

**GENERACION DE PRESION OSMOTICA
MEDIANTE APROVECHAMIENTO DEL
GRADIENTE DE SALINIDAD EN LOS
PROCESOS DE OSMOSIS RETARDADA Y DE
DESALINIZACIÓN DEL AGUA DE MAR**

UNIVERSIDAD DE CARTAGENA

**GRUPO DE INVESTIGACION
MODELACION AMBIENTAL**

**Autor: Luis Carlos Vives Pérez
Director: PhD Edgar Quiñones B.
Cartagena 2016**

**GENERACION DE PRESION OSMOTICA MEDIANTE APROVECHAMIENTO
DEL GRADIENTE DE SALINIDAD EN LOS PROCESOS DE OSMOSIS
RETARDADA Y DE DESALINIZACIÓN DEL AGUA DE MAR**



Grupo de investigación
GIMA

Línea de investigación
GESTION AMBIENTAL

Investigador
LUIS CARLOS JOSÉ VIVES PÉREZ

Director
ING. EDGAR QUIÑONES BOLAÑOS PhD
DOCTOR EN INGENIERIA AMBIENTAL

**UNIVERSIDAD DE CARTAGENA
FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL
CARTAGENA D.T y C
2016**

**GENERACION DE PRESION OSMOTICA MEDIANTE APROVECHAMIENTO
DEL GRADIENTE DE SALINIDAD EN LOS PROCESOS DE OSMOSIS
RETARDADA Y DE DESALINIZACIÓN DEL AGUA DE MAR**



Trabajo de grado como requisito para optar el título de:

INGENIERO CIVIL

Investigador

LUIS CARLOS JOSÉ VIVES PÉREZ

Director

ING. EDGAR QUIÑONES BOLAÑOS PhD
DOCTOR EN INGENIERIA AMBIENTAL

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

2016



NOTA DE ACEPTACION

Firma del director
EDGAR QUIÑONES BOLAÑOS

Firma del jurado
MONICA ELJAIK URZOLA

Firma del jurado
JOSE COLINAS MARQUEZ



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

DEDICATORIA

A Dios dedico este logro por darme la visión y la determinación necesaria para emprender y concluir este proyecto de grado.

A mis padres por ser el motor que impulsaron mi carrera durante todo este tiempo.

A mi familia por el apoyo incondicional que siempre encontré en ellos. A mis amigos por su compañía y solidaridad en este reto tan importante para mi vida.

“Las personas necesitan un propósito que tenga significado, Esa es nuestra razón de vivir. Con un propósito compartido, somos capaces de conseguir cualquier cosa.”

Warren Bennis

LUIS CARLOS JOSÉ VIVES PÉREZ



AGRADECIMIENTOS

Agradezco primeramente a la vida por brindarme esta oportunidad de crecimiento personal y profesional. Gracias a mis padres, mi familia y seres queridos por acompañarme durante esta travesía, a ellos gracias por cada voz de aliento, motivación y sobre todo por su compañía. Gracias al Doctor Edgar Quiñones Bolaños por ser mi guía en la configuración de este proyecto. Por sus aportes, consejos y recomendaciones que fueron vital en el resultado final de este trabajo. Al Grupo de Investigación en Modelación Ambiental (GIMA), la Corporación Autónoma Regional del Canal del Dique (Cardique), La tripulación de la Fragata ARC 20 de Julio de la Armada Nacional, quienes con su apoyo hicieron realidad la realización de este proyecto. A mis queridos amigos gracias por el respaldo y disposición.



TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	14
2. OBJETIVOS.....	17
2.1. OBJETIVO GENERAL	17
2.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS	17
2.3. ALCANCE Y DELIMITACIONES.....	18
2.3.1. Delimitación temporal.....	19
2.3.2. Delimitación espacial.....	19
3. MARCO DE REFERENCIA.....	20
3.1. ANTECEDENTES	20
3.2. MARCO TEÓRICO.....	23
3.2.1. Procesos osmóticos.....	23
3.2.2. Características De Los Procesos Osmóticos.....	23
3.2.3. Energía Osmótica	25
3.2.4. Presión De Osmosis Retardada PRO.....	26
3.2.5. Agua De Mar.....	28
3.2.6. Membranas Osmóticas.....	30
3.2.7. Pre tratamiento del agua.....	36
3.2.8. Conversión energética.....	37
3.3. MARCO LEGAL.....	40
3.3.1. Normatividad para el Abastecimiento de Agua Potable.....	40
3.4. ESTADO DEL ARTE	43
4. METODOLOGÍA.....	48
4.1. FASE 1. REDISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL REACTOR OSMÓTICO	49
4.2. FASE 2: CAPTACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL AGUA DE MAR.	51
4.3. FASE 3: DESALINIZACIÓN DEL AGUA DE MAR.	54
4.4. FASE 4: ANÁLISIS DE FLUJO A TRAVÉS DE LA MEMBRANA POR FO.	55
4.5. FASE 5: GENERACIÓN DE PRESIÓN OSMÓTICA POR PRO.....	56
5. RESULTADOS.....	59
5.1. FASE 1. REDISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL REACTOR OSMÓTICO	59



5.1.1. Elección de la Membrana.....	59
5.1.2 Construcción del reactor.....	60
5.2. FASE 2: CAPTACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL AGUA DE MAR	63
5.2.1. Caracterización fisicoquímica del agua de mar.....	63
5.3. FASE 3: DESALINIZACIÓN DEL AGUA DE MAR.	65
5.4. FASE 4: ANÁLISIS DE FLUJO A TRAVÉS DE LA MEMBRANA POR FO.	68
5.5. FASE 5: GENERACIÓN DE PRESIÓN OSMÓTICA POR PRO.....	70
5.6. PARÁMETROS DE OPERACIÓN	74
6. CONCLUSIONES.....	76
7. RECOMENDACIONES.....	79
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	80
ANEXOS.....	83



LISTADO DE TABLAS

TABLA 1 COMPOSICIÓN TÍPICA DEL AGUA DE MAR FUENTE: (GUTIERREZ, 2012)	29
TABLA 2 MODIFICADO PLAN MAESTRO DE ACUEDUCTO EN BOLÍVAR (PROAMBIENTE LTDA, 2009). 41	
TABLA 3 CARACTERISTICAS COMERCIALES DE LAS MEMBRANAS	59
TABLA 4 CUADRO COMPARATIVO ENTRE CARACTERISTICAS COMERCIALES DE LAS MEMBRANAS..	60
TABLA 5 RESULTADOS ANÁLISIS FISICOQUÍMICO Y MICROBIOLÓGICO DEL AGUA DE MAR.....	63
TABLA 6 RESULTADOS ANALISIS FISICOQUIMICOS Y MICROBIOLÓGICOS DE AGUA DESALINIZADA .	66
TABLA 7 RESULTADO DE TITULACION SALMUERA DE RECHAZO.....	66
TABLA 8 COMPARACION ENTRE AGUA DE MAR Y AGUA DESALINIZADA	67
TABLA 9 VALORES TOMADOS EN LABORATORIO PRUEBA FO USANDO AGUA DE MAR VS SALMUERA C=62,3 Y C=70	69
TABLA 10 VOLUMENES Y CONCENTRACIONES INICIALES Y FINALES PARA DOS CONCENTRACIONES DE SALMUERA	70
TABLA 11 DATOS RECOLECTADOS EN LABORATORIO PARA DETERMINACION DE FLUJO JW.....	71
TABLA 12 RESULTADO DE FLUJOS MEDIANTE ANALISIS EXPERIMENTAL	72
TABLA 13 RANGO DE RESULTADOS POTENCIAL ELECTRICO	73
TABLA 14 ANALISIS DE APLICABILIDAD DE LA POTENCIA	74
TABLA 15 CUADRO DE VALORES EXPERIMENTALES Y CALCULO DE FLUJO PRO	83



LISTADO DE FIGURAS

FIGURA 1 PRINCIPALES AVANCES E INVESTIGACIONES REALIZADAS EN EL MARCO DE LOS PROCESOS OSMÓTICOS A TRAVÉS DEL TIEMPO.....	21
FIGURA 2 REPRESENTACION ESQUEMATICA DE LO PROCESOS OSMOTICOS FUENTE: (HAN, SUI, XUE, & TAI-SHUNG, 2015)	24
FIGURA 3 CONSUMO / PRODUCCIÓN DE ENERGÍA EN FO, PRO Y PRO USANDO MEMBRANA DELGADA SEMI-PERMEABLE. (CHANG KIM & ELIMELECH, 2013).....	28
FIGURA 4 MEMBRANA ENROLLADA EN ESPIRAL (LENNTECH, 2009).....	31
FIGURA 5 MEMBRANA PLACA PLANA (LARA BORRERO, 2002).....	32
FIGURA 6 MEMBRANA PLACA TUBULAR (ROCHEM RO-WASSERBEHANDLUNG GMBH, 2010).....	32
FIGURA 7 MEMBRANA TUBULAR (HIDROSOLUCIONES)	33
FIGURA 8 MEMBRANA FIBRA HUECA (DRACE, 2007).....	34
FIGURA 9 DINAMO	38
FIGURA 10 CONFIGURACIÓN SISTEMA MIXTO DESALINIZADOR/GENERADOR DE ENERGÍA FUENTE (CHANG KIM & ELIMELECH, 2012).....	45
FIGURA 11 ESQUEMA DE METODOLOGIA	48
FIGURA 12 REACTOR OSMOTICO SIN MODIFICACION.....	49
FIGURA 13 MODIFICADO ESQUEMA DE SISTEMA GENERAL PARA GENERACION DE PRESION OSMOTICA (GABRIEL GARCÉS, 2014)	50
FIGURA 14 REACTOR OSMOTICO A ESCALA DE LABORATORIO	51
FIGURA 15 MAPA DE UBICACIÓN DEL PUNTO DE RECOLECCION DE LAS MUESTRAS	52
FIGURA 16 MUESTRAS DE AGUA DE MAR.....	53
FIGURA 17 ESQUEMA DE CONFIGURACION DEL REACTOR PARA EL PROCESO DE OSMOSIS INVERSA	54
FIGURA 18 BUQUE ARC 20 DE JULIO (PUBLIMETRO, 2013) - PLANTA DE DESALINIZACION	55
FIGURA 19 CONFIGURACION DEL SISTEMA PARA MEDICION DE FLUJO MEDIANTE PRO.....	56
FIGURA 20 HIDRODINAMICA DE SOLUCIONES DENTRO DE PROCESO PRO	58
FIGURA 21 MODELO 3D DEL PRIMER PROTOTIPO DE REACTOR OSMOTICO	61
FIGURA 22 DISTRIBUCION DE PRESIONES PARA DIFERENTES FIGURAS GEOMETRICAS (PARK & PAULY, 2003)	61
FIGURA 23 COMPONENTES ADICIONALES DEL REACTOR	62
FIGURA 24 FLUJO A TRAVES DE LA MEMBRANA PARA DOS CONCETRACIONES DE SALMUERA.....	69
FIGURA 25 DISPERSION DE VALOR DE FLUJO	72



GENERACION DE PRESION OSMOTICA MEDIANTE APROVECHAMIENTO DEL GRADIENTE DE SALINIDAD EN LOS PROCESOS DE OSMOSIS RETARDA Y DE DSALINIZACIÓN DEL AGUA DE MAR
Cartagena 2016



FIGURA 26 MANUAL DE OPERACION PLANTA DESALNIZADORA	83
FIGURA 27 FILTRACION DE AGUA REACTOR PILOTO	84
FIGURA 28 EMPAQUE POLIURETANO	85
FIGURA 29 MEMBRANA OSMOTICA TORAY V82	85
FIGURA 30 AJUSTE DEL REACTOR PILOTO.....	86
FIGURA 31 REACTOR A ESCALA DE LABORATORIO	86
FIGURA 32 CERTIFICADO RECONOCIMIENTO COMO PROYECTO MERITORIO EN ENCUENTRO NACIONAL REDCOLSI 2015	87



RESUMEN

Una gran cantidad de energía renovable se puede generar cuando las aguas de diferentes salinidades se mezclan entre sí. El aprovechamiento de esta energía se puede lograr por medio de la presión de osmosis retardada (PRO). El objeto de la presente investigación es demostrar con resultados experimentales que es posible la generación de energía eléctrica y la obtención de agua potable aprovechando el gradiente de salinidad presente en los procesos osmosis inversa y osmosis retardada utilizando las características del agua del Mar Caribe y el aprovechamiento de la salmuera residual en los procesos de osmosis inversa como materia prima. El reactor se utilizó para evaluar procesos osmóticos con la utilización de una membrana polimérica aplicando los conocimientos teóricos acerca de flujo de solución a través de la membrana para la determinación de eficiencias en la producción de energía y desalinización en un ambiente real, basados en las características finales del agua y las presiones generadas.

Con un reactor de acero inoxidable y un membrana Toray V82, se realizaron pruebas de flujo a través de la membrana para los distintos procesos, se caracterizaron muestra de agua de mar, agua desalinizada y salmuera de rechazo las cuales arrojaron valores de salinidad de 35,3 g/l, 0,07 g/l y 63,2 g/l; dando excelentes resultados en el proceso de desalinización con un 99,8 % de remoción de sales y cumpliendo los parámetros exigidos por la normativa colombiana como agua para el consumo humano. Mediante pruebas con concentraciones diferentes un proceso FO se determinó que un aumento en el diferencial de concentración de 7.5 g/l, puede llegar a aumentar la tasa de flujo 1,4 veces, mejorando el rendimiento del sistema. Se logró demostrar experimentalmente que existe un potencial energético mediante la generación de presión osmótica para la membrana analizada de $W=0,0048653\pm 3,79E-5$ W/m^2 , y valores máximos de $W_{max}=0,291$ W/m^2 en un reactor a escala, este valor puede mejorar utilizando otra configuración de membrana diferente que haga posible un aumento del diferencial de presión hidráulica.

Palabras Clave: Ósmosis de presión retardada (PRO), Ósmosis inversa (RO), densidad de energía, gradiente de salinidad, potencial eléctrico, desalinización, Salmuera.



ABSTRACT

A large amount of renewable energy can be generated when water streams of different salinities are mixed together. The development of this energy source can be achieved by means of pressure retarded osmosis (PRO). The object of this research is demonstrate with experimental results that is possible the generation of electric power and the obtaining of drinking water using the gradient of salinity present in processes retarded osmosis and reverse osmosis using features of the water of the Caribbean Sea and the exploitation of residual brine in the processes of osmosis as raw material. The reactor was used to evaluate osmotic processes with the use of a polymer membrane by applying theoretical knowledge about flow of solution across the membrane for the determination of efficiencies in power generation and desalination in a real environment, based on the final characteristics of the water and the pressure is generated.

With a reactor built in stainless steel and a membrane Toray V82, flow tests were conducted through the membrane for the different processes, were characterized sample of seawater, desalinated water and brine rejection which show 35.3 g/l, 0.07 g/l and 63, 2 g/l salinity values respectively; giving excellent results in the process of desalination with 99.8% of salt remoting and the parameters demanded by Colombian regulations as water for human consumption. A process FO was determined through tests with different concentrations to an increase in the concentration of 7.5 g/l, can get to increases flow rate 1.4 times, improving the performance of the system. Achieved experimentally demonstrate that there is an energy potential by generating pressure for analyzed membrane osmotic $W=0.00011389 \text{ W/m}^2$ in a scale reactor, this value can improve using another membrane configuration that make possible an increase in hydraulic pressure differential.

Key words: Pressured Retarded Osmosis (PRO), Reverse Osmosis (RO), Energy density, Salinity, Potential gradient power, Desalination, Brine.



1. INTRODUCCIÓN

El constante crecimiento de las poblaciones y de las expectativas de vida de los seres humanos se refleja por un lado, en el incremento de la demanda energética que se presentaba en años anteriores trayendo consigo un predominio de mecanismos para la producción de energía basados en la utilización de combustibles fósiles, un recurso no renovable debido a la progresiva reducción de sus reservas, al mismo tiempo, contribuyen con gran parte de la contaminación atmosférica y se encuentra entre los principales causantes del llamado efecto invernadero. Por otro lado tenemos que el agua potable es un recurso finito necesario para la supervivencia de los seres humanos y esta genera implicaciones para la salud humana, la vida y la seguridad alimentaria cuando se presenta consumo de mala calidad.

En Colombia las poblaciones que no se encuentran vinculadas al Sistema Interconectado Nacional de energía eléctrica (SIN), en especial las ubicadas en zonas insulares del departamento de Bolívar, se ven obligadas a suplir sus necesidades mediante la generación térmica de energía por quema combustibles fósiles, un servicio que es discontinuo pues operan solo 9 horas diarias en promedio a costos elevados y a expensas también de un impacto ambiental considerable por la emisión de gases colocando en riesgo la salud de los operarios y habitantes ya que éstas son agentes cancerígenos. (Unidad de Planeación Minero Energética, 2014)

Debido a este impacto, se ha estimulado la exploración de alternativas no convencionales para la satisfacción de la demanda de manera sostenible y con menor agresión para el medio ambiente. Por esto, hoy en día sistemas que generan energía a partir de paneles solares o aerogeneradores se presentan como tecnologías de gran interés y focos de investigación.

La accesibilidad del servicio de agua potable también se presenta como una problemática para muchas poblaciones, debido a que carecen de sistemas para la potabilización del agua, por lo que en muchos casos se recurre a transportar el agua mediante carros cisterna desde poblaciones aledañas para la distribuida entre sus habitantes.



