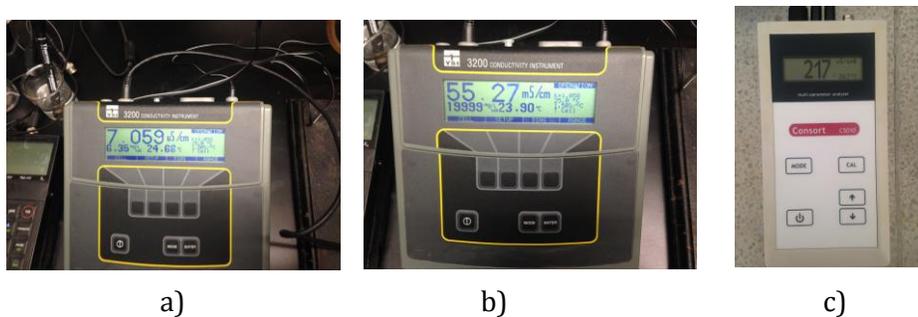


a) Nivel de agua inicial de 6.3 cm; b) Nivel de agua final de 34.7 cm

Figura. 20 Resultados pruebas de calibración en reactor de configuración horizontal

Fuente: Autores

Por otra parte para la configuración horizontal se realizaron pruebas ligeramente diferente ya que se encontraba controlada la entrada de las aguas frescas por medio de una válvula de cheque garantizando el paso continuo de las aguas durante todo el proceso, para la prueba inicial de calibración se realizó primeramente el llenado completo del contenedor destinado a la aguas saladas generando inmediatamente un nivel inicial en el conducto medidor de 6.3 cm (ver figura 20), posteriormente se realizó el llenado del contenedor destinado a las aguas frescas generando un incremento significativo del nivel en el conducto medidor en un intervalo de tiempo bastante corto, alrededor de nueve minutos y medio se llenó a capacidad el contenedor de agua frescas marcando un nivel final en el conducto medidor de 34.7 cm (ver figura 20), cabe resaltar que se decidió dejar el sistema estático alrededor de quince horas y no se presentó variación en la medida de este nivel, a este punto se consideró que posiblemente el delta generado respecto al nivel inicial pudo ser producto del proceso de osmosis generando por el contacto de las aguas a diferentes concentraciones, sin embargo al igual que la configuración vertical queda la duda de la confiabilidad de la prueba por ser la primera realizado en su tipo.



a) Conductividad agua destilada, configuración vertical; b) Conductividad de salida, aguas salas (NaCl) configuración vertical; c) Conductividad agua destilada, configuración horizontal

Figura 21. Pruebas en conductímetros para las diferentes concentraciones

Fuente: Autores

Como era importante determinar si hubo paso de agua por la membrana, se utilizó la prueba de conductividad en la configuración vertical y horizontal, para conocer qué tan disuelta se encontraba la muestra tomada desde el conducto medidor, a la vez el mismo proceso se ejecutó para las aguas de todo el reactor en el momento antes de verterlas y en el de recolección luego de desarrollado todo el proceso. En la primera de ellas para los valores del agua fresca de entrada y salida se obtuvieron 7.059 y 33.88 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y para la segunda configuración fueron de 215.23 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 217.35 $\mu\text{S}/\text{cm}$ respectivamente, cabe resaltar que la diferencias significativas entre las conductividades de las aguas frescas en las dos configuraciones se debe a que en la horizontal se utilizó agua de grifo mientras que para la vertical se empleó agua destilada, para ambos casos era irrelevante utilizar temperatura como parámetro de medición ya que los valores de conductividad se encontraban muy por bajo el rango de lo que se considera como agua salada, lo cual era de esperarse por haber utilizado aguas frescas; del mismo modo al analizar las pruebas para las muestras de agua salada en la entrada la conductividad para la configuración vertical fue de 57.12 mS/cm a 22.83 $^{\circ}\text{C}$ y la configuración horizontal alrededor de 58.11 mS/cm a 29.3 $^{\circ}\text{C}$, que corresponden a una salinidad de 39.9 g/l y 37.7 g/l respectivamente, observamos que ambos valores son un poco diferente de las concentraciones de Cardique, sin embargo se debe tener en cuenta que el mar posee una variedad de sales diferentes a la que se puede conseguir utilizando sal de cocina,

para la muestra de salida la conductividad arrojada en la configuración vertical fue de 55.27 mS/cm a temperatura de 23.90 °C y para la configuración horizontal fue de 37.7 mS/cm a 29.1 °C que equivale a salinidad de 38.8 g/l y 37.2 g/l respectivamente, este resultado nos indica que hay disolución, es decir que el agua pasa a través de la membrana; así mismo solo para la configuración vertical se realizó las mediciones para el conducto indicador y la salinidad fue de 30.6 g/L lo que indica que esta agua es aún más disuelta, comprobando que hay paso de agua por la membrana. En esta prueba quedo el interrogante del pequeño delta alcanzado, y si este corresponde a la presión osmótica.

Para el caso específico de la configuración vertical se necesitaba comprobar si el delta alcanzado en la prueba anterior no es producto de la altura a la que se encuentra el tanque que dispensa el agua salda, de la permeabilidad del agua como tal y no de la osmosis o de un balance del sistemas por presiones atmosféricas, ya que posiblemente el sistema trata de buscar el equilibrio, se decidió reducir la altura del tanque de suministro de aguas salada, a 20.52 cm desde el mismo plano de referencia del reactor , al llenar el tanque con la cantidad requerida, 8 litros, la altura hasta la superficie del agua fue de 43.1 cm. teniendo lo anterior el proceso de llenado se realiza de la misma forma de que las pruebas anteriores. La cabeza de agua en el conducto fue esta vez de 43.8 cm pasado tres minutos y para la manguera de entrada de agua fresca la altura registrada fue de 5 cm aproximadamente, lo que hay que destacar de esta prueba es que como la anterior el nivel del conducto medidor quedo próximo a la altura del nivel que se marca en la manguera de control del reactor, ligeramente más alta que estas, fenómeno que nos hace pensar que al variar la altura del tanque en este caso donde el sistema es cerrado para la aguas salas no influye en la capacidad de general el proceso de osmosis. Por otro lado, la descensión de columna de agua fue una constante durante las pruebas en este caso en una hora y media descendió 0.2 cm en el conducto medidor y en la manguera de reactor 0.1 cm, en 17 horas 0.7 y 0.8 cm respectivamente.

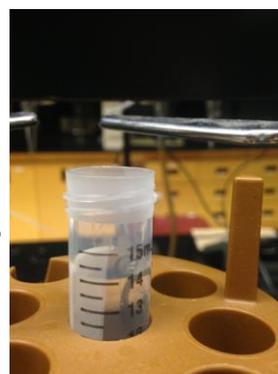
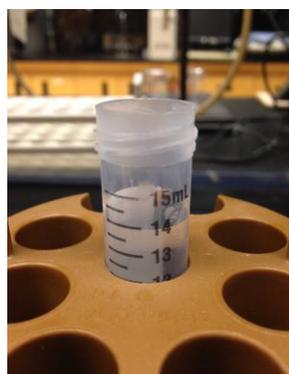


Figura. 22 Tubos de ensayos para prueba de evaporación

Fuente: Autores

Como importante saber por qué ocurría el descenso del agua en el reactor vertical se tomó un tubo de ensayo y se depositó agua hasta un nivel de 14.5 ml con el fin de saber en 24 horas que sucedía, y determinar si la evaporación era la causante de esto o eran cambios internos del reactor los que ocasionaban estas disminuciones en las alturas, lo que se obtuvo fue algo inesperado en las 24 horas el nivel se encontró en 14 ml, es decir la evaporación del agua fue aproximadamente de 0.5 ml en el tiempo dado siendo la rata de evaporación en el ambiente del laboratorio de 0.02 ml/h, valor que nos da una idea de que esta puede ser la causante del descenso pero no por completo, además también entro a consideración las posibilidad de que al no tener recirculación en el sistemas simplemente la cabeza alcanzada no es posible mantenerla.

5.6) Pruebas finales en reactores

Al haber conocido el comportamiento de los sistemas, las consideraciones que se deben tener y la manera de operarlos, se procedieron con las pruebas finales que se tenían previstas.

Cabe resaltar que específicamente para la configuración vertical no fue posible medir ninguna de las alturas en el reactor desde el mismo nivel de referencia por el hecho de que el límite del contenedor de las aguas fresca se encuentra por encima de la referencia inicial de conducto medidor, con base a esto se registraron todas las alturas y se calcularon las diferencias entre las dos referencias del reactor, manguera y tubo. Todos los detalles descritos anteriores se muestran en la figura 23.

Para todas las pruebas se emplearon 2 volúmenes constantes en el caso de rector vertical se tomaron cinco litros para aguas dulces y siete litros para aguas saldas, a su vez otro dato importante para las pruebas a continuación fue la altura del tanque de aguas dulce, este se encontraba a un metro de altura con referencia a la base del contenedor de estas mismas aguas. En el caso de la configuración horizontal se tomaron en el lado de las aguas saladas un volumen constante de 25 litros y para el lado de las aguas frescas, se utilizó un tanque suministrador de 500 litros que con ayuda de la válvula de cheque se controlaba y se permitía el paso del flujo cuando era necesario, además es importante remarcar que la diferencia entre la salida del tanque de las aguas frescas y el reactor fue de aproximadamente de 40 cm

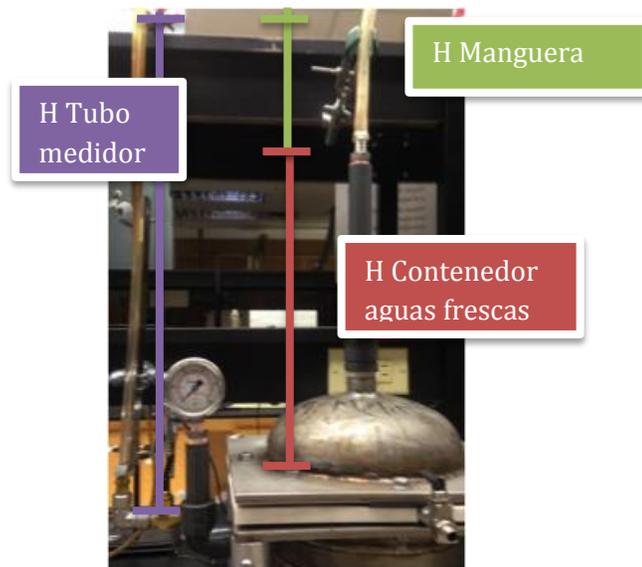


Figura. 23 Referencias de alturas en el sistema de configuración vertical

Fuente: Autores

5.6.1) Aguas frescas

El montaje fue el mismo para las dos configuraciones estudiadas. En este se utilizó para ambos contenedores del reactor agua fresca, con el propósito de tener un blanco, es decir un punto de referencia que sirviera de comparación para las pruebas de cianuro, a la vez de

conocer las condiciones básicas dentro de los sistemas, para ello se desarrollaron seis pruebas que brindaron una idea amplia del comportamiento de los mismas, en las tablas 2 y 3, se resume en detalle los valores obtenidos durante los ensayos

Tabla 2 Pruebas agua destilada reactor vertical.

