



U M S N H
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS:

“PRUEBA DE DIFERENTES DISEÑOS DE DIFUSORES PARA
DISMINUIR EL IMPACTO AMBIENTAL OCASIONADO POR LAS
DESCARGAS DE SALMUERA AL MAR PRODUCTO DE LA
DESALACIÓN”

TESIS PROFESIONAL PARA TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

PRESENTA:

FRANCISCO JAVIER LEMUS RODRÍGUEZ

ASESOR:

M.I. JESÚS MARTÍN CABALLERO ULAJE

MORELIA, MICHOACÁN DE OCAMPO, MÉXICO

AGOSTO, 2009

Me gustaría de manera muy particular, mencionar que todo el material, así como los resultados obtenidos en la parte experimental del proyecto denominado: "ESTUDIO PARA PROBAR EN LABORATORIO EL COMPORTAMIENTO DE DIFUSORES DE SALMUERA EN TANQUE ESTACIONARIO", es material perteneciente al Dr. Gerardo Hiriart Le Bert, al proyecto IMPULSA IV "Desalación de agua de mar con energías renovables", así como a la Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM. Debido a que esta a través del Dr. Hiriart hizo extensiva la invitación a la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, específicamente al Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería Civil por contar con las instalaciones apropiadas para la realización y desarrollo de dicha investigación.

Por último no me queda mas que reiterar que solamente hago uso del material así como de los resultados de la investigación obtenidos, sin ningún otro fin mas que el de conformar esta tesis, ya que los principales objetivos, tanto de la UNAM como de la misma UMSNH son el de promover, fomentar e impulsar el desarrollo de los estudiantes universitarios y de esta manera entregar a esta gran nación mejores profesionistas.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS

DEDICATORIA

1. INTRODUCCIÓN	12
1.1. Disponibilidad del agua	14
1.2. Distribución del agua en México	16
2. ANTECEDENTES	19
2.1. Impulsa IV	20
2.2. Aspectos de la desalación	20
2.3. Casos internacionales de desalación	22
2.4. Desalación actual en México	24
3. ASPECTOS FUNDAMENTALES.....	27
3.1 Desalación	28
3.1.1. Diferentes procesos de desalación	30
3.1.1.1. Procesos por evaporación	30
3.1.1.2. Procesos por membranas	33
3.1.1.3. Procesos más simples	35
3.1.2. Calidad del agua requerida	37
3.1.3. Calidad del agua producto	38
3.1.4. Consideraciones medioambientales	39
3.1.4.1. Impacto en el ambiente marino como resultado de descargar la salmuera al mar	40
3.1.4.2. Uso intensivo de energía	41
3.1.4.3. Impactos de tipo local	41
3.2. Descargas submarinas	42
3.2.1. Clasificación de las emisiones submarinas	44
3.2.2. Campo cercano y Campo lejano	47
3.2.3. Número de Froude densimétrico y Dilución S	48
3.3. Modelación física	49
3.3.1. Tipos de modelos	50
3.3.2. Selección de escala	52
3.3.3. Técnicas de visualización y cuantificación	53

4. MODELACIÓN FÍSICA	64
4.1. Hipótesis	65
4.2. Objetivos de la modelación	65
4.3. Diseño del modelo hidráulico	65
4.4. Instalación experimental	70
4.4.1. Descripción del modelo hidráulico	71
4.4.2. Equipo utilizado	74
4.4.3. Procedimiento de trabajo	74
4.5. Diseño de difusores	77
4.6. Planeación y programa experimental	78
5. DATOS OBTENIDOS	83
5.1. Cuadro de resúmenes del primer ciclo de pruebas	85
5.2. Cuadro de resúmenes del segundo ciclo de pruebas	86
5.3. Cuadro de resúmenes del tercer ciclo de pruebas	87
6. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN OBTENIDA	88
6.1. Procedimiento y análisis de datos e imágenes	89
6.2. Elaboración y análisis de gráficas	90
6.2.1. Primer ciclo de pruebas	90
6.2.2. Segundo ciclo de pruebas	94
6.2.3. Tercer ciclo de pruebas	96
7. RESULTADOS	102
7.1. Cuadros resumen	103
8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	105
8.1. Conclusiones	106
8.2. Recomendaciones	106
9. BIBLIOGRAFÍA	108
ANEXOS	114
ANEXO 1 RANGOS DE SALINIDAD EN EL AGUA, SALINIDAD EN LOS MARES Y OCÉANOS.	115
ANEXO 2 INSTALACIÓN EXPERIMENTAL DEL MODELO HIDRÁULICO.	116

ANEXO 3 ELABORACIÓN DE LA MEZCLA SALINA (SALMUERA) Y PROGRAMA EXPERIMENTAL.	118
ANEXO 4 FOTOGRAFÍAS DE LAS DESCARGAS POR MEDIO DE LOS DIFERENTES DISEÑOS DE DIFUSORES, VISTA EN PERFIL Y EN PLANTA.	121
ANEXO 5 INTEGRANTES DEL EQUIPO TRABAJANDO.	124

ÍNDICE-tablas

15	Tabla No 1.1. Recursos hídricos anuales renovables locales y Per cápita de diversos países así como por continentes.
25	Tabla No 2.1. Inventario de plantas desaladoras por estado, capacidad instalada y capacidad a la que operan.
25	Tabla No 2.2. Plantas desaladoras por estado y por proceso de desalación.
38	Tabla No 3.1. Comparativa de los parámetros mas importantes del agua según la Norma Oficial Mexicana y la Organización Mundial de la Salud.
55	Tabla 3.2 Clasificación de los métodos de visualización de flujos.
69	Tabla No 4.1. Escala a la que se encuentra el modelo con respecto al prototipo.
79	Tabla No 4.2. Resumen de las diferentes variables con las que se trabajo en el primer ciclo de pruebas.
80	Tabla No 4.3. Resumen del primer ciclo de pruebas ampliado.
81	Tabla No 4.4. Resumen del segundo ciclo de pruebas.
82	Tabla No 4.5. Tercer ciclo de prueba en el cual se utilizaron los diferentes diseños de difusores.
85	Tabla No 5.1. Resumen de los resultados obtenidos de la modelación en el primer ciclo de pruebas.
86	Tabla No 5.2. Resumen de los resultados obtenidos de la modelación en el segundo ciclo de pruebas.
87	Tabla No 5.3. Resumen de los resultados obtenidos de la modelación en el tercer ciclo de pruebas, en el cual se utilizaron los diferentes diseños de difusores.

99	Tabla No 6.1. Tenemos el área medida en el modelo en m ² y el área de afectación en el fondo marino para el prototipo también en m ² .
104	Tabla No 7.1. Cuadro resumen de los diferentes diseños de difusores con su respectiva eficiencia mostrada en porcentaje.
104	Tabla No 7.2. Tenemos el área medida en el modelo en m ² y el área de afectación en el fondo marino para el prototipo también en m ² .
115	Tabla No a1.1 Rangos de salinidad de los diferentes tipos de agua.
115	Tabla a1.2. Salinidad Media de los mares y océanos principales del planeta.
119	Tabla No a3.1. Calculo del peso específico, densidad y densidad relativa de las diferentes mezclas salinas.

ÍNDICE-figuras

17	Figura No 1.1. Distribución de la precipitación media mensual histórica en México.
22	Figura No 2.1. Membrana permeable que se utiliza en el proceso de ósmosis inversa.
28	Figura No 3.1. Desalación de agua de mar.
31	Figura No 3.2. Esquema del funcionamiento del método llevado a cabo mediante evaporación súbita por efecto flash.
31	Figura No 3.3. Representación de cómo se realiza la destilación por múltiple efecto (MED) con evaporadores horizontales (HFF).
32	Figura No 3.4. Esquema del funcionamiento de una planta por termocompresión de vapor.
32	Figura No 3.5. Diagrama que muestra claramente el funcionamiento del método por compresión de vapor (CV) con evaporador de tubos verticales (VTE).
34	Figura No 3.6. Diagrama de flujo del funcionamiento de un sistema de Ósmosis Inversa.
35	Figura No 3.7. Proceso llevado a cabo por electrodiálisis (ED).

- 36 Figura No 3.8. Esquema muy simple de un colector solar para llevar a cabo la destilación solar. (Valero A et al 2001).
- 45 Figura No 3.9. Descarga de salida simple mediante un difusor simple o estándar.
- 46 Figura No 3.10. Nomenclatura para un difusor (Manual de diseño de obras civiles A.2.14).
- 73 Figura No 4.1. Croquis del modelo hidráulico visto de perfil, en planta y corte.
- 76 Figura No 4.2. Plantilla que se utilizó para suministrar los diferentes gastos por medio de la apertura y cierre de la válvula.
- 77 Figura No 4.3. Diseño de los diferentes difusores utilizados.
- 90 Figura No 6.1. Ejemplo de los acetatos obtenidos sobre la imagen de la videograbación a los 15 segundos de transcurrida la descarga, los cuales fueron utilizados para medir las áreas de las descargas. La línea verde delimita el área abarcada por la salmuera, la línea azul representa al difusor y la línea negra es la retícula (imágenes de la descarga en perfil).

ÍNDICE-fotografías

- 41 Fotografía No 3.1. Ensayo *in situ* de los efectos de los vertidos hipersalinos sobre *Posidonia oceánica*.
- 42 Fotografía No 3.2. Impacto de tipo local por uso de suelo así como de tipo visual. Desaladora de Alicante, España.
- 42 Fotografía No 3.3. Impacto acústico, originado por bombas y turbinas. Desaladora de Cartagena, España.
- 43 Fotografía No 3.4 y fotografía No 3.5. Descargas superficiales.
- 51 Fotografía No 3.6. Modelo hidráulico del Puerto de Veracruz con fondo fijo, localizado dentro de las instalaciones del laboratorio de hidráulica de la UMSNH.
- 52 Fotografía No 3.7. En la fotografía aparece un canal de pendiente variable en el que se estudia el arrastre de sedimentos, por lo tanto se le denomina de fondo móvil.
- 56 Fotografía No 3.8. Foto que muestra el Método de la película de aceite.

- 57 Fotografía No 3.9 y fotografía No 3.10. En ambas se muestra la técnica de inyección de tinta. En la foto de la derecha se puede apreciar la salida del colorante (azul de metileno) por medio de una aguja insertada por un costado de la tubería y esta a su vez colocada en el centro de la boca del tubo.
- 58 Fotografía No 3.11 y fotografía No 3.12. En la primera fotografía se muestra una red de tubos por el cual se aplica fluoresceína sal sódica que trabaja como colorante. En la fotografía de la derecha se puede observar la red de flujo que nos muestra la trayectoria de la infiltración del agua sobre una cortina de presa hecha a escala.
- 58 Fotografía No 3.13 y fotografía No 3.14. Se puede apreciar otro claro ejemplo del Método de la inyección de tinta.
- 59 Fotografía No 3.15. Aquí podemos observar la trayectoria del flujo por medio de partículas de sal dentro de un canal en laboratorio.
- 60 Fotografía No 3.16. En esta fotografía se puede apreciar claramente como las burbujas de hidrógeno actúan como trazalíneas.
- 61 Fotografía No 3.17. Se puede observar el funcionamiento de esta técnica de visualización.
- 61 Fotografía No 3.18. Imagen que muestra el método de Schlieren reaccionando al flujo turbulento. La línea rosa superior (alta velocidad) es una mezcla que contiene hidrógeno. La línea azul inferior (de poca velocidad) contiene flúor.
- 63 Fotografía No 3.19. En esta fotografía se pueden apreciar las líneas de corriente teñidas de azul, prueba realizada en una mesa de Hele-Shaw.
- 71 Fotografía No 4.1. Fotografía del canal largo en la cual se puede apreciar la instalación experimental así como las ventanas de visualización. Para tener una mejor comprensión de la instalación ver el Anexo No 2.
- 75 Fotografía No 4.2. Carga hidráulica entre la SLA₁ en el depósito y la SLA₂ del Canal Largo.
- 89 Fotografía No 6.1. Retícula sobre la imagen que sirvió de auxiliar para conocer la altura real del chorro.
- 90 Fotografía No 6.2. Diferentes niveles de carga hidráulica.
- 92 Fotografía No 6.3. En las fotografías aparecen las diferentes alturas utilizadas para los difusores.
- 116 Fotografías No a2.1. Vista del Canal Largo donde se albergo la instalación experimental.

- 116 Fotografías No a2.2. y No a2.3 Ventanas de visualización.
- 116 Fotografías No a2.4 y No a2.5. Tanque elevado y tanque inferior.
- 117 Fotografía No. a2.6 Apoyo donde se coloco la cámara digital y el brazo donde se coloco el equipo de venoclisis.
- 117 Fotografías No a2.7. y No a2.8. Graduación del tanque inferior y válvula de esfera graduada para dar los diferentes gastos.
- 117 Fotografía No a2.9. Cuadrícula situada en la plancha de concreto y en la ventana de visualización donde se realizaron las descargas.
- 121 Par de fotografías No a4.1. Descarga del Difusor "vertical" o "estándar".
- 121 Par de fotografías No a4.2. Descarga del Difusor "Y".
- 122 Par de fotografías No a4.3. Descarga del Difusor "T".
- 122 Par de fotografías No a4.4. Descarga del Difusor "codo de 90°".
- 122 Par de fotografías No a4.5. Descarga del Difusor "codo" ó "reducción gradual".
- 123 Par de fotografías No a4.6. Descarga del Difusor "peine" ó "abanico".
- 123 Par de fotografías No a4.7. Descarga del Difusor "cono invertido".
- 124 Fotografía No a5.1. Control de la carga hidráulica.
- 124 Fotografía no a5.2 Grabación de video "vista en planta".
- 124 Fotografía No a5.3. Todo el equipo de trabajo, realizando sus correspondientes actividades.
- 125 Fotografía a5.4. Revisando últimos detalles.
- 125 Fotografía No a5.5. Manera en la que se hacia el cambio de los diferentes diseños de difusores.
- 125 Fotografía a5.6. Realizando otro cambio de difusor.
- 125 Fotografía a5.7. Revisando el tanque elevado así como el tanque inferior.
- 125 Fotografía a5.8. Medición volumétrica del gasto en el tanque elevado y control de la carga hidráulica.

ÍNDICE-gráficas

49	Grafica No 3.1. Grafica para obtener la dilución (S) en función del número de Froude densimétrico y la profundidad.
91	Grafica No 6.1. Se muestra la variación del gasto descargado al incrementarse la carga hidráulica.
91	Grafica No 6.2. Se muestra la variación de la altura del chorro de salmuera contra el gasto descargado.
93	Grafica No 6.3. Se muestra la variación del Froude Densimétrico contra la altura del difusor.
93	Grafica No 6.4. Se muestra la variación de Froude Densimétrico contra la altura del chorro adimensionalizada con la altura del difusor.
94	Grafica No 6.5. Se muestra la variación de la altura total del chorro de salmuera contra el gasto descargado mediante difusores con diámetros nominales de $\frac{1}{2}$ " y $\frac{3}{8}$ " así como alturas de difusores de 5cm, 20cm y 40cm.
95	Grafica No 6.6. Grafica que muestra la variación del Froude Densimétrico contra la altura del chorro adimensionalizada con la altura del difusor, considerando dos diámetros de difusor.
96	Grafica No 6.7. Grafica del Froude densimétrico contra la altura del chorro adimensionalizada con el diámetro del difusor.
97	Grafica No 6.8. En la grafica se observan cinco rectas de la altura total del chorro para cada diseño de difusor probado, excluyendo los difusores que realizan su descarga de manera horizontal.
98	Grafica No 6.9. Grafica que permite comparar las áreas o superficies teñidas por cada tipo de difusor.
99	Grafica No 6.10. En esta gráfica se muestra el área en planta para cada tipo de difusor contra el gasto descargado.
100	Grafica No 6.11. Grafica que permita comparar la eficiencia de los difusores, partiendo de la Grafica No 9, solo que ahora visto en % - Eficiencia.
120	Grafica No a3.1. Grafica que muestra la variación lineal entre el peso específico y la concentración de la mezcla salina.

AGRADECIMIENTOS.

Al **M.I. Jesús Martín Caballero Ulaje** por brindarme la oportunidad de trabajar con el dentro de los proyectos que ha desarrollado y por tenerme la confianza en el desarrollo de los mismos. Gracias por ser mi asesor y enseñarme muchas cosas como la honestidad, rectitud y paciencia con la que debemos conducirnos a través de la vida. Y por último gracias por apoyarme a través de estos últimos años.

Al **Dr. Gerardo Hiriart Le Bert** por invitarnos a trabajar dentro del proyecto IMPULSA IV "Desalación de agua de mar con energías renovables", por ser un gran ser humano y por ser un gran ejemplo a seguir.

Al **Ing. Jorge Leonel Ángel Hurtado** por todo su apoyo y consejos en el desarrollo de esta tesis así como por ser un gran amigo dentro del laboratorio.

Y a todas las personas que colaboraron para el desarrollo del proyecto, como la estudiante de Ingeniería Civil **Miriam Guadalupe López Chávez** a las **Biólogas Blanca Estela López O. y Erika Gómez P.** Ya que para lograr los objetivos establecidos dentro del proyecto, solo se pudieron llevar a cabo con la colaboración de todos los integrantes de manera conjunta haciendo a la vez un gran equipo de trabajo, al cual estoy orgulloso de haber integrado.