Un claro ejemplo es la Isla de Tierra Bomba (Cartagena de Indias) donde la poca agua que se suministra es estrictamente utilizada para el consumo, mientras que en otras labores como la limpieza de la vivienda y la higiene personal son realizadas con agua salobre o agua de mar. Es evidente que la falta de agua potable y de servicios básicos, se reflejan en la baja calidad de vida, el aumento de enfermedades y son la causa principal que hace que las zonas insulares del caribe colombiano se encuentren superadas frente a otras economías del país.

Como se evidencia en los alarmantes datos proporcionados por (Defensoría de los derechos humanos, 2009) ninguno de los 44 municipios de Bolívar toman agua potable y solo el municipio de Turbana está próximo a cumplir con la norma sobre agua potable. Esto significa que 602.529 personas beben agua no apta para el consumo y de ellos 113.677 toman agua con alto riesgo microbiológico.

Entre estos encontramos La llamada “energía azul”, o generación de energía basada en la utilización de la presión hidráulica generada como resultado del diferencial salino presente entre dos fluidos dentro de un reactor de presión por ósmosis retardada (PRO) separados por una membrana semipermeable, se postula como una de las más prometedoras fuentes de energía del futuro debido a la facilidad de obtención de su materia prima y la potencial capacidad de generar energía estimada en 2TW o aproximadamente el 13% del consumo usual de energía mundial (Fabio La Mantia, 2011). Una energía máxima de 0,8 kW/m³ puede ser capturada cuando 1 m³ de agua de río se mezcla con 1,0 m³ de agua de mar y la reserva mundial de la energía osmótica es de alrededor de 2,5 teravatios, sin embargo, 980 GW de esta energía osmótica es accesible utilizando la técnica de PRO (Logan & Elimelech, 2012)

Nuestro país posee un amplio contacto con el mar caribe, cuenta con más de 2000 km de franja costera, de los cuales, 193 km se ubican en el distrito de Cartagena de Indias (Alcaldía Mayor de Cartagena de Indias, 2001), el cual presenta valores de salinidad superficial del 35.3 a 35.8 partes por mil, lo que representa un gran potencial energético para nuestra región, sin embargo la carencia del conocimiento en esta tecnología hace que



no sea aprovechado el potencial energético existente. (Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras, 2008)

La utilización de membranas osmóticas semipermeables es también utilizada para solucionar problemas de abastecimiento de agua potable mediante la osmosis inversa, proceso por el cual se desaliniza el agua de mar brindando una alternativa diferente ante esta problemática. Este proceso osmótico genera un material de desperdicio llamado “salmuera”, el cual no es más que fluido con altas concentraciones de sal de rechazo, normalmente estos desecho son arrojados a la fuente de abastecimiento, lo que ocasiona a gran escala un cambio significativo en el ecosistema. (Gutiérrez, 2012)

En ese sentido, el objeto de la presente investigación es mostrar de manera concreta con resultados experimentales y que pueden ver de primera mano que es posible la generación de energía eléctrica y la obtención de agua potable aprovechando el gradiente de salinidad presente en los procesos de osmosis, osmosis inversa y osmosis retardada utilizando agua de mar como materia prima. El potencial de esta tecnología ha sido publicado en universidades localizadas en Estados Unidos, Noruega, España, Corea del Norte entre otras, en este caso, además de analizar todo el proceso de la transferencia tecnológica, contribuir a la generación de conocimiento, al desarrollo y fortalecimiento de la tecnología mediante las investigaciones, se proyecta plantear esta tecnología como una nueva alternativa de solución para dos de las principales problemáticas presentes en muchos de los municipios del departamento de bolívar sin generar impacto alguno en los ecosistemas.



2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar el potencial energético y de desalinización de un reactor osmótico a base de membranas poliméricas a escala de laboratorio, mediante la medición de la presión osmótica generada y la caracterización del agua desalinizada, utilizando agua de mar y salmuera de rechazo como solución, que permita plantear alternativas de tratamiento de agua y suministro de energía eléctrica.

2.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Construir un reactor a escala de laboratorio para la desalinización de agua de mar y generación de energía eléctrica a través del aprovechamiento de la presión osmótica, utilizando la configuración del sistema para un tipo de membrana.
- Analizar características fisicoquímicas del agua de mar desalinizada y de la salmuera de rechazo producto de los procesos de osmosis inversa en un reactor osmótico a escala de laboratorio, para determinar diferenciales de salinidad y recomendar tratamientos adicionales para su utilización como suministro de agua potable.
- Analizar los procesos para generar presión osmótica utilizando salmuera sintética como solución de empate y agua de mar como solución alimentadora, en el proceso de generación de energía eléctrica en un reactor de presión por osmosis retardada a escala de laboratorio.
- Definir parámetros de operación para un reactor osmótico a escala de laboratorio utilizado para la generación de energía eléctrica y desalinización del agua de mar para un tipo de membrana.



2.3. ALCANCE Y DELIMITACIONES

El principal objetivo de esta investigación es determinar la eficiencia de un reactor osmótico mediante los procesos de presión osmótica retardada utilizando agua de mar como solución alimentadora y salmuera de rechazo de diferentes concentraciones resultado de procesos de osmosis inversas para la desalinización del agua de mar como solución de empate. El proyecto se limitó a la construcción del reactor osmótico, su utilización para la desalinización del agua de mar mediante la osmosis inversa y el análisis de las presiones generadas, los caudales apropiados de operación y el potencial energético de la membrana en el proceso de osmosis retardada mediante la medición del flujo de agua a través de la membrana.

El reactor se utilizó para evaluar procesos osmóticos con la utilización de membranas poliméricas. Esto con el objetivo de aplicar los conocimientos teóricos acerca de flujo de solución a través de la membrana para la determinación de eficiencias en la producción de energía y desalinización en un ambiente real, basados en las características finales del agua y las presiones que se generen.

El proyecto es el desarrollo de una tecnología compacta, que integrará la generación de energía eléctrica y la desalinización del agua de mar en coherencia con las características propias de la región. estos resultados son antecedente de temáticas de investigación como la generación de nuevo conocimiento en cuanto a las modificaciones necesarias que deben hacerse sobre membranas comercialmente disponibles para lograr mayor densidad energética y la configuración del sistema que permita reducir las pérdidas de presión, la colmatación y polarización de la membranas, La viabilidad técnica de utilizar la salmuera que resulta de la desalinización del agua de mar en pro de satisfacer otra necesidad básicas con un mismo proceso.

Este proyecto hace parte de la línea de investigación de energía osmótica desarrollada por el grupo de investigación GIMA, por lo cual su producto complementario es la implementación de estos conocimientos para la construcción de una planta piloto a mayor escala en futuros proyectos, donde estudios y experimentos que se lograrían permitirán



definir la viabilidad de construir plantas de este tipo a gran escala, y a su vez serán un gran aporte a la comunidad científica que tiene grandes expectativas en el desarrollo de la energía osmótica y su incorporación como fuente alternativa de energía eléctrica a nivel nacional e internacional.

2.3.1. DELIMITACIÓN TEMPORAL

Para el proyecto desarrollado en el segundo semestre académico del año 2015, se realizó la revisión bibliográfica e información secundaria pertinente disponible en las bases de datos de la Universidad de Cartagena las cuales permitieron obtener conocimientos teóricos, técnicos y el estado actual de las líneas de investigación relacionadas con procesos osmóticos y la generación de energía eléctrica. Paralelo a esto se adelantó la construcción y ensamble del reactor osmótico.

Las muestras de agua de mar fueron tomadas en el mismo mes, intentando evitar mayores diferencias entre las características fisicoquímicas de las muestras.

2.3.2. DELIMITACIÓN ESPACIAL

La recolección del agua de mar se realizó en las zonas costeras del departamento de bolívar, en la zona localmente conocida como “las Boyas” que se encuentra entre las playas frente al hospital de boca grande en el barrio de Castillo grande de la ciudad de Cartagena y la playa Punta Arena que se encuentra en la isla de Tierra Bomba, el punto exacto de extracción se ubica en las coordenadas 10°23'36.3"N 75°34'28.1"W.

El ensamble y evaluación del reactor a escala de laboratorio se realizaron dentro de las instalaciones de los laboratorios de la Universidad de Cartagena, lugar con condiciones conocidas y disponibilidad del equipo necesario para realizar dichas actividades.



3. MARCO DE REFERENCIA

3.1. ANTECEDENTES

Alrededor del mundo los procesos osmóticos son cada vez más utilizados para suplir algunas de las necesidades básicas, la ósmosis inversa está siendo comúnmente usada para la desalinización del agua de mar y la obtención de agua pura ya que demandan menos cantidad de energía que otros métodos. En cuanto a la utilización de los procesos de osmosis para la producción de energía eléctrica, se están realizando investigaciones donde se hacen experimentos para establecer la funcionalidad, la eficiencia y las limitaciones de estos procesos.

El concepto de ósmosis en la generación de energía eléctrica es relativamente nuevo, aproximadamente hace 40 años el Profesor Sidney Loeb de la Universidad de Negev, Beersheba – Israel, utilizó por primera vez la teoría de una planta con membranas semi-permeables que generan presión osmótica. El avance de la tecnología permitió el desarrollo y mejoramiento de las características de estas membranas semipermeables y componentes básicos de sistemas osmóticos, lo que hace factible el ser utilizados para la generación de energía entre los años 1980 y 1990, por parte de un equipo de la organización de investigación noruegas a cargo del Sr. Thor Thorsen. (Loeb & Norman, 1975)

En la figura 1 se muestra un esquema que muestra los principales avances e investigaciones realizadas en el marco de los procesos osmóticos a través del tiempo.

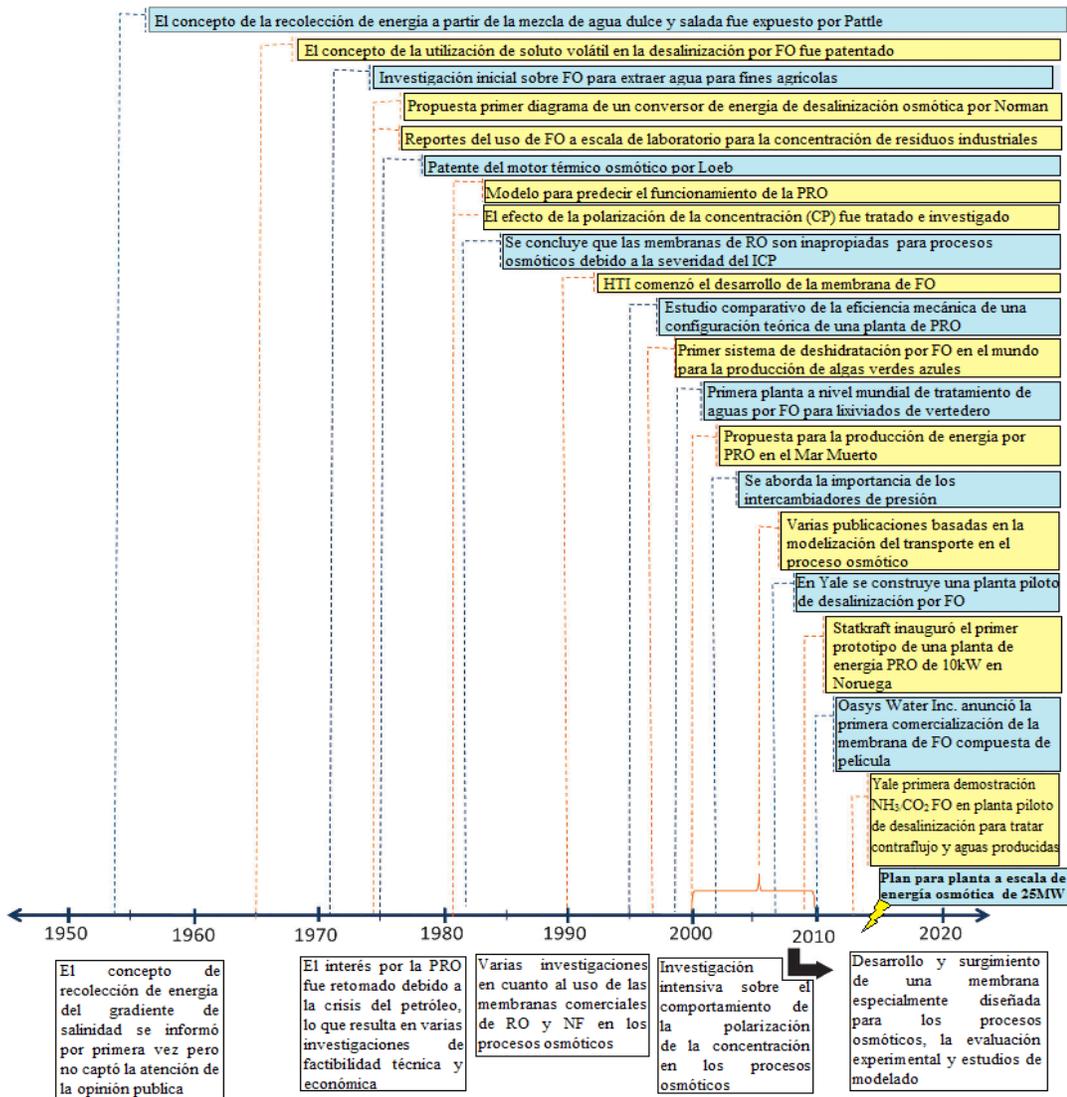


FIGURA 1 PRINCIPALES AVANCES E INVESTIGACIONES REALIZADAS EN EL MARCO DE LOS PROCESOS OSMÓTICOS A TRAVÉS DEL TIEMPO.



A nivel local, las investigaciones de (Ortiz Laza C., 2010) determinan algunas características básicas presentes en los procesos para la generación de energía a base de sistemas de presión osmótica encontrando como los parámetros más influyentes las presiones de entrada, diferencial de salinidad y la temperatura. Realizada por dos estudiantes de Ingeniería Civil de la Universidad de Cartagena con apoyo del grupo de investigación GIMA, por lo cual este proyecto continua con la línea de investigación que fue iniciada.

(Gabriel Garcés, 2014) Adelantó un proyecto enfocado en el diseño de una planta piloto de generación de energía y la desalinización del agua de mar idealizada para una escuela en la isla de Barú, indagando en la utilización de componentes adicionales como intercambiadores de presión dentro del sistema aumentan su eficiencia en la generación de presión. también realizaron una comparación de distintas configuraciones del sistema cambiando las fuentes de las aguas afluentes del sistema entre las que se encontraban agua de mar, agua de rio, aguas residuales; eligiendo como el más favorable el sistema basado en el agua de mar y la salmuera de rechazo.

A nivel nacional, encontramos algunos trabajos relacionados con el procesamiento del agua utilizando sistemas osmóticos, entre los cuales tenemos el trabajo de (Moreno Benavides, 2011), Este proyecto es un diseño que se enfoca en la purificación del agua a través de procesos de osmosis y además, en él se realiza un estudio de mercadeo para la implementación de este nuevo sistema.

A nivel internacional, las empresas y plantas más importantes en el tema son STAT KRAFT, la cual en 2009 construyó en Noruega una planta piloto para realizar experimentos y poder desarrollar la tecnología de PRO para la producción de energía; LENNTECH “Water treatment solutions” con sede en Holanda, la cual proporciona tratamientos de osmosis inversa para la purificación del agua de manera eficiente; PURE AQUA, Inc. “water treatment and reverse osmosis systems”, empresa pionera en Estados Unidos, en la desalinización del agua de mar, presentan plantas de osmosis inversa de diferentes



capacidades de producción, y con tecnología completamente automatizadas. (LENNTECH, 2009), (Statkraft, 2008)

3.2. MARCO TEÓRICO

3.2.1. PROCESOS OSMÓTICOS

Actualmente los procesos osmóticos a base de membranas poliméricas se presentan como posibles soluciones para problemáticas básicas alrededor del mundo como fuentes eficientes de agua para el consumo humano y la generación de energía eléctrica con un mínimo impacto al medio ambiente. Por esto son muchos los estudios que se adelantan con el fin de mejorar las características tales como aumentar su resistencia a las presiones, mejores soluciones de drenaje, la retención de las partículas salinas y la disminución del efecto de polarización de dichas membranas semipermeables que a su vez optimizaría los procesos de ósmosis inversa (RO) y la ósmosis directa (FO) utilizadas para la desalinización y la osmosis de presión retardada para la generación de energía eléctrica. (Klaysom, Cath, Depuydt, & Vankelecom, 2013).

3.2.2. CARACTERÍSTICAS DE LOS PROCESOS OSMÓTICOS

La ósmosis es un fenómeno en el que se produce el paso o difusión de una solución diluida a través de una membrana semipermeable selectiva a otra solución más concentrada. Es inducido por una diferencia soluta de concentraciones molares través de una membrana que permite el paso de agua, pero rechaza moléculas de sal e iones.

En el caso de agua salada oceánica, una energía de alrededor de 2.88MJ por 1 m³ de agua fresca se libera cuando se mezcla con una gran cantidad de agua salada. En una planta de energía osmótica, esta energía puede ser utilizada para generar energía eléctrica; en la naturaleza, esta energía sólo se traduce en un ligero calentamiento del océano en la desembocadura del río según (Diger, Trondle, & Platt, 2013).

La solución receptora se denomina solución de extracción, inclusive se puede conocer como agente osmótico o medio osmótico, pero el nombre que más corresponde es solución



de extracción. Para solucionar distintos problemas que se presentan en la ingeniería, se utilizan diferente procesos osmóticos con membranas semipermeables, principalmente está la osmosis Inversa (RO) por sus siglas en inglés, Osmosis Directa (FO) y Presión de osmosis retardada (PRO). Estas comparten características comunes como la utilización de membrana; pero características como los solutos y las direcciones de los flujos del agua son diferentes, así como también las fuerzas de conducción para el transporte de masa Como se muestra en la figura 2.