Aguas Destiladas							
Altura en Manguera (cm)	Altura en el contenedor Aguas frescas (cm)	Altura en Entrada de Aguas fresca (cm)	Altura en el Tubo medidor (cm)	Promedio Altura en el tubo medidor (cm)	Δh (cm)	Promedio Δh (cm)	Tiempo (s)
2.3	37.0	39.3	32		-7.3		
2.0	37.0	39	31		-8		
2.2	37.0	39.2	32		-7.2		
2.0	37.0	39	36	32.33	-3	-6.8	189.5
2.1	37.0	39.1	31		-8.1		
2.0	37.0	39	32		-7		

Tabla 3 Pruebas agua de grifo reactor horizontal.

Agua de grifo					
Altura inicial tubo medidor (cm)	Altura final tubo (cm)	Promedio altura tubo medidor (cm)	Δh (cm)	Promedio Δh (cm)	Tiempo (s)
6.4	22.7		16.3		
6.3	22.3		16		
6.5	22.6		16.1		
6.3	22.6	22.55	16.3	16.2	583.0
6.4	22.7		16.3		
6.3	22.4		16.1		

En ambas configuraciones se observó que el acenso del agua era inmediato, para el caso de la configuración vertical en alrededor de los tres minutos el sistema llegaba a un valor máximo de equilibrio que estuvo en promedio en 32.33 cm, mientras que para la configuración horizontal alrededor de los nueve minutos el promedio de altura en el tubo medidor fue de 22.55 cm por ende se puede determinar que para las siguientes pruebas hay

que considerar que el agua por si sola pose una cabeza de presión, además se obtuvo que el paso del agua a través de la membrana era de $3.58 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ y $2.77 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ para la configuración vertical y horizontal respectivamente, este valor fue referente para las pruebas con concentraciones de sal y cianuro.

5.6.2) Sal común (NaCl)

Para estas pruebas se tomaron tres concentraciones distintas, una que corresponde como se había dicho con anterioridad a las concentraciones de agua mar, y para las otras se decidió duplicar y dividir entre dos el valor anterior. Las concentraciones fueron de 17.5, 35.5 y 71 g/l. En la tabla 4 y 5 se relacionan los datos que se tomaron; las alturas a las que las ascendían el agua, el tiempo del todo el proceso y además el nivel de agua del lado del conducto de entrada (manguera).

Tabla 4 Pruebas agua salada reactor vertical.

Aguas Saladas NaCl								
Concentraciones (g/l)	Altura en Manguera (cm)	Altura en el contenedor Aguas frescas (cm)	Altura en Entrada de Aguas fresca (cm)	Altura en el Tubo medidor (cm)	Promedio Altura en el tubo medidor (cm)	Δh (cm)	Promedio Δh (cm)	Tiempo (s)
17.5	2.4	37.0	39.4	37.9	38.10	-1.5	-1.4	187.0

	2.5	37.0	39.5	38.7				-0.8
	2.6	37.0	39.6	37.7				-1.9
35.5	2.3	37.0	39.3	40.76				1.46
	3.2	37.0	40.2	40.7	40.74		0.7	189.0
	3.5	37.0	40.5	40.75				0.25
71	3.6	37.0	40.6	44				3.4
	2.5	37.0	39.5	44.3	43.10		3.3	189.6
	2.3	37.0	39.3	41				1.7

Tabla 5 Pruebas agua salada reactor horizontal.

Aguas Saladas NaCl						
Concentraciones (g/l)	Altura inicial en el tubo medidor (cm)	Altura final en el tubo (cm)	Promedio altura tubo medidor (cm)	Δh (cm)	Promedio Δh (cm)	Tiempo (s)
17.5	6.5	31.5		25		
	6.3	31.8	31.53	25.5	25.1	574.0
	6.6	31.3		24.7		
35.5	6.5	34.1		27.6		
	6.4	34.8	34.33	28.4	27.9	576.0
	6.4	34.1		27.7		
71	6.6	37.3		30.7		
	6.5	36.8	37.20	30.3	30.7	584.0
	6.4	37.5		31.1		

Según los datos de las tablas anteriores se puede afirmar que al incrementar las concentraciones de sal la altura registrada en los conductos medidores también lo hace, tenemos que al aumentar cuatro veces la concentración mínima en el caso del reactor con configuración vertical se incrementa la cabeza alrededor de 5cm mientras que en la horizontal el incremento fue poco menos de 6 cm, del mismo modo en los deltas alcanzados de las aguas, es decir la variación entre el nivel final e inicial respecto a las concentraciones manejadas se observó un incremento notorio para ambas configuraciones, se tiene que para las concentraciones de 17.5, 35.5 y 71 g/l esta variación fue de -0.4, 0.7, 3.3 cm respectivamente en la configuración vertical, a su vez en cuanto la horizontal fueron de 21.5, 27.9 y 30.7 cm bajo las mismas concentraciones, si bien es cierto que las cabezas de presiones

en la configuración horizontal eran muchos mayores que la vertical. Cabe resaltar además que las cabezas que el potencial obtenido no eran lo que se esperaba, ya que con estas concentraciones de sal en general utilizando otro sistema se podría esperar una efectividad mayor, sin embargo, estamos hablando de un sistema no continuo y por estar en su primera fase de implementación no posee grandes fuerzas de presión.

Comparando los resultados obtenidos de cabeza de agua se identifica que para la configuración horizontal estos son dramáticamente superiores para cada una de las concentraciones comparados con el vertical, por ejemplo, para 71 g/l de NaCl el horizontal es diez veces mayor al vertical, pese a la gran diferencia existente con base a esta variable no se puede definir cuál de los dos es tiene un mayor potencial, ya que esto solo y únicamente depende del poder de densidad.

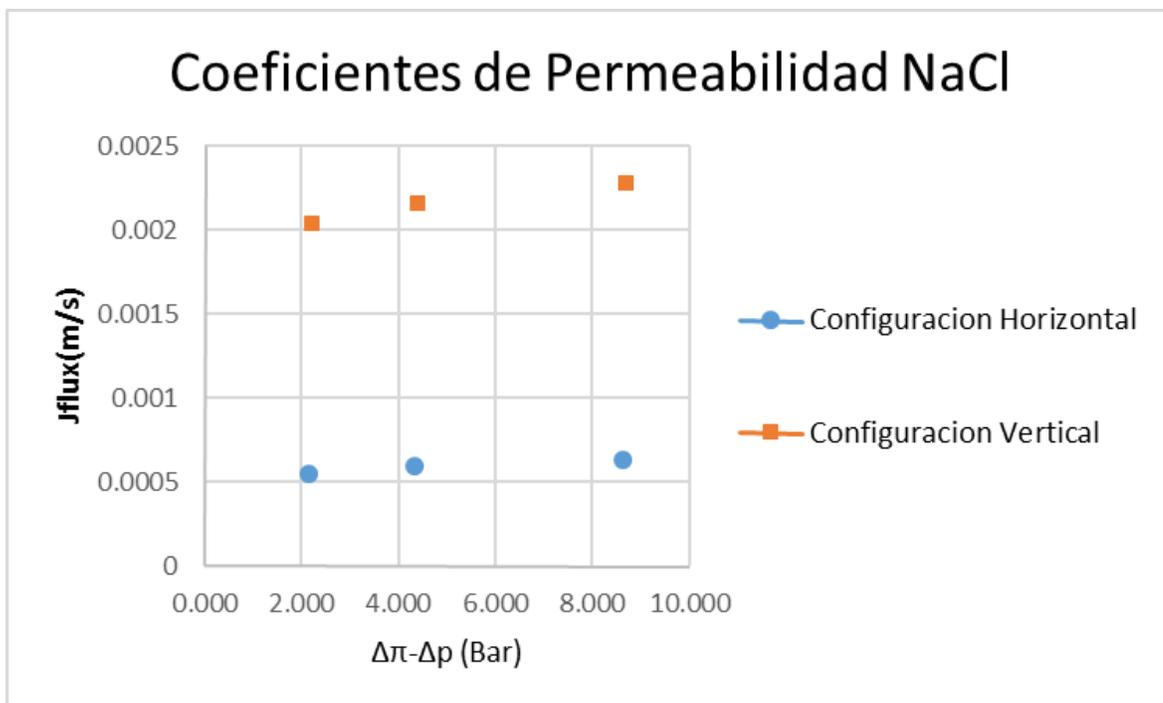
Basado en lo anterior el objetivo era determinar cuanta energía o potencial fueron capaces de producir los sistemas, se debiendo calcular los diferentes parámetros que esto involucra, el primer paso fue determinar el coeficiente de permeabilidad de la membrana, para ello se realizó el cálculo de la presión osmótica a través de la ecuación de Vant hoff (ecuación 4), donde se relacionan aparte de la constante de los gases y la temperatura relativa kelvin, la concentración molar del soluto, y el termino especial que es el coeficiente de Vant hoff que expresa la cantidad de iones y partículas que se forman (en promedio) en una solución de una unidad de fórmula de soluto, para este caso NaCl crea dos partículas en solución un iones de Na⁺ y uno de Cl⁻, por tanto el coeficiente es 2, siendo este adimensional. Por otra parte, también se conocía el valor del flujo permeado a través de la membrana, es decir cuánta agua paso a través de la membrana en el tiempo que fue medido en instante en que la lámina de agua incrementaba en el conducto medidor, cabe resaltar que las alturas obtenidas en el durante las pruebas para cada una de las concentraciones fue promediada para tener un valor representativo por cada concentración. Los valores anteriores se resumen en la tabla 6.