Por último a todos los profesores y amigos que me enseñaron y apoyaron en mi estancia dentro de la facultad.

DEDICATORIA.

A Dios por darme la oportunidad de crecer en una gran familia.

A mi papá, aunque se que el no se encuentra físicamente aquí, de cualquier manera ve y sabe lo que estoy haciendo, por lo que pienso que el ahora esta muy orgulloso de mi.

A mi mamá por estar en las buenas y en las malas con nosotros (por tener la función de ser madre y padre a la vez), y que solamente gracias a su incondicional apoyo pude terminar mi carrera.

A mi hermano por tolerarme tanto tiempo y por ser un gran ejemplo de rectitud y honestidad.

A Miriam por compartir buenos y malos momentos en estos últimos años conmigo así como aguantarme durante tanto tiempo, y por ser un gran ejemplo académico.

Al Caco, al Rame, al Ruso y la Yury por compartir muchísimas experiencias con ustedes esperando que así sea toda nuestra vida.

A mis primos Jesús Mora, José Francisco, Juan Crisóstomo y Carlos Alberto, los Varela; a mis primas Rocío, Sandra, Loula, Ximena, Claudia, Sandy, Viry, Xitlaly, así como a toda la familia por compartir muchos momentos de la vida conmigo ¡los quiero mucho!

Al resto de amigos y amigas que siempre han estado conmigo y han querido compartirme sus experiencias y momentos agradables.

1. INTRODUCCIÓN

La investigación que se llevó a cabo, tiene como principal objetivo disminuir el impacto ambiental generado por las descargas de salmuera en el fondo marino producto de la desalación, para lograr lo anterior se hace la propuesta del uso de diferentes diseños de difusores con la finalidad de que en el ambiente marino se presente una dilución y mezclado más rápido y eficiente entre la salmuera y el agua de mar, para que los efectos perjudiciales que se presentan en la zona de descarga, específicamente en la flora y fauna marina, sean los menores posibles.

Para poder lograr lo anterior, se fijaron dos objetivos muy particulares, el primero fue conocer el comportamiento de una descarga de salmuera en agua estanca, haciendo uso de diferentes difusores; y segundo, hacer la comparación del comportamiento que presentan las diferentes condiciones de descarga entre los diferentes diseños.

Dentro del desarrollo de la tesis, se hace un breve recorrido por diversos temas de interés dentro de la desalación, haciendo mención de la importancia que tiene la desalación de agua de mar en la vida actual, para mitigar la gran escasez que hay del vital líquido en ciertas regiones del mundo, generalmente debido a los grandes periodos de sequía que se presentan, así como la sobre explotación de los recursos hídricos renovables, o simplemente porque ciertas regiones cuentan con características físicas y climatológicas muy particulares.

Por otro lado se toca el tema de los diferentes procesos por los cuales se puede desalar el agua de mar, se analizan también los impactos ambientales ocasionados por llevarse a cabo la misma; seguido de esto se hace una revisión de las diferentes formas de verter la salmuera en los cuerpos receptores de agua, específicamente al mar; hasta finalmente introducirnos en el tema de la modelación hidráulica, donde, dentro de otros aspectos se aborda de manera muy breve las diferentes técnicas de visualización de flujos como gran auxiliar para comprender y analizar mejor el fenómeno en estudio.

Cabe señalar que algunas aplicaciones importantes de la modelación física para el presente trabajo, fue el observar el comportamiento real de las plumas de salmuera en el fondo marino, así como observar la dilución que presenta la misma dentro del mar, reiterando que todo esto se pudo llevar a cabo solamente gracias a la modelación hidráulica.

1. 1. DISPONIBILIDAD DEL AGUA

La tierra tiene aproximadamente 1,386 millones de kilómetros cúbicos de agua (Mkm³). De esta gran cantidad de agua, el 97.5% es agua salada y el resto es agua dulce. Si se desglosan los 34.7 Mkm³ de agua dulce (o sea, el 2.5%), el 69% se encuentra congelada en los casquetes polares y en ciertas regiones montañosas (y por lo tanto de uso imposible), el 29.9% se localiza en acuíferos subterráneos, el 0.9% se localiza en la atmósfera, y solamente el 0.3% (que corresponde aproximadamente a 0.104 Mkm³) esta distribuida en ríos, lagos, arroyos, acuíferos, embalses, etc. Los cuales están en consideración de ser utilizables sin limitaciones técnicas ni económicas. (Fuentes D. M., et al 2003)

Lo que se conoce como ciclo hidrológico terrestre (evaporación-formación de nubes-precipitación-escurrimiento) es el responsable de que existan los recursos hídricos renovables (el periodo de renovación de los hielos polares es de aproximadamente 10,000 años, y de los acuíferos es de aproximadamente 17 años, cuando estos se extraen a una velocidad superior a la recarga, este se considera como recurso hídrico no renovable). El valor medio de los recursos hídricos renovables mundiales se calcula en 42,750 km³/año, lamentablemente este valor es muy variable con el espacio y el tiempo.

En la siguiente tabla se muestra la distribución por continente así como de ciertos países como dato significativo de la gran irregularidad de la distribución del agua en el planeta.

País/Continente	Anual (Km³)	Per cápita (m³/hab)
Alemania	96	1,165
España	110.3	2,707 *
Francia	180	3,355 *
Irlanda	47	13,187
Noruega	384	87,691
Rusia	4,312.70	29,115
EUROPA	6,142.90	
Canadá	3,287	90,767 *
Estados Unidos	2,930	6,902 *
México	345	4,416 *
NORTE AMÉRICA	6,562	
Argentina	270	20,707 *
Brasil	6,220	45,039 *

CENTRO Y SUR AMERICA	10,338	
Argelia	13.87	460
Egipto	2.8	779 *
Nigeria	----	2,198
ÁFRICA	3,988.10	
China	2,800	2,127 *
Emiratos Árabes	0.15	64
Japón	547	3,362 *
Indonesia	----	12,596 *
ASIA	12,686.50	
Nueva Zelanda	313	89,400
OCEANÍA	1,539.30	

Tabla No 1.1. Recursos hídricos anuales renovables locales y Per cápita de diversos países así como por continentes. Fuente: Shiklomanov, I. (1999) y WRI (1999). Los datos señalados con *, son valores actualizados procedentes de FAO (2007) y para el caso de México, CNA (2008).

De la tabla anterior se puede observar, que del 0.3% del total de recurso hídricos en el mundo, el 50% solo se localiza en 6 países, los cuales son: Brasil, Canadá, Rusia, Estados Unidos, China e India.

Por lo que podemos concluir que hay una mala distribución espacial y temporal de los recursos hídricos alrededor del mundo.

Ahora bien, el crecimiento de la población juega un papel importante de acuerdo con la disponibilidad de agua dulce en el futuro. A principios de Julio del año 2007 la población del mundo fue de 6,700 millones de habitantes. De acuerdo con el Departamento de Asuntos Económicos y Sociales de las Naciones Unidas (DESA), proyectan a la población del mundo para el año 2050 con 9,200 millones de habitantes, según la variante media, (United Nations, 2007).

Como es bien sabido, la vida humana depende del agua dulce, por lo que, la Organización Mundial de la Salud (OMS) establece un mínimo de 150 litros por persona por día para mantener un límite de higiene que no permita la transmisión de enfermedades infecciosas. De estos, tan sólo 0.75 litros es el mínimo necesario a beber (lo normal es 2.5 litros), y el resto es necesario para cocinar, lavar, ducharse, etc. (Al-Gobaisi, 1997).

En un país en el que se cuenta con una disponibilidad per cápita de 1,000 m³ de agua dulce, este se considera que tiene un estrés hídrico el cual

impide su desarrollo (Al-Gobaisi, 1997). En la actualidad 26 países sufren problemas de escasez de agua, (alrededor de 300 millones de personas), por lo que para el año 2050, se estima que al rededor de 66 países se encuentren afectados por la escasez (2/3 de la población mundial aproximadamente), (Medina, J. A. 2003).

Además, la disponibilidad de recursos no implica que su calidad o disponibilidad permita su simple uso, poniendo como ejemplo que hay 1,500 millones de personas que dedican de 3 a 4 horas diarias a conseguir agua (Intermón 1998), generalmente esto pasa en países africanos y asiáticos, también podemos destacar regiones como la India donde hay una concentración de más de 60 millones de personas.

1.2. DISTRIBUCIÓN DEL AGUA EN MÉXICO

Hablando un poco sobre México, podemos decir que cuenta con casi dos millones de kilómetros cuadrados de territorio, que además actualmente recibe del orden de 1.51 billones de metros cúbicos de agua en forma de precipitación. De esta, el 72.5% se evapotranspira y regresa a la atmosfera, el 25.6% escurre por los ríos y arroyos y el 1.9% restante se infiltra al subsuelo y recarga los acuífero, de manera que anualmente el país cuenta con 465,000 millones de m³ de agua dulce renovable (disponibilidad natural media). Sin embargo su distribución espacial es irregular, ya que en el 42% del territorio, ubicado principalmente en el norte, las precipitaciones medias anuales son inferiores a los 500 mm, teniendo como ejemplo Baja California donde se presentan 202 mm al año (CNA, 2008) y más cerca al río Colorado, no llega a los 50 mm. Por el contrario, en un 7% del territorio, existen zonas con precipitaciones medias anuales superiores a los 2,000 mm, como es el caso de Tabasco donde se presentan 2,410 mm (CNA, 2008) o lugares donde se registran lluvias mayores a los 5,000 mm. Generalmente, el 67% de las lluvias se presentan en cuatro meses del año (en verano), (CNA, 2008) por lo que en México existe una mala distribución temporal del agua. Es evidente que existe un desequilibrio hidráulico en nuestro país además de que los asentamientos humanos no corresponden a la disponibilidad de agua, teniendo como resultado una mala distribución espacial: la disponibilidad media anual en el país es de 465,000 millones de m³/año, ahora bien, en el altiplano y la mesa del norte habita el 60% de la población (aproximadamente 60 millones de habitantes), y en esta región sólo se cuenta con el 12% del agua (56,626 millones de m³/año). El análisis anterior nos indica que cada habitante dispone de 944 m³/año en esta región, y tal como se menciona en el párrafo anterior, disponibilidades menores a 1,000 m³/año/habitante implican un estrés

hídrico que puede llegar a impedir un buen desarrollo, (Fuentes D. M., et al 2003).

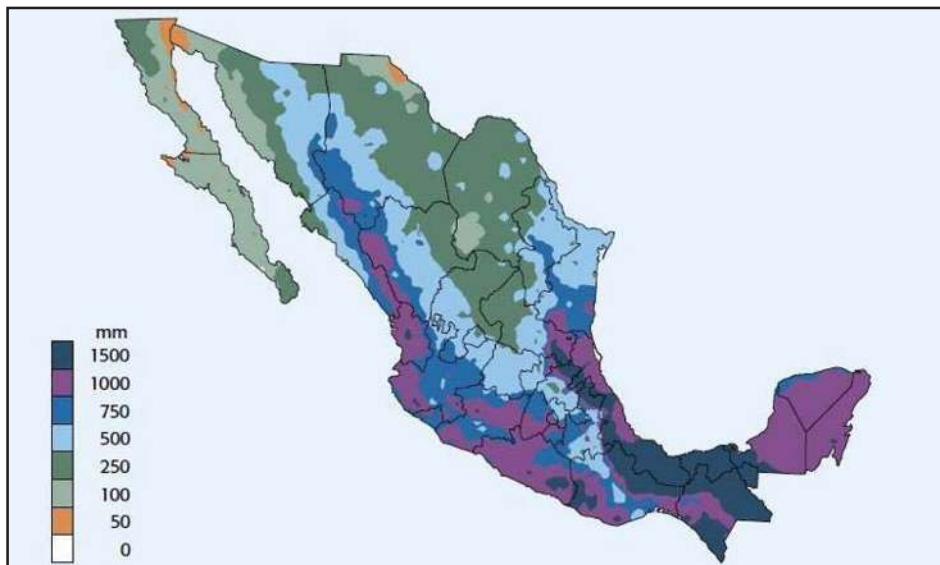


Figura No 1.1. Distribución de la precipitación media mensual histórica en México, (CNA, 2007).

En la República Mexicana se han identificado cerca de 653 cuerpos de agua subterráneos distribuidos en todo el territorio nacional, de los cuales 104 están sometidos a sobreexplotación, suministrando estos aproximadamente el 60% del agua necesaria para todo uso en el país. Debido a esto, la reserva de agua subterránea en los últimos 40 años ha perdido por sobreexplotación, del orden de 60 km³ y se sigue mermando a un ritmo de 5.4 km³/año. Esta sobreexplotación ha conllevado a la intrusión salina en 17 acuíferos costeros ubicados en los estados de Baja California, Baja California Sur, Sonora, Sinaloa, Nuevo León, Coahuila, Colima y Veracruz. (CNA, 2008).

Además, en la parte del noroeste del país hay un gran crecimiento poblacional derivado de varios factores sociales (como la migración), además de un gran desarrollo industrial debido a que esta región se localiza en la frontera con la economía más grande del planeta, por lo que se ha formado un pasillo industrial importante entre las dos naciones, provocando un aumento sustancial en el consumo de agua en esta zona, en la cual este recurso se tensiona altamente y no se dispone de él en suficientes cantidades.

Si hacemos un análisis profundo de los problemas que actualmente se presentan en el país, bien cabe mencionar que México cuenta con más de 11,000 km de litorales, aproximadamente el 68% de estos corresponde a

las costas e islas del Océano Pacífico y Golfo de California, y el 32% a las costas, islas y cayos del Golfo de México y mar Caribe. Además la zona marítima mexicana cuenta con 500,000 km² de plataforma continental; 16,000 km² de superficie de estuarios y cerca de 12,500 km² de lagunas costeras. Lo anterior, junto a derechos sobre amplias zonas marítimas y aprovechando el potencial de los acuíferos salobres intercontinentales (superficiales y subterráneos) para producir agua potable, le puede asegurar a México una gran riqueza potencial en cuanto a disponibilidad de agua se refiere, (Fuentes D. M., et al 2003).

Por todo lo anterior, la desalación de agua de mar, se ofrece como un recurso hacia el futuro que puede ayudar significativamente a paliar la escasez de agua.

2. ANTECEDENTES

2.1. IMPULSA IV

La Universidad Nacional Autónoma de México a través de su Instituto de Ingeniería lleva a cabo el Proyecto de Investigación Multidisciplinaria de Proyectos Universitarios de Liderazgo y Superación Académica, Proyecto IMPULSA IV "Desalación de agua de mar con energías renovables". Este proyecto fue creado en el año 2005, estableciéndose tres metas específicas: Primero desarrollar soluciones para el problema de escasez de agua en el noroeste de México, que sean eficientes económica, social y ambientalmente (IMPULSA IV, 2008). Para lograr este propósito se desea incluir el uso de energías renovables. Como segunda meta se tiene el formar un grupo de Ingenieros e Investigadores expertos en los temas de desalación, quienes puedan ser capaces de transformar los conocimientos científicos en soluciones aplicadas y con un alto grado de conocimiento en el tema de las energías renovables. Y por ultimo, se desea transmitir el conocimiento y la experiencia a la sociedad, a través de cursos, libros, seminarios, participación en proyectos, etc. (Alcocer S. M. *et al.* 2008)

Dentro de la dirección de este proyecto se encuentra el Dr. Gerardo Hiriart Le Bert quien ha hecho extensiva la invitación a la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo para hacer uso de las instalaciones del Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería Civil por resultar estas apropiadas para el objeto del presente proyecto.

2.2. ASPECTOS DE LA DESALACIÓN

Desde tiempos muy remotos, ya se hablaba de una posible "desalación", podemos iniciar haciendo mención a la Biblia, donde se nos habla de un primer proyecto de desalación, que fue realizado por Moisés en un lugar llamado Mei Mara en el desierto Sinai, donde introdujo una pieza de madera amarga dentro de agua salada, la cual se transformo en agua potable (Einav R. *et al.* 2002). Posteriormente, a lo largo de la historia antigua podemos observar hombres dedicados a dicho esfuerzo, como son: Tales de Mileto, Demócrito, Plinio, Laguna (medico de Carlos V) y Aristóteles (Valero A. *et al.* 2001). Quien este último hablaba de aquello que hacia inservible el agua de mar para poder regar los campos y calmar la sed; este filósofo observando la naturaleza captó los principios físicos para separar el agua y las sales en los que se basan las tecnologías modernas de la desalación (Torres M. 2004), por lo que en la época griega clásica, es donde se definen los principios para la separación del agua y las sales.

El primer reporte científico, describe una tecnología propuesta para la desalación de agua de mar que fue publicado por Thomas Jefferson, en la Secretaria de Estado de América, en 1791 (Jefferson T. 1791).

Entrando en el siglo XIX se puede hablar de una instalación desaladora de naturaleza no estable, esta era una planta de destilación solar en una explotación minera "Las salinas de Chile" (Hanbury W. T. et al. 1993). Su rendimiento era muy pequeño (20 m³ producidos en una extensión de 4,000 m²), pero era la primera forma de obtener agua dulce para el abastecimiento de la población minera en aquel lugar tan remoto y árido. Posteriormente, en el año de 1884 se fabrica por primera vez un evaporador para un barco aprovechando la energía residual del vapor de salida de su caldera.

Durante la Segunda Guerra Mundial, fueron utilizados diversos inventos portátiles de desalación por varias tropas armadas (Einav R. et al. 2002).