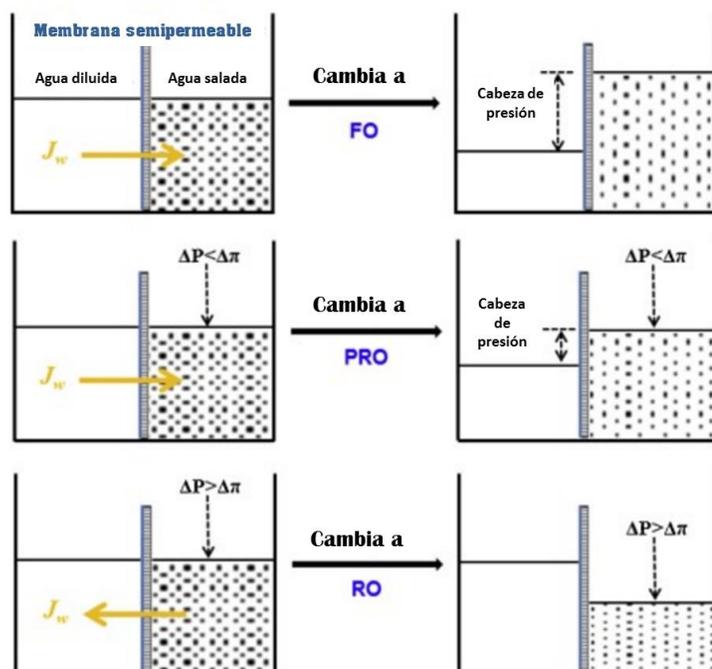


FIGURA 2 REPRESENTACION ESQUEMATICA DE LO PROCESOS OSMOTICOS FUENTE: (HAN, SUI, XUE, & TAI-SHUNG, 2015)

La osmosis inversa RO es el proceso en el cual se aplica una presión mayor a la presión osmótica, esta presión es ejercida en el compartimiento que contiene la más alta concentración de sólidos disueltos. Esta presión obliga al agua a pasar por la membrana semi-permeable en dirección contraria al del proceso natural de osmosis. El



flujo del solvente depende de la Presión aplicada, la presión osmótica aparente y el Área de la membrana presurizada

El flujo a través de las membranas para los tecnologías de FO y PRO está impulsado por la diferencia de presión osmótica ($\Delta\pi$), en el que las propiedades de la capa de soporte juegan un papel crucial en el flujo y el rendimiento del sistema. Mientras el agua es presionada mecánicamente en la capa de soporte en RO, en FO y PRO el agua se transmite a través de la membrana químicamente, en consecuencia la presencia de poros secos o gas atrapado dentro de los poros de la capa de soporte en las membranas FO o PRO, y la polarización de la concentración interna (ICP), puede inducir a la disminución drástica del flujo. Aunque FO y PRO son procesos estrechamente relacionados, todavía requieren un diferente grado de selectividad para la capa externa de la membrana. FO requiere membranas altamente selectivas, mientras PRO tiene como objetivo obtener una alta densidad de potencia y por lo tanto requiere sólo el suficiente rechazo de sal para que induzcan óptimamente la polarización de la concentración y mantener la conducción de la fuerza motriz. Además, las membranas de PRO tienen que ser lo suficientemente fuerte para soportar la presión hidráulica de la solución de extracción. En una forma, el PRO se puede ver como el proceso de transición de FO a RO en el proceso osmótico.

3.2.3. ENERGÍA OSMÓTICA

Para entender 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)

Debido al movimiento Browniano, si la concentración de partículas no es uniforme, se produce un flujo de material desde la zona de alta concentración hacia la de más baja



concentración hasta alcanzar un equilibrio. Esta 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)

De acuerdo con Van't Hoff, la presión osmótica P (bar) es directamente proporcional a la concentración C (g/l) y la temperatura absoluta T , es inversamente proporcional al peso molecular M y Donde R es la constante de los gases igual a 0,082 litros atm/mol grados kelvin (Hoek, 2002)

$$P = \frac{C}{M}RT \quad (2)$$

3.2.4. PRESIÓN DE OSMOSIS RETARDADA PRO

PRO se basa en el aprovechamiento de diferencias en las concentraciones salinas de soluciones separadas por una membrana semipermeable para generar un flujo de agua constante. Cuando esto sucede, el agua se difundirá desde el lado de la solución de alimentación en el lado de la solución de empate que es el lado de agua de mar que está presurizado. El agua salada a presurizada y diluida se divide entonces en una corriente que va a través de una hidroturbina para generar energía mediante la despresurización de la misma, y el otro que pasa a través de un intercambiador de presión para reaprovechar la energía transmitiéndola al agua de mar para lograr el mantenimiento de la circulación. En un proceso de PRO, densidad de potencia (W) se normaliza por el área de la membrana y se utiliza comúnmente para representar la eficiencia de conversión de energía de la membrana. Esta se puede expresar de la siguiente manera:

$$W = Jw\Delta P \quad (3)$$



Donde ΔP es la presión hidráulica diferente través de la membrana, J_w es el flujo de agua y se puede expresar por la siguiente ecuación:

$$J_w = Aw(\Delta\pi + \Delta P) \quad (4)$$

Donde A es el coeficiente de permeabilidad al agua de la membrana y $\Delta\pi$ es la solución diferencial de presión osmótica a través de la membrana.

Combinando las Ecuaciones (3) y (4),

$$W = Aw(\Delta\pi + \Delta P)\Delta P = -Aw\left(\Delta P - \frac{\Delta\pi}{2}\right)^2 + Aw\frac{\Delta\pi^2}{4} \quad (5)$$

Se puede observar en la Figura 3 que cuando la presión hidráulica es igual a la media de la presión osmótica a través de la membrana, la densidad de potencia alcanza el máximo valor teórico y sugiriendo la condición de trabajo óptima para una planta de energía PRO. De la ecuación. (5), el valor máximo de la densidad de potencia se puede obtener la ecuación para la potencia máxima.

$$W_{Max} = A\frac{\Delta\pi^2}{4} \quad (6)$$

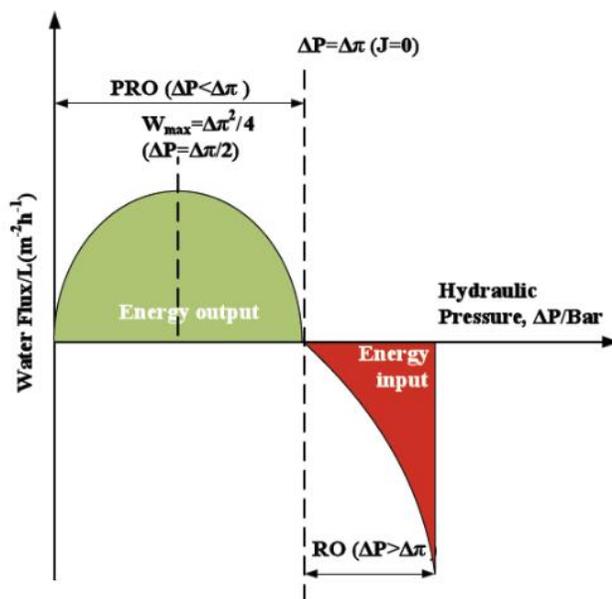


FIGURA 3 CONSUMO / PRODUCCIÓN DE ENERGÍA EN FO, PRO Y PRO USANDO MEMBRANA DELGADA SEMI-PERMEABLE. (CHANG KIM & ELIMELECH, 2013)

3.2.5. AGUA DE MAR

El agua de mar, por definición, es una solución acuosa en la que se encuentran disueltos una amplia variedad de sólidos (sales principalmente) y gases atmosféricos, sumándose a estos materiales, sólidos suspendidos del tipo orgánico e inorgánico. Junto con los anteriores, forman parte también de esta solución acuosa algunos organismos microscópicos vivos vegetales conocidos como fitoplancton y animales (zooplancton).

Según (Oltra & Troyano, 1972) no se puede dar una definición cuantitativa del agua de mar por tratarse de una mezcla de sustancias de composición variable de unos lugares a otros. En la tabla 1, se puede apreciar los principales constituyentes del agua de mar y sus respectivas concentraciones.



TABLA 1 COMPOSICIÓN TÍPICA DEL AGUA DE MAR FUENTE: (GUTIERREZ, 2012)

Constituyente	Símbolo	g/kg en agua de mar	% por peso
Cloruro	Cl ⁻	19,35	55,07
Sodio	Na ⁺	10,76	30,62
Sulfato	SO ₄ ⁻	2,71	7,72
Magnesio	Mg ⁺⁺	1,29	3,68
Calcio	Ca ⁺⁺	0,41	1,17
Potasio	K ⁺	0,39	1,1
Bicarbonato	HCO ₃ ⁻	0,14	0,4
Bromuro	Br ⁻	0,067	0,19
Estroncio	Sr ⁺⁺	0,008	0,02
Bario	B	0,004	0,01
Fluoruro	F ⁻	0,001	0,01
Total	-	-	99,99

3.2.5.1. SALINIDAD

La salinidad varía en dirección tanto horizontal como vertical y aun en un mismo punto puede sufrir variaciones en las diferentes estaciones del año. Los factores que hacen cambiar la salinidad son, en primer lugar, la temperatura ya que si es elevada provoca una evaporación intensa y por lo tanto un incremento de salinidad resultante de la concentración de sales; en segundo lugar, los aportes de agua dulce, que por dilución, disminuye la salinidad. De aquí que, por regla general, se presenta una mayor salinidad en las zonas tropicales que en las de latitud elevada.

De esta manera, la salinidad del mar no es igual en todas partes del mundo. A ello contribuyen diferentes factores como el derretimiento de las masas de hielo de los polos, la desembocadura de los ríos, la propia evaporación, la lluvia, las nevadas, el viento, el movimiento de las olas y las corrientes marinas (estos últimos afectados por los ciclos lunares).

Se considera que la mayoría del agua contenida en los mares y océanos contiene, como media, sólo un 3,5 % de sal (35 gramos por litro), así como otros minerales disueltos, aunque esa pequeña cantidad es suficiente para que no se pueda beber. La salinidad interviene directamente sobre las características fisicoquímicas del agua del mar relacionándose con la temperatura, la densidad y el pH; caracteriza las masas de agua



oceánicas e influye en la distribución de los seres vivos, ya que sus estructuras y funcionamiento están íntimamente ligados a las variaciones de la salinidad.

3.2.6. MEMBRANAS OSMÓTICAS

La membrana de ósmosis es una película de acetato de celulosa parecido al celofán, y puede estar formulada para dar diferentes grados de rechazo de sal, algunas tienen la habilidad de rechazo de 50 a 98%, esta permeabilidad puede ser muy pequeña, al punto que todas las impurezas, moléculas de la sal, bacterias y virus son retenidos.

Están hechas de material sintético por lo general compuesto de poliamida, las membranas comunes son conocidas como TFC (Thin Film Composite) que pueden usarse en escalas de pH que van de 2 a 12. Esta membrana por lo general está en forma de rollo separada por una rejilla plástica interior que la contiene, por lo que el agua que se va a tratar pasa a lo largo del rollo y el agua producto se va juntando por el interior y hacia el centro en forma de espiral.

Los sistemas de membrana para el tratamiento de agua originalmente se usaban para desalinización aunque ahora su uso se ha extendido en sistemas para el tratamiento de materiales orgánicos, dichos sistemas consisten en láminas delgadas que técnicamente no tienen poros. La membrana permite que las moléculas de agua pasen pero retiene otras sustancias en suspensión.

Es necesario hacer un tratamiento del agua antes de su utilización, para que no se contamine la membrana y se limite su eficiencia. Los sistemas de ósmosis inversa requieren que la membrana se limpie regularmente y se cambie periódicamente.

Las membranas para ósmosis inversa se construyen con varios materiales, los cuales tienen pros y contras, así que se debe seleccionar la membrana correcta para las necesidades específicas del sistema de tratamiento.



Las membranas poliméricas usadas para generar procesos osmóticos pueden tener distintas configuraciones según sus características principales y su manufacturación, a continuación veremos algunas de estas.

3.2.6.1. CONFIGURACIÓN ENROLLADA EN ESPIRAL

Compuestas con varias láminas de membrana plana alrededor de una tubería central que suministra el agua que recibirá el tratamiento. Las configuraciones de fibra fina hueca utilizan un grupo de miles de tubos huecos que están contruidos con material de la membrana.

La configuración enrollada en espiral suele ser uno de los módulos menos costoso por unidad de área de membrana. 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/cm^2), que son bajos comparados con las otras configuraciones.

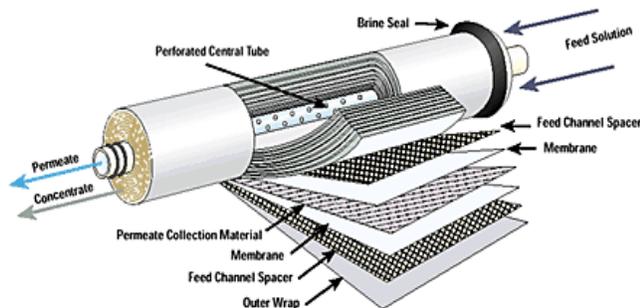


FIGURA 4 MEMBRANA ENROLLADA EN ESPIRAL (LENNTECH, 2009)

3.2.6.2. CONFIGURACIÓN PLACA PLANA O BASTIDOR

Las hojas planas de membrana son puestas contra hojas de placa similares a un filtro prensa convencional. La solución de alimentación fluye a lo largo de estrechos pasajes, atravesando las membrana o los conjunto de membranas que puedan ensamblarse a partir de las membranas individuales intercambiable o paquetes se membranas.



La construcción tiene ciertas ventajas. Los costos de remplazo de membranas son bajos, pero los costos de trabajo de remplazo 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. (Lara Borrero, 2002).

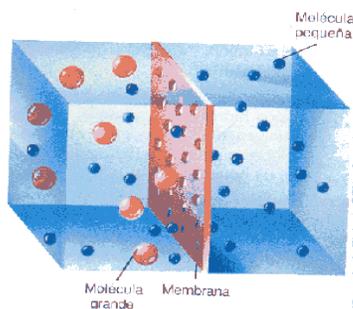


FIGURA 5 MEMBRANA PLACA PLANA (LARA BORRERO, 2002)

3.2.6.3. CONFIGURACIÓN PLACA TUBULAR

El módulo PT está compuesto de varios discos circulares moldeados con un cojinete de la membrana de osmosis inversa instalado en entre cada disco. Los discos están conectados entre una brida de conexión y una brida final mediante una “varilla de conexión” de acero inoxidable. Este ensamblado se encuentra instalado en un contenedor a presión. Todas las conexiones de agua se encuentran en un extremo.

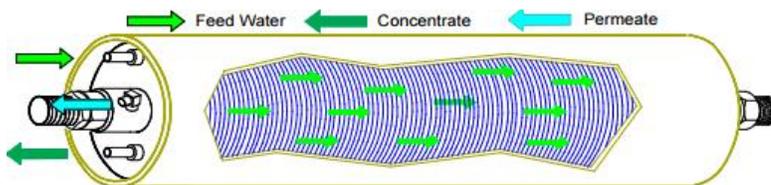


FIGURA 6 MEMBRANA PLACA TUBULAR (ROCHEM RO-WASSERBEHANDLUNG GMBH, 2010)



El agua de alimentación se desvía por la brida de sellado de conexión para enviar tal agua a los alrededores y al exterior de los discos e introducirla en la brida de sellado final y, a continuación, se dirige al circuito hidráulico deseado a través de la pila de módulos. El agua de alimentación, al pasar por los cojinetes de la membrana, elimina el agua pura (esto se denomina Permeado). Dada esta eliminación de agua pura, el agua de alimentación adquiere una mayor salinidad, lo que se denomina Concentrado.

El permeado se acumula en el centro del módulo y sale por la conexión de manguera central.

3.2.6.4. CONFIGURACIÓN TUBULAR

La membrana se encuentra dentro de un tubo poroso o perforado. Las membranas pueden estar enrolladas en espiral, compuestas con varias láminas de membrana alrededor de una tubería central que suministra el agua que recibirá el tratamiento.

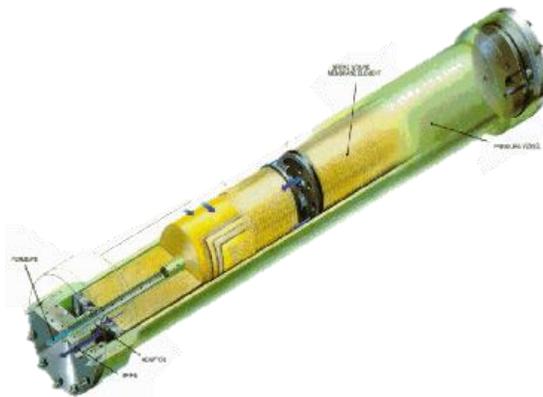


FIGURA 7 MEMBRANA TUBULAR (HIDROSOLUCIONES)

3.2.6.5. CONFIGURACIÓN FIBRA HUECA

Esta configuración se compone de fibras del tamaño de un cabello humano que son tejidas por maquinaria hasta tener una forma tubular. Los extremos del tubo se cubren por un material plástico sellador y todo se inserta en una cápsula de presión, el agua salina presurizada hace que el agua pura pase por la pared de cada fibrilar y a través de la



perforación de la fibra expuesta hasta juntarse en la salida de la cápsula en donde es colectada. Se utilizan miles de tubos huecos agrupados que están contruidos con material de la membrana.