Tabla 6 Potencia eléctrica agua salada reactor vertical y horizontal

Aguas Saladas NaCl
Configuración vertical

Concentraciones (g/l)	Ci(Molar Con)	$\Delta\pi$ (bar)	Δp bar)	Jflux(m/s)	$\Delta\pi-\Delta p$	a	W(W/m ²)	W máx.
17.5	0.043	2.121	-0.1	2.04E-03	2.221	9.17E-04	4.25E-04	2.15E-03
35.5	0.087	4.302	-0.1	2.16E-03	4.402	4.90E-04	8.42E-04	8.85E-03
71	0.174	8.605	-0.1	2.27E-03	8.705	2.61E-04	1.66E-03	3.54E-02
Configuración horizontal								
17.5	0.043	2.121	-0.04	5.49E-04	2.161	2.54E-04	4.3838E-05	5.70E-04
35.5	0.087	4.302	-0.04	5.96E-04	4.342	1.37E-04	8.80938E-05	2.35E-03
71	0.174	8.605	-0.04	6.37E-04	8.645	7.37E-05	1.75376E-04	9.39E-03

Como se muestra en la tabla 9 los valores para el coeficiente de permeabilidad son variables como se esperaba, ya que acorde a las concentraciones estos también lo hace, sin embargo, se debe encontrar un valor representativo para esta membrana y específicamente para el soluto estudiado, por ello se debe encontrar mediante el uso de análisis estadísticos las pendientes de la curva que son descritas por la función que forma los puntos. Grafica 3.

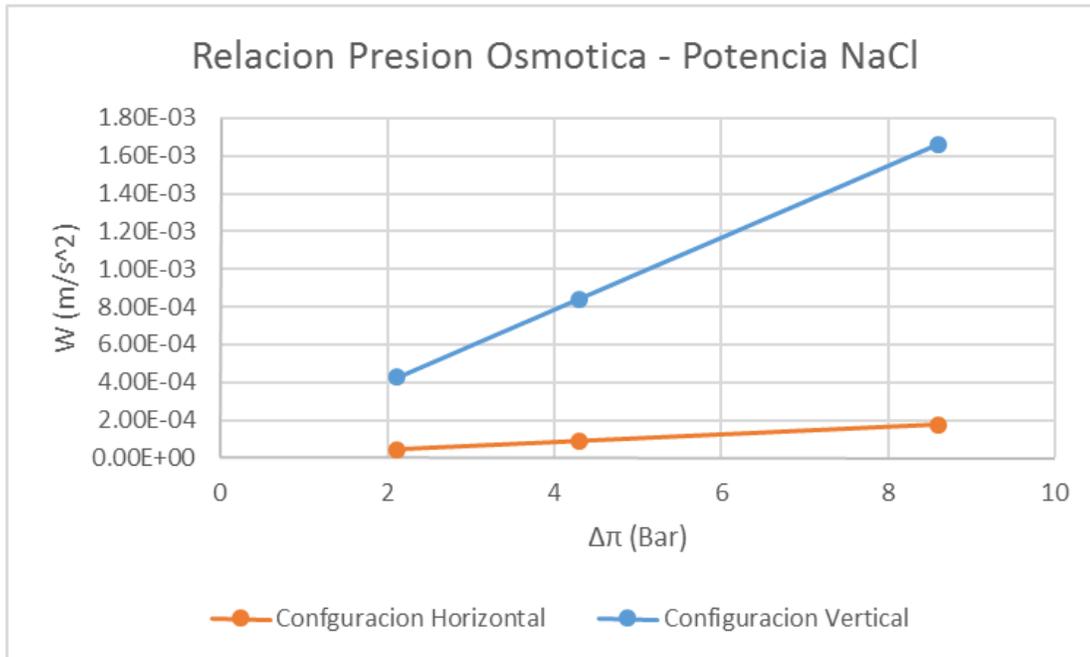


Grafica 3 Coeficiente de permeabilidad membrana NaCl

Para calcular el valor representativo de permeabilidad se hizo uso de la regresión lineal, que permitió agrupar los puntos dispersos conocidos de la gráfica 3 y determinar su dependencia funcional entre el flujo y la diferencia de presiones, que para este caso era las osmóticas y las hidráulicas. A partir del proceso anterior los valores representativos para cada configuración del coeficiente de permeabilidad fueron de $1,91 \times 10^{-3} \text{ ms}^{-1} \text{ bar}^{-1}$ o $1,91 \times 10^{-5} \text{ ms}^{-1} \text{ Kpa}^{-1}$ para el reactor vertical y $7,51 \times 10^{-4} \text{ ms}^{-1} \text{ bar}^{-1}$ o $7,51 \times 10^{-6} \text{ ms}^{-1} \text{ Kpa}^{-1}$ para el horizontal, basados en estos valores se puede afirmar que la rata de flujo que pasa a través de la configuración vertical es alrededor de 39% mayor que el horizontal.

En el mismo sentido al analizar la densidad de potencia producida por las diferentes configuraciones se observa que la vertical es la más efectiva y que además como se muestra en la gráfica 4 existe una proporcionalidad lineal entre la presión osmótica y la potencia genera, aunque dicha potencia a su vez depende directamente del coeficiente de

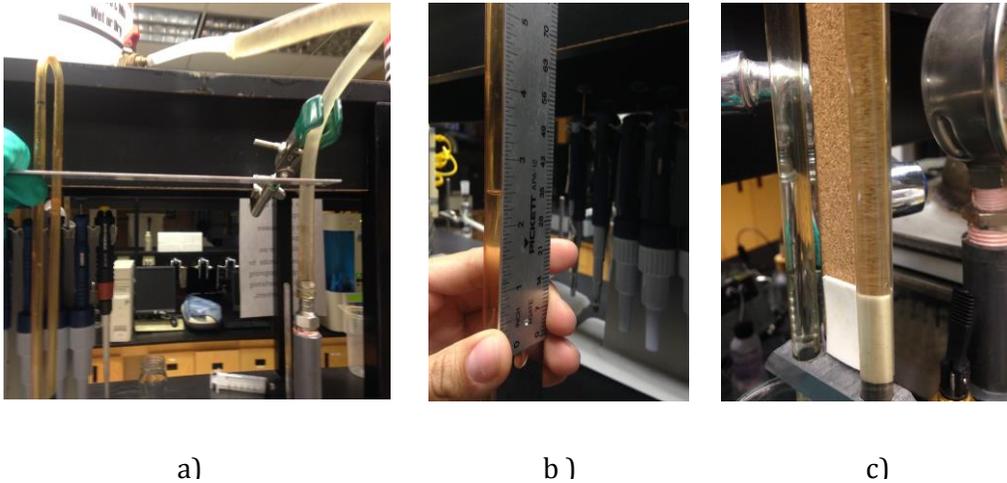
permeabilidad, parámetro que es decisivo a la hora de los cálculos. Como valor máximo obtenido tenemos $1.66 \times 10^{-3} \text{ W/m}^2$ para una concentración de 700 mg/l, mientras que para la configuración horizontal el valor máximo bajo la misma concentración fue de $1.753 \times 10^{-4} \text{ W/m}^2$, ratificando lo visto en la gráfica antes mencionada.



Grafica 4 Relación Presión osmótica – Potencia NaCl

5.6.3) Cianuro (NaCN)

Luego de realizar nueve pruebas con diferentes concentraciones de sal se vio pertinente el uso del cianuro por el hecho que se tenía una amplia idea del funcionamiento del reactor, entre los que se encontraban las alturas máximas esperadas de acuerdo a las concentraciones que se manejarían, pericia en el cierre de la válvula de las aguas saldas en el momento adecuado, manejo de las salidas del aire en los 2 contenedores. Además, se tomaron precauciones adicionales realizando las pruebas en un espacio amplio para evitar la concentración de cualquier gas toxico que pudiera alojarse en el laboratorio.



a) Comparación de alturas para determinación de delta de presión; b) lamina máxima de 45. 53 para 700 mg/l ; c) Prueba inicial con cabeza de aguas de un metro.

Figura. 24 Pruebas de cianuro en reactor de configuración vertical.

Fuente: Autores

Durante la primera prueba específicamente en el reactor con configuración vertical como se muestra en la figura 24 se desarrolló un fenómeno no esperado, bajo las mismas condiciones de altura de tanque, llenado de aguas y cerrado de válvulas, la columna de agua conseguida fue de aproximadamente un metro, lo que en comparación con las agua de sal (NaCl) fue abismal la diferencia entre las cabezas de presión utilizando la concentración más baja que fue concebida para las pruebas con cianuro (NaCN). Para confirmar la validez de dicho evento se procedió a realizar las pruebas que se tenían planeadas, durante el desarrollo de estas no se observó la gran variación como ocurrió al inicio, la altura máxima alcanza durante tres pruebas adicionales en promedio fue de 40.3 cm indicándonos que fue algo atípico, sin embargo, queda la incógnita del porque se produjo si se mantuvieron las mismas condiciones en todas las pruebas. Con el fin de determinar el comportamiento de la del sistema de acuerdo a las distintas concentraciones se procedió con su implementación, obteniendo cabezas de aguas para 50, 100, 200 y 700 mg/l de 41.57, 42.13, 44.47, 45.53 cm respectivamente en promedio, en el mismo sentido para el otro caso estudiado tenemos que las cabezas máximas

de presión para las mismas concentraciones antes mencionadas fueron 30.87, 32.53, 33.73, 34.83, 35.77 cm Ver tablas 7 y 8.

Es importante resaltar que con los valores anterior no se tenía idea alguna de la capacidad de generar energía o incluso si era la diferencia de concentraciones “Osmosis” la que causaba tales incrementos, las alturas solamente nos describían la transferencia de las agua de un lado al otro del reactor; en mira de conocer el proceso se tomó una referencia simple, pero que nos daría una ilustración inicial de lo que se ocurría en el reactor , por ello se comparó el nivel que alcanzado en el sistema utilizando solamente aguas frescas (pruebas previas), de esta forma entenderíamos a priori si el proceso solo se trataba de una balance de agua generado por las presión atmosférica. Se realizó un promedio entre tres repeticiones del mismo ensayo y la altura promedio obtenidas estuvieron próximas a 32.33 cm y 22.55 cm (ver tablas 2 y 3), al restar esta con las alturas de las diferentes concentraciones previamente conseguidas de la configuración vertical, se calcularon valores de 8.97, 10.24, 10.8, 13.14, 14.2 cm y en la horizontal de 8.32, 9.98, 11.18, 12.28, 13.22 para 25, 50, 100, 200 y 700 mg/l respectivamente, tabla 7 y 8 y para que inicialmente permitió inferir que el incremento, es decir los deltas dados por las diferencias de las alturas eran producto de la presión osmótica.

Tabla 7 Pruebas aguas cianuradas reactor vertical.