Debido al bajo rendimiento energético que se tenía de la energía solar y al alto consumo de energía que se requería, motivó a buscar otras alternativas de desalación. Las primeras investigaciones de membranas para desalación provienen de los años 30, donde Ferry las recopila en 1936 y las clasifica de acuerdo al material utilizado en dichas membranas (natural, de malla porosa, cobre, celofán, etc.). Pero las primeras experiencias de membranas donde se tiene un rechazo de sales aceptable son de Reid y Breton en la Universidad de Florida en 1953, que obtuvieron un rechazo del 98% con membranas planas de acetato de celulosa. Posteriormente Loeb y Sourirajan en 1960 mejoraron este tipo de membranas. Ya en los años 70, el material de las membranas se sustituye por poliamida aromática que a principios de esta década aparecen para aguas salobres. Posteriormente en 1972 aparece la primera membrana de este tipo para agua de mar la cual aumentaba un rechazo de sal de hasta un 99%. (Valero A. et al. 2001). Para el año de 1979, se presenta una crisis del petróleo muy importante que trajo consigo la búsqueda por disminuir el consumo específico, por parte de la industria de la desalación (Torres C. M. 2004).

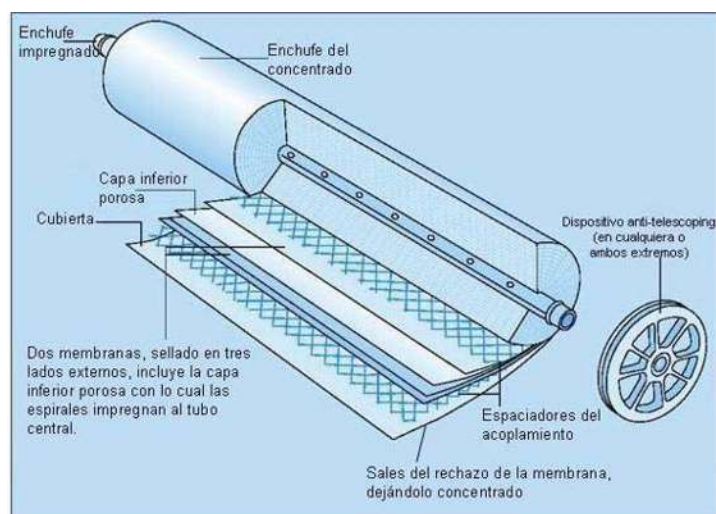


Figura No 2.1. Membrana permeable que se utiliza en el proceso de ósmosis inversa.

A raíz de la crisis del 79, ya no cabían mejoras dentro de los procesos de evaporación, por lo que, es cuando se produce un cambio de proceso hacia la Ósmosis Inversa, lo que sirvió para desarrollar plenamente la industria de las membranas hasta extender su empleo de forma masiva dentro del mercado, esto trajo consigo rebajas en los costos de inversión como de operación, por lo que, la Ósmosis inversa desplazó a las antiguas plantas desalinizadoras por ser estas obsoletas, y se logró también un mayor uso del agua desalada alrededor del mundo (Torres C. M. 2004).

2.3. CASOS INTERNACIONALES DE DESALACIÓN

Para el año 2004, la capacidad total instalada alrededor del mundo era de aproximadamente 32 millones de m³/día. Sumando el agua de mar y el agua salobre, la industria de la desalación tiene un importante peso en Oriente Medio con un 60%, seguido por los siguientes países: USA (16%), los Países Árabes Mediterráneos (6%), España (5%), Italia (2%), otros miembros de la Unión Europea (3%) y finalmente el resto del mundo (8%) (Torres C. M. 2004).

Respecto del número de unidades instaladas, el primer lugar lo ocupa Estados Unidos, ya que cuenta con un gran número de plantas de pequeño tamaño en comparación con las plantas de Oriente Medio, y ocupando el segundo lugar se encuentra Arabia Saudita.

En cuanto a tecnologías, las de destilación abarcan el 52%, las de ósmosis inversa con 38%, y el restante 12% lo ocupa principalmente la Electrodiálisis y el resto de los procesos de desalación.

a) Oriente Medio y Norte de África (MENA)

En Oriente Medio, a medida que transcurren los años, se observa un incremento muy importante en cuanto a la cantidad de agua desalada, cabe señalar que para la capacidad instalada en esta región, esta está muy por encima de su baja densidad demográfica. Por ejemplo, en los Emiratos Árabes Unidos, en los últimos años han doblado su capacidad de desalación para una población no excesivamente alta.

b) América

La desalación en los Estados Unidos de América, esta centrada en los estados de California, Texas y Florida, debido a la gran zona árida donde están ubicados dentro de su país (con sequías cada vez más frecuentes en esta zona). Además de que en esta región se prevé un aumento demográfico del 45% para el año 2025 (Gleick, P. H. 1998). Cabe señalar que es aquí, donde se ha tenido el mayor crecimiento del número y capacidad de instalaciones durante los últimos años en el mundo, casi todas ellas de Ósmosis Inversa potabilizando aguas de contenido salobre.

c) Asia y Oceanía

También podemos hablar de Japón y Corea, las cuales tienen su propia tecnología que compite dentro del mercado mundial, al contrario de lo que pasa en Australia y China, que si bien tienen su propia tecnología, esta no la exportan.

Los recursos disponibles en esta zona son muy variados, ya que en algunos países de esta región se cuenta con una gran disponibilidad hídrica, esto debido a la baja población en alguno de ellos, y en otros a su elevada pluviometría, por lo que se puede decir que los problemas de agua en esta zona son muy localizados, como por ejemplo en China donde se localizan zonas altamente pobladas acompañadas de una mejora en el nivel de vida.

La situación actual en la India es muy importante en el tema de la desalación, donde hay más de 200,000 poblaciones con agua no potable, de ellas alrededor de 50,000 tienen problemas de salobridad (con niveles

salinos de hasta 4,000 ppm) con un impacto de alrededor de 60 millones de personas. Además hay numerosos pueblos con un censo medio de 500 a 1,500 habitantes en zonas montañosas ó en deltas de grandes ríos, en los cuales el suministro de agua potable es crucial. En este país se han instalado cientos de pequeñas plantas de ósmosis inversa y electrodialisis, con capacidades de 10 a 30 m³/día destinadas para consumo local (Prabhakar S. et al, 1997). Sólo existen 2 plantas de destilación por múltiple efecto con capacidad de más de 10,000 m³/día para suplir procesos industriales, pero se planean instalar grandes plantas desaladoras.

d) Europa

Con respecto a los países Europeos, España es el país más desarrollado, ya que a finales del año 2006 contaba con 950 instalaciones desaladoras en funcionamiento, con una producción total de 2.06 millones de m³/día (DBK, 2007). Por otra parte, la desalación sólo es representativa en islas del mediterráneo, ya que en algunas de ellas sufren continuas sequías y no cuentan con ningún río importante como es el caso de Chipre, que cuenta con dos pequeñas plantas de Destilación súbita por Efecto Flash y dos plantas más de Ósmosis Inversa, con una capacidad de 60,000 m³/día (Echaniz J. et al, 1997). Italia por otra parte es menos importante en cuanto al porcentaje de aportación al consumo, pero se debe resaltar que la capacidad total instalada es comparable con la española.

Grecia y Turquía tienen también pequeñas plantas de Ósmosis Inversa generalmente utilizadas para el abastecimiento de las islas del mar Egeo.

Finalmente, Alemania y Austria que si bien no desalan, cuentan con plantas de reutilización de aguas residuales o de producción de agua ultrapura para procesos industriales, sin utilizarse para el consumo humano.

2.4. DESALACIÓN ACTUAL EN MÉXICO

Hablando específicamente de México, podemos mencionar que actualmente en diversos estados de la República Mexicana funcionan diversas plantas desaladoras, pero muchas de ellas enfrentan ciertos problemas. En el país tenemos algunos casos en los que las plantas ni siquiera operan, como por ejemplo, en el caso de Quintana Roo, en Xcalak, cerca de Chetumal e Isla Contoy, aquí existen plantas de Ósmosis Inversa que prácticamente están abandonadas, ya sea por la falta de refacciones (que en la actualidad para este proceso mas del 50% del equipo instalado es de importación), o sencillamente porque en estas comunidades nunca falta agua. (Fuentes, D.M. et al 2003).

A continuación se presenta una tabla, en la cual se puede apreciar el número de plantas desaladoras instaladas en el país, su capacidad instalada, así como la capacidad a la que operan (censo llevado a cabo hasta Diciembre del 2001).

Estado	Plantas desaladoras	% Nacional	Opera		Capacidad instalada m ³ /día	Capacidad que opera m ³ /día
			Si	No		
Baja C. Norte	10	5.80%	7	3	9,540	8,040
Baja C. Sur	38	22.20%	32	6	8,979	3,346
Campeche	2	1.20%	2	0	3,120	2,132
Coahuila	7	4.10%	2	5	78	31
Durango	24	14.00%	9	15	650	374
Guerrero	4	5.80%	2	2	2,000	900
Nuevo León	2	5.80%	2	0	325	325
Oaxaca	1	5.80%	1	0	13,478	13,478
Q. Roo	76	5.80%	57	19	27,058	23,266
SLP	1	5.80%	1	0	60	5
Sonora	5	5.80%	4	1	471	80
Tamaulipas	1	5.80%	1	0	1,728	363
Total Nacional	171	5.80%	118	53	67,487	52,340

Tabla No 2.1. Inventario de plantas desaladoras por estado, capacidad instalada y capacidad a la que operan (Fuentes, D.M. et al 2003).

Como se puede apreciar en la tabla anterior, México cuenta con una capacidad instalada de 67,487 m³/d (781.1 lt/s), pero debido a que el 31% de las plantas no opera por diversas circunstancias, ya sea por los elevados costos de mantenimiento, por la necesidad de refacciones de importación así como de la falta de personal calificado, en México realmente se desala alrededor de 52,340 m³/d. El estado que cuenta con la mayor capacidad instalada y número de plantas es Quintana Roo, el cual representa el 44% del total nacional.

En la tabla siguiente se muestra la distribución de las plantas desaladoras en el país, pero aparecen de manera desglosada por el tipo de proceso por el cual llevan a cabo la desalación.

Estado	Plantas desaladoras	Proceso				Solar experimental
		OI	CV	MSF	Solar	
Baja California	10	3	4	1	2	0
Baja California Sur	38	32	3	0	2	1
Campeche	2	2	0	0	0	0
Coahuila	7	7	0	0	0	0
Durango	24	24	0	0	0	0

Guerrero	4	4	0	0	0	0
Nuevo León	2	2	0	0	0	0
Oaxaca	1	1	0	0	0	0
Q. Roo	76	75	1	0	0	0
SLP	1	1	0	0	0	0
Sonora	5	4	0	0	1	0
Tamaulipas	1	1	0	0	0	0
Total Nacional	171	156	8	1	5	1

Tabla No 2.2. Plantas desaladoras por estado y por proceso de desalación (Fuentes, D.M. et al 2003).

El proceso más utilizado en nuestro país es la Ósmosis Inversa. Los usos para el cual están destinadas básicamente son tres; Primero, el 53% de las plantas desaladoras instaladas (90 plantas) son para uso turístico, estas son plantas pequeñas instaladas en hoteles, las cuales cuentan con una capacidad instalada de 26,942 m³/d (311.81 lt/s); Segundo, el 35% son de uso municipal (61 plantas) que cuentan con una capacidad instalada de 18,403 m³/d (231 lt/s); Y finalmente, el 12% restante (20 plantas) son para uso industrial, con una capacidad instalada de 22,143 m³ (256.3 lt/s). (Fuentes, D.M. et al 2003).

Es evidente que en nuestro país ya se lleva a cabo la desalación desde hace algunos años, aunque esta sea a escala muy pequeña en ciertas regiones, como las zonas turísticas. El potencial de la tecnología de desalación es y lo será en mayor medida en un futuro próximo para el abasto de poblaciones, como lo es en la ciudad de Ensenada, Baja California; o en La Paz, en Baja California Sur.

3. ASPECTOS FUNDAMENTALES

3.1. DESALACIÓN

La desalación es un proceso por el cual el agua de mar puede convertirse en un recurso hídrico perfectamente aprovechable, tanto para el consumo humano, como para el riego y usos industriales.

El agua pura en estado líquido prácticamente no se encuentra en la naturaleza. Lo que llamamos agua es en realidad una disolución de diversas sales en agua. En la naturaleza encontramos el agua en los tres estados (sólido, líquido y gaseoso), de estos, sólo el hielo y el vapor de agua puede considerarse que es agua químicamente pura, pero, en estado líquido, en realidad lo que denominamos agua son distintas disoluciones naturales que varían, desde las aguas muy finas de manantial de montaña de 0.2 gramos de sal por litro, hasta los 35 gramos del agua de mar y los más de 45 gramos de las salmueras.

El agua para consumo humano no debe, ni tener más de 0.5 gramos por litro ni ser agua destilada. En ambos casos no son provechosos para el organismo. Por lo tanto, si queremos obtener agua potable a partir del agua del mar (agua de 35 gramos por litro) tendremos que separar las sales que contiene hasta llegar al agua potable (menor a 0.5 gramos por litro). Básicamente en esto consiste la desalación de agua de mar, (Torres M. 2004).

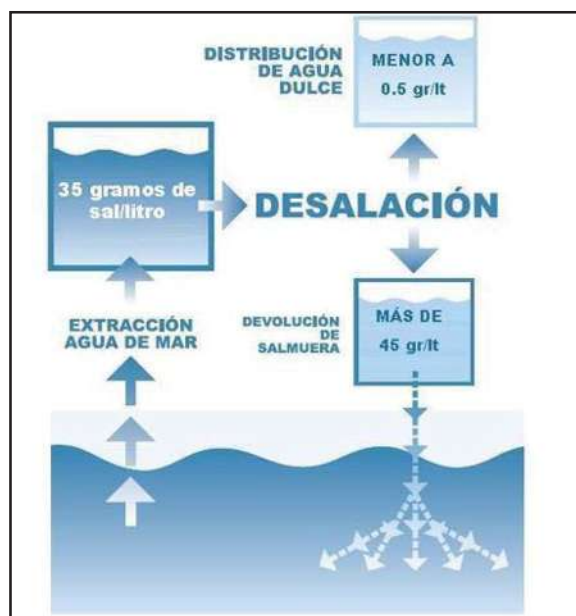


Figura No 3.1. Desalación de agua de mar (Torres C. M. 2004).

En el Anexo 1 se muestran los rangos de salinidad de los diferentes tipos de agua así como la salinidad media de los mares y océanos.

Desde el punto de vista termodinámico, la desalación de agua se puede obtener aplicando la energía necesaria para poder separar las sales que la misma contiene. Por lo que la cantidad de energía necesaria para lograr la desalación y siguiendo el camino inverso del proceso de desalación, midiendo la energía que se desprende en la disolución de sales en agua pura, puede representarse por la formula de El-Sayed y Silver, (1980).

$$W_{\min} = R * T * Lna_w$$

Donde:

$W_{\min}$ = Es la energía mínima desprendida en el proceso de la mezcla (kWh/m³).

R = Es la constante universal de los gases ($R=0.082$ atm 1/K mol).

T = Definida como la temperatura absoluta de la mezcla ($T=\text{Temperatura } (^{\circ}\text{C})+273.15$).

a_w = Es la actividad de los electrolitos que componen la disolución salina, este tiene un valor cercano a la unidad para aguas marinas.

Como esta actividad depende fuertemente de la concentración de dichos electrolitos (es directamente proporcional a la molalidad de los constituyentes tanto iónicos como no iónicos), la energía mínima desprendida en el proceso y por lo tanto la necesaria para desalar, depende de la concentración del agua de aporte: por ejemplo, para un agua bruta media del mar de 3,500 ppm de total de sólidos (TDS), con una temperatura de 25° C, dicha energía es de 0.88 kWh/m³, por lo que esta baja hasta los 0.3 kWh/m³ en el caso de que el agua tenga una concentración de 15,000 ppm. (Valero et al 2001).

Lamentablemente ningún proceso tiene el carácter de reversibilidad total que implica que pudiéramos desalar agua salada con costos energéticos tan bajos, esto nos conduciría a que tuviéramos un proceso extremadamente lento y cerca del equilibrio, algo que es imposible de materializar físicamente. La tecnología actual solo permite desalar a un costo energético al menos cinco veces mayor al mínimo para cada concentración (esto principalmente a que existen rozamientos, fricciones, flujos de calor que no son convertibles totalmente en trabajo, etc.)

3.1.1. DIFERENTES PROCESOS DE DESALACIÓN

En la segunda mitad del siglo 20, surge un incremento en los estándares de vida de los países desarrollados, que trajo como resultado un incremento en la demanda del uso del agua por día, así como un incremento de uso en la industria (Einav R. *et al.* 2002), y por otra parte, sabiendo que el insumo principal en la desalación es el combustible, las diversas crisis del petróleo han conllevado a buscar nuevas tecnologías de desalación así como encontrar su buena eficiencia.

Existen diversos procesos de destilación, todos basados en el mismo principio físico y buscando el mismo fin, lograr la separación del agua y las sales disueltas para obtener agua potable.

Las técnicas más comunes para desalación de agua están basadas en su mayoría en dos procesos, evaporación y posterior condensación del vapor, y separación por membranas, pero cabe señalar que también existen los procesos por cristalización e intercambio iónico.