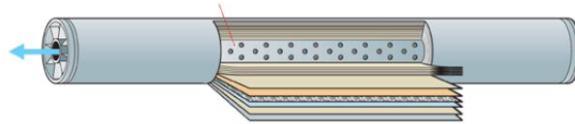


FIGURA 8 MEMBRANA FIBRA HUECA (DRACE, 2007)

3.2.6.6. PERMEABILIDAD DE SAL EN LAS MEMBRANAS

Las membranas para procesos de osmosis impulsada, son susceptibles a la difusión inversa de la sal, cuando una pequeña cantidad de NaCl penetra la membrana desde la solución de alimentación a la solución de dilución debido al gradiente de concentración a través de la membrana. La difusión inversa de la sal reduce la diferencia de presión osmótica efectiva a través de la membrana. El coeficiente de permeabilidad a la sal de una membrana semi-permeable se puede obtener a partir de experimentos RO y está dada por la ecuación general que describe el transporte de sal:

$$Js = B * \Delta C_{salt} \quad (9)$$

Donde B es la constante de rechazo indicada por la ecuación:

$$B = \frac{A(1 - R)(\Delta P - \Delta \pi)}{R} \quad (10)$$

Y R el rechazo de sal definido como

$$R = 1 - \frac{C_p}{C_f} \quad (11)$$

Donde C_p es la concentración de sal en la solución de filtrado y C_f es la concentración de sal en la solución de alimentación. (Achilli, Cath, & Childress, 2009)



El flujo de sal J_s [L/ m²h] es proporcional a su coeficiente de permeabilidad, B y ΔC_{salt} . El perfil de concentración de la sal por el sistema es ilustrado en la Figura 6. Sólo la diferencia de concentración de sal a través de la piel de la membrana dará el transporte de agua por la membrana.



3.2.7. PRE TRATAMIENTO DEL AGUA

Para los procesos de potabilización de agua, deben garantizarse el pre tratamiento del afluente para la protección de las bombas y la no obstrucción micro molecular de los filtros de membrana semipermeables, para el mejor funcionamiento de estas. El sistema de pre tratamiento es una estructura auxiliar que debe preceder a cualquier sistema de tratamiento. Esta estructura persigue principalmente los objetivos de reducir las partículas finas, los sólidos en suspensión, material coloidal y material orgánico e inorgánico que traen consigo las aguas.

Para que la membrana no presenta obstrucción por posibles depósitos de partículas materia orgánica, coloides y partículas suspendidas, que llevan a los microorganismos afectar la eficiencia de la membrana por lo que se toman diferentes medidas antes, durante y después del proceso osmótico. La limpieza de la membrana se considera una medida periódica y fundamental pero no la única. Efectivamente se toman medidas previas para que la membrana no se vea afectada o en contacto directo con este tipo de partículas, por lo que antes del agua entrar al reactor pasa por una serie de etapas que implementan filtros para la eliminación de partículas orgánicas e inorgánicas.

En el caso del Buque ARC 20 DE JULIO se clasificaron las siguientes etapas según el filtro a implementar y teniendo en cuenta las etapas determinadas en la tesis doctoral “Análisis estadístico de los parámetros DQO, DBO5 y SS de las aguas residuales urbanas en el ensuciamiento de las membranas de ósmosis inversa”

Tratamiento previo o Pre Tratamiento. El objetivo es eliminar posibles partículas sólidas de gran densidad que puedan producir abrasión o daños significativos en los filtros previos por donde se conducirá el agua.

Tratamiento Primario: Mediante los filtros Silex Bobinados (filtro de Arena) marca sefiltra, se depura agua con cargas bajas o medianas de contaminantes, que requieran una retención de partículas de hasta veinte micras de tamaño. Se busca de igual forma eliminar coloides, separación de grasas y aceites, sedimentación, floculación, flotación y filtración.



Tratamiento Secundario: Mediante Los cartuchos y placas filtrantes ZetaPlus BC, marca se filtra, diseñado para retener trazas de contaminantes orgánicos en líquidos. Según la descripción del filtro emplean celulosa como material filtrante aglomerada por una resina catiónica que proporciona su característica carga + proporcionando una gran capacidad de retención de impurezas, las más pequeñas de las cuales son adsorbidas electro cinéticamente.

Tratamiento Terciario: Por Ósmosis inversa, se busca realizar una filtración de la materia orgánica y buscar los cambios fisicoquímicos más representativos para el proceso. Este proceso se realiza por medio de presión para la separación de las sales, filtrando solo el agua sin sales y no por proceso de electrodiálisis.

De este proceso se obtienen dos productos, la agua desalinizada que tiene como principal característica la anulación casi por completo de la salinidad y cambio en las sales las sales inorgánicas disueltas, como fósforo. Y la Salmuera que tiene como principal característica un elevado grado de salinidad.

Tratamiento post desalinización. Se pasa solo a seguir tratando y filtrando el agua desalinizada mediante filtro clarificador y por ultimo piedra dolomita con el fin de decolorar y retener trazas de contaminantes orgánicos haciéndola apta para uso doméstico.

Los sedimentadores son las estructura de remoción de partículas y purificación de agua más populares y efectivos que se ha desarrollado, desde el siglo XV hasta nuestros días, han sido los tratadores primarios que remueven los materiales en suspensión transportados en el agua, logrando la potabilización inicial de la misma (Bermudez, 2013).

3.2.8. CONVERSIÓN ENERGÉTICA

La energía potencial del agua se transforma en energía de presión y en energía cinética. Tal energía puede transformarse en trabajo cuando el agua golpea un objeto tal que la dirección del flujo del agua cambie y el objeto se mueva como resultado de la acción del agua. La magnitud de la velocidad del agua se reduce debido a la fricción que se presenta por el flujo del agua a través de la superficie del objeto, y la energía entregada por



el agua se transforma también en trabajo útil, lo cual si se utiliza una máquina adecuada (turbinas hidráulicas), la energía existente en el agua que fluye puede convertirse en energía eléctrica.

Para que se cumpla la transformación de la energía de presión del agua en energía cinética y luego en eléctrica es necesaria la utilización de varios componentes que conforman una turbina hidráulica

3.2.8.1. DINAMO

Un dinamo es una maquina reversible que puede trabajar como generador o como motor. Cuando actúa como motor, transforma la energía eléctrica en energía mecánica de rotación. Por ejemplo, se podría hacer una dinamo utilizando un motor eléctrico y conectándolo a una bombilla. Al producir un movimiento de giro en su eje, se genera corriente eléctrica continua y con la que se podría iluminar la bombilla como se muestra en la figura 9.

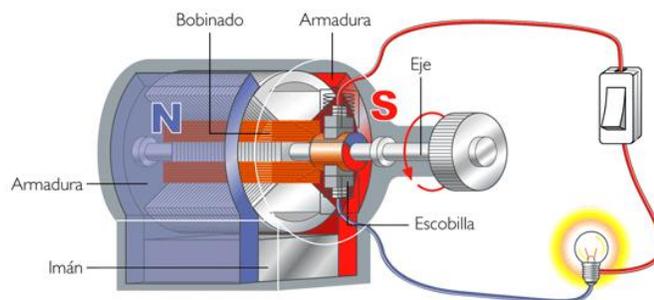


FIGURA 9 DINAMO

3.2.8.2. RODETE

El rodete es una rueda con alabes en forma de cuchara cangilones, con un diseño característico, situados en su perímetro exterior. Sobre estas cucharas es sobre las que incide el chorro del inyector, de tal forma que el choque del chorro se produce en dirección tangencial al rodete, para maximizar la potencia de propulsión P_t .



Las cucharas tienen una forma característica, presentan una sección de entrada, una sección de salida, una mella en la parte externa, son simétricas en dirección axial y una cresta central afilada. Las dimensiones de las cucharas, y su número dependen del diámetro del chorro que incide sobre ellas, cuanto menos ese diámetro, más pequeñas serán las cucharas y mayor número de ellas se situaran en el rodete.

Por otra parte la mella, con una anchura ligeramente superior al diámetro del chorro tiene como función evitar el rechazo. El máximo aprovechamiento energético del fluido se obtiene cuando el chorro incide perpendicularmente sobre la cuchara. Pero, al girar el rodete, cuando se aparta una cuchara y llega la siguiente, esta tapa a la anterior antes de estar en condiciones de aprovechar su energía adecuadamente. La mella evita que una cuchara tape a la anterior demasiado pronto.



3.3. MARCO LEGAL

3.3.1. NORMATIVIDAD PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE

Dentro de la normatividad de nuestro país existen varias leyes y decretos que se deben tener en cuenta al momento de finalizar un proceso de potabilización de agua, específicamente los que rigen la calidad, la conservación y el uso eficiente de la misma. Estas normas corresponden a los decretos 475 de 1998 y 2105 de 1983, y las Leyes 373 de 1997 y 79 de 1986.

El Decreto número 475 del 10 de marzo de 1998 por el cual se expiden normas técnicas de calidad del agua potable. Las disposiciones de este decreto son de obligatorio cumplimiento y con ellas se regulan las actividades relacionadas con la calidad del agua potable para consumo humano.

Por su parte el Decreto número 1575 del 09 de mayo de 2007 presenta como objeto principal establecer el sistema para el control y la protección de la calidad del agua, con el fin de vigilar, prevenir y controlar los riesgos para la salud humana causados por su consumo. Es aplicable a todos los entes prestadores de servicio que suministren o distribuyan agua para consumo humano, ya sea cruda o tratada, en el territorio nacional, sin importar el uso que de ella se haga.

La resolución 2115 del 2007 incluyen las condiciones aptas que deben presentar las aguas dispuestas para el uso y consumo humano en el territorio colombiano. Este muestra una serie de características organolépticas, físicas y microbiológicas mínimas del agua potable que se muestran en la tabla 2



TABLA 2 MODIFICADO PLAN MAESTRO DE ACUEDUCTO EN BOLÍVAR (PROAMBIENTE LTDA, 2009)

PARÁMETRO	Valores Permisibles Según Resolución 2115 de 2007
PH	6 a 9
DBO5 (mg/l)	-
DQO (mg/l)	-
Solidos Totales (mg/l)	
sulfatos (mg/l)	250
Nitritos (mg/l)	0,1
Nitratos (mg/l)	10
Hierro Total (mg/l)	0,3
Manganeso (mg/l)	0,1
Dureza Total (mg/l)	160
Alcalinidad Total (mg/l)	100
Cloruros (mg/l)	250
Conductividad (um/cm)	1000
Turbiedad (NTU)	5
Calcio (mg/l)	60
Selenio (mg/l)	0,01
Color (Hazen)	15
Cianuros Totales(mg/l)	0,1
Mercurio (mg/l)	0,001
Coliformes Totales (NMP/100ml)	0
Coliformes Fecales (NMP/100ml)	0
Recuento de Mesófilos	100

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. 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. El decreto 2105 de 1983 reglamenta la potabilización y suministros de agua para consumo humano. El decreto 475 de 1998 reglamenta las normas a seguir dependiendo de algunos parámetros, la calidad del agua potable. Para determinar los parámetros de diseño de la planta piloto a escala de laboratorio se utilizara el Reglamento Técnico de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS2000)



3.3.2. NORMATIVIDAD PARA EL ABASTECIMIENTO DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Actualmente se encuentra en proceso de implementación el Plan Energético Nacional (Versión Preliminar) 2010-2030 por parte de la UPME, en este se inscribe los lineamientos y parámetros de viabilidad para sistemas de generación de energía renovables. La Ley 697 de 2001, Ley de Uso Racional y Eficiente de la Energía (URE), brinda una serie de pautas 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. Además de avanzar hacia la identificación y cuantificación de proyectos potenciales en el país, el Plan plantea la promoción del Mecanismo de Desarrollo Limpio –MDL.

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. Estas metas fueron adoptadas en el 2012 por el Ministerio de Ambiente para que se les puedan otorgar beneficios tributarios de IVA y Renta.



3.4. ESTADO DEL ARTE

En su estudio (Altaee, Millar, & Zaragoza, 2016) modelaron el impacto de diversos parámetros del sistema para entender mejor cómo diseñar y operar unidades prácticas PRO-RO. Los resultados del modelo muestran que la densidad de potencia generada PRO intensifica con el aumento de la salinidad del agua de mar y la tasa de recuperación de ósmosis inversa. Para un proceso de RO operando a la tasa de recuperación del 52% y 35 g/L de salinidad de alimentación, una densidad de potencia máxima de 24 W /m^2 se logró utilizando solución de arrastre 4,5 M de NaCl.

(Tanioka, 2015) muestra el prefacio del megaproyecto “Pressure Retarded Osmosis in MegatonWater” basado en la generación de energía mediante la salinidad utilizando módulos de membrana por un sistema de presión por Osmosis Retardada (PRO) entre el agua pura y salmuera concentrada. El agua pura y salmuera concentrada se suministran desde el centro de tratamiento de aguas residuales y una planta de desalinización de agua de mar, respectivamente. Se demostró la generación de presión entre salmuera concentrada y agua purificada de las aguas residuales tratadas de modo que era posible construir el plan de generación de energía salinidad comercial por PRO.

En el artículo realizado por Chalida Klaysom, Tazhi Y. Cath, Tom Depuydt, & Ivo F. J. Vankelecom, se evidencia como los procesos de osmosis con membranas han sido estudiados y desarrollados por décadas. En este se exponen una amplia recopilación de varios estudios relacionados con procesos de membrana osmótica, se centraliza en los nuevos conocimientos, estudios teóricos acerca de los mecanismos y modelación de transporte de membranas; además se resaltan los rendimientos generales de las membranas osmóticas y se presentan las perspectivas a futuro de esta tecnología. (Klaysom, Cath, Depuydt, & Vankelecom, 2013).

Las investigaciones revelan el gran potencial del sistema y la necesidad de profundizar en el conocimiento de esta tecnología de generación de energía eléctrica. Los factores investigados han sido la estructura de la membrana y sus efectos en la producción de energía a partir del gradiente de salinidad por presión de osmosis retardada así como la



aplicación de modelación para predecir el comportamiento de los procesos osmóticos de generación.

A su vez (Qianhong, Xue, & Chuyang Y, 2012) analizaron la aplicación de un modelo matemático para predecir las densidades de energía obtenidas experimentalmente asumiendo que los parámetros de las membranas son constantes durante todo el proceso de PRO. El objetivo fue encontrar una membrana que permita alcanzar una densidad energética de por lo menos 5 W/m^2 .

El estudio realizado por (Helfer, Lemckert, & Anissimov., 2014) identificó las ventajas más importantes de la tecnología PRO, su capacidad para generar un suministro constante y confiable de poder comparado a otras fuentes renovables como el viento y solar, y sus impactos medioambientales bajos. Asimismo indaga en la utilización de gradientes de salinidad presentes entre la salmuera de alta concentración de plantas de desalación y agua de mar, o aún entre el agua de mar y aguas de hipersalina o aguas subterráneas.

En su trabajo de tesis doctoral (Gutierrez, 2012) propone una reducción del consumo energético en desalación de agua de mar mediante un proceso ósmosis directa a través de membranas semipermeables a base de la salmuera de rechazo, utilizando la energía producida en el propio proceso a través de turbinas Pelton, con una tasa de recuperación de 1,6, pasando de valores de consumo de $2,43 \text{ kWh/m}^3$ a valores de $2,28 \text{ kWh/m}^3$ dentro de todo el proceso; asimismo la salmuera diluida pasa a valores de concentración de 70 g/l a $34,4 \text{ g/l}$ (partiendo de una salinidad de agua de mar de $38,5 \text{ g/l}$) la cual al ser arrojada a mar se combina con el agua salobre reduciendo la salinidad final hasta un valor de concentración ligeramente por debajo de la salinidad del mar (33 g/l) y por tanto no dañino para el medio.

(Chang Kim & Elimelech, 2013) Analizaron un reactor de membranas comerciales a escala de laboratorio, distintos escenarios de generación del gradiente de salinidad contraponiendo por separado el agua de mar y la salmuera que resulta de los procesos de desalinización frente al agua salobre que resulta de procesos de tratamiento de aguas residuales domésticas, frente a las características del agua subterránea y frente al agua de río. Entre los



resultados arrojados por el estudio esta que los procesos osmóticos referidos muestran mejores resultados cuando las soluciones están a temperaturas que oscilan los 30°C.

Además analizaron el contexto de la producción de energía eléctrica mediante la osmosis basados en una variedad de recursos de diferente gradiente de salinidad. Como se puede observar en la Figura 10, se implementó salmuera producto del proceso de osmosis inversa de las plantas desalinizadoras como solución de empate de alto grado de salinidad y agua de mar como solución de alimentación de bajo grado de salinidad. Además se realizaron pruebas con diferentes tipos de soluciones de empate y alimentación con el fin de comparar resultados. El estudio demuestra la viabilidad de la generación de energía eléctrica por presión de osmosis retardada usando agua de mar como solución de alimentación mediante la utilización de un proceso híbrido de desalinización por Osmosis inversa/Osmosis directa (FO/RO) y Osmosis retardada (PRO).