Aguas Cianuradas								
Concentración (mg/L de CN)	Altura en Manguera (cm)	Altura en el contenedor Aguas frescas (cm)	Altura en Entrada de Aguas fresca (cm)	Altura en el Tubo medidor (cm)	Promedio Altura en el tubo medidor (cm)	Δh (cm)	Promedio Δh (cm)	Tiempo (s)
25	5.4	37.0	42.4	41.2		-1.2		
	5.2	37.0	42.2	40	40.30	-2.2	-2.7	186
	7.3	37.0	44.3	39.7		-4.6		
50	6.9	37.0	43.9	42.2		-1.7		
	7	37.0	44.0	41.2	41.57	-2.8	-2.3	190
	6.8	37.0	43.8	41.3		-2.5		
100	3.2	37.0	40.2	41.2		1.0		
	6.2	37.0	43.2	44.1	42.13	0.9	0.9	184
	3.2	37.0	40.2	41.1		0.9		
200	6.5	37.0	43.5	44.6		1.1		
	6.4	37.0	43.4	44.2	44.47	0.8	1.0	188
	6.5	37.0	43.5	44.6		1.1		
700	6.6	37.0	43.6	45		1.4		
	6.7	37.0	43.7	45.9	45.53	2.2	1.9	186
	6.7	37.0	43.7	45.7		2.0		

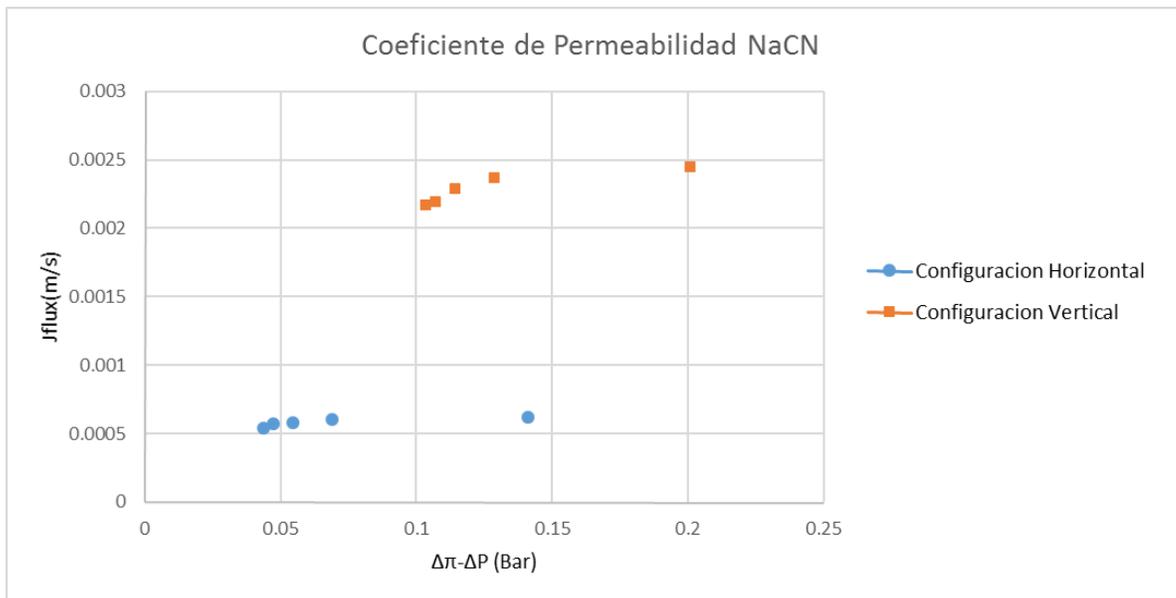
Tabla 8 Pruebas aguas cianuradas reactor horizontal.

Aguas Cianuradas								
Concentración (mg/L de CN)	h Manguera (cm)	h Contenedor aguas frescas	Altura inicial en el tubo medidor (cm)	Altura final en el tubo (cm)	Promedio altura tubo medidor (cm)	Δh (cm)	Promedio Δh (cm)	Tiempo (s)
25	5.4	37.0	6.5	30.3		23.8		
	5.2	37.0	6.2	31.2	30.87	25.0	24.5	570
	7.3	37.0	6.5	31.1		24.6		
50	6.9	37.0	6.6	32.1		25.5		
	7	37.0	6.2	32.8	32.53	26.6	26.1	568
	6.8	37.0	6.4	32.7		26.3		
100	3.2	37.0	6.3	33.5		27.2		
	6.2	37.0	6.5	33.9	33.73	27.4	27.3	578
	3.2	37.0	6.5	33.8		27.3		
200	6.5	37.0	6.4	34.9		28.5		
	6.4	37.0	6.4	34.8	34.83	28.4	28.4	580
	6.5	37.0	6.5	34.8		28.3		
700	6.6	37.0	6.6	35.9		29.3		
	6.7	37.0	6.5	35.5	35.77	29.0	29.2	578
	6.7	37.0	6.6	35.9		29.3		

Por otra parte, si comparamos los valores de altura hidráulica promedio alcanzada por las aguas salada y cianuradas en la configuración vertical encontramos por ejemplo si son comparados los dos valores máximos que se tomaron para hacer las pruebas, hallamos que siendo las aguas saladas cien veces mayor de concentración produjo un poco menos de la mitad en comparación con las cianuradas. Tenemos que con 71g/ l empleados para en las aguas saladas y 700 mg/l en las cianuradas, estas produjeron una altura de 3.3 y 1.9 respectivamente, valores que muestran el potencial que existe en las agua cianuradas, de igual forma para la configuración horizontal se obtuvieron valores incluso más alentadores con la concentración máxima de cianuro de tan solo 700 mg/l se obtuvo una cabeza de 29.2 cm, en contraste con 30.7 cm para los experimentos con sal común a 71g/l, lo más increíble en esta pruebas es la cercanía de las cabezas de aguas y la lejanía de las concentraciones empleadas. Sin embargo, cabe resaltar que la membrana fue seleccionada para ser empleadas en condiciones más agresivas, aun así, es un punto de comparación confiable y muy diciente.

Tabla 9 Potencia eléctrica aguas cianuradas reactor vertical y horizontal.

Aguas Cianuradas NaCN								
Configuración Vertical								
Concentración (mg/L de CN)	Ci(Molar Con)	$\Delta\pi$ (bar)	$\Delta\rho$ (bar)	Jflux(m/s)	$\Delta \pi -\Delta\rho$	α	W(W/m ²)	W máx.
25	7.29E-05	0.003613082	-0.1	0.002167	0.103613	0.020911	3.27E-05	1.03148E-08
50	1.46E-04	0.007226164	-0.1	0.002188	0.107226	0.020403	3.39E-05	4.12592E-08
100	2.92E-04	0.014452327	-0.1	0.002290	0.114452	0.020007	3.62E-05	1.65037E-07
200	5.83E-04	0.028904655	-0.1	0.002365	0.128905	0.018349	4.07E-05	6.60148E-07
700	2.04E-03	0.101166292	-0.1	0.002448	0.201166	0.012169	6.36E-05	8.08681E-06
Configuración horizontal								
Concentración (mg/L de CN)	Ci(Molar Con)	$\Delta\pi$ (bar)	$\Delta\rho$ (bar)	Jflux(m/s)	$\Delta \pi -\Delta\rho$	α	W(W/m ²)	W máx.
25	7.29E-05	0.003613082	-0.04	0.000542	0.043613	0.012416	5.51E-06	2.62674E-09
50	1.46E-04	0.007226164	-0.04	0.000573	0.047226	0.012128	5.97E-06	1.0507E-08
100	2.92E-04	0.014452327	-0.04	0.000584	0.054452	0.010718	6.88E-06	4.20279E-08
200	5.83E-04	0.028904655	-0.04	0.000601	0.068905	0.008716	8.71E-06	1.68111E-07
700	2.04E-03	0.101166292	-0.04	0.000619	0.141166	0.004383	1.78E-05	2.05936E-06

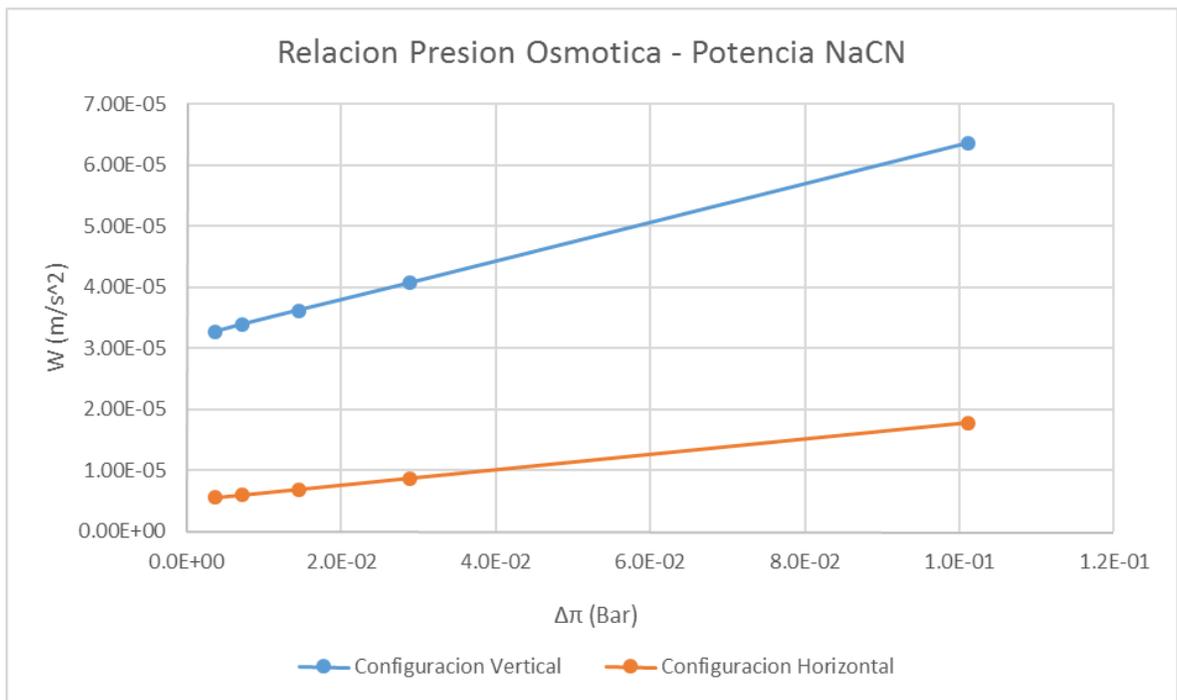


Grafica 5 Coeficiente de permeabilidad membrana NaCN..