3.1.1.1. PROCESOS POR EVAPORACIÓN

Dentro de los procesos por evaporación, existen diferentes sistemas, estos los podemos diferenciar por la forma de recuperar el calor de condensación del vapor (Torres C. M. 2004). A continuación se mencionan y describen los diferentes procesos de desalación existentes que actualmente se utilizan aplicando la técnica por evaporación:

a) Destilación súbita por efecto flash (MSF)

La desalación obtenida por destilación, consiste en un proceso de evaporación, en combinación con una central eléctrica. Para obtener vapor que no contenga sales, es necesario llegar a una evaporación súbita (esta evaporación es irreversible), para esto se requiere la utilización de una cámara flash; posteriormente, el vapor se condensa.

Dentro de los procesos de evaporación, es el más utilizado en el mundo, sobre todo en Oriente Medio ya que tiene como ventaja una gran eficiencia cuando el agua presenta alta salinidad, temperatura y contaminación.

Pero por otro lado, este proceso tiene una gran desventaja, su consumo específico, o sea, la cantidad de energía consumida para producir 1m³ de agua desalada, es considerablemente más alto comparado con otros

procesos. Además de un alto costo de operación, su costo de instalación no es mas bajo que otros procesos de desalación.

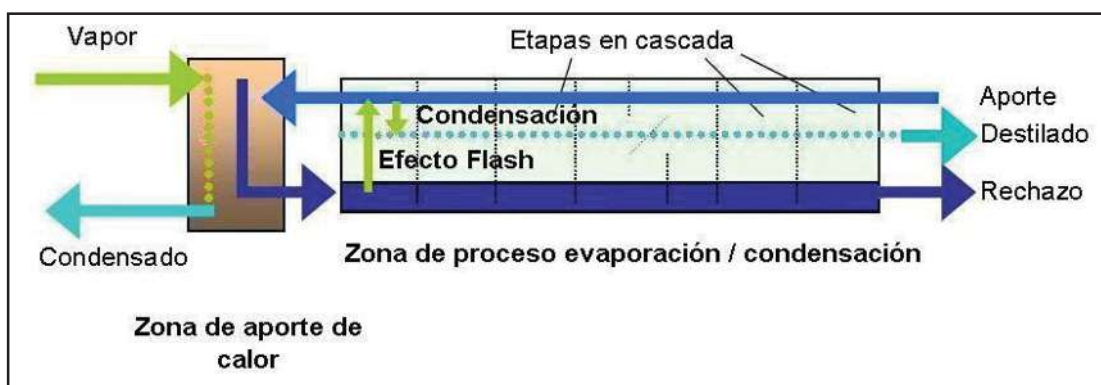


Figura No 3.2. Esquema del funcionamiento del método llevado a cabo mediante evaporación súbita por efecto flash. (Valero et al 2001).

b) Destilación por múltiple efecto (MED).

En este proceso la evaporación se produce de manera natural, esto transcurre en una cara de los tubos de un intercambiador aprovechando el calor latente desprendido por la condensación de vapor que transcurre en la otra cara del mismo. Usualmente este proceso se usa en combinación con una central eléctrica (Einav R. *et al.* 2002).

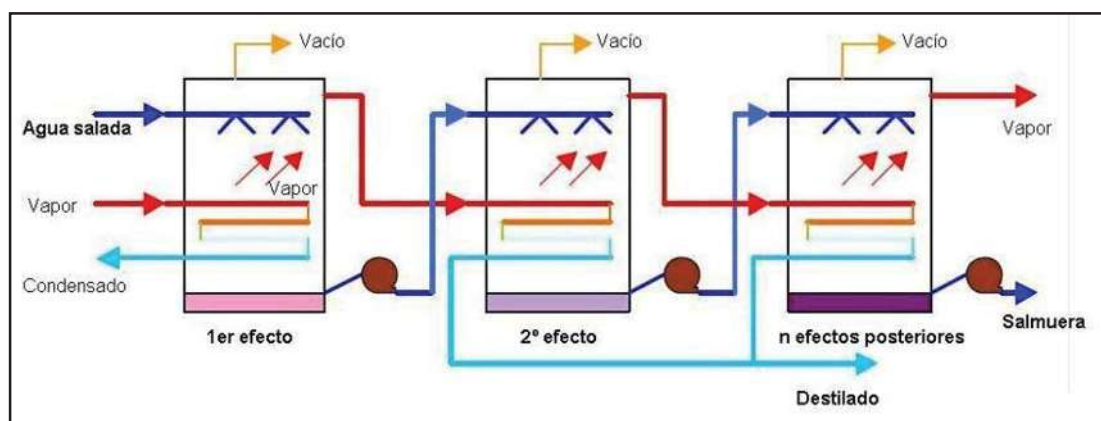


Figura No 3.3. Representación de cómo se realiza la destilación por múltiple efecto (MED) con evaporadores horizontales (HFF) (Valero et al 2001).

c) Compresión térmica de vapor (TVC).

El agua destilada en este proceso se obtiene, de la misma manera como se lleva a cabo en la Destilación de Múltiple Efecto (MED), pero a diferencia de esta, el TVC utiliza una fuente de energía térmica diferente,

utilizando compresores térmicos (termocompresores), que consumen vapor de media presión.

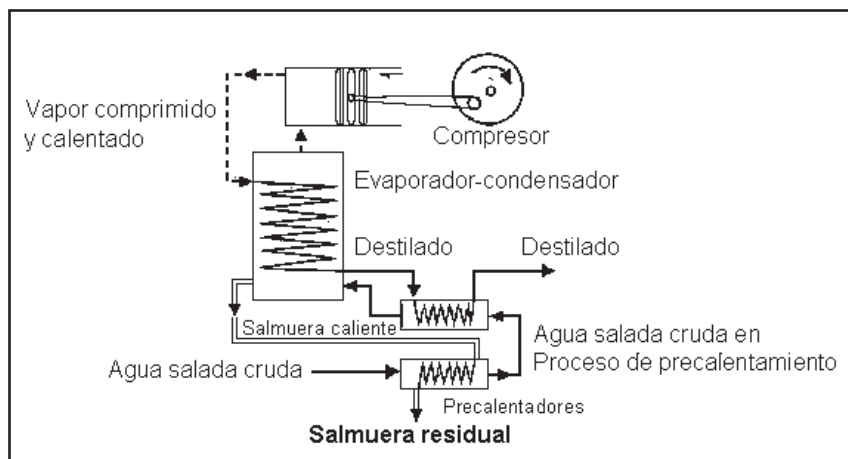


Figura No 3.4. Esquema del funcionamiento de una planta por termocompresión de vapor. (Arreguín Cortes 2003).

d) Compresión mecánica de vapor (CV).

En este proceso se evapora el agua salada, en un lado de la superficie de intercambio, posteriormente se comprime lo suficiente para que condense del otro lado y así pueda mantenerse el ciclo de destilación de agua salvando las pérdidas del proceso y la elevación de la temperatura de ebullición del agua salada respecto a la pura.

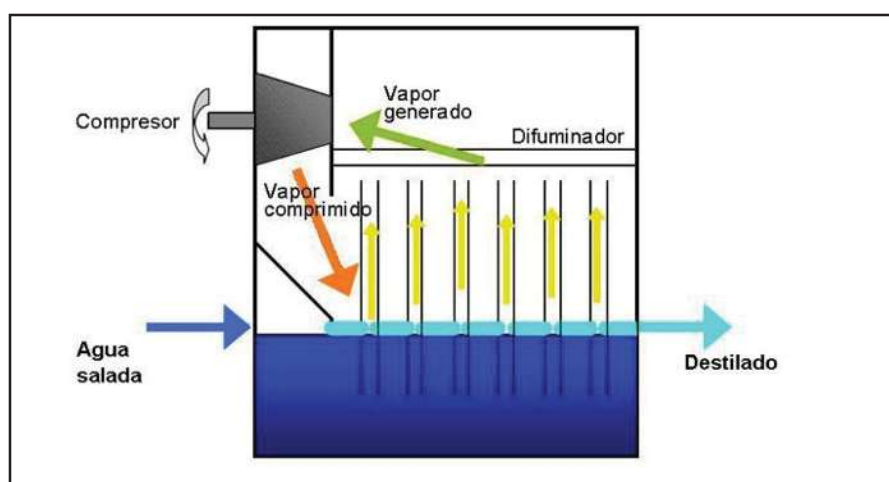


Figura No 3.5. Diagrama que muestra claramente el funcionamiento del método por compresión de vapor (CV) con evaporador de tubos verticales (VTE). (Valero A et al 2001).

3.1.1.2. PROCESOS POR MEMBRANAS

Los procesos con membranas han venido en aumento en su aplicación en el tratamiento del agua para la industria, debido a diversas ventajas cuando son comparados con procesos alternativos, estas ventajas son el bajo requerimiento de energía; también el proceso es continuo, lo que permite un control automático y una operación estable, así como bajos costos de mantenimiento. Actualmente las membranas continúan evolucionando bastante, ya que están mejorando continuamente su capacidad y funcionamiento, así como también los requerimientos de presión los cuales cada vez son más bajos (García O. C. 2008). A continuación se mencionan los diferentes procesos que utilizan el sistema por membranas:

a) Destilación por membranas

Este es un proceso combinado de evaporación y filtración. Este proceso consiste en calentar el agua salada para mejorar la producción de vapor, esta agua es expuesta a una membrana (membrana hidrófoba) que tiene como función permitir el paso del vapor, pero no del agua. Después de atravesar la membrana, el vapor se condensa sobre una superficie más fría, obteniendo así agua desalada. Ya en estado líquido, esta no puede retroceder atravesando la membrana, por lo que es colectada y conducida hacia la salida.

b) Ósmosis inversa (OI)

Es el proceso de desalación más eficiente en cuanto a términos de consumo de energía y costo (Winston W. et al. 1992) (Altman T. 2000). Se lleva a cabo mediante membranas, las cuales son semipermeables y su función es separar dos soluciones de diferente concentración.

El proceso de osmosis inversa funciona de tal manera que, cuando dos soluciones se unen a través de una membrana semipermeable (esta tiene como función permitir el paso del agua, pero no de las sales), existiendo una circulación natural de la solución menos concentrada para igualar las concentraciones finales, con lo que la diferencia de alturas obtenida, se traduce en una diferencia de presión llamada osmótica. Por lo que si agregamos una presión externa (mediante un equipo presurizador) que sea mayor a la presión osmótica de una disolución con respecto a la otra, el proceso se puede invertir, haciendo circular agua de la disolución más concentrada y purificando la zona con menor concentración, obteniendo agua de pureza admisible (Valero A. *et al.* 2001).

La gran ventaja que tiene esta técnica con respecto de las demás esta en que el consumo eléctrico específico es el menor de los estudiados hasta ahora (6-8 kWh/m³), pero se puede aprovechar la energía en la salmuera que es rechazada a alta presión para rebajar esa cifra hasta por debajo de 3 kWh/m³.

Sin embargo, las limitaciones tecnológicas asociadas a las membranas con algunos tipos de aguas marinas impide su implantación total en el resto del mundo (Valero A. *et al.* 2001).

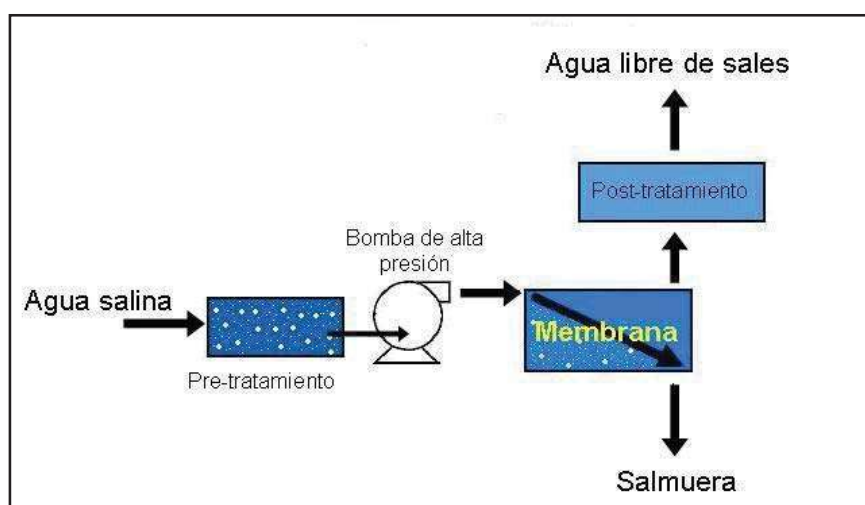


Figura No 3.6. Diagrama de flujo del funcionamiento de un sistema de Ósmosis Inversa. (Arreguín, C. *et al.* 2000).

c) Electrodialisis (ED)

Este proceso también utiliza membranas semipermeables con el objetivo de llevar a cabo una desmineralización del agua salobre.

El proceso de electrodialisis consiste en utilizar membranas selectivas al paso de los iones positivos y negativos. En lugar de separar el agua de la dilución, reteniendo los iones salinos como ocurre en la ósmosis inversa, en la electrodialisis se crea un campo eléctrico al que se somete el agua salada, provocando que los cationes y los aniones emigren hacia sus respectivos electrodos. Si en el camino encuentran estas membranas selectivas, los iones pasarán o quedaran retenidos, dejando zonas intermedias y alternativas entre las membranas donde se concentra el agua (rechazada) y donde se obtiene el agua dulce.

Esta técnica compite con la ósmosis inversa en la desalación de agua salobre, generalmente cuando esta tiene un alto contenido de sílice, ya que con la ósmosis se obtienen menos rendimientos.

La desventaja de esta técnica es que actualmente no se puede utilizar para desalar agua de mar (Torres C. M. 2004).

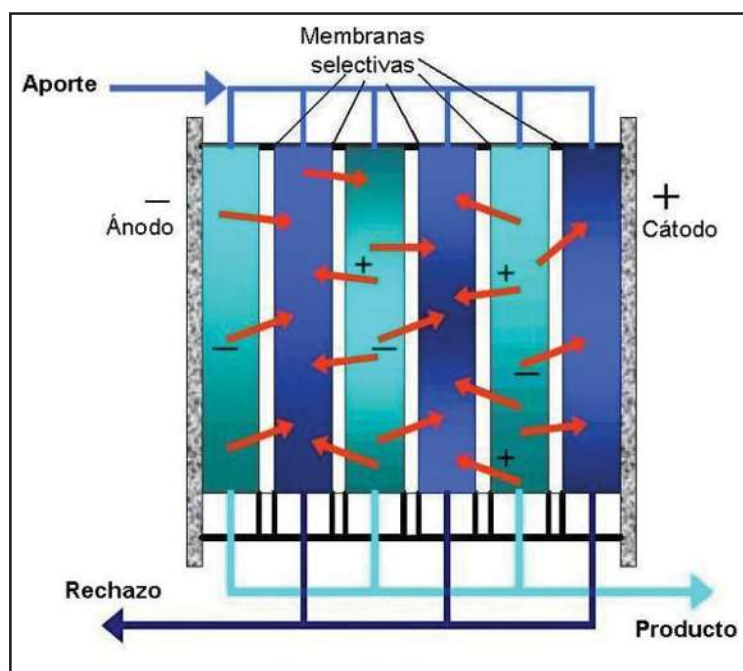


Figura No 3.7. Proceso llevado a cabo por electrodiálisis (ED), (Valero A et al 2001).

3.1.1.3. PROCESOS MÁS SIMPLES

Existen otras técnicas de desalación, por lo general, estos procedimientos son utilizados a menor escala, algunas de estas han sido desplazadas a través del tiempo debido a la evolución que han tenido tanto los procesos de evaporación y las de membranas, así como una mayor producción de agua en algunas de ellas, por otro lado, alguna de las siguientes técnicas, no sirven para la desalación de agua de mar, por lo que su uso se limita a agua con bajas concentraciones de sales, a continuación se describen estos métodos:

a) Destilación solar

El uso de la energía solar resulta ser el ideal para la producción de agua potable en zonas áridas y aisladas de poblaciones importantes. Su gran ventaja, es que el coste de consumo de energía es prácticamente nulo además de una escasa inversión monetaria. Pero, la baja rentabilidad de

esta reside en la baja producción por metro cuadrado de colector, esto es, una producción de unos cuantos litros al día en condiciones climatológicas favorables, por lo que en lugares con un alto consumo de agua dulce, no es practica esta técnica.