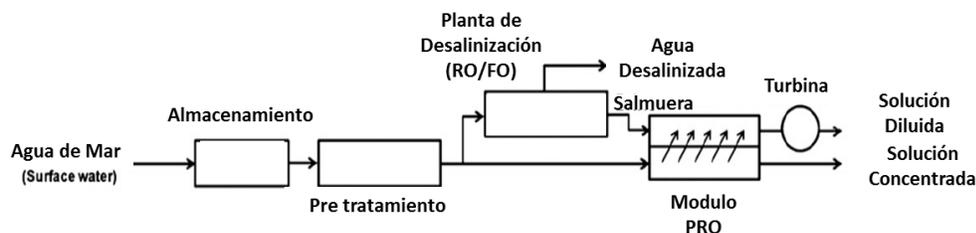


FIGURA 10 CONFIGURACIÓN SISTEMA MIXTO DESALINIZADOR/GENERADOR DE ENERGÍA FUENTE (CHANG KIM & ELIMELECH, 2012)

Debido a la ausencia de membranas comerciales diseñadas específicamente para PRO, en los ensayos se utilizó una membrana FO delgada (93 μm) de hoja plana a base de celulosa reforzada con una malla de poliéster incrustada y con un área superficial de 20.02 cm^2 suministrada por la empresa Hydration Technology Innovations HTI.

Los coeficientes de permeabilidad utilizados fueron los del agua $A = 1.23 \text{ L m}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ bar}^{-1}$, la sal $B = 2.62 \text{ L m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ y los de transferencia de masa del canal $k = 8.62 \times 10^{-5} \text{ m/s}$, respectivamente. La resistencia a la difusión del soluto dentro de la capa de soporte de



la membrana K, fue determinada mediante la implementación de los valores de flujo de agua obtenidos de experimentos de PRO para una $\Delta P = 0.48$ bar a la ecuación 1, de flujo de agua de PRO y se resolvió numéricamente para K.

$$J_w = A \left[\frac{\pi_{D,b} \exp(-J_w/k) - \pi_{F,b} \exp(J_w K)}{1 + (B/J_w) [\exp(J_w K) - \exp(-J_w/k)]} - \Delta P \right] \quad (1)$$

Donde $\pi_{D,b}$ y $\pi_{F,b}$ son las presiones osmóticas del volumen de las soluciones de empate y alimentación, respectivamente, parámetros calculados con el software comercial Stream Analyser, desarrollado por OLI Systems, Inc. Los valores obtenidos para K fueron 2.70×10^5 , 3.33×10^5 y 3.34×10^5 s/m para soluciones de empate de 1, 1.5 y 2M NaCl, respectivamente. Se utilizó la ecuación Y para modelar el flujo de agua por PRO, y fue resuelta numéricamente para determinar el flujo de agua teórico (J_w) y la correspondiente densidad de energía ($W=J_w\Delta P$) fue calculada para un rango de presiones hidráulicas. De esta forma pudieron comparar las diferencias entre los resultados del modelo y los obtenidos experimentalmente, sin embargo para condiciones de altos gradiente de salinidad usando 1.5 y 2 M NaCl como soluciones de empate, solo pudieron confirmar el incremento de la densidad de energía, ya que las celdas para medir el flujo del agua no soportaban presiones hidráulicas de más de 12.6 bar.

Una descripción más detallada de los procesos con membranas osmóticas para generación de energía eléctrica, son presentados por (Achilli & Childress, 2010) y (Achilli, Cath, & Childress, 2009). La revisión se centra en estudios teóricos de los mecanismos y en la teoría de modelación de transporte a través de las membranas, además se resaltan los rendimientos generales de las membranas osmóticas y se presentan las perspectivas a futuro de esta tecnología. Estas investigaciones en general hasta al momento concluyen que es necesario continuar con el desarrollo de esta promisorio tecnología energética en el cual los puntos básicos son encontrar un gradiente de salinidad óptimo, ya que el agua dulce de río contrapuesta con agua de mar produce los mayores flujos de agua permeada y una mayor presión osmótica en teoría, sin embargo, un mayor flujo ocasiona un rápido colmatación de



la membrana disminuyendo el gradiente de presión. Es necesario establecer los criterios de la calidad de agua tanto de entrada (que tan pura es necesaria, que compuestos inhiben con rapidez el proceso) como de salida y los pre-tratamiento requeridos. Agua subterránea o agua de río podrían disminuir los costos de generación de energía y alargar la vida útil de la membrana. La densidad energética de las membranas, una mayor producción energética por una de área de membrana, debe conducir a menos área superficial de la membrana y por consiguiente menor costo.



4. METODOLOGÍA

El proyecto de investigación de carácter cuantitativo experimental que tuvo una duración de 9 meses empezando en el mes de mayo del 2015 y finalizó en enero del 2016, tuvo como punto de partida una recopilación de información secundaria, basada en la búsqueda en artículos científicos que abordaron las temáticas de pruebas con membranas, características de los procesos y construcción de reactores a escala los cuales fueron usados como referencia para generar una metodología adecuada. El proyecto fue desarrollado en 5 fases enmarcadas por los alcances de los objetivos previamente planteados, la cual se puede apreciar en la figura 11.



FIGURA 11 ESQUEMA DE METODOLOGIA



4.1. FASE 1. REDISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL REACTOR OSMÓTICO

Elección de la Membrana

El elemento principal para la operación del sistema es la membrana, para la obtención de esta se realizó un análisis comparativo entre 3 referencias definidas comercialmente como “adecuadas para agua de mar” de diferentes fabricantes que se encontraban en el mercado en presentación Flat Sheet (tipo placa plana), para los cuales se compararon las características comerciales suministradas por el vendedor (Sterlitech Corporation) de rechazo de sales, flujo a través de la membrana, rango de resistencia al pH y su precio.

Construcción del reactor

El reactor compuesto por dos módulos cilíndricos cada uno con un radio de 10” y una profundidad de 25 cm cada uno, los cuales se unen mediante chanfles con 12 perforaciones para tornillos, estos están separados mediante un empaque de neopreno para evitar filtraciones. Cada módulo tiene 3 salidas en tubería de PVC de ½” provistas de válvulas de cierre tipo bola, que se utilizan para el suministro y rápida evacuación de las aguas, también está dotado de manómetros para la lectura de presiones dentro del reactor como se muestra en la figura 12.



FIGURA 12 REACTOR OSMOTICO SIN MODIFICACION



Sistema Complementario

Para la correcta operación del reactor fue necesaria la implementación de un sistema que integró almacenamiento de las aguas, bomba para mantener caudal constante de entrada y tuberías para el transporte del material. Utilizando como referencia la propuesta para el sistema complementario que se refleja en la figura 13, se utilizaron tanques y una bomba centrífuga disponible en el laboratorio de saneamiento de la universidad de Cartagena, así como una red de tuberías en PVC de ½” como conductores de las soluciones hasta el reactor, dando como resultado el sistema que se presenta en la figura 14

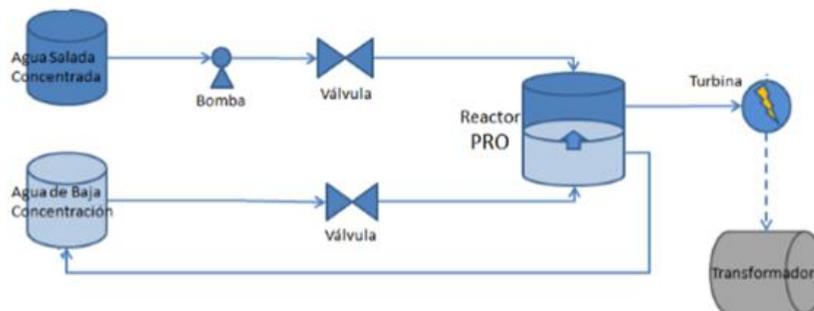


FIGURA 13 MODIFICADO ESQUEMA DE SISTEMA GENERAL PARA GENERACION DE PRESION OSMOTICA (GABRIEL GARCÉS, 2014)



FIGURA 14 REACTOR OSMOTICO A ESCALA DE LABORATORIO

Al finalizar el ensamble del sistema se realizaron varias pruebas de flujo y permeabilidad, utilizando agua potable de la llave impulsada con la bomba centrífuga a un caudal de 10 l/min por un tiempo de 15 min, en varias ocasiones se presentaron fugas ocasionadas por mal cerrado entre los módulos y fallas en la unión entre el chaflán de los reactores con el empaque, en varias ocasiones fue necesario el reemplazo de dicho empaque

4.2. FASE 2: CAPTACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL AGUA DE MAR.

Recolección de las muestras

Se realizaron dos salidas de campo en la cuales se realizó la recolección de 100 litros de agua de mar en cada una, estos fueron almacenados en botellones de 20 L utilizados comúnmente para la comercialización de agua potable que se muestran en la figura 16, dicha recolección se realizó en la zona localmente conocida como “las Boyas” que se encuentra entre las playas frente al hospital de bocagrande en el barrio de Castillo grande de la ciudad de Cartagena y la playa Punta Arena que se encuentra en la isla de Tierra Bomba, el punto exacto de extracción se ubica en las coordenadas 10°23'36.3"N



75°34'28.1"W, punto que se muestra en la figura 15. El punto de extracción fue recomendada por lancheros nativos de la isla de Tierra Bomba quienes afirmaron utilizar las aguas de este sitio para su implementación como solución salina para limpieza de heridas por parte del personal del hospital y los nativos de la isla debido al pureza de las mismas. Las muestras fueron llevadas al laboratorio de saneamiento de la Universidad de Cartagena.



FIGURA 15 MAPA DE UBICACIÓN DEL PUNTO DE RECOLECCION DE LAS MUESTRAS



FIGURA 16 MUESTRAS DE AGUA DE MAR

Se pretendía realizar un pretratamiento del agua mediante sedimentación para remover arenas que pudiesen dañar la superficie de la membrana, pero después de una semana de almacenamiento y agregar a una de las muestras alumbre para generar la floculación de sólidos en suspensión, no se presentó formación de flóculos ni decantación de partículas al fondo de los tanques, por lo que se optó por no realizar el procedimiento.

Caracterización fisicoquímica del agua de mar

Del agua recolectada se tomó una muestra de 5 L la cual fue llevada a al laboratorio de calidad ambiental de la corporación autónoma regional del Canal del Dique (CARDIQUE) donde se realizaron pruebas fisicoquímicas y microbiológicas según los parámetros de los Standard Methods Edition 22 y cumpliendo los estándares de calidad de las norma ISO 17025. Entre los parámetros evaluados se encuentran la DBO, DQO, Nitrato, Nitrito, Oxígeno Disuelto, pH, Salinidad, Plomo, SD (sólidos disueltos), SS (sólidos suspendidos), S.S.T (sólidos suspendidos totales), temperatura, coliformes totales y coliformes fecales.



4.3. FASE 3: DESALINIZACIÓN DEL AGUA DE MAR.

Osmosis inversa en reactor a escala

Para conseguir la desalinización del agua de mar mediante ósmosis inversa, se determinó la presión osmótica de la solución mediante el factor de Van't Hoff con el objetivo de garantizar una presión hidráulica mayor. Se configuró el reactor como se puede apreciar en la figura 17.

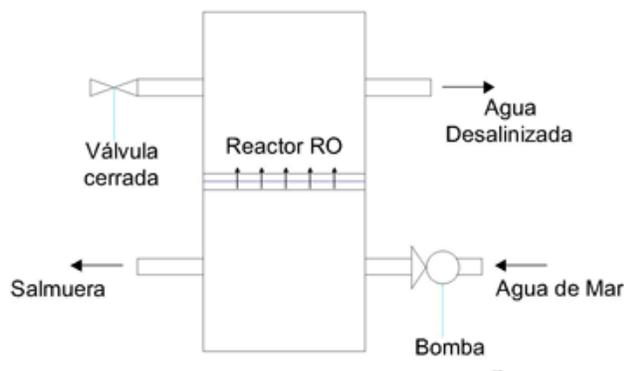


FIGURA 17 ESQUEMA DE CONFIGURACION DEL REACTOR PARA EL PROCESO DE OSMOSIS INVERSA

Se utilizó una bomba centrífuga para el llenado del tanque con un caudal de 20 l/h hasta llenar la totalidad de uno de los lados del reactor, de este punto se continuó con un caudal de 0,2 l/min hasta llevar el reactor a una presión mayor a la presión osmótica y generar el proceso de desalinización. Se pretendían tomar muestras de agua cada 15 min desde el momento en que se llegara a la presión adecuada para verificar diferencias de salinidad para cada módulo del reactor que indican la efectividad de la desalinización.

Osmosis Inversa en Planta Osmótica ARC 20 de Julio

Debido a la inhabilidad de conseguir el proceso en el reactor a escala, el agua desalinizada y la salmuera de rechazo se obtuvieron del Buque “ARC 20 de Julio” propiedad de la armada nacional, el cual se encuentra dotado con una planta para la desalinización del agua de mar fabricada por ROCHEM RO-Wasserbehandlung GmbH y de referencia RO510-



PT02-10S que se muestra en la figura 18. Esta trabaja con tres módulos de membranas tipo placa tubular de donde con la colaboración de los ingenieros oficiales tripulantes de dicha embarcación se tomaron muestras de 5 L del agua desalinizada y de la salmuera de rechazo generada. El agua desalinizada fue analizada en el laboratorio de calidad ambiental de la corporación autónoma regional del canal del dique bajo los mismos parámetros que el agua de mar con el objetivo de realizar un análisis comparativo entre las características y evaluar la efectividad del sistema para la desalinización del agua. Para la muestra de salmuera solo se determinó su concentración de sal.



FIGURA 18 BUQUE ARC 20 DE JULIO (PUBLIMETRO, 2013) - PLANTA DE DESALINIZACION

4.4. FASE 4: ANÁLISIS DE FLUJO A TRAVÉS DE LA MEMBRANA POR FO.

Esta fase se realizaron pruebas para verificar el flujo a través de la membrana generado únicamente por la reacción osmótica entre las dos aguas con un diferencial de salinidad, para tales pruebas se llenó uno de los lados del reactor con agua de mar y el otro con dos salmueras sintéticas de diferentes concentraciones preparadas en laboratorio utilizando agua potable del grifo y sal refinada utilizada comúnmente para cocinar, teniendo en cuenta la concentración en g/l de la muestra tomada en la fase anterior y las otras basado en las concentraciones encontradas en bibliografías de la información secundaria (Gutierrez, 2012)



Al iniciar se tomaron muestras de 40 ml de cada solución a temperatura ambiente de 25° centígrados , luego simultáneamente se realizó el llenado de ambos módulos con 16 l de cada una divididos por la membrana ubicada con el lado filtrante hacia el agua de mar o de menor concentración y con válvulas para la salida del aire abiertas. Durante las pruebas se tomaron medidas de variación del volumen cada 10 min para la primera hora, luego cuatro más cada media y se tomó una medida final 24 después de empezada la prueba en cada lado del reactor. Para finalizar se tomaron nuevamente muestras de 40 ml de cada solución para su titulación y se midieron los volúmenes finales de cada lado del reactor.

4.5. FASE 5: GENERACIÓN DE PRESIÓN OSMÓTICA POR PRO.

La generación de ósmosis retardada se realizó utilizando la configuración del reactor que se aprecia en la figura 19. A diferencia de la fase anterior se realizó un suministro de solución en el lado del reactor donde se aloja la salmuera impulsada mediante un tanque ubicado a 0,5 m sobre el nivel del reactor, lo que generó una columna de agua que actúa como la presión hidráulica diferente través de la membrana ΔP encargada de transformar el proceso de FO en PRO,

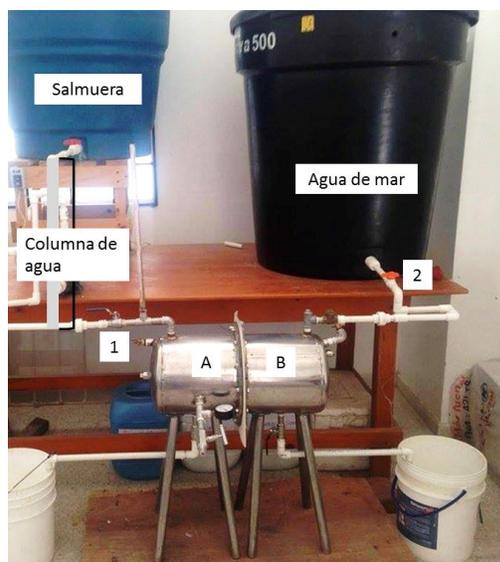


FIGURA 19 CONFIGURACION DEL SISTEMA PARA MEDICION DE FLUJO MEDIANTE PRO



Esta fase busca determinar el potencial energético de la membrana con las características del agua del mar caribe y la salmuera de rechazo sintética, este potencial es determinado mediante la ecuación:

$$W = A(\Delta\pi + \Delta P)\Delta P = -A\left(\Delta P - \frac{\Delta\pi}{2}\right)^2 + A\frac{\Delta\pi^2}{4}$$

para esto es necesario conocer el coeficiente de permeabilidad al agua de la membrana A, el cual se despeja de la siguiente ecuación.

$$J_w = A(\Delta\pi + \Delta P)$$

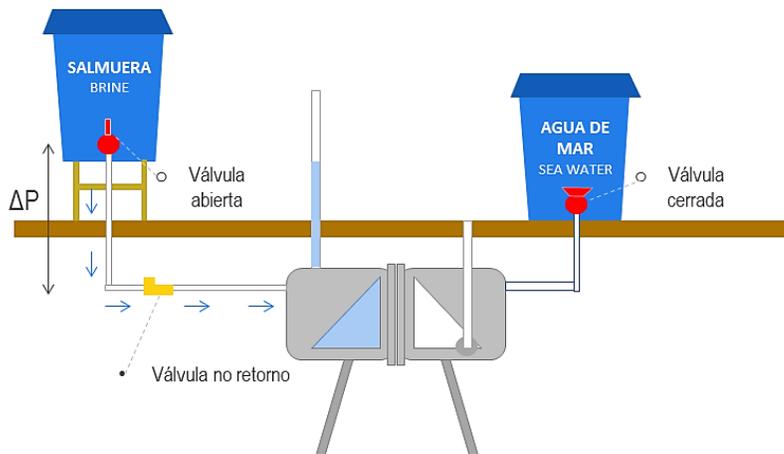
Donde la solución diferencial de presión osmótica a través de la membrana $\Delta\pi$ en este caso será la misma determinada teóricamente en la fase anterior y el flujo de agua a través de la membrana se determinó experimentalmente utilizando el sistema a escala.