Realizando el mismo procedimiento de regresión como se adelantaron para las pruebas de sal común se llega a un valor representativo del coeficiente de permeabilidad de la membrana igual a $3.26 \times 10^{-3} \text{ms}^{-1} \text{bar}^{-1}$ o $3.26 \times 10^{-5} \text{ms}^{-1} \text{Kpa}^{-1}$ para el reactor vertical y $7.51 \times 10^{-4} \text{ms}^{-1} \text{bar}^{-1}$ o $7.51 \times 10^{-6} \text{ms}^{-1} \text{Kpa}^{-1}$ para el reactor horizontal que en comparación con las aguas sales es mayor, lo anterior es justificable en primer lugar porque la membrana fue diseñada para condices más adversas por ende podría funcionar mejor ante ellas, en segundo lugar la conductividad como mostraron los valores de calibración son mayor, esto se traduce a que las partículas de cianuro son más pequeñas, parámetro que ayuda a evitar cualquier obstrucción o a facilitar el paso de sustancias mucho más rápido y por ende a aumentar la cantidad de agua que pasa por la membrana, por otro lado al comparar los valores entre las configuraciones observamos que a través de la vertical el flujo de agua es mayor por unidad de tiempo, es decir que esta configuración permite generar mayor cabeza de agua en un intervalo menor, es decir mayor es la eficiencia en el sistema.

Teniendo el valor de estándar para la permeabilidad de la membrana se procedió a determinar el poder de densidad que para el caso de las membranas es el que indica teóricamente cuanto

watts por metro cuadrado de membrana se pueden producir, usando la ecuación (3) y (5) los valores promedios de producción de energía acordes a la concentración máxima utilizadas que corresponde al mismo tiempo a las soluciones manejadas en los relaves acuíferos del sur de Bolívar fueron de $6.36 \times 10^{-5} \text{ W/m}^2$ y $1.78 \times 10^{-5} \text{ W/m}^2$ para el reactor de configuración vertical y horizontal respectivamente, y el máximo que se puede producir en el sistema vertical es de $8.08 \times 10^{-6} \text{ W/m}^2$ mientras para el de configuración horizontal es de $2.059 \times 10^{-6} \text{ W/m}^2$.



Grafica 6 Relación Presión osmótica – Potencia NaCl

Del mismo modo como ocurrió las aguas de sales y como se muestra en la gráfica 6 la relación de la densidad vs la presión osmótica fue lineal, sin embargo, al observar detalladamente la tendencia de las pendientes es muy similar, es en la densidad que puede generar las aguas cianuradas que son alrededor del 28% mayor.

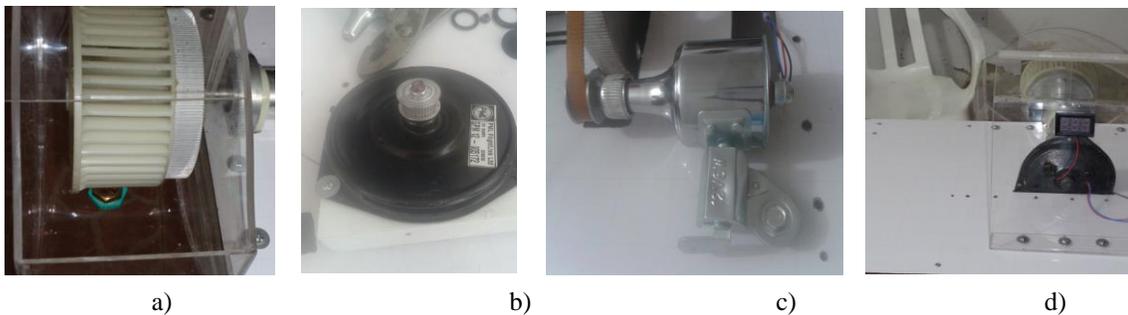
Con base a nuestros sistemas, donde no existen presiones del lado de las aguas de cianuro, tenemos que el cálculo tiende a estar un poco dispersos de lo que comúnmente se logra con aguas de mar, ya que al no tener ese valor se altera el signo y por supuesto el resultado final de las pruebas, sin embargo, se decidió realizar todo el procedimiento porque se quería

comparar los órdenes de magnitud hallados en la investigación con los de las publicaciones buscada con anterioridad. Lo que se pudo determinar fue la concordancia parcial en los valores como el coeficiente de permeabilidad en las referencias estudiadas estando estos alrededor de $1.87 \times 10^{-9} \text{ m/s.kPa}$ $1.02 \times 10^{-9} \text{ ms}^{-1} \text{Kpa}^{-1}$ (Achilli, Cath, & Childress, 2009) (Gang, Sui, Xue, & Tai-Shung, 2015) basados en una membrana de celulosa de triacetato (CTA) de la empresa Hydration Tecnology Innovations empleada para procesos FO , en nuestro caso el valor más significativo fue de $3.261 \times 10^{-5} \text{ m/s kPa}$ logrado en la configuración vertical, sin embargo cabe anotar el significado de las unidades, y en general en la investigación la presión es realmente baja (casi nula), parámetro que hace alejar un poco el valor de los que comúnmente la comunidad científica obtiene además que se trabajó con una membrana de tipo RO thin film, totalmente diferente a las de la investigación mencionada y en nuestro caso se despreció el efecto de polarización interna en la membrana factor que afecta directamente el paso del flujo de agua a través de ella, a su vez en esta investigación se utilizó como soluto la sal común e instrumentos automatizados para realizar los procesos de medición y recirculación del sistema, instrumentos con que no se contaban en el laboratorio. En cuanto a la poder de densidad alcanzado $6.36 \times 10^{-5} \text{ W/m}^2$ en la cofiguracion vertical y considera el más representativo, se encuentra bastante alejado de los 5 W/m^2 , necesario para producir energía de forma sostenible por medio de reactores osmóticos (Klaysom, Cath, Depuydt, & Vankelecom, 2013), sin embargo anteriormente se puntualizó en la falta de recirculación y en lo primario de las investigaciones con cianuro, factores que hacen justificables no haber alcanzado el valor visualizado.

5.7) Optimización sistema generación de energía

El primer planteamiento del sistema consistió en un rodete blanco de plástico de 14 cm de diámetro apoyado en un eje de aluminio de la misma longitud que permitía el giro y la transmisión del movimiento generado por el agua hacia el dinamo de 12 V PML FlightLink Ltd. de color negro, viéndose este reflejado en la marcación del voltímetro digital y en el encendido de los bombillos. Para observar el comportamiento del sistema antes de instalarlo en el laboratorio, se procedió a poner en funcionamiento mediante una prueba casera con agua potable, direccionándose el flujo de agua a presión desde el grifo a través de una

manguera hacia el rodete y no evidenciándose movimiento alguno capaz de marcar un valor en el voltímetro empleado para la medición, por ende se consideró que la energía generada era muy poca o nula es decir insuficiente para cumplir el propósito de la investigación, analizando dicho inconveniente se identificaron dos posibles variables que ocasionaban esta situación, el primero de ellos fue el rodete quizás porque las aspas no poseían la forma adecuada para el movimiento, en segundo lugar se pensó que el dinamo debido a que quizás a la hora de producir energía la natural oposición al movimiento que genera este fuera muy fuerte e impediría el movimiento total. Identificadas las posibles causas se definió un segundo planteamiento del sistema que consistió en el mismo rodete del diseño anterior pero esta vez al eje se le adicionó otro plato de 14 cm de diámetro para que la transmisión del movimiento al dinamo se realizara por medio de una correa, el dinamo utilizado aquí fue de 12V 6W de color plateado, se probó el funcionamiento de igual forma que en el primer planteamiento y se obtuvo que el movimiento era muy poco. Ver figura 25. Como al realizar los cambios en el dinamo no hubo mejoría notoria se decidió abordar el otro elemento que se consideraba problemático en el sistema y este era el rodete.



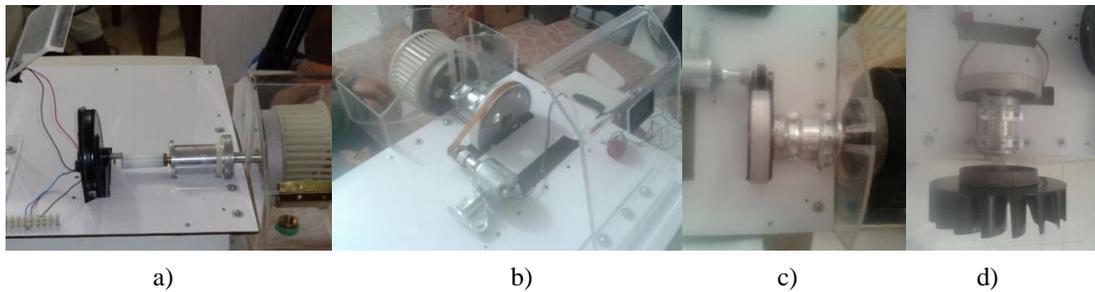
a) Rodete blanco ; b) Dinamo de 12 V PML FlightLink Ltd. de color negro; c) Dinamo plateado 12V 6W; d) Tablero de acetato con voltímetro digital.

Figura. 25 Componentes del sistema de generación de energía

Para el tercer planteamiento se procedió a realizar el cambio de rodete por uno negro de 25 cm de diámetro, que aunque poseía una menor cantidad de aspas estas eran más curvas siendo aún mejores en teoría que las planteadas en los dos sistemas anteriores, debido a que cuando el flujo de agua impacte sobre las mismas el impulso para el giro fuese mucho mayor dando como resultado un incremento en la velocidad y por ende un aumento en la producción de

energía, además en este planteamiento se mantuvo el plato interno de 14cm pero se decidió realizar la transmisión mediante contacto entre el dinamo y el plato, no mediante correa como se decidió en el sistema anterior, al poner a prueba se notó que la velocidad con que giraba el sistema era mayor ocasionando que los bombillos se encendieran, sin embargo la continuidad de este movimiento no era por mucho tiempo y a su vez el dinamo producía un ruido cuando realizaba el giro ocasionando malestar auditivo en los presentes.