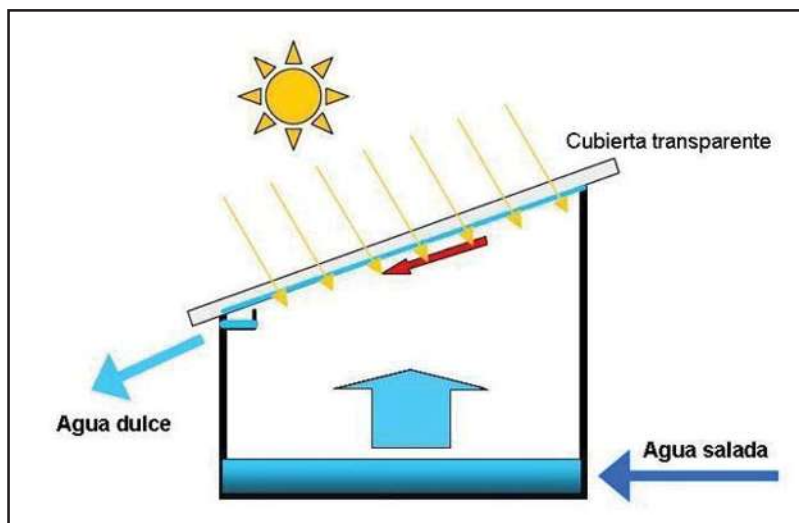


Figura No 3.8. Esquema muy simple de un colector solar para llevar a cabo la destilación solar.
(Valero A et al 2001).

b) Congelación

Este proceso consiste en congelar el agua y posteriormente fundir los cristales de agua pura formados, obteniendo así, agua dulce, independientemente de la concentración del agua inicial. Este proceso parece relativamente fácil, pero para su uso industrial, tiene grandes problemas, esto debido al aislamiento térmico del frío que se requiere.

c) Formación de hidratos

Este método está basado en el principio de la cristalización, este consiste en obtener, mediante la adición de hidrocarburos al agua de mar, hidratos complejos en forma cristalina, con una relación molécula de hidrocarburo/molécula de agua del orden de 1/18 (Torres, 1999) El rendimiento energético es mayor que el método de destilación, pero también tiene su desventaja, ya que tiene una gran dificultad tecnológica en cuanto a la separación y lavado de cristales para llevarlo a una escala industrial.

d) Intercambio iónico

Para llevar a cabo este proceso, se utilizan resinas de intercambio iónico, estas son sustancias insolubles, que actúan intercambiando iones con la sal disuelta si estas entran en contacto. Esta técnica proporciona agua de gran calidad si la concentración de sal es menor de 1gr/lit.

Este proceso se utiliza a nivel industrial en las plantas de tratamiento de aguas para el ciclo de vapor de centrales térmicas, ya que su uso para agua de mar y agua salobre implica un coste considerablemente alto.

3.1.2. CALIDAD DEL AGUA REQUERIDA

La calidad del agua requerida depende básicamente del uso que se le quiera dar a esta. Por ejemplo, para ciertos procesos industriales se puede utilizar agua con 5,000 ppm, pero por el contrario, para centrales eléctricas el límite máximo permisible es ínfimo.

Dentro de la agricultura, ciertos cultivos pueden tolerar agua hasta con 2,000 ppm, aunque esto depende mucho de las características de la tierra, clima, composición del agua salobre, método de riego y fertilizantes aplicados.

Por otro lado, para consumo humano, el límite es de 1,000 ppm, aunque en climas excesivamente cálidos un aporte extra de sales puede ser beneficioso para el cuerpo humano.

La normativa oficial mexicana referida a la "salud ambiental, agua para uso y consumo humano-límites permisibles de calidad y tratamiento a que debe someterse el agua para su potabilización" (NOM-127-SSA1-1994), establece los límites permisibles de calidad y los tratamientos de potabilización del agua para uso y consumo humano, que deben cumplir los sistemas de abastecimiento públicos y privados que la distribuyan dentro del país. La presente Norma, divide los parámetros en:

- a) Bacteriológicos
- b) Organolépticos
- c) Químicos
- d) Radioactivos
- e) Físicas
- f) Organolépticas

La siguiente tabla nos muestra una comparación de los parámetros más significativos del agua según la Norma Oficial Mexicana y la Organización Mundial de la Salud:

PARAMETRO	NOM-127-SSA1-1994	OMS (guía)
Cloruros (como Cl ⁻)	250 mg/l	250 mg/l
Sulfatos (como SO ₄ ⁼)	400 mg/l	250 mg/l
Nitratos (como N)	10 mg/l	50 a 100 mg/l
Sodio (máximo como ión)	200 mg/l	200 mg/l
TDS	1,000 ppm	1,000 ppm
pH	6.5 a 8.5	6.5 a 8
Dureza total	500 como CaCO ₃	200 mínimo como mg/l Ca ^{**}
Alcalinidad	-	-
Magnesio	-	-

Tabla No 3.1. Comparativa de los parámetros mas importantes del agua según la Norma Oficial Mexicana y la Organización Mundial de la Salud.

En la tabla anterior se muestran diferentes parámetros, estos están relacionados con la salinidad del agua y el consumo humano.

3.1.3. CALIDAD DEL AGUA PRODUCTO

Como ya se mencionó con anterioridad, existen diferentes formas en que se ve afectado el ambiente marino debido a la desalación, ocasionado por la calidad de los residuos desechados por una planta desaladora, esta calidad depende de diversos factores, entre los que se encuentran: El tipo de proceso utilizado para desalar, la tecnología utilizada, la calidad del influente, el agua producida, los sistemas de pretratamiento, así como de los sistemas de limpieza utilizados en los equipos de la planta. En la mayoría de estos procesos utilizan cloro o sus derivados para limpiar las tuberías y algunas partes de los equipos e incluso en los procesos de pretratamiento. Algunos de estos elementos son tóxicos para la vida marina (Arreguín C. et al 2000).

Podemos mencionar que la calidad del agua desechada, puede contar con algunas de las siguientes características:

- a) Concentración de sal que varía de 46,000 hasta 80,000 ppm.
- b) Un incremento de 15°C, sobre la temperatura del agua de mar.
- c) Niveles de turbiedad superiores a los del influente.

- d) Niveles de oxígeno por debajo del influente. (generalmente en plantas destiladoras).
- e) Compuestos químicos del proceso de pretratamiento como cloruro férrico, dióxido de sulfuro, dióxido de carbono, polielectrolitos, bisulfuro de sodio y polímeros, que tienen origen en los floculantes, anticrustantes, anticorrosivos y biocidas.
- f) Otros compuestos químicos de los procesos de lavado de las tuberías y membranas de ósmosis inversa, como compuestos de sodio, ácido hidroclohídrico, ácido cítrico, polifosfatos y sulfato de cobre.
- g) Compuestos orgánicos y metales que pudieran estar contenidos en el influente y concentrados en el proceso de desalinización.

3.1.4. CONSIDERACIONES MEDIOAMBIENTALES

La desalación si se observa de forma positiva, contribuye al ambiente, ya que al realizarse esta actividad se está reduciendo la explotación de las fuentes no renovables del agua potable, así como una gran contribución a la humanidad dotando a esta de agua para su consumo, especialmente en regiones donde es escasa; pero por otro lado puede causar un impacto local negativo en el ambiente.

Los diversos procesos de la desalación, pueden ocasionar cierto grado de contaminación, ya sea al ambiente, al aire, la tierra próxima y al interior de los mares. El tipo de contaminación depende de diversos factores además de que estos se presentan directa o indirectamente. Por ejemplo, la desalación es dependiente de algún tipo de energía, y de acuerdo a esto, puede ser energía fósil, energía eléctrica, etc. Según la energía empleada, es el tipo y grado de contaminación. Por otro lado también se presenta la contaminación acústica y de uso de suelo.

Cabe mencionar que puede existir un impacto ambiental provocado por la obra de toma (Hiriart L. G. 1983), y que por otro lado, toda instalación desaladora da origen a un vertido hipersalino que es devuelto al mar. Esto no quiere decir que se le añade más sal al mar, sino que se regresa de forma concentrada la que se había tomado con anterioridad. Además, las plantas que utilizan procesos por evaporación, como la MSF (Destilación súbita por efecto flash) agregan a la salmuera una turbiedad y una temperatura elevada (Bleninger T. et al 2007).

3.1.4.1. IMPACTO EN EL AMBIENTE MARINO COMO RESULTADO DE DESCARGAR LA SALMUERA AL MAR

Las nuevas instalaciones utilizan comúnmente el método de desalación por Osmosis Inversa, esta técnica trae consigo un gran rechazo de agua con una gran concentración de sal (salmuera), que es vertida generalmente al ambiente marino. (Jibril et al. 2001), como esta concentración es más densa ($\geq 50,000\text{ ppm}$) que el agua de mar ($30,000 - 50,000\text{ ppm}$), esta se precipita al lecho marino produciendo así, la formación de un sistema estratigráfico, provocando la presencia de una salinidad más alta en el fondo del mar. La presencia de una mayor cantidad de sal puede afectar a varios mamíferos bentónicos que habitualmente se encuentran en lugares estables y con una salinidad normal. (Del Bene J. V et al. 1994) (Einav R. et al. 2003).

Ahmed M. y Latteman S. comentan que las comunidades más sensibles serán las más afectadas, quizás dando como resultado la desaparición total de estas dentro de la zona de influencia de la salmuera. También comentan que la magnitud del impacto dependerá de diversos factores, como las características de la desaladora y la salmuera que estas rechazan, la localización y el área de la influencia de la descarga, así como también de la naturaleza y tolerancia de los mamíferos marinos afectados. (Ahmed M. et al. 2000) (Lattemann S. et al. 2003).

Pero por otro lado, Valero A. y otros autores dicen que la fauna marina no queda afectada significativamente por la presencia de salmuera gracias a que tienen movilidad y pueden apartarse de la zona de afectación, y que incluso hay experiencias de una mayor cuota de captura pesquera cerca de las áreas de descarga. Pero, sin embargo comentan, que hay que observar con detenimiento la flora marina existente en ciertas partes del mundo, mas específicamente las praderas de "Posidonia Oceánica" localizadas en el Mediterráneo, (Valero A. et al. 2001) que es una fanerógama marina que proporciona gran cantidad de oxígeno al agua, la cual habita entre la superficie y los 50 metros de profundidad, además de que casi 1,000 especies de seres vivos están vinculadas en algún momento de su vida a esta.



Fotografía No 3.1. Ensayo *in situ* de los efectos de los vertidos hipersalinos sobre *Posidonia oceánica*. (Antequera, M. et al 2008)

3.1.4.2. USO INTENSIVO DE ENERGÍA

Esto tiene un impacto indirecto en el ambiente, debido a la necesidad de aumentar la producción de electricidad, esto lleva consigo consecuencias ambientales, por ejemplo, al usarse energía fósil para la producción de energía eléctrica, hay una aportación a la atmósfera de Óxidos de Nitrógeno (NOx), Dióxido de Azufre (SO₂), compuestos volátiles, macropartículas, Dióxido de Carbono (CO₂), etc. (Semiat R. 2000). Por lo anterior deben asociarse las plantas de generación de energía a las plantas desaladoras. **Solamente** en el caso de que la energía eléctrica utilizada en algunos procesos de desalación (OI, ED, CV, bombeo de las MSF y MED), sea de **origen renovable**, no deberá asignarse este impacto ambiental al proceso desalador.

Actualmente, existen investigaciones muy avanzadas en nuevas membranas que requieren una menor presión de trabajo, por lo que el consumo energético es cada día menor, por lo que sería muy interesante evaluar la carga ambiental asociada a la desalación en función del consumo energético total de la planta.

3.1.4.3. IMPACTOS DE TIPO LOCAL

Cabe mencionar de manera muy somera que existen otros impactos de tipo local, como por ejemplo el uso de suelo, ya que se requiere aproximadamente de 10,000 m² para producir de 5,000 a 10,000 m³/día de agua desalada; así como también el impacto visual producto del diseño arquitectónico utilizado en esta clase de edificios; por otro lado tenemos el impacto acústico, que es generado por el uso de bombas y turbinas de

alta presión para la recuperación de energía. En este tipo de impactos solo cabe mencionarlos y no profundizar en ellos, ya que no tienen mayor importancia, debido a que generalmente las plantas desaladoras se construyen y localizan lejos de poblaciones y zonas habitadas así como de los centros turísticos.



Fotografía No 3.2. Impacto de tipo local por uso de suelo así como de tipo visual. Desaladora de Alicante, España.



Fotografía No 3.3. Impacto acústico, originado por bombas y turbinas. Desaladora de Cartagena, España.

3.2. DESCARGAS SUBMARINAS

Desde el punto de vista físico y químico, las diferencias entre el agua dulce, el agua de mar y la salmuera sólo están en la distinta concentración de sales de cada una, variando entre 0.5 gramos por litro (gr/lit) en agua

dulce, 35 gr/lit en el agua de mar y 69 gr/lit en la salmuera. A simple vista no se puede diferenciar una de otra. Son tres líquidos perfectamente transparentes, sin color ni olor, que sólo se distinguen por el sabor debido a la diferente concentración de sales en cada una.

En el proceso de desalación, por cada litro de agua que sacamos del mar, obtenemos casi la mitad de agua dulce (0.45 litros) y algo más de la mitad de salmuera (0.55 litros). Se puede entonces observar que al mar no se le añade sal, sino simplemente se devuelve la misma que tenía pero en menor cantidad de agua. (Torres M. 2004).

Existen diferentes formas de desechar la salmuera producto de las plantas desaladoras, como por ejemplo, existen las descargas en tierra firme, una de ellas son las lagunas de evaporación, otras son conocidas como inyección en pozos profundos. (Arreguín et al. 2000). También existen las descargas superficiales directamente en la costa, que son llevadas acabo específicamente al Norte de África y Oriente Medio (MENA).



Fotografía No 3.4 y fotografía No 3.5. Descargas superficiales (R.L. Doneker et al. 2007).

Otra manera de realizar las descargas de las plantas desaladoras, son desechando al mar la salmuera combinada con el agua de los sistemas de enfriamiento de las plantas generadoras de energía eléctrica, así como también, llevando a cabo las descargas con los desechos del pretratamiento o de operación de la planta. Todo esto con el fin de diluir la concentración de sales y otros compuestos químicos y disminuir la temperatura de la salmuera en algunos casos. Pero, por otro lado, deberá considerarse que la adición de sales a la descarga del pretratamiento reducirá la demanda bioquímica de oxígeno. (Arreguín C. et al 2000).

Por ultimo existe otra forma de desechar la salmuera procedente de una planta desaladora y es conocida como **descarga submarina**,

habitualmente **este vertido es el más utilizado** y estas descargas se realizan generalmente mediante emisores submarinos.

Estos emisores submarinos varían en cuanto a su forma, algunos emisores son tuberías tendidas por encima del fondo marino y alguna otras son: una o varias tuberías que van enterradas en el fondo marino. Además estas tuberías pueden terminar o rematar en un difusor o en difusores múltiples (Hiriart L. G. 1983) de estos últimos existe una gran variedad y combinaciones. Por ultimo cabe mencionar que estos difusores pueden variar en cuanto a su diseño se refiere (generalmente el difusor simple o estándar es el mas utilizado), además de que estos difusores pueden tener cierta orientación e inclinación, ya sea vertical u horizontal.

3.2.1. CLASIFICACIÓN DE LAS EMISIONES SUBMARINAS

Las emisiones submarinas se clasifican en dos grupos: los de difusor sencillo y los de descarga submarina con difusores múltiples, a continuación se hace una breve descripción de estos:

a) Descarga de salida simple. Esta consta de un tubo sumergido con una sola abertura o bien, cuando la tubería de descarga termina en un solo difusor; estas descargas generalmente se realizan bajo las condiciones siguientes:

1. Cuando las condiciones del ambiente favorecen una rápida dilución (presencia de corrientes y mareas).
2. También cuando el área disponible para la descarga de la mezcla es muy amplia.
3. Si la batimetría de la zona (características del fondo), impide la instalación de difusores (WA DOE, 1998).

De acuerdo con la Guía de Descargas de Agua de Enfriamiento en ríos, lagos y mares, de las instalaciones de procesamiento, llamada "Thermal Discharges" (Descargas Termaleas), estas descargas de salida simple se clasifican en:

- a) Horizontal
- b) Vertical

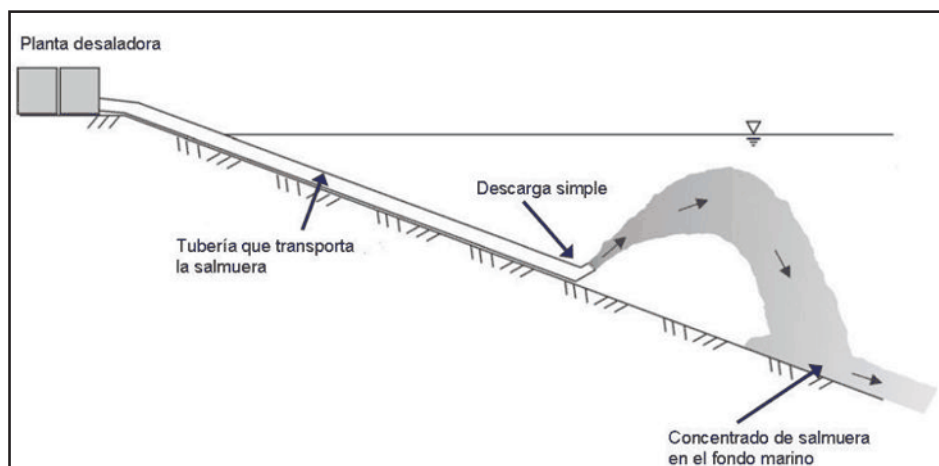


Figura No 3.9. Descarga de salida simple mediante un difusor simple o estándar. (Bleninger, T. et al, 2007).

b) Descargas de salidas múltiples. Es una estructura lineal que consiste en un tubo principal con dos o más salidas espaciadas por las cuales se descarga la salmuera en forma de turbulentos chorros a alta velocidad en el cuerpo de agua. Los inyectores pueden estar conectados a conducciones verticales o a un tubo que presenta múltiples aberturas instalado en el fondo marino (PSU 2003), típicamente son utilizados bajo las siguientes condiciones:

1. En áreas donde la dispersión de la mezcla es hiperactiva.
2. Donde los índices de la corriente efluente son más grandes de 1mgd. 1mgd (Millones de galones/día) equivale a 3,785 millones de m³/d.
3. Donde la batimetría permite la instalación de difusores.
4. Y en zonas donde generalmente la estabilidad de la pendiente bajo el agua es buena (WA DOE, 1998).