La prueba dividida en tres pasos inició con él en llenado del lado A del reactor dejando la válvula No 1 abierta, al llegar el agua a un punto de estabilización se marcó un punto de partida en la manguera de medición como se muestra en la fase 1 de la figura No 20. El segundo paso la válvula número dos es abierta para darle entrada al agua de mar, desde este momento se toma el tiempo que demora el reactor en llenarse a su totalidad teniendo en cuenta el incremento generado en el nivel del otro módulo evitando el regreso del agua al tanque de almacenamiento mediante la válvula de no retorno, al finalizar el llenado se tomó registro del nivel finales con el que es posible deducir el volumen trasladado a través de la membrana en un tiempo determinado como se muestra en la fase 2. Los datos son tomados hasta este momento debido a que luego de eso empiezan a variar las concentraciones transformando el proceso de PRO a FO. Esta prueba fue replicada 15 veces con el fin de minimizar errores en la toma de información y poder identificar datos sesgados utilizando como valor final un rango del promedio aritmético de los valores resultantes teniendo en cuenta la incertidumbre.



DINAMICA DE FLUIDOS DENTRO DEL REACTOR ENSAYO PRO

Fase 1



Fase 2

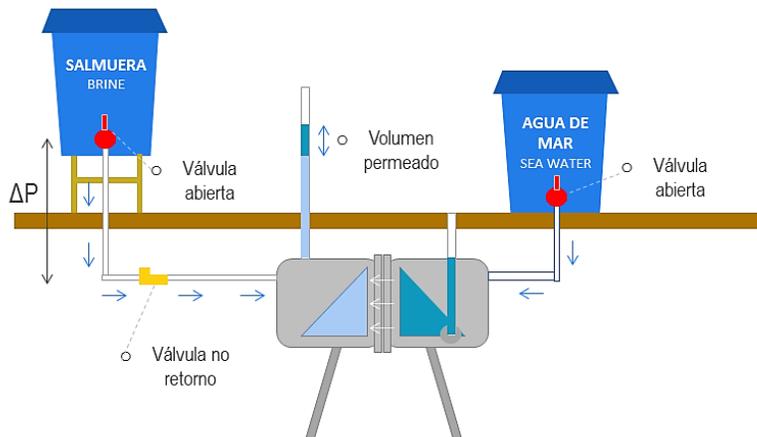


FIGURA 20 HIDRODINAMICA DE SOLUCIONES DENTRO DE PROCESO PRO



5. RESULTADOS

5.1. FASE 1. REDISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL REACTOR OSMÓTICO

5.1.1. ELECCIÓN DE LA MEMBRANA

En la tabla 3 , se muestran las características comerciales suministradas por la empresa estadounidense STERLITECH para cada una de las membranas tipo placa plana escogida, esta información fue recopilada en un cuadro comparativo tabla 4 donde se puede ver que algunas de las características como el rango del pH no muestran diferencias significativas.

TABLA 3 CARACTERISTICAS COMERCIALES DE LAS MEMBRANAS

DOW FILMTEC™		GE Osmonics™		Toray™	
Series	SW30HR	Series	SG	Series	82V
Feed	Seawater	Feed	Industrial/Wastewater	Feed	Seawater
Type	High Rejection	Type	Chlorine Resistant	Type	High Rejection, Low Energy
pH Range (25°C)	2-11	pH Range (25°C)	1-11	pH Range (25°C)	2-11
Flux (gfd)/psi	17-24/800	Flux (gfd)/psi	22/225	Flux (gfd)/psi	27/798
NaCl Rejection	99.6%	NaCl Rejection	98.2%	NaCl Rejection	99.7%
MWCO (Daltons)	~100	MWCO (Daltons)	0	MWCO (Daltons)	0
Polymer	Polyamide	Polymer	Thin Film	Polymer	Polyamide



TABLA 4 CUADRO COMPARATIVO ENTRE CARACTERISTICAS COMERCIALES DE LAS MEMBRANAS

Características	Dow Filmtec Flat Sheet Membrane SW30HR PA-TFC, RO 12 x 12"	GE Osmonics Flat Sheet Membrane SG TFC, RO, 305 x 305 mm	Toray Flat Sheet Membrane 82V PA, RO 470 x 470 mm
<i>Flujo a través de la membrana (gfd/psi)</i>	17-24/800	22/225	27/798
<i>Rechazo de Sales</i>	99.6%	98.2%	99.7%
<i>Rango de Ph (25°)</i>	2-11	1-11	2-11
<i>Fuente de alimentación</i>	Agua de mar	Industrial/aguas residuales	Agua de mar
<i>Costo</i>	\$93.87	\$93.87	\$61.90
<i>Membrana Elegida</i>			X

Luego del análisis se descartó la membrana número dos, aunque esta tiene un excelente comportamiento en la remoción de soluto y buen flujo a través de la membrana, esta es diseñada para soportar su exposición frente a aguas industriales y aguas residuales con alta cantidad de agentes contaminantes, lo que aumenta sus costos. Debido a que su comportamiento frente al rechazo a las sales es el mejor, su fuente de alimentación de diseño es el indicado, posee un mayor flujo a través de la membrana y su valor frente a las otras se escogió la membrana Toray v82.

5.1.2 CONSTRUCCIÓN DEL REACTOR

Para la construcción del reactor escala de laboratorio se tenía como diseño el modelo que se presenta en la figura 21, se tomó bajo referencia los estudios científicos adelantados por (Hernandez, Rios, & Vicencio, 2010) en los cuales se desarrollaron diferentes pruebas de procesos osmóticos bajo condiciones controladas utilizando un reactor cubico construido en acrílico. Buscando un mejor comportamiento del sistema ante las presiones y la resistencia a los sulfatos se realizaron modificaciones en al diseño inicial propuesto realizando cambios en su geometría y material.

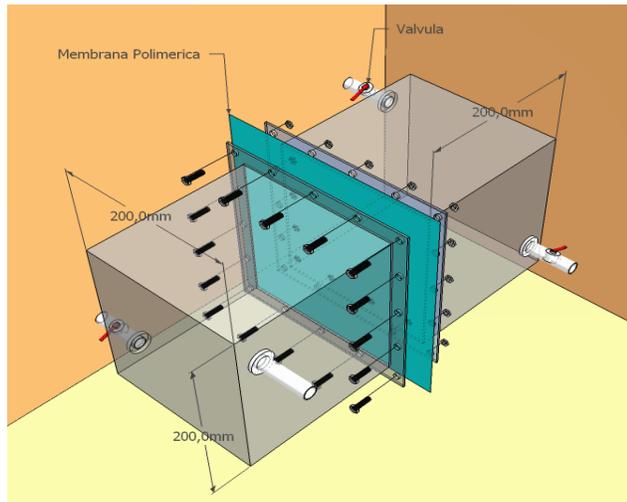


FIGURA 21 MODELO 3D DEL PRIMER PROTOTIPO DE REACTOR OSMOTICO

Debido a las presiones esperadas y el constante contacto del sistema con el agua de mar, el reactor se construyó con una forma cilíndrica ya que la geometría del círculo permite distribuir las presiones de manera homogénea a diferencia de lo cuadrados generan espacios de bajas presiones como se muestra en la figura 22, además el acrílico propuesto en primera instancia fue reemplazado por Acero Inoxidable debido a que este último posee un mejor comportamiento ante la presiones, su método de adherencia entre pieza y pieza mediante soldadura garantiza un mejor comportamiento ante las filtraciones y por su buen desempeño ante el ataque de los sulfatos.

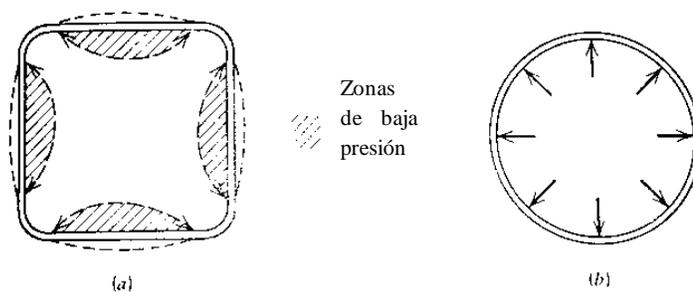


FIGURA 22 DISTRIBUCION DE PRESIONES PARA DIFERENTES FIGURAS GEOMETRICAS (PARK & PAULY, 2003)



Para darle solución a los problemas con la salida de los gases que se encontraban dentro del reactor antes de su llenado, se incorporaron salidas en la parte superior para este fin además de dos mangueras transparente de 3/8" como indicadores de volumen para cada módulo ya que era complicado adquirir información sobre el nivel de agua dentro del reactor y sus variaciones en medio de los proceso que a su vez sirven como puntos de toma de muestras en el transcurso del proceso. De igual forma se anexó al sistema una lámina en talco con perforaciones utilizada como soporte para la membrana para evitar deformaciones excesivas causadas por la presión que quebraran la membrana. Estas modificaciones se pueden evidenciar en la figura 23.



FIGURA 23 COMPONENTES ADICIONALES DEL REACTOR



5.2. FASE 2: CAPTACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL AGUA DE MAR

5.2.1. CARACTERIZACIÓN FISCOQUÍMICA DEL AGUA DE MAR

Para el análisis de los anteriores resultados, se evalúan los parámetros con mayor relevancia para los futuros procesos de ósmosis. Como se evidencia en la tabla 5. Para el parámetro de mayor incidencia en los procesos de ósmosis, la salinidad, el valor obtenido es de 35,3 o/oo, valor estándar en agua de mar, a una temperatura de 25 °C. En el caso del pH, también oscila entre el rango considerado normal para aguas marino-costera (entre 7,05 y 8,9) se logra evidenciar un nivel evidenciado un nivel básico. (BETANCOURT & Sanchez, 2011)

TABLA 5 RESULTADOS ANÁLISIS FISCOQUÍMICO Y MICROBIOLÓGICO DEL AGUA DE MAR.

RESULTADOS ANALISIS FISCOQUIMICO Y MICROBIOLÓGICO AGUA DE MAR				
Parametros	Unidades	Metodos	Agua de Mar	Limite de Deteccion
DBO5	mg O2/L	S.M 5210- B,4500-O-G	1,48	0,46
DQO	mg O2/L	S.M 5220 - C	435,00	14,68
Fosfato	mg/L	S.M 4500- P E	0,03	0,026
Mercurio	mg/L	S.M 3112 Mod	<LD	0,0025
Nitrato	mg NO3-N/L	S.M 4500 - NO3-E	0,0221	0,104
Nitrito	mg NO2-N/L	S.M 4500 - NO2-B	0,0033	0,0022
Oxígeno Disuelto	mg O2/L	S.M 4500- O - G	0,38	NA
pH	Unidades	S.M 4500- H- B	8,1	NA
Salinidad	o/oo	S.M 2520-B	35,3	NA
Plomo	mg/L	S.M 3030-E;3111-B	<LD	0,0023
SD	mg/L	S.M 2540-C	57856	76,3
SS	mL/L	S.M 2540-F	<LD	0,1
S.S.T	mg/L	S.M 2540-D	52	4,21
Temperatura	°C	S.M 2550-B	25	NA
Zinc	mg/L	S.M 3030-E;3111-B	<LD	0,01
Coliformes Totales	NMP/100mL	Tubos Multiples	33X10	NA
Coliformes Fecales	NMP/100mL	Tubos Multiples	33X10	NA

Para el resto de los indicadores como mercurio, plomo, SS, Zinc los límites no pueden ser detectados al presentarse en proporciones pequeñas, otros como el fosfato y nitrato se encuentran levemente por encima del límite detección por lo que no afecta de manera negativa. Según el índice de calidad de las aguas marinas y costeras (oxígeno disuelto, pH, nitratos, fosfatos, sólidos suspendidos totales, demanda bioquímica de oxígeno y coliformes



totales) para la preservación de la flora y fauna no puede ser determinada dado que muchos de los indicadores no fueron detectados. Lo anterior también al ser mínimo supondrá un proceso de remoción mucho menos complejo de estos parámetros para alcanzar luego del proceso de osmosis agua que cumpla con los parámetros para ser potable.

Por otra parte y en el caso de los coliformes fecales y totales, los resultados de 33x10 NMP/100mL superan los parámetros establecidos por el Decreto No. 1594 del 26 de junio del Ministerio de Salud. 1984, lo que indica presencia de microorganismo patógenos (como Escherichia coli, Enterobacter, Citrobacter, Salmonella, Shigella, Klebsiella, Listeria entre otros) generando alertas y determinando la alta contaminación fecal por parte de seres humanos y animales, pero sobre todo con relacionada con vertimiento de aguas y sólidos residuales de los diferentes municipios de la isla Tierra Bomba. Al estar por fuera de los límites de detección puede llegar afectar al ecosistema generando enfermedades gastroenteritis, cólera, hepatitis e incluso hasta la muerte como el caso de alguna cepa Escherichia coli y deterioro del ecosistema específicamente los corales.

La presencia altos porcentajes de Coliformes sugiere fallas en el tratamiento de las aguas y residuos orgánicos e inorgánicos que presenta la isla de Tierra Bomba, así como la integridad del sistema de distribución, lo que se evidencia la pocas condiciones que presentan la isla para generar calidad de vida y su impacto directo en el ecosistema.

Muchos de los anteriores resultados, coinciden con los mostrados del departamento de Bolívar en el estudio (Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras, 2008) “*Diagnóstico y Evaluación de la Calidad de Aguas Marinas y Costeras en el Caribe y Pacífico Colombianos*”. En dicho análisis se clasifica a Tierra Bomba dentro de la Bahía afuera, y obtiene por medio del índice para preservación de flora y fauna (ICAMPFF) tanto en época de lluvias como seca la calidad del agua es adecuada.



5.3. FASE 3: DESALINIZACIÓN DEL AGUA DE MAR.

Para conseguir la desalinización del agua de mar mediante ósmosis inversa, se determinó la presión osmótica de la solución mediante el factor de Van't Hoff con el objetivo de garantizar una presión hidráulica mayor mediante la siguiente ecuación.

$$\pi = \frac{C}{M}RT$$

Donde la concentración $C=35,3 \text{ g/L}$, la temperatura absoluta $T= 25^{\circ}\text{C} = 298,15^{\circ}\text{K}$, el peso molecular $M=58,44 \text{ g/mol}$ y la constante de los gases $R=0,082 \text{ litros atm/mol}\cdot\text{K}$

$$\pi = \frac{35,3 \text{ g/l}}{58,44 \text{ g/mol}} 0,0082 \frac{\text{l. atm}}{\text{mol. K}} * 298,15^{\circ}\text{K}$$

$$\pi = 14,76 \text{ atm}$$

Dentro del proceso realizado se presentaron diferentes inconvenientes que dificultaron la realización del experimento. En 5 pruebas utilizando la bomba solo se logró alcanzar presiones máximas de 5 bares, conjuntamente en una ocasión falló la membrana al ser expuesta ante la presión, en el proceso de presurización no se tuvo en cuenta el escape de los gases por lo que al ser liberados estos en el módulo sin agua se generó un efecto de vacío y al estar únicamente apoyada en las bridas de los módulos la tensión superficial en la membrana fue muy alta dando como resultado su colapso.

Debido a los inconvenientes y la dificultad de conseguir otra bomba, se optó por tomar muestras de otro sistema de desalinización en base a procesos de ósmosis inversa. Con la colaboración de la Armada Nacional, se realizó una visita a la planta de desalinización del buque ARC 20 de Julio, donde una vez se realizó el proceso de ósmosis inversa, se obtuvieron dos productos, un producto inmediato es el agua desalinizada y la salmuera de alta concentración generada como residuo en el procesos, de los cuales se tomaron muestras que posteriormente se analizaron en el laboratorio de Cardique arrojando los resultados que se muestran en las tablas 6 y 7.



GENERACION DE PRESION OSMOTICA MEDIANTE APROVECHAMIENTO DEL GRADIENTE DE SALINIDAD EN LOS PROCESOS DE OSMOSIS RETARDA Y DE DSALINIZACIÓN DEL AGUA DE MAR
Cartagena 2016



TABLA 6 RESULTADOS ANALISIS FISICOQUIMICOS Y MICROBIOLÓGICOS DE AGUA DESALINIZADA

RESULTADOS ANALISIS FISICOQUIMICO Y MICROBIOLÓGICO AGUA DESALINIZADA ARC 20 DE JULIO				
Parametros	Unidades	Metodos	Agua Desalinizada	Limite de Deteccion
DBO5	mg O2/L	S.M 5210- B,4500-O-G	<LD	0,46
DQO	mg O2/L	S.M 5220 - C	42,4	14,68
Fosfato	mg/L	S.M 4500- P E	0,03	0,026
Mercurio	mg/L	S.M 3112 Mod	<LD	0,0025
Nitrato	mg NO3-N/L	S.M 4500 - NO3-E	0	0,104
Nitrato	mg NO2-N/L	S.M 4500 - NO2-B	0,0033	0,0022
Oxigeno Disuelto	mg O2/L	S.M 4500- O - G	9,2	NA
pH	Unidades	S.M 4500- H- B	7,2	NA
Salinidad	o/oo	S.M 2520-B	0,07	NA
Plomo	mg/L	S.M 3030-E;3111-B	<LD	0,0023
SD	mg/L	S.M 2540-C	<LD	76,3
SS	mL/L	S.M 2540-F	<LD	0,1
S.S.T	mg/L	S.M 2540-D	<LD	4,21
Temperatura	°C	S.M 2550-B	25	NA
Zinc	mg/L	S.M 3030-E;3111-B	<LD	0,01
Coliformes Totales	NMP/100mL	Tubos Multiples	<0	NA
Coliformes Fecales	NMP/100mL	Tubos Multiples	0	NA

TABLA 7 RESULTADO DE TITULACION SALMUERA DE RECHAZO

RESULTADOS ANALISIS SALINIDAD SALMUERA				
Parametros	Unidades	Metodos	Agua de Mar	Limite de Deteccion
Salinidad	o/oo	S.M 2520-B	63,2	NA

En la tabla 8 se evidencian los parámetros arrojados por el agua desalinizada en planta desalinizadora del buque ARC 20 de Julio y la diferencia con los datos del agua de mar inicial comparados frente a los valores admisible para algunos parámetros por la resolución 2115 del 2007.