En ultimas se realizó un cuarto planteamiento con el fin de mejorar el ya existente, se decido utilizar el mismo rodete anterior de 25 cm de diametro, pero esta vez se realizó la transmision del movimiento similar a la del segundo planteamiento mediante una correa aunque el dinamo fue el utilizado inicialmente, se observó en la puesta en funcionamiento que la velocidad de giro era mayor que en todos los anteriores planeamientos y este dinamo no producía ruido cuando realizaba el giro, de igual manera se evidenciaba la generacion de energía en la marcacion del tablero digital del voltimetro y en la luces ubicadas en el soporte del dinamo. En la figura 26 se muestran los cuatro planteamientos mencionado anteriormente.



a) Primer planteamiento del sistema; b) Segundo planteamiento del sistema; c) Tercer planteamiento del sistema; d) Cuarto planteamiento del sistema.

Figura. 26 Planteamientos de sistemas para la generación de energía eléctrica

Fuente: Autores

A pesar de los cambios realizados para mejorar el sistema y acoplarlo a los reactores, la potencia esperada en los mismos no fue suficiente para hacerlo funcionar en primera instancia por que no se contaba con el sistema de recirculación y equipos de impulsión que garantizaba una cabeza continua para realizar las mediciones. Sin embargo, se tiene la certeza que el sistema de generación de energía puede funcionar habiendo sorteado los inconvenientes antes planteados.

5.8) Ingeniería Aplicada

Basados en la máxima densidad de poder calculada en las experimentaciones anteriores, se estimó cuantos watts son producidos por metro cuadrado de membrana, bajo las condiciones de operación de los reactores diseñados, el valor de densidad máximo fue de $6.36 \times 10^{-5} \text{ W/m}^2$, para una concentración de 700 mg/l en la configuración vertical. Basado en el parámetro anterior se calculó cuanto es área de membrana requerida para abastecer una casa con utensilios realmente básicos. En la tabla 10, se muestra el consumo en watts mensuales de un hogar promedio asumido.

Tabla 10 Consumo eléctrico de un hogar mensual.

CONSUMO BASICO POR MES					
Electrodoméstico	Numero de electrodomésticos	consumo por unidad (W/h)	tiempo (h) por día	total (W) por día	total (W) mensual
Bombillas	4	15	5	300	9000
Ventilador	1	100	4	400	12000
Televisor	1	115	3	345	10350
Lavadora	1	500	0,5	250	7500
Refrigerador	1	184	4	736	22080
Plancha	1	550	0,01	5,5	165
				TOTAL, CONSUMO	61095

Basados en los cálculo de la tabla , tenemos que en promedio el consumo de energía por mes en la casa planteada es alrededor de 61095 W, por tanto los metros cuadros de membrana

requerido para este hogar es de 959669811 m^2 , basado en el este valor observamos que el el area necesaria acorde a la densidad generada por el sistema más eficiente es extremadamente grande, comparado con la necesitada siendo el sistema capaz de producir 5 W/m^2 es de 12219 m^2 , alrededor de novecientos seseta millones de metros cuadrado menos.

Es evidente que la demanda de metros cuadrados de membrana comúnmente es algo elevada, es por ello las membranas tipo espiral, son las más recomendables, ya que consisten en material de filtro empaquetado en forma ceñida, esta alta densidad de empaquetado implica que hay significativamente más área de superficie en una determinada unidad de filtración que la que pueden proporcionar otro tipo de membranas son empleadas a gran escala, ya que poseen la capacidad de portar grandes áreas en un contenedor; sin embargo las configuraciones de placa bastidor, configuración empleada en la investigación permite una fácil manipulación además de escalamientos en grandes magnitudes.

6) CONCLUSIONES

Estimada la variación del potencial eléctrico en función de la presión osmótica, se halló que existe una proporcionalidad lineal entre ellas, tanto para aguas saladas como cianuradas, además se comprobó una densidad de poder máxima de $6.36 \times 10^{-5} \text{ W/m}^2$, haciendo uso de la membrana polimérica GE Osmonic SE, concentraciones de cianuro de 25, 50, 100, 200, 500 y 700 mg/l y configuraciones de reactores osmóticos (vertical y horizontal), Convirtiéndose este proyecto en una ante sala para la generación de energía de forma eco amigable y sostenible.

Basados en la investigación anterior se puede concluir que:

- Determinando las características fisicoquímicas de la membrana GE Osmonics SE implementada en la investigación se encontró que desde el punto de vista físico este no es hidrofílica, es decir no permitía la adhesión de partículas de cianuro, siendo entonces la adecuada para soportar la abrasión a las diferentes concentraciones de aguas cianuradas a las que se vio expuesta. Mientras que en sus características químicas se encontraron además de las cadenas de carbono y oxígeno por ser un polímero, contenido de azufre en pequeñas proporciones de entre 5 -10 %, que garantizaron la elasticidad de la misma, evitando rupturas y permitir la obtención de un potencial de energía a la vez de una buena eficiencia en el sistema.
- Los reactores construidos en la Universidad de Cartagena y la Universidad de Ryerson permitieron generar un potencial de energía representado en cabeza de presión mediante el uso de una membrana polimérica y basados en diferentes configuraciones (horizontal y vertical), a través de las pruebas realizadas se logró identificar que el reactor de configuración vertical es más efectivo para el aprovechamiento de las presiones osmóticas, debido a la fuerza que ofrece la gravedad durante el llenado del mismo, además por el contacto inmediato través de

la membranas de las láminas de agua con diferentes concentraciones, permitiendo un proceso de osmosis más efectivo.

- Monitoreando el funcionamiento de las plantas pilotos, bajo las diferentes condiciones empleadas, estas presentaron un buen rendimiento, ya que permitieron obtener para cada una de las concentraciones una densidad de poder e identificar que con 700 mg/l de NaCN se podía generar $6.36 \times 10^{-5} \text{ W/m}^2$, que representan el potencial energético del sistema desarrollado, además a través del buen monitoreo y manejo se pudo idéntica el coeficiente de permeabilidad de la membrana empleada que fue $3.26 \times 10^{-5} \text{ ms}^{-1} \text{ Kpa}^{-1}$ estando este cerca en orden de magnitud al obtenidos de otra investigaciones previas entre los cuales están $1.89 \times 10^{-9} \text{ ms}^{-1} \text{ Kpa}^{-1}$ y $1.02 \times 10^{-9} \text{ ms}^{-1} \text{ Kpa}^{-1}$ (Gang, Sui, Xue, & Tai-Shung, 2015) (Achilli, Cath, & Childress, 2009). Demostrando en definitiva que las plantas presentaron un buen comportamiento durante el desarrollo de las pruebas.
- Se identificó que el mejor sistema de conversión de energía eléctrica consistía en un rodete de plástico negro de 25 cm de diámetro sujeto a un plato interno de aluminio de 14 cm de diámetro y este a su vez a una correa encargada de transmitir el movimiento al dinamo, conectado a un voltímetro digital. El sistema de conversión de energía fue realizado y probado paralelamente con las pruebas en los reactores a través de pruebas caseras, sin embargo, este no pudo ser ensamblado con los montajes experimentales por la falta de condiciones adecuadas para su funcionamiento, especialmente las presiones necesarias para presurizar a niveles adecuados el sistema permitiéndole a través de los inyectores dirigir el potencial generado y determinar los watts producidos

7) RECOMENDACIONES

- Acorde con los ensayos realizados el proyecto no alcanzo a obtener el potencial de energía esperado de $5W/m^2$, a su vez tampoco se pudieron realizar variaciones en presiones para obtener graficas representativas de pruebas de osmosis retardada, por tanto, solo se quedó una pequeña idea del potencial existente de acuerdo las concentraciones de cianuros manejadas en los relaves acuíferos en el sur de bolívar. En general se debe seguir mejorando los sistemas ya existentes, con el fin de obtener los valores de poder de densidad mínimos requeridos para genera energía de forma constante. Esta investigación es el primer eslabón alcanzado para poder desarrollar la tecnología osmótica en Colombia y en especial Cartagena y aquellas zonas aisladas que necesitan de energía para vivir en condiciones dignas
- A través de las experimentación realizada se observó que el proyecto se encuentra limitado, al utilizar un solo tipo y una sola clase de membranas (GE Osmonics SE), si bien es cierto que se obtuvieron datos alentadores, al no tener punto de comparaciones no se podría determinar si esta membrana es la mejor para los proceso con cianuro o si aquellas que se encuentran en el mercado pueden brindar mayor potencial de acuerdo a los sistemas planteados. Por ellos es necesario realizar pruebas con membranas RO de diferentes características a las actuales y determinar si el potencial puede ser mayor, ya que una sola serie de pruebas con la membrana GE Osmonics SE no garantiza una completa confiabilidad en los resultados por tratarse de las primeras investigaciones que se han adelantado al respecto en la Universidad de Cartagena y de Ryerson y en Colombia. Se sugiere además adelantar ensayos con membranas de tipo FO, ya que estas requieren de menores presiones para generar el proceso de osmosis y podrían a su vez crear un potencial energético incluso más grande que con membranas de tipo RO, además permitirían ahorrar energía en el sistema al no emplear bombas para crear la presión extra requerida.

- La mayor restricción analizada en los sistemas de reactores fue el volumen de los mismos, manejar grandes cantidades de aguas en las primeras experimentaciones de osmosis es un reto grande y en general dificulta la obtención de buenos resultados, ya que se tiene que controlar múltiples variables como el flujo, la presión, y concentraciones que a gran escala como en nuestro caso magnifican la complejidad de maniobra. Además, el sistema estuvo en cierta medida condicionado por no tener los instrumentos y/o elementos adecuados para la extracción de aire en los contenedores. Del mismo modo acorde con las configuraciones de los reactores empleadas durante la previa investigación se propone seguir trabajando con reactores de tipo vertical, por el hecho de que puede ser aprovechadas las cabezas de presiones que se generan al realizar el vertimiento de las aguas, además se pueden realizar variaciones de alturas que permitirían tener un parámetro de estudio y una forma de ahorro de energía en el sistema al aprovechar las presiones generadas. Por otro parte se considera viable realizar una reducción en el volumen de los contenedores, limitándose estos al área activa y de contacto directo de la membrana con las dos aguas y se podría garantizar un proceso de osmosis aún más rápido y efectivo, del mismo modo se podrían realizar cambios a los reactores actualmente empleado, tratando de reducir volumen mediante el uso de distintos componentes que reduzcan la capacidad completa de agua requerida, al mismo tiempo de mejorar el potencial, por ejemplo se considera apropiado el uso de arenas como material de relleno, por las propiedades de succión que estas poseen que al estar en contacto con el agua, esta arena al colocarse en contenedor de las aguas saladas ayudaría a acelerar el paso del fluido desde el contenedor de aguas dulce, mejorando de manera considerable el proceso.
- En cuanto a la implementación y monitoreo del sistema, el proyecto estuvo limitación en las presiones que debían mantenerse para lograr el proceso de osmosis retardada. Como se trató del primer montaje realizado de esta índole en la Universidad, de Cartagena se desconocían algunas consideraciones importantes como la forma de llenado, de medición y circulación de las aguas, punto que fueron cruciales en la

obtención de los datos y en especial del potencial energético esperado. Al ser reactores en acero, era imposible visualizar lo ocurrido en el interior y por ende controlar de forma más precisa las variables, fue toda una proeza. En el caso específico de las de la configuración vertical, el reactor era complejo de manejar al tener múltiples válvulas y controles que operar al mismo tiempo cuando el sistema se encontraba en marcha, además este al no tener válvula de drenaje en el contenedor superior se tenía que realizar el vaciado de forma manual, una actividad bastante laboriosa y agotadora. Las experiencias durante las pruebas permitieron además conocer la importancia de la recirculación de las aguas en los reactores, con el fin de mantener el potencial generado durante los ensayos, de la misma forma otro punto crucial son las bombas y la capacidad de las mismas, aunque estas no hayan sido utilizadas se debe tratar de entender un poco más los sistemas y adaptar la más idónea de acuerdo a las variaciones y características del mismo