De acuerdo con la guía "Thermal Discharges", se pueden clasificar los difusores de salida múltiples de la siguiente manera:

- a) uni-direccional
- b) alternados
- c) organizado

Existe además otra clasificación de los difusores de acuerdo con el Manual de Diseño de Obras Civiles de la CFE, donde se clasifican los difusores dependiendo de la aplicación específica, tomando como referencia el ángulo de inclinación β que puede ser constante o variar de un difusor a otro. Por lo que se clasifican en:

- a) Normales si $\beta = 90^\circ$
- b) Lineales si $\beta = 90^\circ \left(1 - \frac{Y_i}{L_D}\right)$
- c) Senoidales si $\beta_i = \cos^{-1} \left(\frac{Y_i}{L_D} \right)$
- d) Logarítmicas si $\beta_i = \cot^{-1} \left(\frac{1 - \frac{Y_i}{L_D}}{\frac{1}{\pi} \log \frac{1 + \frac{Y_i}{L_D}}{1 - \frac{Y_i}{L_D}}} \right)$

Donde:

Y_i es la distancia del difusor i al centro del difusor.

L_D es la longitud del portadifusores.

El ángulo de orientación θ puede ser el mismo para todos los difusores (difusor escorado) o bien, estos pueden ir alternándose en cuanto a su dirección se refiere (difusor alternado), ver figura:

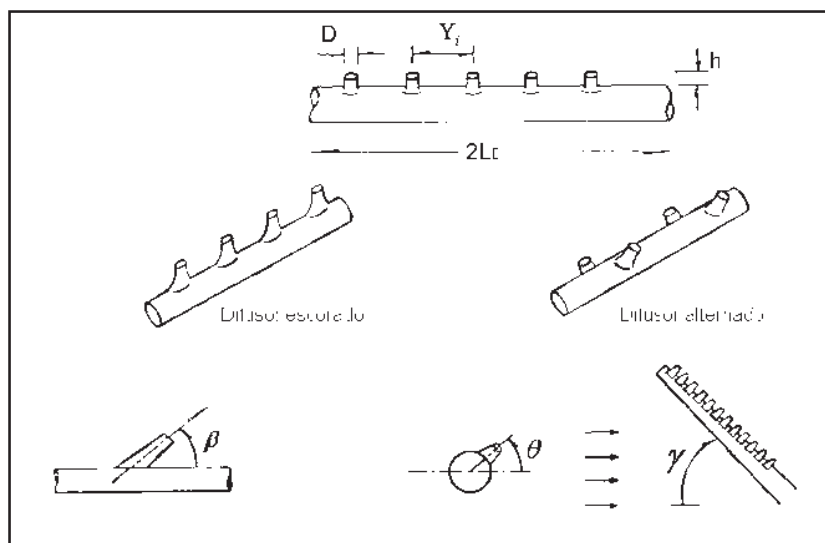


Figura No 3.10. Nomenclatura para un difusor (Manual de diseño de obras civiles A.2.14).

Donde:

β es el ángulo de orientación.

θ representa el ángulo de tendido.

Según el ángulo de tendido γ que se forma entre el eje del portadifusor y una línea de corriente, los difusores se clasifican en:

- a) Perpendiculares si $\gamma = 90^\circ$
- b) Paralelos si $\gamma = 0^\circ$
- c) Difusor amurado si $0 < \gamma < 90^\circ$
- d) Largo si $90^\circ < \gamma < 180^\circ$

3.2.2. CAMPO CERCANO Y CAMPO LEJANO.

El campo cercano se localiza en las inmediaciones de la zona de descarga (cercanía a la salida del difusor). Debido a la energía cinética y potencial de la descarga de salmuera al fondo del mar, se originan turbulencias que provocan la rápida dilución entre la salmuera y el agua marina, todo esto llevándose acabo en un espacio relativamente pequeño.

La dilución que se presenta en esta región depende de diversos factores, los cuales son: el sistema de descarga utilizado (por ejemplo: en la entrada suave de la desembocadura de un torrente se produce menor dilución que la que se presenta en una descarga superficial y, ésta a su vez es menor que la descarga producto de un difusor sumergido), de las dimensiones del difusor o dispositivo de descarga (diseño del difusor, diámetro, separación entre bocas para el caso de la presencia de salidas múltiples, distancia al fondo marino, así como la orientación de la descarga, etc.) y por ultimo dependiendo también del caudal y densidad del efluente así como de la geometría y batimetría del medio receptor.

Por otra parte el campo lejano es una zona más tranquila, donde la mezcla se sedimenta en el fondo debido a la mayor densidad que presenta la salmuera con respecto del agua de mar y esta fluye lentamente cuesta abajo sobre la pendiente del fondo marino esparciéndose lentamente o bien es arrastrada por las corrientes advectivas del lugar. Esta fase es común a todos los sistemas de vertido y las únicas diferencias que se presentan entre uno y otro son: la densidad, el espesor y ancho iniciales de la corriente de densidad que se establece. La ausencia de turbulencias importantes y el fuerte gradiente de densidad que existe en la interfaz provocan que la dilución adicional se produzca en forma muy lenta (al menos que haya presencia de corrientes submarinas). Como consecuencia, una gran área de los fondos marinos presentará salinidades similares a las que se obtienen tras la dilución en el campo cercano, **por lo que se insiste en la importancia de contar con un diseño**

adecuado del dispositivo de vertido o descarga (siendo este el caso de los difusores). (Antequera M. et al, 2008).

Para determinar cuáles fuerzas son predominantes se utiliza el número de Froude densimétrico (F_0).

3.2.3. NÚMERO DE FROUDE DENSIMÉTRICO Y DILUCIÓN S

a) El Número de Froude Densimétrico (F_0), es un cociente de las fuerzas inerciales (velocidad de la descarga) sobre las fuerzas gravitacionales y de acuerdo al “Manual de diseño de obras civiles, A.2.14: Obras de toma y sistemas de enfriamiento para plantas termoeléctricas”, la formula para obtener dicho número para un Difusor sencillo es el siguiente:

$$F_0 = \frac{V_0}{\sqrt{\frac{\Delta\rho}{\rho} gD}}$$

Donde:

V_0 Velocidad característica dada en (m/s), igual a:

$$V_0 = Q_0 \left(\frac{D^2}{4} \right)$$

Q_0 Gasto de la descarga m^3/s

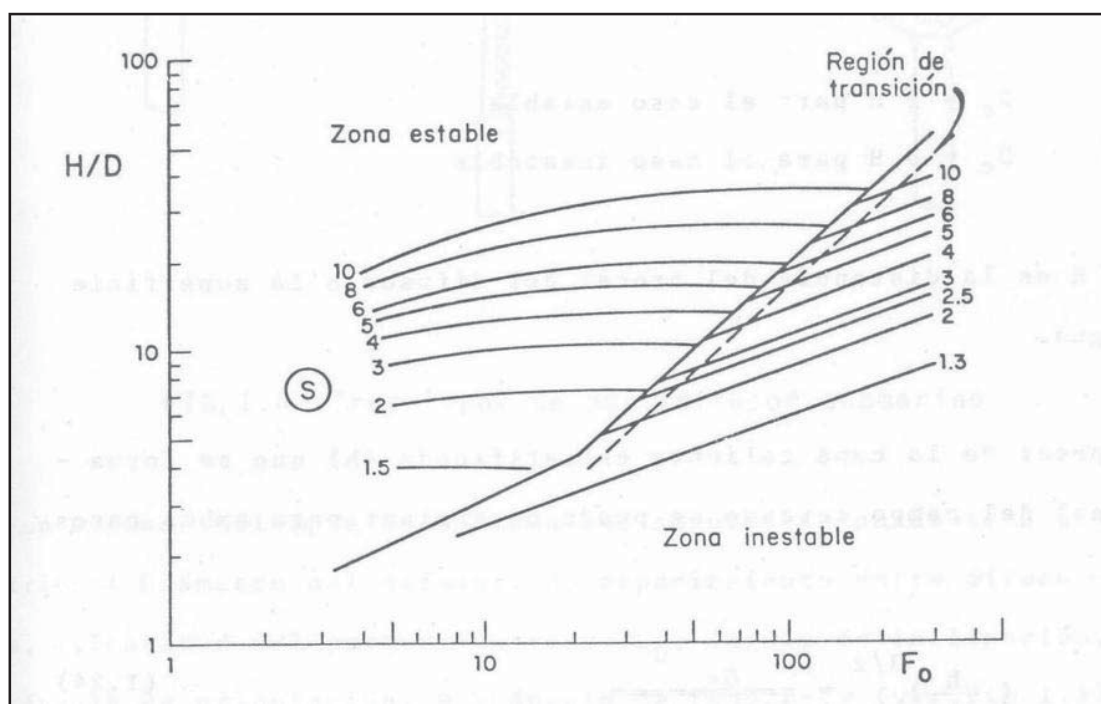
$\Delta\rho$ Diferencia de densidad entre el agua descargada (salmuera) y el agua receptora (agua de mar), igual a:

$$\Delta\rho = \rho - \rho_0$$

g Aceleración de la gravedad $9.8 m/s^2$

D Diámetro del difusor utilizado en la descarga (m)

b) Dilución (S). Así mismo se puede obtener la dilución S que se presenta entre la salmuera y el agua de mar, a partir del Número de Froude Densimétrico (F_0) y la altura H , que es la que hay entre el brocal del difusor y la superficie libre del agua. Proponiéndose la siguiente grafica:



Grafica No 3.1. Grafica para obtener la dilución (S) en función del número de Froude densimétrico y la profundidad. (Manual de diseño de obras civiles A.2.14).

3.3. MODELACIÓN FÍSICA

Es cierto que muchos de los fenómenos que ocurren en la naturaleza y específicamente dentro del campo de la hidráulica, resultan demasiado complejos el tratar de estudiarlos utilizando únicamente métodos matemáticos, debido a que el planteamiento teórico no se encuentra lo suficientemente desarrollado para establecer su estructura matemática. Por otro lado, cabe señalar que actualmente se cuenta con la modelación matemática-computacional, que se presenta como una gran herramienta en el tema de la modelación.

En la hidráulica, al referirnos a "modelo hidráulico" corresponde básicamente a un sistema que simula un objeto real llamado "prototipo", a este prototipo se le ingresa cierta información que se procesa en forma adecuada para posteriormente emplearse en el diseño, construcción y

operación de obras de ingeniería. Dicho de otra manera, un modelo físico a escala reducida (modelo hidráulico), representa a escala el objeto real o prototipo de algún proyecto. (Vergara, M. A. 1993)

Actualmente, dentro de la modelación se cuenta con técnicas muy avanzadas, hay diversos instrumentos de medición importantes, equipo generador de fenómenos a escala, diversas técnicas de visualización; permitiéndonos predecir de una manera muy precisa lo que puede ocurrir en el prototipo, todo esto llevándonos a obtener óptimos resultados en funcionalidad, estabilidad y economía de las estructuras por construir. He aquí la importancia que justifica la utilización de un modelo hidráulico.

Para llevar a cabo con éxito la modelación, es importante tener bien definidas las variables que intervienen, particulares o en grupo, lo anterior con la finalidad de validar las soluciones analíticas del problema dado, o determinar las leyes de relación entre las diferentes variables que al extrapolarlas al prototipo, nos permitan la optimización de los elementos involucrados en el sistema modelo-prototipo.

En ciertas etapas del trabajo a realizar y cuando dichas etapas se pueden describir con suficiente detalle, se pueden emplear los modelos matemáticos, que nos pueden servir y ayudar a complementar los resultados.

La aplicación de la modelación física y matemática, evidentemente tienen grandes limitantes, que dependen de la complejidad del problema, así como de la intervención de las variables y sus fronteras a tratar, por lo que en ocasiones resulta mas eficaz utilizar los modelos matemáticos.

3.3.1. TIPOS DE MODELOS

El modelo de un río, canal, puerto, laguna etc., puede ser construido con fronteras fijas o móviles, y que comúnmente son llamados: modelos de fondo fijo o modelos de fondo móvil.

a) Modelos de fondo fijo. Estos se emplean para llevar a cabo la reproducción de los fenómenos en donde la variación de niveles y las velocidades del flujo son parámetros determinantes. Pudiendo ser el caso proyectos de control de avenidas, de navegación e irrigación. También es importante realizar el estudio de fenómenos locales sobre ciertas estructuras así como conocer su comportamiento hidráulico, pudiéndose aplicar para vertedores, compuertas, obras de toma y de descarga, estructuras sumergidas, agitación de oleaje, propagación de mareas,

corrientes, etc. En donde el patrón de flujo y niveles del agua son fundamentales.



Fotografía No 3.6. Modelo hidráulico del Puerto de Veracruz con fondo fijo, localizado dentro de las instalaciones del laboratorio de hidráulica de la UMSNH.

b) Modelos de fondo móvil. Por otro lado, estos se emplean para el estudio de problemas relacionados con la estabilidad de cauces de ríos, de canales y playas. Por lo que es importante reproducir las variables del flujo combinadas con las del sedimento y la mecánica del transporte.

Podemos hacer otras dos clasificaciones, por ejemplo, cuando el modelo hidráulico presenta escalas de magnitudes lineales horizontales, verticales e inclinadas, y estas son iguales, podemos decir que se trata de un **modelo similarmente geométrico**; y que por otro lado, si se presentan por lo menos dos escalas de líneas diferentes, poniendo como simple ejemplo: una escala para la longitud horizontal E_x y otra para la longitud vertical E_y , podemos decir que el **modelo será distorsionado**, denominándose entonces a la relación $\frac{E_x}{E_y}$ como distorsión geométrica Δ , la cual se presentara mayor que la unidad. Entre las causas que nos pueden causar una distorsión, podemos mencionar:

- a) Rugosidad. Cuando la rugosidad necesaria a representar es tan pequeña que físicamente es imposible de conseguirla.
- b) Flujo. Cuando el tipo del flujo en el modelo no corresponda al del prototipo.

- c) Por razones de espacio. Cuando el modelo resulte muy grande con respecto a la superficie disponible, lo que significaría aumentar (numérica) la escala de líneas y esto ocasionando a su vez reducir la escala de las magnitudes verticales, haciéndose mas fuerte la influencia de otros fenómenos, siendo el caso de la tensión superficial que en el prototipo no es de consideración.
- d) Equipo de medición. En caso de disponer o construir cierto equipo de medición, cuyas características no permitan obtener la información correcta, esto debido a las dimensiones que puedan presentar estos equipos.



Fotografía No 3.7. En la fotografía aparece un canal de pendiente variable en el que se estudia el arrastre de sedimentos, por lo tanto se le denomina de fondo móvil.

3.3.2. SELECCIÓN DE ESCALA

Generalmente la selección de escalas lineales, tanto horizontales, E_x , y verticales E_y , se hace en forma independiente, buscando siempre que el modelo resulte lo más grande posible, siempre y cuando lo permitan el presupuesto, el espacio, el tiempo, la instrumentación, las rugosidades a reproducir así como la alimentación del agua.

También es recomendable tomar en consideración que, durante la operación del modelo, el efecto de escala sea lo más reducido posible. El **efecto de escala** se puede definir como la diferencia resultante entre las condiciones del modelo y el prototipo causadas por la imposibilidad práctica de lograr que actúen simultáneamente todas las fuerzas en el prototipo, teniendo como claro ejemplo cuando en un modelo se trabaja

con el mismo fluido del prototipo, no es posible cumplir con las condiciones de Froude y de Reynolds.

3.3.3. TÉCNICAS DE VISUALIZACIÓN Y CUANTIFICACIÓN

Es importante hacer mención de las diferentes técnicas de visualización de flujos, ya que para el desarrollo de las pruebas llevadas a cabo en la modelación hidráulica, fue necesario utilizar una de ellas, específicamente el Método de la línea de inyección conocida de otra manera como Método de inyección de tinta. Es fundamental conocer acerca de estas técnicas, ya que la aplicación de las mismas dentro de la modelación física es de suma importancia, ya que gracias a ellas podemos comprender más los fenómenos hidráulicos. Estas técnicas también pueden auxiliarnos para cuantificar áreas o volúmenes, ya que nos permiten diferenciar visualmente entre dos o más líquidos.

Gracias a la gran importancia de este tema dentro de la hidráulica, a continuación se hace mención de los conceptos más básicos de las técnicas de visualización de flujo, así como su clasificación y descripción de algunas de ellas.

Podemos iniciar mencionando que existen diversas técnicas para visualizar el comportamiento de un flujo, la utilización de éstas depende del estado del flujo, su regularidad, el movimiento relativo entre el flujo y el observador, así como su dependencia del tiempo.

a) Flujo permanente y no permanente.

Un flujo permanente es independiente del tiempo, mientras que un flujo no permanente es dependiente del tiempo. Si el flujo es constantemente o no, el patrón observado depende del movimiento relativo entre el flujo y el observador. Por ejemplo, el flujo más allá de un cuerpo que se mueve a velocidad constante en un líquido inmóvil aparece como flujo inestable a un observador que sea también inmóvil, pero constante a un observador que se mueve con el cuerpo. (Nakayama Y. et al, 2008).

b) Líneas aerodinámicas ó de corriente, líneas de trayectoria, líneas de traza y líneas de tiempo.