TABLA 8 COMPARACION ENTRE AGUA DE MAR Y AGUA DESALINIZADA

Parametros	Unidades	Agua de Mar	Agua de Mar Desalinizada	Valores permisibles segun Resolucion 2115 del 2007	Limite de Deteccion
DBO5	mg O2/L	1,48	<LD	-	0,46
DQO	mg O2/L	435,00	42,4	-	14,68
Fosfato	mg/L	0,03	0,03	-	0,026
Mercurio	mg/L	<LD	<LD	0,001	0,0025
Nitrato	mg NO3-N/L	0,0221	0	10	0,104
Nitrito	mg NO2-N/L	0,0033	0,0033	0,1	0,0022
Oxigeno Disuelto	mg O2/L	0,38	9,2	-	NA
pH	Unidades	8,1	7,2	6 a 9	NA
Salinidad	o/oo	35,3	0,07	0,25	NA
Plomo	mg/L	<LD	<LD	0,1	0,0023
SD	mg/L	57856	<LD	-	76,3
SS	mL/L	<LD	<LD	-	0,1
S.S.T	mg/L	52	<LD	-	4,21
Temperatura	°C	25	25,2	-	NA
Zinc	mg/L	<LD	<LD	3	0,01
Coliformes Totales	NMP/100mL	33X10	<0	0	NA
Coliformes Fecales	NMP/100mL	33X10	0	0	NA

Comentario [P&E1]: La misma pregunta: Para que comparan los datos de agua de mar con la desalinizada si el agua de mar no es la misma tomada por el buque?

Una vez se presenta el proceso de ósmosis inversa, el agua sufre un proceso de precipitación de sales minerales, óxidos metálicos y posibles coloides ó compuestos orgánicos. Teniendo en cuenta lo anterior se evidencia en la mayoría de índices como el Mercurio, Plomo, sólidos suspendidos (SS), y Zinc que presentan límites no detectados y mantendrá en límites con menor capacidad de ser detectados, y en el caso del nitrato y los sólidos suspendidos totales (SST) pasan a ser cero y mínimo respectivamente como para ser detectados.

Se debe tener en cuenta que uno de los objetivos de las etapas previas a la ósmosis, es eliminar el total de sólidos suspendidos en agua mediante un filtro de arena que realizan un retención de partículas de hasta veinte micras de tamaño para eliminar las cargas bajas o medianas de contaminantes. Posteriormente pasa por el filtro cartucho y llega al proceso de ósmosis inversa por presión, posterior a esto se somete a dos filtros adicionales, por clarificación y piedra dolomita para hacerla apta al consumo y uso doméstico mediante tratamientos convencionales.



El índice de DBO y DQO pasaron a disminuir significativamente, en especial el primero al no detectarse los límites para detección mínima.

El índice de salinidad como se evidencia disminuyó significativamente, eliminando el 99,8% de salinidad del agua, por lo que se determina que la osmosis se llevó a cabo con éxito. Los filtros previos a este proceso buscan compensar o equilibrar los otros indicadores para obtener agua potable y de consumo doméstico. De igual forma el pH disminuyó a 7,2 pero se mantiene Neutro.

Por su parte la salmuera obtenida, segundo producto del proceso osmótico, obtuvo una salinidad del 63,2 o/oo superando los parámetros determinados para aguas marinas pero alcanzando el objetivo de este producto.

5.4. FASE 4: ANÁLISIS DE FLUJO A TRAVÉS DE LA MEMBRANA POR FO.

En la figura 24 podemos apreciar la tendencia del flujo al pasar el tiempo determinado por los datos obtenidos que se encuentran relacionados en la tabla 9, en ambos casos se muestra como en el primer momento que ambas agua entran en contacto se produce un paso rápido de agua, luego de esto continúa un paso de agua que paulatinamente va disminuyendo la densidad del flujo, esto puede deberse a que a medida que se genera el paso de agua van cambiando las concentración buscando el equilibrio entre las dos soluciones como se corrobora en la tabla 10, donde puede verse cómo varían las concentraciones de ambas soluciones al pasar determinado tiempo.



TABLA 9 VALORES TOMADOS EN LABORATORIO PRUEBA FO USANDO AGUA DE MAR VS SALMUERA C=62,3 Y C=70

Agua de mar vs Salmuera 62,3			Agua de mar vs Salmuera 70		
Tiempo (m)	Volumen (L) ARC	h (cm)	Tiempo (m)	Volumen (L) Sintetica	h (cm)
10	0,025702	36,2	10	0,027619	38,9
20	0,028684	40,4	20	0,030672	43,2
30	0,029678	41,8	30	0,032092	45,2
40	0,030246	42,6	40	0,032589	45,9
50	0,030743	43,3	50	0,033015	46,5
60	0,031169	43,9	60	0,033299	46,9
90	0,032518	45,8	90	0,034293	48,3
120	0,033796	47,6	120	0,035571	50,1
150	0,034861	49,1	150	0,036778	51,8
180	0,036068	50,8	180	0,037772	53,2

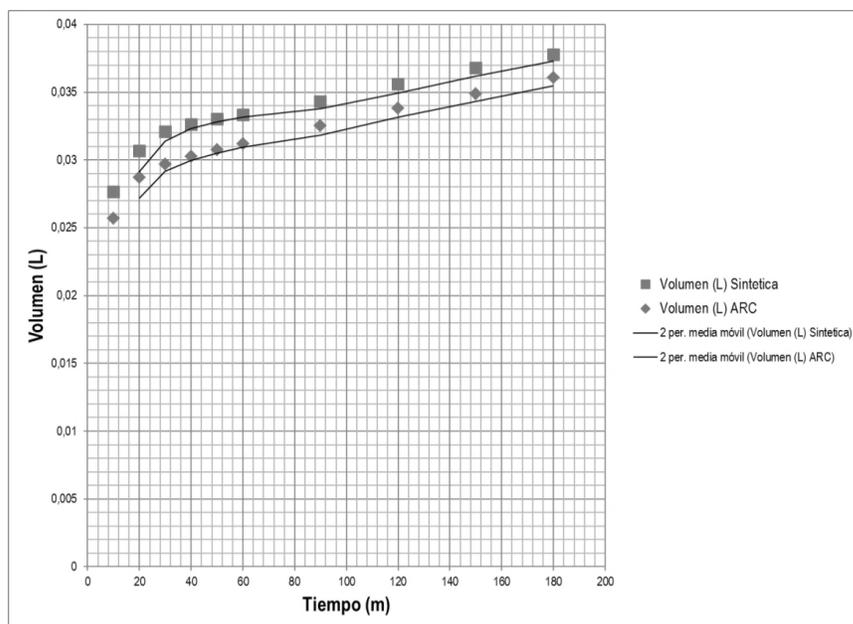


FIGURA 24 FLUJO A TRAVES DE LA MEMBRANA PARA DOS CONCENTRACIONES DE SALMUERA

También puede observarse cómo a medida que aumenta el diferencial de concentración entre las dos soluciones, para la concentración de Salmuera ARC con un diferencial de 27.9 g/l se tuvo un flujo aproximado de 0,5 l en 24 h y un 0,7 l aproximadamente para la muestra sintética con diferencia de 34,5. Lo que nos muestra que aumentando el diferencial de concentración en 7.5 g/l el flujo aumenta 1,4 veces, mejorando el desempeño del



proceso osmótico. Este proceso no funciona para la generación de energía eléctrica debido a que el flujo disminuye con el pasar del tiempo, si se sigue la tendencia llegaremos a un punto de equilibrio donde se detendrá el proceso.

TABLA 10 VOLUMENES Y CONCENTRACIONES INICIALES Y FINALES PARA DOS CONCENTRACIONES DE SALMUERA

	Datos Iniciales				Datos Finales (24h)			
	Agua de Mar		Salmuera		Agua de Mar		Salmuera	
	Vol (l)	C (g/l)	Vol (l)	C(g/l)	Vol (l)	C (g/l)	Vol (l)	C (g/l)
Muestra Sintetica	16	35,3	16	70	15,3	36,78	16,68	67,2
Muestra ARC	16	35,3	16	63,2	15,5	36,12	16,42	61,4

5.5. FASE 5: GENERACIÓN DE PRESIÓN OSMÓTICA POR PRO.

Al iniciar esta fase, se calculó teóricamente la presión osmótica presente en la salmuera de rechazo de concentración 63,2 g/l, ésta arrojó resultado de $\pi=26,43$, y con este se determinó el diferencia de presión osmótica entre las dos soluciones con la ecuación $\Delta\pi = 26.43 - 14,76 = 11,67 \text{ bar}$

En la tabla 11 se ubican los datos tomados en laboratorio al momento de hacer las pruebas, cabe resaltar que estos datos fueron tomados con temperaturas de 25°C, los valores expresados con cm en medición fueron multiplicados por 0,71 cm², área transversal de la manguera de 3/8 de pulgada, dejando el valor final expresado en unidades de litros. Valores con los cuales se calcularon 15 valores experimentales para el Flujo Jw expresado en unidades de h/l.



Prueba	h (mm)	tiempo (m:s)
1	224	9:21
2	134	9:15
3	203	9:18
4	174	8:56
5	214	9:16
6	202	9:25
7	241	8:34
8	192	9:24
9	230	8:45
10	210	9:25
11	192	9:00
12	232	9:08
13	200	9:00
14	102	8:15
15	253	9:34

TABLA 11 DATOS RECOLECTADOS EN LABORATORIO PARA DETERMINACION DE FLUJO JW

En la tabla 12 se pueden observar los valores obtenidos para J_w , entre ellos los valores para las pruebas No 2 y No 14, arrojan resultados demasiado sesgados al grupo de valores, esto debido a que el flujo de agua no fue continuo por fallas en el escape del aire contenido dentro del reactor, arrojando un valor de correlación de 0,00263, que al ser tan bajo indica baja confiabilidad al realizar la dispersión de los datos. Por esta razón fueron retirados al momento de graficar aumentando el valor de correlación $R^2 = 0,02$, con los cuales mediante el cálculo de la incertidumbre se estableció un rango de resultado. Cabe resaltar que comparando el valor inicial de volumen de 0,025 L arrojando en la fase anterior al evaluar las mismas soluciones, a diferencia de los valores obtenidos en esta prueba muestra una disminución significativa del flujo cuando este se genera mediante el proceso PRO.

Comentario [P&E2]: Asi de bajo?



Prueba	Volumen (L)	tiempo (h)	Flujo (L/h)
1	0,01590	3:44	2:26
2	0,00951	3:42	1:28
3	0,01441	3:43	2:13
4	0,01235	3:34	1:59
5	0,01519	3:42	2:21
6	0,01434	3:46	2:11
7	0,01711	3:44	2:38
8	0,01363	3:45	2:05
9	0,01633	3:30	2:41
10	0,01491	3:46	2:16
11	0,01363	3:40	2:08
12	0,01647	3:39	2:35
13	0,01420	3:36	2:16
14	0,00724	3:18	1:15
15	0,01796	3:49	2:42

TABLA 12 RESULTADO DE FLUJOS MEDIANTE ANALISIS EXPERIMENTAL

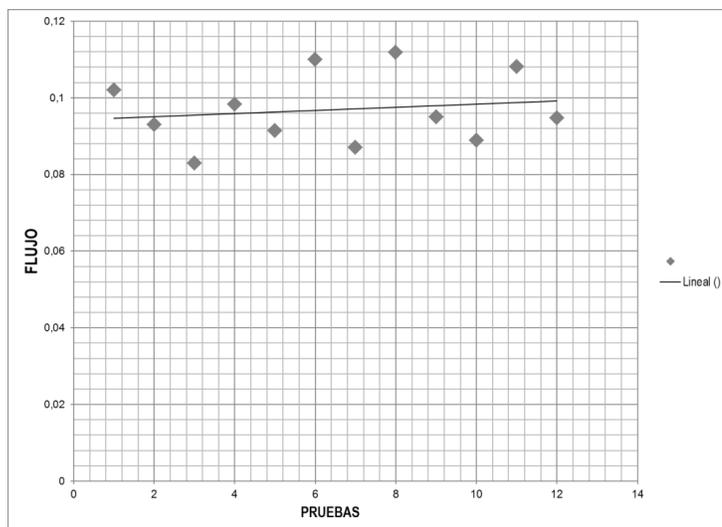


FIGURA 25 DISPERSIÓN DE VALOR DE FLUJO

Se encontraron valores para la desviación estándar de 0,009947 y para la incertidumbre de 0,000765, lo que da como resultado un rango de valores para J_w entre 0,098898 l/h y



0,097638 l/h los cuales se usaron para determinar el la permeabilidad de la membrana utilizada.

$$Jw = A(\Delta\pi + \Delta P)$$

$$0,098133 \pm 7,65 \times 10^{-4} = A(11,82 + 0,05)$$

$$A = \text{entre } 0,00883317 \text{ l/h} * \text{bar y } 0,0082028 \text{ l/h} * \text{bar}$$

Teniendo un rango para el coeficiente de permeabilidad al agua de la membrana, podemos calcular el rango de Potencial energético de la membrana Toray V82 utilizando Agua de mar y Salmuera de rechazo como soluciones a con un $\Delta P=0,05$ además del potencial máximo para la configuración evaluada del sistema a escala de laboratorio que se muestran en la tabla 13, en unidades de W/m^2 mediante las ecuaciones

$$W = A(\Delta\pi + \Delta P)\Delta P$$

$$W_{Max} = A \frac{\Delta\pi^2}{4}$$

TABLA 13 RANGO DE RESULTADOS POTENCIAL ELECTRICO

	Mayor	Menor	Und
Jw	0,0989	0,0974	l/h
A	0,0083	0,0082	l/h*bar
W	0,0049	0,0048	W/m ²
Wmax	0,2910	0,2865	W/m ²

El valor de $W=0,0048653 \pm 3,79E-5 \text{ W/m}^2$ nos indica que existe un potencial eléctrico mediante el aprovechamiento de la presión osmótica utilizando una membrana toray V82 en formato placa plana, con este se podrían generar aproximadamente 0.0049 Watts de energía constantes utilizando el reactor a escala de laboratorio con una presión de entrada de la salmuera de 0,05 bar, la cual si se incrementa el flujo mediante la variación de ΔP puede alcanzar valores máximos $W_{max}=0,291 \text{ W/m}^2$.



Realizando un análisis de la aplicabilidad de este sistema, encontramos que para el consumo estimado de una institución educativa pequeña de aproximadamente cuatro salones con capacidad para 100 personas que se determinó mediante el análisis que se muestra en la tabla 14, serían necesarios aproximadamente 3'691.440,6 m² de membrana activa con la configuración utilizada en la experimentación y 62.196,7 m² utilizando la potencia máxima calculada teóricamente para el suministro constante de energía eléctrica, lo que por los costos de las membranas no sería factible, pero con algunos cambios en el sistema como la utilización de otra configuración de membrana mucho más eficiente y la implementación de sistemas como intercambiadores de presión para el reaprovechamiento de la energía dentro del sistema, aumentarían la eficiencia logrando resultados más factibles técnico y económicamente para la utilización

TABLA 14 ANALISIS DE APLICABILIDAD DE LA POTENCIA

POTENCIA REQUERIDA INSTITUCION EDUCATIVA PARA 50 personas				
ITEM	DESCRIPCION	CANTIDAD	P UNIDAD (W)	P TOTAL (W)
Iluminacion	Luminarias ahorradoras	24	20	480
Toma corrientes	Conexión electrodomesticos bajo consumo	20	300	6000
Toma corrientes	Conexión electrodomesticos alto consumo	8	700	5600
Ventiladores	Ventilador convencional	16	150	2400
SUB TOTAL				14480
FS 25%				3620
CONSUMO TOTAL				18100
			<i>M2 de membrana requerida</i>	
			W 0,004903	3691440,641
			Wmax 0,291012	62196,70744

5.6. PARÁMETROS DE OPERACIÓN

Mediante esta investigación se realizó un análisis experimentalmente de diferentes procesos osmóticos y donde se revisó su efectividad para la solución de problemáticas en el ámbito de desabastecimiento de agua potable y energía eléctrica. De estos, se pudo determinar algunas características que influyen de gran manera sobre la efectividad de los mismos.