- Al no haber obtenido las presiones previstas, esta fueron una limitante para el uso del mecanismo de conversión de energía, ya que a pesar de haberlo ensayado con pruebas casera y presiones generadas por mangueras, no puedo ser empleado o acoplado a los reactores osmóticos, quedando la duda si este fue o no el mejor ensamblaje para los montajes estudiados De acuerdo a lo anterior, se sugiere seguir mejorando el sistema de conversión mecánica y en el sistema de rodets, a su vez de ser posible reducir la escala con el fin de que pueda ser empleado por sistemas donde la generación de presiones no sea tan significativa.

8) . REFERENCIAS

(s.f.).

- Achilli, A., Cath, T., & Childress, A. (2009). Power generation with pressure retarded osmosis: An experimental and theoretical investigation. *Journal of Membrane Science*, 42-52.
- Alcaldía Mayor de Cartagena de Indias. (20 de 11 de 2001). *cartagena.gov*. Recuperado el 20 de 07 de 2014, de http://www.cartagena.gov.co/Cartagena/secplaneacion/Documentos/pages/pot/files/diagnostico/DECRETO_0977_DE_2001.pdf
- Estaya, H., Troncoso, E., & Romero, J. (2014). Design and cost estimation of a gas-filled membrane absorption (GFMA) process as alternative for cyanide recovery in gold mining. *Journal of Membrane Science*, 253-264.
- Achilli, A., & Childress, A. (2010). Pressure retarded osmosis: From the vision of Sidney Loeb to the first prototype installation - Review. *Desalination*, 205-211.
- Achilli, A., Cath, T. Y., & Childress, A. (2009). Power generation with pressure retarded osmosis: An experimental and theoretical investigation. *Journal of Membrane Science*, 42-52.
- Bulgariu, L., & Bulgariu, D. (2011). Extraction of gold(III) from chloride media in aqueous polyethylene glycol-based two-phase system. *Separation and Purification Technology*, 620-625.
- Carreño Rivera, A., & Garces Yepes, G. (2014). *Diseño de planta piloto para la generación de energía eléctrica y potabilización del agua a partir de reactores de membrana osmótica*. Cartagena, Colombia: Universidad de Cartagena.
- Chang Kim, Y., & Elimelech, M. (2013). Potential of osmotic power generation by pressure retarded osmosis using seawater as feed solution: Analysis and experiments. *Journal of Membrane Science*, 429, 330 - 337.
- CIER 08 Regulación del Sector Eléctrico. (2000). *Regulación sector Eléctrico (2013)*. Recuperado el 17 de Noviembre de 2013, de Marco Regulatorio para la Rentabilidad e Inversión - Actualización 2013: <https://sites.google.com/site/regulacionsectorelectrico/colombia>
- De La Hoz, J. V. (2009). *Economía y conflicto en el Cono Sur de Bolívar*. Cartagena.
- Donato, D., Nichols, O., Possingham, H., Moore, M., Ricci, P., & Noeller, B. (2007). A critical review of the effects of gold cyanide-bearing tailings solutions on wildlife. *Environment International*, 974-984.

- Elimelech, M., & Yin Yip, N. (25 de Abril de 2012). La energía oculta que producen los ríos cuando se unen al mar. (B. MUNDO, Entrevistador)
- Elimelech, M., Yin Yip, N., Hoover, L., Phillip, W., & Tiraferri, A. (2011). Forward with Osmosis: Emerging Applications for Greater. *Environmental: Science & Technology*, 9824 - 9830.
- Gang, H., Sui, Z., Xue, L., & Tai-Shung, C. (10 de 07 de 2015). Progress in pressure retarded osmosis (PRO) membranes for osmotic power generation . *Polimer Science*, 51, 1-27.
- Helfer, F., Lemckert, C., & Anissimov, Y. (2014). Osmotic Power with Pressure Retarded Osmosis: Theory, Performance and Trends - A Review. *Journal of Membrane Science*, 453, 337-358.
- Hernandez Sanchez, A., Rios Ponce, G., & Vicencio Medina, A. (2010). *Energia del gradiente salino. Generacion de energia a partir de la presion osmotica existente entre aguas con diferentes gradientes salino*. Tamaulipas, Mexico.
- hidrosoluciones. (2005). *Hidrosoluciones* . Obtenido de <http://www.hidrosoluciones.com.ar/osmosis.php>
- Hilson, G., & Monhemiusb, A. (2006). Alternatives to cyanide in the gold mining industry: what prospects for the future? *Journal of Cleaner Production*, 1158-1167.
- Jaramillo, O. (2007). *Intercambiadores de Calor*. Universidad Nacional Autonoma de Mexico, Centro de Investigación en Energía, Mexico D.C.
- Klaysom, C., Cath, T. Y., Depuydt, T., & Vankelecom, I. (2013). Forward and pressure retarded osmosis: potential solutions for global challenges in energy and water supply. *The Royal Society of Chemistry 2013*, 3-31.
- Lara Borrero, J. A. (2002). *Eliminacion de Nutrientes Mediante Procesos de Membranas*. Madrid.
- Loeb, S., Van Hessen , F., & Shahaf, D. (3 de Agosto de 1976). Production of energy from concentrated brines by pressure-retarded osmosis : II. Experimental results and projected energy costs. *Journal of Membrane Science*, 1(2001), 249-269.
- Mariño Arévalo, A. A., & Fernández Villa, D. J. (2006). El mar: una opción de competitividad olvidada. *Innovar. Revista de Ciencias Administrativas y Sociales*, 16(27), 117-126.
- Ministerio de Minas y energía. (2011- 2012). *Memorias al Congreso de la República*. Colombia: Ministerio de Minas y energía.
- Ministerio de minas y energia, M. (2013). *Energia electrica*. Bogota.

- Moreno Benavides, J. A. (2011). *Diseño de planta de tratamiento de agua de osmosis inversa para la empresa dober osmotech de colombia ltda*. Cali, Colombia: Universidad Autonoma de Occidente.
- Murthy, Z., & Gupta, S. (1999). Sodium cyanide separation and parameter estimation for reverse osmosis thin film composite polyamide membrane. *Journal of Membrane Science*, 89-103.
- Osmotic Power, I. (2009). *Osmotic Power Inc*. Obtenido de <http://osmoticpower.com>
- Qianhong, S., Xue, J., & Chuyang Y, T. (2012). Osmotic power production from salinity gradient resource by pressure retarded osmosis: Effects of operating conditions and reverse solute diffusion. *Journal Membranes Science*, 262-273.
- Qianhong, S., Xue, J., & Chuyang, Y. (2012). Osmotic power production from salinity gradient resource by pressure retarded osmosis: Effects of operating conditions and reverse solute diffusion. *Journal of Membrane Science*, 262-273.
- Quintana Portilla, M. C. (2013). *Contribución al diseño de procesos avanzados de separación mediante ósmosis directa*. Tesis de Pregrado, Universidad de Cantabria, Ingeniería Química.
- Quiñones Bolaños, E. (2005). *Evaluación del grado de remoción de cianuro de sodio y cianato de sodio de aguas contaminadas sintéticas por el método de pervaporación utilizando membranas elastoméricas bajo diferentes condiciones de operación*. Toronto: University of Guelph.
- Ramos Avilez, H. V. (2012). *Remoción de cianuro en relavés auríferos utilizando bichar reducida a partir de talles de *Gliricidia sepium**. Cartagena: Universidad de Cartagena.
- Salinas Cesar, T. P., & Ortiz Laza, C. A. (2010). *Lineamiento para el diseño y construcción de un sistema de generación de energía eléctrica a partir de reactores de membrana osmótica*. Tesis de Pregrado, Universidad de Cartagena, Ingeniería Civil, Cartagena.
- Shockravi, A., Abouzari, E., & Javadi, A. (2009). Synthesis and Properties of Novel Fluorinated Polyamides Based on Noncoplanar Sulfoxide Containing Aromatic Bis(ether amine). *Polimer Journal*, 41(3), 174-180.
- Statkraft. (2008). *Osmotic power - A new, renewable energy source*. Alemania: Statkraft Publishmen.
- Statkraft Company. (04 de 05 de 2009). *Statkraft*. Obtenido de <http://www.statkraft.com/>
- Sueur, C. T. (18 de 11 de 1947). *EE.UU Patente n° US2430859 A*.
- Unidad de Planeación Minero Energética. (2014). *Informe de Gestion UPME 214*. Bogota D.C.

Unidad de Planeación Minero Energética. (s.f.). *UPME.GOV*. Recuperado el 20 de Julio de 2014, de <http://www1.upme.gov.co/>

Universidad de los Andes. Colombia. (s.f.). Recuperado el 08 de Abril de 2015, de <https://investigaciones.uniandes.edu.co/index.php/en/centro-de-microscopia/microscopio-electronico-de-barrido-meb/descripcion-de-la-tecnica-meb>

Valencia, J. (1981). *Teoría, diseño y control de los procesos de clarificación de agua*. Lima: O.P.S.: C. P. Ambiente.