Una línea por todas partes tangencial a la velocidad de los elementos fluidos en cierto tiempo, se conoce como **línea aerodinámica ó línea de corriente**. La curva que demuestra donde ha estado un elemento fluido dado en horas anteriores se llama **línea de trayectoria**. Una línea

aerodinámica es una descripción Euleriana del flujo, y una línea de trayectoria es de Lagrange. En un flujo bidimensional de un líquido ideal, las líneas aerodinámicas para un observador fijo coinciden con las líneas de trayectoria. En flujo bidimensional, el espacio entre dos líneas aerodinámicas es proporcionalmente inverso a la velocidad local en el campo de flujo.

Una línea obtenida por la inyección constante de un trazalíneas fluido en una cierta posición constante en el flujo, se le llama **línea de traza**. En flujo inestable, una línea de traza no coincide con una línea aerodinámica o una línea de trayectoria.

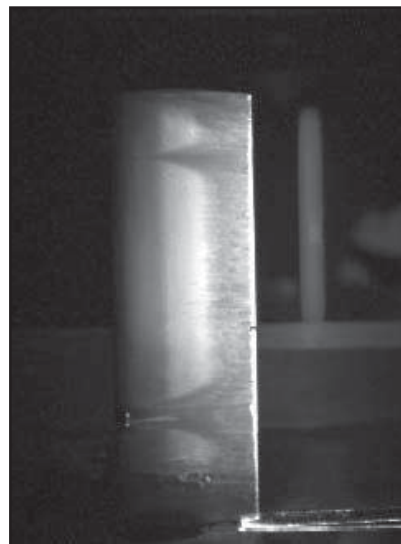
Las líneas aerodinámicas ó líneas de corriente, las líneas de trayectoria y las líneas de traza no coinciden generalmente, a excepción de que todas coinciden en la presencia de un flujo permanente. Las líneas obtenidas por la inyección instantánea de un trazalíneas de una fuente situada a lo largo de una línea transversal por la que fluye, son llamadas **líneas de tiempo**. Tales líneas son útiles en distribuciones de la velocidad y fluctuaciones del flujo. Una línea en la cual las características físicas, por ejemplo temperatura, presión o densidad, etc. En las que se mantiene un valor constante se conoce como línea de *Niveaun* o simplemente como *línea de contorno*. Estas líneas pueden ser obtenidas de diferentes maneras.

Existe una gran variedad de métodos de visualización de flujo y una gran cantidad de clasificación de ellos, estos han sido clasificados por la característica del flujo, por el fenómeno del flujo que revelan, por el método físico o químico usado para obtener la visualización, la calidad o forma de los materiales usados y de los métodos para la inyección o generación de trazalíneas, a continuación se presenta la clasificación que propone Yasuki Nakayama de dichos métodos:

A continuación se presenta una breve descripción de algunos métodos de visualización, para poder comprender mejor la utilización y aplicación de estos.

a) Método de la película de aceite.

Básicamente consiste en una mezcla de aceite y pigmento que se separa en la superficie de la prueba en el modelo. La fuerza de corte en el flujo actúa en esta película de aceite y el pigmento se convierte en un patrón de rayas. Este patrón muestra el sentido del chorro en la superficie del modelo, y puede revelar *la transición, la separación y patrones de flujo secundarios*. El método de la película de aceite tiene una gran aplicación para observar flujo permanente, y demuestra que el patrón de flujo tiempo-hecho en promedio es afectado por la fuerza centrífuga y por la gravedad.



Fotografía No 3.8. Foto que muestra el
Método de la película de aceite

b) Método de la película termosensible.

Es una película de un material especial que cambia de color o fase según su temperatura y ésta se forma en la superficie del modelo de prueba. El estado del flujo en la superficie del modelo se indica por el color o la fase de esta película. Los materiales que se utilizan para este método son el cristal líquido o la pintura termosensible.

c) Método de los penachos superficiales.

Consiste en varios penachos atados a la superficie de la prueba que se modela. Éstos indican el sentido del chorro cerca de la superficie del modelo. Las regiones *separadas* y los *flujos secundarios* se pueden detectar por la dirección y la fluctuación de los penachos.

d) Método de los penachos de profundidad.

Los penachos se atan a una cierta distancia de la superficie del modelo de prueba en puntales finos. La dirección del flujo más allá del modelo y características tales como vórtices se puede detectar por la dirección de

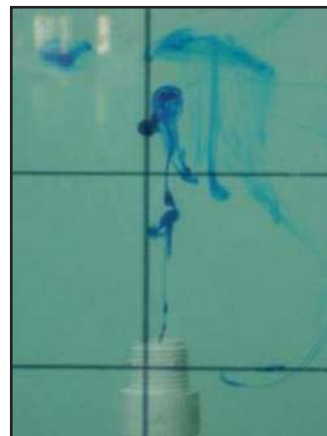
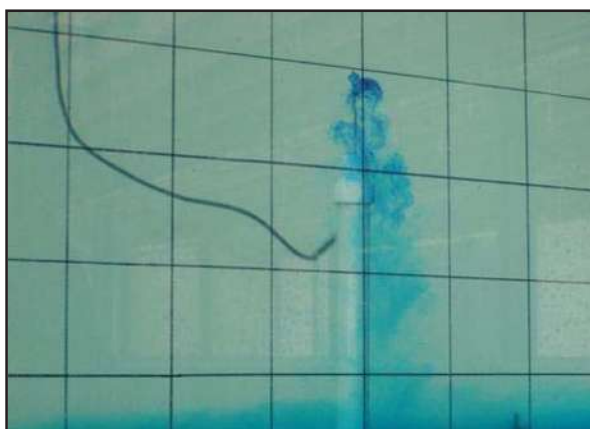
estos penachos. Los penachos superficiales a veces se utilizan junto con los penachos de profundidad.

e) Método de la rejilla del penacho.

Consiste en una gran cantidad de penachos que se colocan en una red de acoplamiento en un plano generalmente perpendicular al flujo. El flujo alrededor del modelo de prueba, su *estela* y cualquier *vórtice* que se arrastra son revelados por el patrón de los penachos.

f) Método de la línea de inyección o inyección de tinta.

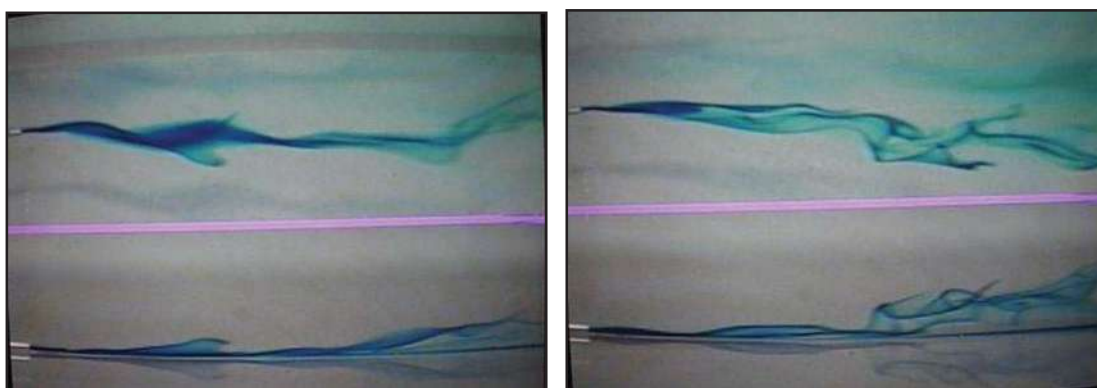
Consiste en inyectar un trazalíneas fluido continuamente en un flujo mediante tubos finos, a través de agujeros o de una ranura en la prueba del modelo. El estado del flujo es demostrado por las líneas resultantes. El trazalíneas fluido puede consistir básicamente en algún tinte o simplemente agua con algún colorante pudiendo ser este último azul de metileno o naranja de metilo, entre otros.



Fotografía No 3.9 y fotografía No 3.10. En ambas se muestra la técnica de inyección de tinta. En la foto de la derecha se puede apreciar la salida del colorante (azul de metileno) por medio de una aguja insertada por un costado de la tubería y esta a su vez colocada en el centro de la boca del tubo.



Fotografía No 3.11 y fotografía No 3.12. En la primera fotografía se muestra una red de tubos por el cual se aplica fluoresceína sal sódica que trabaja como colorante. En la fotografía de la derecha se puede observar la red de flujo que nos muestra la trayectoria de la infiltración del agua sobre una cortina de presa hecha a escala.



Fotografía No 3.13 y fotografía No 3.14. Se puede apreciar otro claro ejemplo del Método de la inyección de tinta.

g) Método de la suspensión.

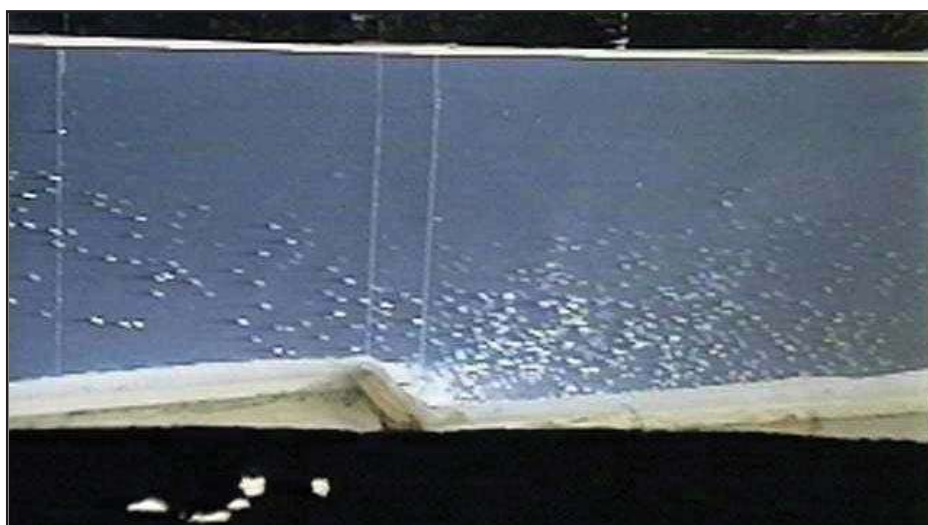
Las partículas que funcionan como trazalíneas pueden ser algún fluido o sólido, estas se distribuyen uniformemente en el líquido, generalmente antes de que se inicie el movimiento, posteriormente se sigue la trayectoria de las partículas pudiéndose observar y obtener el patrón de flujo.

h) Método del trazalíneas flotante.

El estado del flujo es examinado observando el movimiento de las partículas que se dispersan y flotan en la superficie libre de un líquido. Este método también sirve para observar líneas de trayectoria. Debe considerarse que el flujo superficial libre puede diferenciarse del que está por debajo de la superficie.

Estas partículas pueden ser de diferentes tipos:

1. Partículas plásticas con densidad semejante a la del agua, si se desea que no se sumerjan.
2. Partículas granulares semejantes a los sedimentos.
3. Partículas de sal.
4. Partículas fluorescentes, con sensibilidad especial a un tipo de longitud de onda λ , para aplicar estas partículas es necesario contar con una fuente de luz láser.



Fotografía No 3.15. Aquí podemos observar la trayectoria del flujo por medio de partículas de sal dentro de un canal en laboratorio.

i) Método de la precipitación electrolítica.

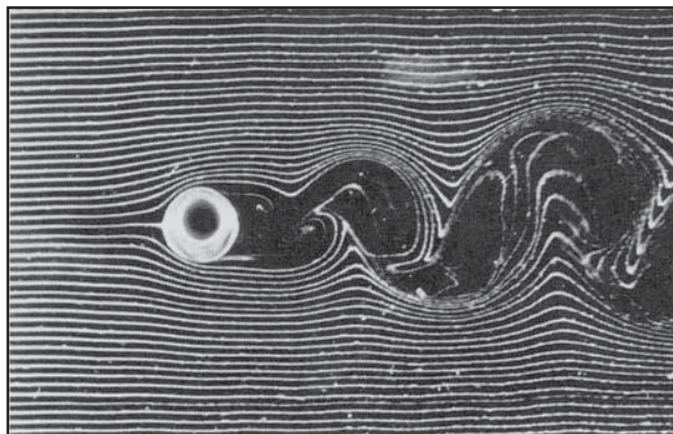
Este método es aplicable cuando el agua se utiliza como el fluido operante. El modelo tiene áreas de capas metálicas en su superficie o un alambre fino que se coloca en la corriente superior del modelo. Éstas capas metálicas son de estaño y tienen la función de actuar como un ánodo. Las partículas blancas que se precipitan se generan cerca de este ánodo por electrólisis, y éstas actúan como trazalíneas.

j) Método de las burbujas de hidrógeno.

Este método nos permite obtener perfiles de velocidad instantáneos y seguir la evolución de las estructuras del flujo.

Esta técnica consiste en la generación de burbujas de hidrógeno a partir de un alambre muy fino que es el ánodo de un circuito de corriente

directa, el cátodo comúnmente es una placa de cobre que se coloca cerca del ánodo en la corriente del agua. Cuando se aplica voltaje al circuito se produce la liberación de burbujas de hidrógeno por electrólisis y estas a su vez actúan como el trazalíneas.



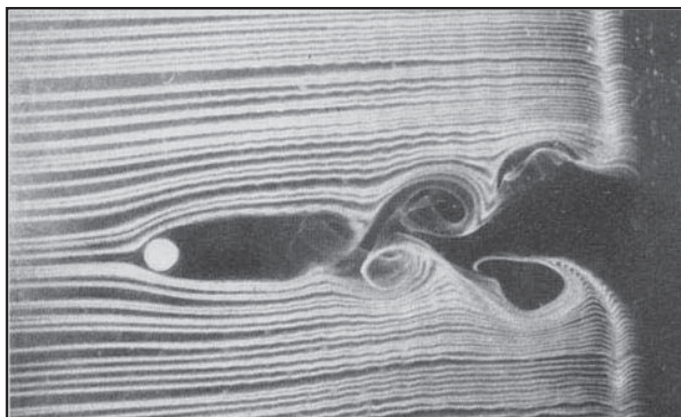
Fotografía No 3.16. En esta fotografía se puede apreciar claramente como las burbujas de hidrógeno actúan como trazalíneas.

k) Método del trazo de la chispa.

Las descargas eléctricas se producen usando una serie de pulsos de alto voltaje entre los electrodos convenientemente formados. La primera chispa eléctrica hace una trayectoria ionizada. Esta trayectoria ionizada se mueve junto con el flujo de aire y la segunda chispa eléctrica se propaga a lo largo de esta trayectoria móvil que tiene resistencia eléctrica muy baja. De tal manera, las chispas eléctricas subsecuentes se propagan a lo largo de la trayectoria ionizada de mudanza uno tras otro y remontan las líneas de tiempo del flujo de aire.

l) Método del túnel de humo.

El humo blanco se genera mediante un alambre metálico ahogado en aceite y calentado por una resistencia eléctrica. El humo generado se utiliza como trazalíneas dentro de un túnel ó tubo para así poder visualizar el flujo.



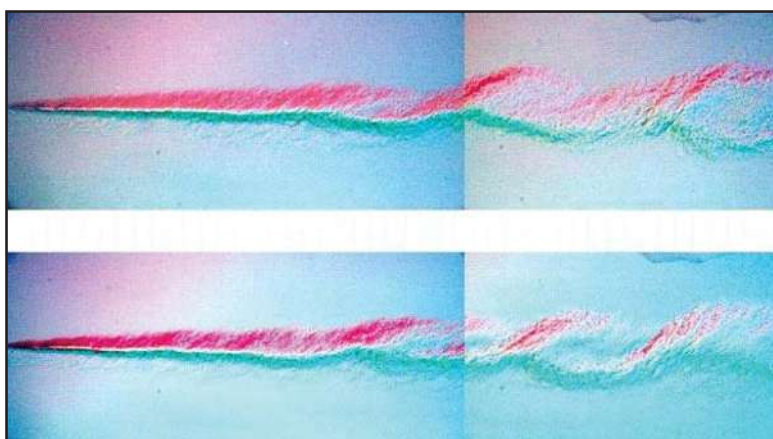
Fotografía No 3.17. Se puede observar el funcionamiento de esta técnica de visualización.

m) Método del registrador de sombras

La luz de una fuente puntual o de un haz de luz paralelo se pasa con el flujo en una sección de la prueba y se proyecta encendido a una pantalla o a una película fotográfica. El estado del flujo es indicado por el patrón del brillo.

n) Método Schlieren.

Consiste en un haz de luz paralelo que se refracta con el flujo, se enfoca encendido a un borde de cuchillo, y después se utiliza para formar una imagen en la pantalla o la película fotográfica detrás del borde de cuchillo. El estado del flujo es visualizado por un patrón brillante y oscuro de la pantalla o de la película.



Fotografía No 3.18. Imagen que muestra el método de Schlieren reaccionando al flujo turbulento. La línea rosa superior (alta velocidad) es una mezcla que contiene hidrógeno. La línea azul inferior (de poca velocidad) contiene flúor.