Las presiones son el principal parámetro que determina la efectividad de los procesos, en la osmosis inversa se pudo ver en un sistema comercial que son necesarios valores que se



acercan a los 60 bares para el correcto funcionamiento sin interrupciones del flujo, llegando a valores máximos recomendados de 70 bares para garantizar la integridad de la membrana. Para la generación de presión por osmosis retardada vemos como al aplicar una presión hidráulica en la solución más concentrada a diferencia de la osmosis directa, disminuye el flujo a través de la membrana, sin embargo, al ser constante el flujo de entrada se mantienen las concentraciones los que permite tener un flujo contante y aprovechar de la presión generada por el diferencial de salinidad la cual llega a un punto máximo con condiciones exactas de la presión de entrada.

El flujo también se presenta como una de las principales características de los procesos, en la prueba donde se mezclaron las dos soluciones sin ninguna entrada adicional generó un proceso de osmosis directa presentando un flujo de agua inicial el cual fue disminuyendo a medida de que se equilibran las concentraciones. A diferencia de la osmosis retardada que al tener circulación continúa genera un flujo constante que se puede aprovechar para la generación de energía.



6. CONCLUSIONES

La presente investigación se adelantó la construcción de un sistema a escala de laboratorio que utiliza un reactor en formato placa plana dotado de una membrana polimérica para el análisis de diferentes procesos osmóticos, se realizaron varios cambios al modelo cubico encontrado en las referencias el cual construido en acrílico presentaba problemas en términos de resistencia de los materiales y distribución de las presiones debido a la geometría, por lo que mejoró utilizando acero inoxidable como material principal y dándole una geometría cilíndrica, con lo que el reactor analizado respondió de manera positiva ante las presiones generadas por los procesos. Se añadieron varios elementos para mejorar el comportamiento de los procesos como válvulas para el escape de los gases y una rejilla en talco perforado para el soporte de la membrana.

El análisis de las muestras de agua de mar recolectadas, se evaluaron las características fisicoquímicas y microbiológicas más relevantes en temas de su utilización en futuros procesos osmóticos. La salinidad alcanzo valores de 35,3 g/l, encontrándose dentro del rango de 33 g/l a 38,5 g/l para Mar Caribe, el pH de 8,1 y la temperatura de 25° C se encuentran dentro de un rango considerado como básico y normal respectivamente para aguas marino costeras. Los indicadores para el mercurio, plomo, SS, zinc, fosfatos, y nitratos se encuentran levemente por encima de los valores de detección lo que indica que las cantidades encontradas no afectan la calidad del agua. Por otra parte para los coliformes fecales y totales muestran valores de 33x10NML/100mL, lo que indica presencia de microorganismos patógenos que pueden proceder del vertimiento de aguas y solidos residuales por las poblaciones aledañas que pueden generar daños en el ecosistema y enfermedades. En general se puede deducir que el agua de mar analizada es recomendable para realizar procesos de potabilización mediante procesos osmóticos y un pretratamiento básico para el que recomienda filtros de arena y filtro de carbón activado.

Se pudo corroborar la eficiencia de la ósmosis inversa como tratamiento para la desalinización y potabilización del agua de mar con un 99,8% de remoción de la salinidad presente en un sistema comercial, al igual que la efectividad de su utilización en conjunto



con diferentes componentes para el tratamiento del agua como un sistema Integral de potabilización de gran eficiencia, mostrando excelente resultados en la remoción de Sólidos, Coliformes y demás contaminantes presentes en el agua de mar con valores iguales a 0, menores que los límites de detección o mucho menores que los límites indicados por la resolución 2115 del 2007 para aguas consideradas como potable, lo que demuestra que los sistemas de osmosis inversa son una solución viable para los problemas de desabastecimiento de agua potable en para poblaciones con accesibilidad al agua de mar. En este proceso el principal parámetro que se debe tener en cuenta es la presión hidráulica del agua de mar al entrar en la membrana, esta debe ser mayor que la presión osmótica de la solución, para el agua del Mar Caribe a una temperatura de 25° C, necesita una presión de $\pi = 14,76$ bares para que empiece el paso de la primera gota de agua desalinizada, en el caso de los sistemas tubulares las presiones optimas son de 60 bares con un límite de 70 bares,

La investigación nos muestra mediante las pruebas en las condiciones de osmosis directa, que desde el momento en que amabas soluciones entran en contacto se produce un paso rápido de agua, luego de esto continúa un paso de agua que paulatinamente va disminuyendo la densidad del flujo, esto puede deberse a que a medida que se genera el paso de agua van cambiando las concentración buscando el equilibrio entre las dos soluciones por lo que se debe mantener un flujo constante de alimentación para mantener las concentraciones . De igual manera, mediante pruebas experimentales se comprobó que si es posible aprovechar el diferencial de salinidad entre la salmuera de rechazo generada en los procesos de ósmosis inversa con concentraciones salinas de 62,3 g/l en conjunto con el agua del mar caribe con concentraciones de muestras analizadas de 35,3 g/l que generaron un flujo de agua aproximado en $J_w = 0,098133 \pm 7,65 \times 10^{-6}$ l/h a través de la membrana dentro de un procesos de ósmosis retardada que podría aprovecharse para la generación de energía eléctrica. En este caso las pruebas realizadas en una membrana Toray V82 realizando pruebas con una presión hidráulica de $\Delta P = 0,05$ bar y un diferencial osmótico de $\Delta \pi = 11.67$ bar, arrojaron un rango de coeficiente de permeabilidad para la membrana de $A = 0,0082673 \pm 6,4 \times 10^{-6}$ que genera en esta un potencial de



$W=0,0048653\pm 3,79E-5$ W/m², el cual con las condiciones de presión adecuadas llega a valores máximos de $W_{max}=0,291$ W/m² en un sistema a escala.

Los resultados obtenidos al ser comparados con los resultados de 10W/m² encontrados teóricamente en referencias muestra un valor bastante bajo, de igual forma al reflejar los resultados obtenidos en un ambiente real, se necesitarían aprox. 62176 m² de membrana para suministrar con energía eléctrica una pequeña institución educativa de 100 estudiantes, no que hace que el sistema no sea factible por las grandes dimensiones de un sistema de membranas placa plana y el excesivo costo de las mismas. Sin embargo los resultados de la investigación son de gran importancia ya que son la base para distintas investigaciones que planeen alternativas de mejora optimización del sistema, además brinda una alternativa funcional para las características de las aguas del Mar Caribe y reutiliza un desecho que como se constató con la visita al buque ARC 20 de Julio son vertidos en al océano generando un impacto negativo en los ecosistemas marinos cercanos, dando solución a la problemática energética de la región.



7. RECOMENDACIONES

Este proyecto es la base para generar propuestas de investigación basadas en el análisis de procesos osmóticos a mayor escala, para mejorar los resultados y optimizar los procesos de osmosis inversa y osmosis retardada es recomendable la utilización de un formato de membrana más compacto, los sistemas de placa tubular al ser más compactos llegan a presurizarse con mayor rapidez, al ser más compacto aprovecha mayor área activa de membrana en un menor espacio y poseen un mejor control de la salida de los gases. Para realizar pruebas de procesos osmóticos dentro de reactores en formato de membrana placa plana, es indispensable incorporar salidas para la expulsión de gases en la parte superior. De igual forma utilizar sistemas de soporte de la membrana como una lámina de talco perforada con el objetivo de evitar deformaciones excesivas causadas por la presión que que podrían quebrar la membrana.

Para la implementación de sistemas de osmosis inversa utilizando agua de mar con las características del mar caribe encontradas en las muestras como medio de abastecimiento de agua potable para el consumo humano, se recomienda realizar un pretratamiento basado en filtros de arena y cartuchos de carbón activado para su limpieza inicial, mayor remoción de posibles contaminantes y como medio de protección para la inhibición de las membranas debido a saturación por sedimentos filtrados y polarización.

En esta investigación no se utiliza una salmuera de concentración resultante de un proceso desalinizador osmótico, en su lugar se usaron muestras producidas sintéticamente dentro del laboratorio con el fin de simular las condiciones reales de soluciones naturales. Con la utilización de esta en los experimentos se demuestra la posibilidad de implementar un esquema propuesto basado en el tratamiento de desalinización y producción de energía con agua de mar como única solución de alimentación. Sin embargo se recomienda continuar la indagación utilizando salmuera real con reactores a base de membrana en serie y así determinar una factibilidad del sistema completo, que a su vez cuente con un sistema de conversión energética como una turbina que proporcione resultados visibles en el ámbito de la generación de electricidad.



8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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
- REGLAMENTO TÉCNICO DEL SECTOR DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO BÁSICO. (2000).
- Achilli, A., Cath, T., & Childress, A. (2009). Power generation with pressure retarded osmosis: An experimental and theoretical investigation. . *Journal of Membrane Science*, 42-52.
- Altaee, A., Millar, G. J., & Zaragoza, G. (2016). Integration and optimization of pressure retarded osmosis with reverse osmosis for power generation and high efficiency desalination. *Energy* 103, 110 - 118.
- Bermudez, A. (2013). Recuperado el 2014 de 06 de 10, de http://oppidum.es/numeros/oppidum_08-09/pdfs/op08-09.05_bermudez-marques.pdf
- BETANCOURT, j., & Sanchez, j. (2011). Quality of Superficial Waters in Bahía Málaga Colombian Pacific.
- 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 of Sciences*, 330 - 337.
- Defensoria de los derechos humanos. (2009). *DIAGNÓSTICO SOBRE LA CALIDAD DEL AGUA PARA EL CONSUMO HUMANO EN COLOMBIA EN EL MARCO DEL DERECHO HUMANO AL AGUA*.
- Diger, F., Trondle, T., & Platt, U. (2013). Optimization of the energy output of osmotic power plants. *journal of Renewable Energy*, 7.
- Elimelech, M., Yin Yip, N., Hoover, L., Phillip, W., & Tiraferri, A. (2011). Forward with Osmosis: Emerging Applications for Greater. . *Environmental: Science & Technology*, , 9824 - 9830.



- Fabio La Mantia, M. P. (2011). Batteries for efficient energy extraction from a water salinity difference. *Nano Lett.* 11 , 1810–1813. .
- Gabriel Garcés, A. C. (2014). DISEÑO DE PLANTA PILOTO PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA Y.
- Gutierrez, B. (Diciembre de 2012). Recuperacion de energia de la salmuera. Madrid, España.
- Han, G., Sui, Z., Xue, L., & Tai-Shung, C. (2015). Progress in pressure retarded osmosis (PRO) membranes for osmotic power generation. *Progress in polymer sciences*.
- Helfer, Lemckert, & Anissimov. (2014). Osmotic power with Pressure Retarded Osmosis: Theory, Performance an trends. *Journal of memebrane science*, 337-358.
- Hernandez, A., Rios, G., & Vicencio, A. (2010). Energia del gradiente salino. Generacion de energia a partir de la presion osmotica existente entre aguas con diferente gradiente salino.
- Hidrosoluciones. (s.f.). *HidroSoluciones*. Recuperado el 5 de 2015, de <http://www.hidrosoluciones.com.ar/images/Membrana-en-Espiral.gif>
- Hoek, E. M. (2002). Influence of Crossflow Membrane Filter Geometry and Shear Rate on Colloidal Fouling in Reverse Osmosis and Nanofiltration.
- IMPROAMBIENTALES. (s.f.).
- Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras. (2008). *Diagnóstico y Evaluación de la Calidad de Aguas Marinas y Costeras en el Caribe y Pacífico Colombianos*. Santa Marta.
- Klaysom, C., Cath, T. Y., Depuydt, T., & Vankelecom, I. F. (2013). Forward and pressure retarded osmosis: potential solutions for global challenges in energy and water supply. *Chemical Society Reviews*, 6959-6989.
- Lara Borrero, J. A. (2002). *Eliminacion de Nutrientes Mediante Procesos de Membranas*. Madrid.
- LENNTECH. (2009). *WATER TREATMENT SOLUTIONS*. Retrieved Septiembre 29, 2013, from. Recuperado el 4 de Febrero de 2015, de <http://www.lenntech.es/>
- Loeb, S., & Norman, R. S. (1975). Osmotic Power Plants. *Science* 22 August, 654-655.
- Logan, B., & Elimelech, M. (2012). Membrane-based processes for sustainable power generation using water. *Nature*, 488((7411)), 313-19.



- Moreno Benavides, J. (2011). *DISEÑO DE PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA DE OSMOSIS INVERSA PARA LA EMPRESA DOBER OSMOTECH DE COLOMBIA LTDA*. Santiago de Cali: Universidad Autonoma de Occidente.
- Moreno, J. (2004). *Especificaciones técnicas para el diseño de cañtaciones por gravedad de aguas superficiales*. Lima, Perú: Organización Panamericana de la Salud.
- Oltra, F., & Troyano, F. (1972). *La desalacion y su situacion en españa*. Madrid: Publicaciones Cientificas de la Junta de Energia Nuclear.
- Ortiz Laza C., C. S. (2010). *LINEAMIENTOS PARA EL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DE REACTORES DE MEMBRANA OSMÓTICA*. Cartagena.
- Park, & Pauly. (2003). *Estructuras en concreto*.
- PROAMBIENTE LTDA. (2009). *PLAN MAESTRO DE ACUEDUCTO PARA BOLIVAR*.
- 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 of membrane science*, 262-273.
- ROCHEM RO-Wasserbehandlung GmbH. (2010). *Manual de operacion y mantenimineto V 0,1 Desalinizadora de agua de mar Rochem RO510-PT02-10S*.
- Romero, J. (2009). *Calidad del Agua 3 edicion*. Escuela Colombiana de Ingenieria.
- Statkraft. (2008). *Osmotic power - A new, renewable energy source*. . Alemania: Statkraft Publishmen.
- Tanioka, D. (2015). Preface to the special issue on “Pressure Retarded Osmosis in MegatonWaterSystem Project”. *Desalination*.
- Unidad de Planeación Minero Energética. (2014). *Informe de Gestion UPME 214*. Bogota D.C.
- UPME. (2006). *Atlas de Viento y Energia Eolica en Colombia*.
- Valencia, J. (1981). *Teoria, diseño y control de los procesos de clarificacion de agua*. Lima: O.P.S.
- Vivas-Aguas, L., Sanchez, S., Tomic, S. N., Cadavid, P., Bautista, J., & Betancourt, j. (2012). *Diagnóstico y Evaluación de la Calidad Ambiental Marina en el Caribe y Pacífico Colombiano*.



ANEXOS

TABLA 15 CUADRO DE VALORES EXPERIMENTALES Y CALCULO DE FLUJO PRO

pruebas	cm en medidor	Volumen (cm3)	Volumen (L)	tiempo (h)	tiempo (m)	tiempo (m:s)	Flujo
1	22,4	15,904	0,01590	0,1558	9,35	9:21	0,102058
2	13,4	9,514	0,00951	0,1542	9,25	9:15	0,061712
3	20,3	14,413	0,01441	0,1550	9,3	9:18	0,092987
4	17,4	12,354	0,01235	0,1490	8,94	8:56	0,082913
5	21,4	15,194	0,01519	0,1545	9,27	9:16	0,098343
6	20,2	14,342	0,01434	0,1570	9,42	9:25	0,091350
7	24,1	17,111	0,01711	0,1557	9,34	8:34	0,109921
8	19,2	13,632	0,01363	0,1567	9,4	9:24	0,087013
9	23	16,33	0,01633	0,1460	8,76	8:45	0,111849
10	21	14,91	0,01491	0,1570	9,42	9:25	0,094968
11	19,2	13,632	0,01363	0,1533	9,2	9:00	0,088904
12	23,2	16,472	0,01647	0,1523	9,14	9:08	0,108131
13	20	14,2	0,01420	0,1500	9	9:00	0,094667
14	10,2	7,242	0,00724	0,1375	8,25	8:15	0,052669
15	25,3	17,963	0,01796	0,1595	9,57	9:34	0,112621



FIGURA 26 MANUAL DE OPERACION PLANTA DESALNIZADORA



FIGURA 27 FILTRACION DE AGUA REACTOR PILOTO



FIGURA 28 EMPAQUE POLIURETANO



FIGURA 29 MEMBRANA OSMOTICA TORAY V82



FIGURA 30 AJUSTE DEL REACTOR PILOTO



FIGURA 31 REACTOR A ESCALA DE LABORATORIO



GENERACION DE PRESION OSMOTICA MEDIANTE APROVECHAMIENTO DEL GRADIENTE DE SALINIDAD EN LOS PROCESOS DE OSMOSIS RETARDA Y DE DSALINIZACIÓN DEL AGUA DE MAR
Cartagena 2016



Universidad Santiago de Cali - Octubre 8 al 11 de 2015
XVIII Encuentro Nacional y XII Internacional
de Semilleros de Investigación

LA FUNDACION RED COLOMBIANA DE SEMILLEROS DE INVESTIGACIÓN

*Atreverse a investigar:
para construir sociedades.*

Certifica que el proyecto:

GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA MEDIANTE EL APROVECHAMIENTO EL GRADIENTE DE SALINIDAD EN LOS PROCESOS DE OSMOSIS RETARDA Y DE DESALINIZACIÓN DEL AGUA DE MAR, CARACTERÍSTICA DEL CARIBE COLOMBIANO

UNIVERSIDAD DE CARTAGENA

Obtuvo un reconocimiento como:

MERITORIO

En el XVIII Encuentro Nacional y XII Internacional de Semilleros de Investigación, realizado en la UNIVERSIDAD SANTIAGO DE CALI del 8 al 11 de Octubre de 2015.

Olga Lucia Galvis Pinzón
Coordinadora Nacional
RedCOLSI



FIGURA 32 CERTIFICADO RECONOCIMIENTO COMO PROYECTO MERITORIO EN ENCUENTRO NACIONAL REDCOLSI 2015