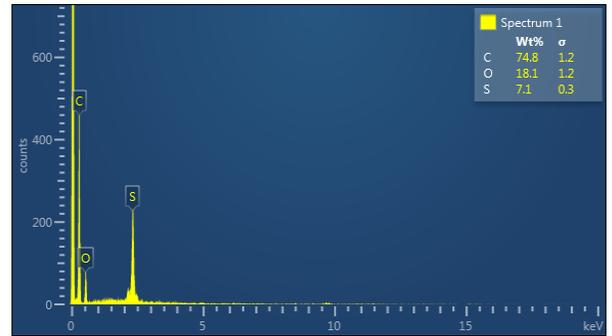
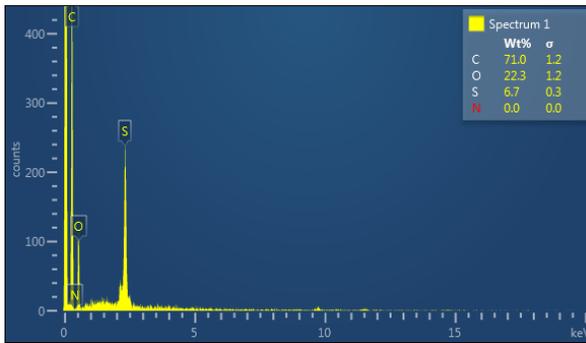
Water Environment Federation, W., American Public Health Association, A., & American Water Works Association, A. (Febrero de 2015). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*.

ANEXOS

- **Análisis de elementos internos membranas**

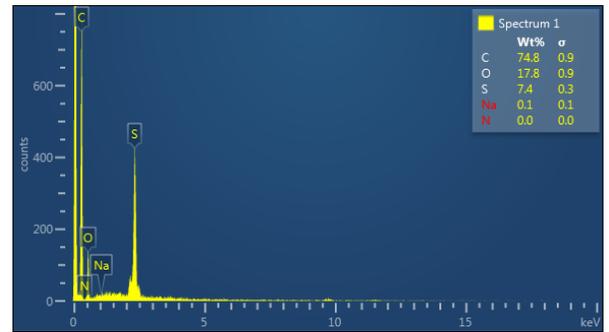
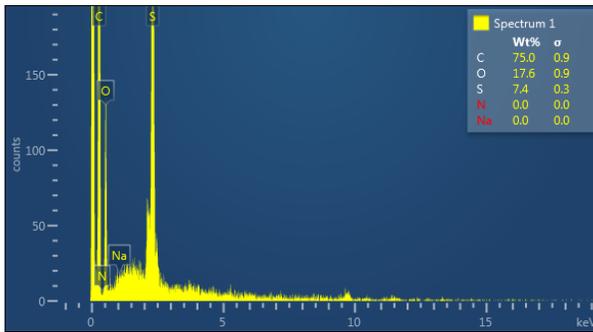
Membrana Seca

Blanco

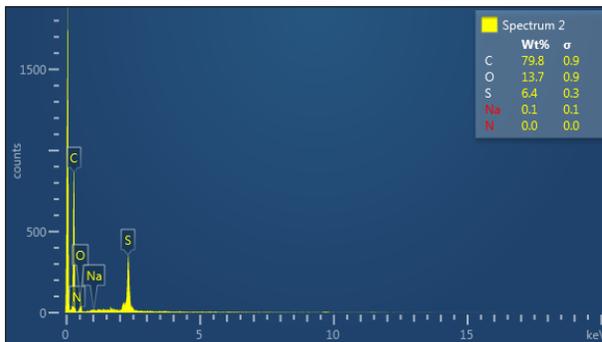


25 mg/L

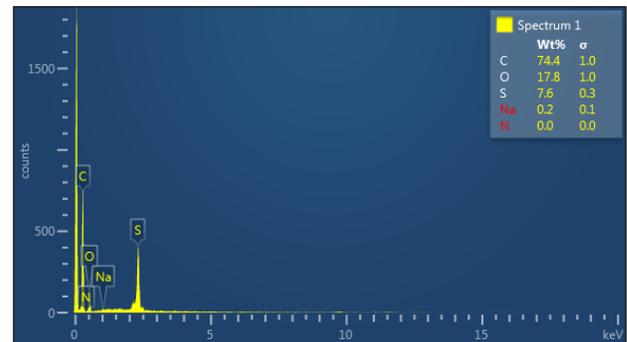
50 mg/L



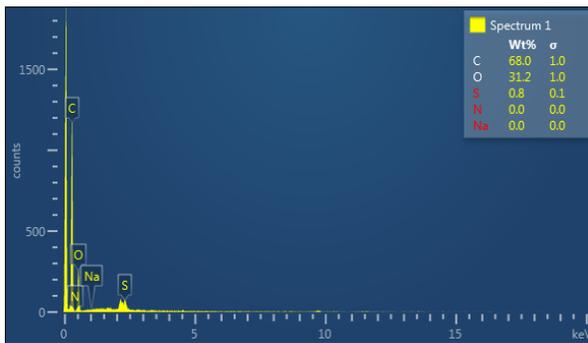
100 mg/L



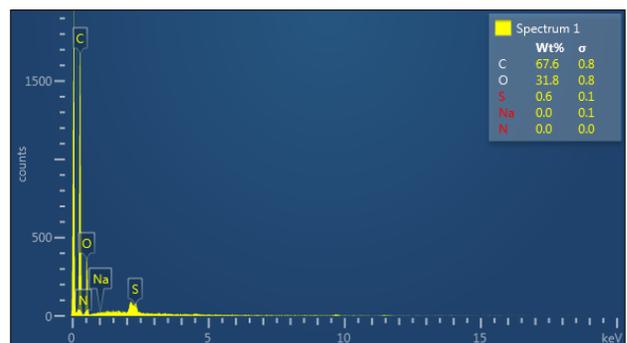
200 mg/L



Blanco cara NO activa

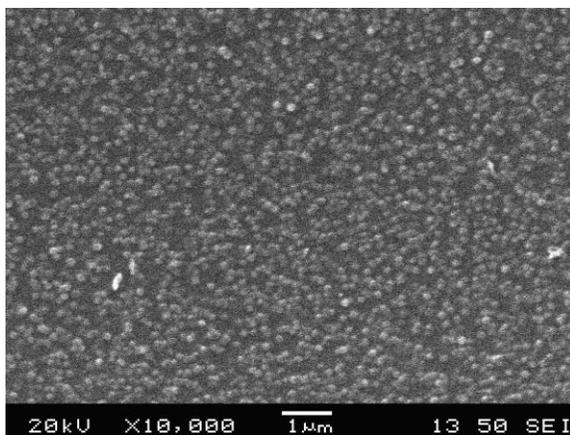


200 mg/L cara No activa

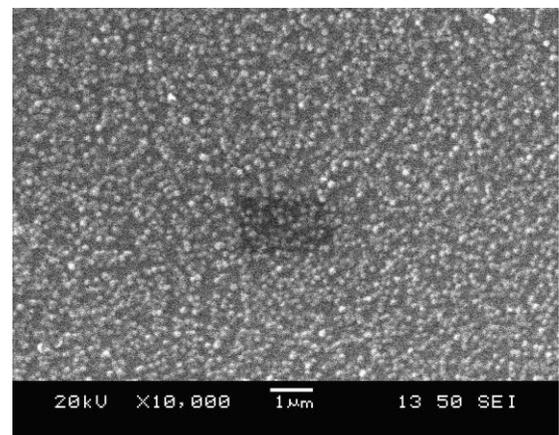


- **Vista microscópica de estructura interna de membranas**

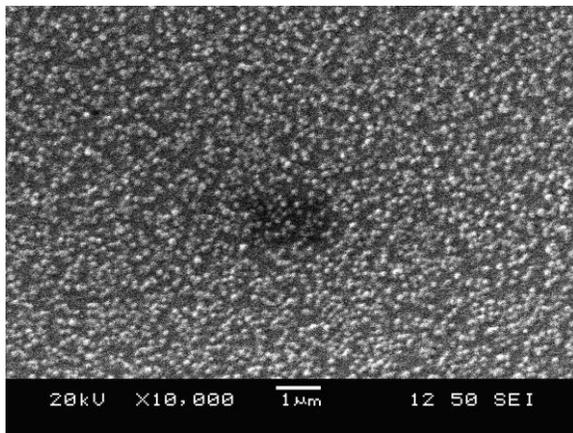
Blanco



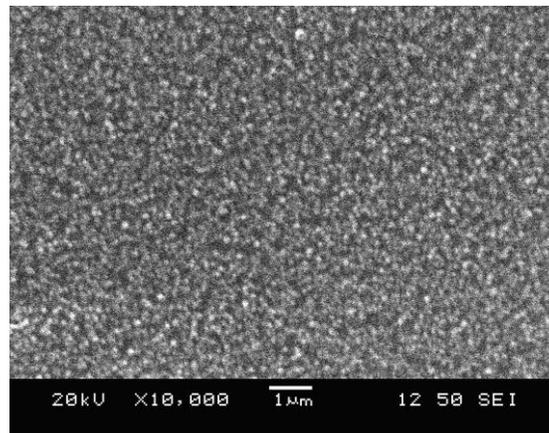
25 mg/L



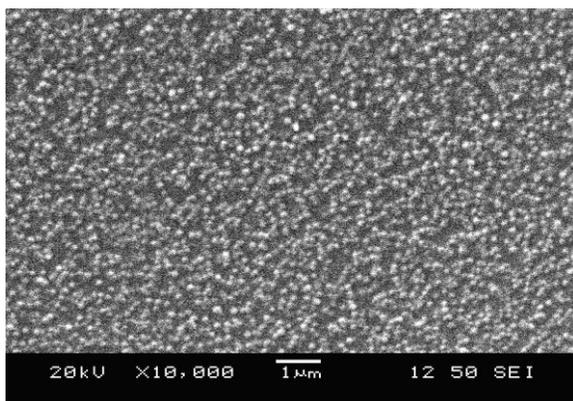
50 mg/L



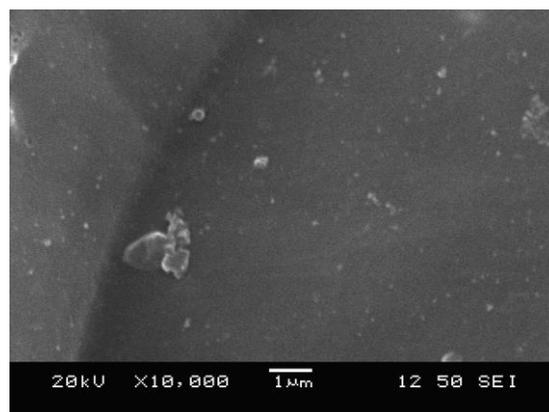
100mg/L



200 mg/L



Blanco cara NO activa



200 mg/L cara NO activa