ñ) Método del interferómetro

Un haz de luz paralelo está partido y uno de los rayos de luz se pasa con el flujo en la sección de la prueba, después se recombina con otro rayo, que ha pasado a través de una sección del compensador. Los rayos combinados entonces forman una imagen en una pantalla o en una película fotográfica. El flujo es visualizado por el patrón resultante de la franja de interferencia. Las líneas de la equi-densidad del campo de flujo son obtenidas ajustando el sistema para dar la iluminación uniforme sobre la pantalla con aire inmóvil en la sección de trabajo. Las franjas transformadas son obtenidas en proporción con el cambio de la densidad del flujo ajustando el sistema para dar franjas paralelas en la pantalla con el líquido en la sección de la prueba en descanso.

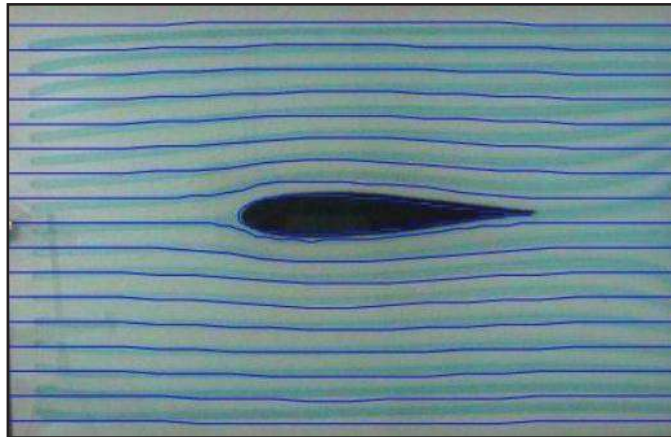
o) Método del termógrafo

Se detectan los rayos infrarrojos irradiados de la superficie de un cuerpo sólido o de un líquido y la distribución de la temperatura superficial se visualiza como patrón brillante y oscuro de las líneas de la equi-temperatura.

p) Método de flujo de Hele-Shaw.

Consiste en un modelo de dos dimensiones, la instalación está conformada por dos placas de cristal planas paralelas entre las cuales se encuentra una pequeña y en cuyo interior se introducen dos fluidos de diferente viscosidad.

Primero se introduce el fluido más viscoso el cual queda retenido entre las dos placas; después, lentamente, se introduce el segundo fluido. El flujo de un líquido viscoso que en este espacio estrecho tiene líneas aerodinámicas que coinciden con las del flujo potencial. Por consiguiente, las líneas aerodinámicas del flujo potencial bidimensional son obtenidas por la inyección continua de un tinte o burbujas de hidrógeno entre las placas. Dada la velocidad de desplazamiento del segundo fluido, se trataría de un fenómeno con números de Reynolds bajos. Sin embargo, el fluido se modela con las ecuaciones correspondientes a un número de Reynolds infinito (fluido potencial).



Fotografía No 3.19. En esta fotografía se pueden apreciar las líneas de corriente teñidas de azul, prueba realizada en una mesa de Hele-Shaw.

4. MODELACIÓN FÍSICA

4.1 HIPÓTESIS

Se cree que con el uso de diferentes diseños de difusores en el laboratorio se puede encontrar alguno que presente mayor dilución en el fondo marino al momento de realizarse una descarga de salmuera, y por consiguiente un menor impacto ambiental. Generalmente en las plantas desaladoras se utilizan difusores verticales o estándar así como difusores en forma de Y para llevar a cabo las descargas. Nosotros proponemos probar difusores con diferentes diseños, los cuales consideramos generarán una mayor dilución de la salmuera en el fondo del mar.

Se desconoce cual será el comportamiento en algunos de los difusores propuestos, pero se cree que por su diseño y forma, alguno resultará mas eficiente que el difusor vertical o estándar así como el difusor en forma de Y.

Las eficiencias de los difusores se conocerán observando el comportamiento de la pluma generada por el difusor y por consiguiente, analizando el área que ésta abarca en el fondo, vista en planta y de perfil.

4.2 OBJETIVOS DE LA MODELACIÓN

Algunas aplicaciones importantes de la modelación física para el presente trabajo fue el observar el comportamiento de las descargas submarinas de salmuera en el fondo marino utilizando diferentes diseños de difusores, así como observar la dilución de la salmuera dentro del mar. Estas observaciones se pueden llevar a cabo gracias a la modelación hidráulica, teniéndose la gran ventaja de que al trabajar a escala los costos son mucho menores que si se quisieran hacer pruebas en una instalación real, ya que es más fácil y económico manipular o hacer modificaciones al modelo que a una instalación en funcionamiento.

4.3. DISEÑO DEL MODELO HIDRÁULICO

Como primer paso en la modelación, debemos partir de los datos de la Planta Desaladora prototipo, los cuales son:

- 1.- Planta Desaladora que produce 60,000 m³/día de producto (agua desalada)
- 2.- Recuperación del 50%
- 3.- Salinidad del agua de mar de 36,250 ppm.
- 4.- Diámetro del difusor empleado para realizar la descarga de salmuera dentro del mar.

$$D = 0.75 \text{ m } \text{ ó } 30'' \text{ nominal.}$$

Clasificación de la emisión:

De acuerdo con la Guía de Descargas de Agua de Enfriamiento... "Thermal Discharges", (Millar D.S. et al, 1984), se realizara la descarga de salida simple mediante un solo difusor vertical, cuya descarga se denomina:

Descarga vertical

Y de acuerdo al Manual de Diseño de Obras Civiles de la CFE, (Hiriart, L.G., 1983), las características del difusor son:

Descarga normal con $\beta = 90^\circ$ y con $\theta = 90^\circ$

Con un ángulo de tendido $\gamma = 90^\circ$ denominado **Perpendicular porque $\gamma = 90^\circ$**

a) Cálculos básicos de la Planta Desaladora

Gasto del producto (agua desalada):

$$Q_p = \frac{60,000 \frac{m^3}{día}}{86,400 \frac{s}{día}} = .70 m^3 / s \quad \text{ó} \quad 700 \text{ l/s}$$

Por ser del 50% la recuperación de la Planta, el gasto que tenemos de la salmuera es igual al gasto del producto.

$$Q_p = Q_s = 700 \text{ l/s}$$

Velocidad de la descarga:

$$V_d = \frac{Q_p}{A_d}$$

$$Q_p = 0.70 m^3/s$$

$$A_d = \frac{\pi(D)^2}{4} = \frac{3.1416 (0.75m)^2}{4} = 0.4418 m^2$$

$$V_d = \frac{0.70 m^3 / s}{0.4418 m^2} = 1.584 m / s$$

Concentración salina de la descarga:

$$C_{\text{mar}} = 36,250 \text{ ppm}$$

Peso específico de: $\gamma = 1,036.25 \text{ Kg/m}^3$

Densidad del agua de mar: $\rho = \frac{\gamma}{g} = \frac{1,036.25 \text{ Kg/m}^3}{9.81 \text{ m/s}^2} = 105.632 \frac{\text{Kg.s}^2}{\text{m}^4}$

La concentración de la salmuera es de aproximadamente el doble del agua extraída del mar ya que del 100% del agua de mar que entra a la planta, el 50% es agua dulce desalada y el restante 50% contiene las sales propias más la de la parte desalada. Es necesario tomar en cuenta que se requiere agua como vehículo de transporta de las sales extraídas, esto se puede ver a detalle en el *Capítulo 3.1 Desalación*, por lo que tenemos lo siguiente:

C salmuera = Sal extraída al agua marina + Sal del agua de mar (vehículo)

C salmuera = 36,250 + 36,250 = 72,500 ppm

Peso específico de: $\gamma = 1,072.50 \text{ Kg/m}^3$

Densidad de la salmuera de $\rho = 109.327 \frac{\text{Kg.s}^2}{\text{m}^4}$

b) Diseño del modelo físico

Sustituyendo valores de nuestro prototipo en la formula del Número de Froude Densimétrico, obtenemos lo siguiente:

$$F_0 = \frac{V_0}{\sqrt{\frac{\Delta\rho}{\rho} gD}} = \frac{1.584}{\sqrt{\left(\frac{109.327 - 105.632}{105.632}\right) (9.81) (0.75)}}$$

$$F_0 = 3.122$$

c) Selección de escala

Debido a las dimensiones físicas del canal largo de pruebas del laboratorio y de lo práctico que resulta utilizar tubería de 1/2" de diámetro, se optó por seleccionar como el diámetro de descarga del difusor de 1/2" así como parámetro base para determinar las escalas.

D prototipo = 0.75 m (30" nominal)
D modelo = 0.5" (0.0125 m)

Escala de líneas.

$$\frac{D_{prototipo}}{D_{Modelo}} = \frac{0.75m}{0.0125m} = 1:60$$

Se puede decir que **el modelo representa al prototipo con una escala de 1:60** (hablando de modelos hidráulicos es razonable).

Para que el modelo se opere de manera adecuada, este debe tener un número de Froude Densimétrico de $F=0.584$, similar al del prototipo, esto con la finalidad de que exista una similitud hidráulica:

$$F = \frac{V_0}{\sqrt{\frac{\Delta\rho}{\rho} gD}} = 0.584$$

Despejando la velocidad.

$$Vm = F \sqrt{\frac{\Delta\rho}{\rho} gD}$$

$$Vm = 0.584 \sqrt{\left(\frac{109.327 - 105.632}{105.632}\right) (0.81) (0.75)} = 0.296m/s$$

Escala de velocidad.

$$\frac{V_{prototipo}}{V_{Modelo}} = \frac{1.584m/s}{0.296m/s} = 1:5.35$$

Para la escala de velocidades, la velocidad del modelo representa 1:5.35 con respecto al prototipo.

En cuanto al gasto de descarga (Q), este es:

$$Qm = V_{Modelo} \times A_{prototipo}$$

$$A_m = \frac{\pi Qm^2}{4}$$

$$A_m = \frac{\pi (0.0125m)^2}{4} = 0.0001227m^2$$

$$Qm = (0.2044m/s) (0.0001227m^2) = 0.000025m^3/s \quad \text{ó} \quad 0.025 l/s$$

Escala de gasto.

$$\frac{Q_{\text{prototipo}}}{Q_{\text{Modelo}}} = \frac{700}{0.025} = 1:28,000$$

En cuanto a la escala del gasto, tenemos que el gasto del modelo representa 1:28,000 con relación al gasto del prototipo.

Resumiendo

Parámetros	Prototipo	Modelo	Escala
Líneas (diámetros)	0.75 m	0.0125 m	1 : 60
Velocidades	1.584 m/s	0.296 m/s	1 : 5.35
Gastos	700 l/s	0.025 l/s	1 : 28,000

Tabla No 4.1. Escala a la que se encuentra el modelo con respecto al prototipo.

Al modelar los efectos de diferencia de densidad, se debe seguir cumpliendo con la condición de tener igual Número de Froude Densimétrico en el prototipo y en el modelo, por lo que se tiene:

$$F_{\text{prototipo}} = F_{\text{Modelo}}$$

$$\left(\frac{\Delta \rho}{\rho} \right)_{\text{Modelo}} = \left(\frac{\Delta \rho}{\rho} \right)_{\text{Modelo}}$$

Como en el laboratorio no se cuenta con agua de mar para abastecer la instalación, se trabajo con agua dulce, la cual tiene un peso específico de $\gamma = 1,000 \text{ Kg/m}^3$, y por otro lado, en lugar de utilizar salmuera, se utilizo agua salada con un peso específico de $\gamma = 1036.25 \text{ Kg/m}^3$.

Es decir:

En el prototipo (real):

Peso específico Del mar $\gamma = 1,036.25 \text{ Kg/m}^3$
De la salmuera $\gamma = 1,072.50 \text{ Kg/m}^3$

En el modelo hidráulico (modelación):

Peso específico Del mar $\gamma = 1,000 \text{ Kg/m}^3$
De la salmuera $\gamma = 1036.25 \text{ Kg/m}^3$.

Para obtener un comportamiento de la pluma en el laboratorio similar al del prototipo, debe obtenerse la misma diferencia de densidades $\Delta\rho$ que se utiliza en el Número de Froude densimétrico.

Por lo que es importante destacar que de aquí en adelante **me referiré a la mezcla salina como salmuera** sabiendo que realmente esta tiene un peso específico de $\gamma = 1,072.50 \text{ Kg/m}^3$, pero que para trabajar en el laboratorio realmente se utilizó una mezcla de sal con un peso específico de $\gamma = 1036.25 \text{ Kg/m}^3$.

Posteriormente se procedió a la construcción del modelo hidráulico, para así poder iniciar con las pruebas experimentales.

4.4. INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

La instalación experimental en la cual se trabajó, se encuentra localizada en el interior del laboratorio de Hidráulica "Ing. David Hernández Hueramo" dependiente de la Facultad de Ingeniería Civil de la universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. La instalación en la cual se realizaron las pruebas de descarga de salmuera probando los diferentes diseños de difusores, se ubicó dentro del "Canal Largo" hecho principalmente de concreto con una longitud de 50 metros, 0.515 m. de ancho así como 1.14 m. de profundidad. Este Canal Largo tiene una sección transversal rectangular a todo lo largo, no tiene pendiente longitudinal y tiene la característica de recircular el agua, por lo que una vez lleno, el agua no tiene movimiento dentro del mismo. Otra característica importante para llevar a cabo la experimentación es que el Canal cuenta con una doble ventana de visualización formada por 10 secciones de cristal templado a ambos lados del canal, teniendo una longitud total de 8.80 m. por lado.



Fotografía No 4.1. Fotografía del canal largo en la cual se puede apreciar la instalación experimental así como las ventanas de visualización. Para tener una mejor comprensión de la instalación ver el Anexo No 2.

4.4.1. DESCRIPCIÓN DEL MODELO HIDRÁULICO

Para poder comprender mejor el modelo, nos podemos auxiliar de la Figura No 4.1, y haciendo una descripción de izquierda a derecha (sentido del flujo), se encuentra el tanque elevado, el cual tenía como función alimentar al tanque inferior para que este mantuviera una carga hidráulica constante (conectados entre si por una válvula de seccionamiento así como auxiliar para la obtención del gasto (de forma volumétrica) que se descargaba por los difusores. Posteriormente se encuentra el tanque inferior cuya función era descargar la mezcla salina de manera controlada. Este depósito se encontraba conectado a una tubería flexible mediante una válvula de seccionamiento (mediante la cual se regulaba la descarga de la mezcla salina). La tubería flexible a su vez estaba conectada a una tubería de PVC de 1" de diámetro la cual remataba en una pieza T ahogada en una plataforma de concreto sobre el fondo del canal. Sobre la pieza T se localizaba un cople cuya función fue recibir los diferentes difusores verticales por los cuales se hacia la descarga de la mezcla salina, continuando con la pieza T, se instaló otra válvula de seccionamiento con la finalidad de desfogar todo el sistema si este lo requería.

Para completar la descripción del modelo, se trazo una malla de 5x5 cm. Sobre la sexta ventana de visualización y se colocó otra malla (también de 5x5 cm.) sobre la plataforma de concreto, con la finalidad de mantener la escala en las videograbaciones.

Sobre una de las ventanas de visualización se colocó un brazo el cual sostenía el equipo de venoclisis que cumplía la función de inyectar la tinta como método de visualización de la descarga.

Croquis en planta, corte y sección transversal del canal e instalación experimental.

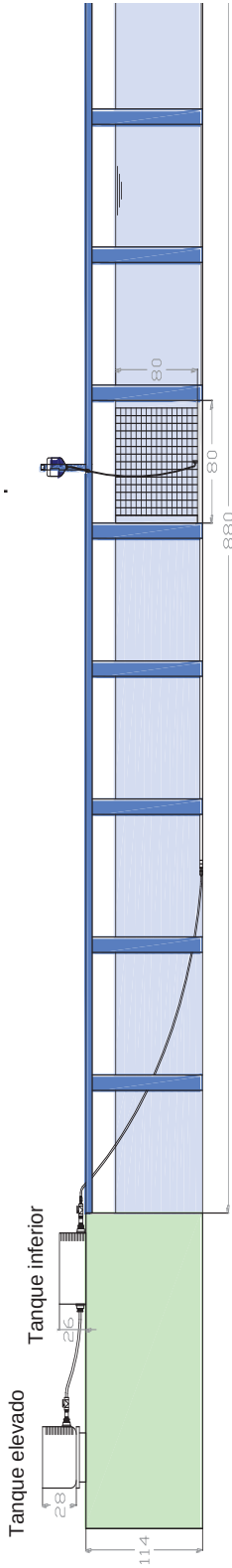


Figura No 4.1.a Vista lateral del canal e instalación.

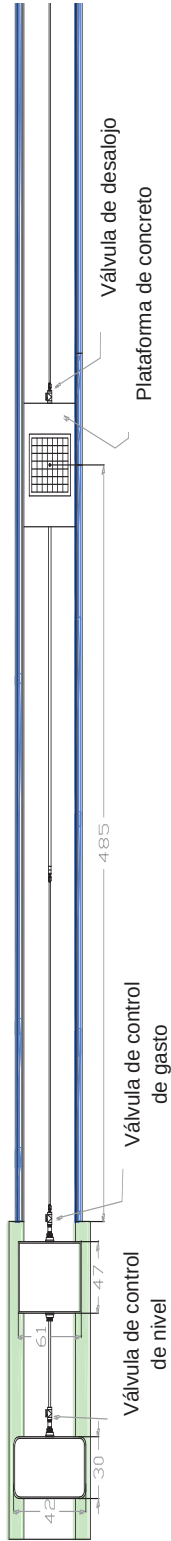


Figura No 4.1b Vista en planta del canal e instalación

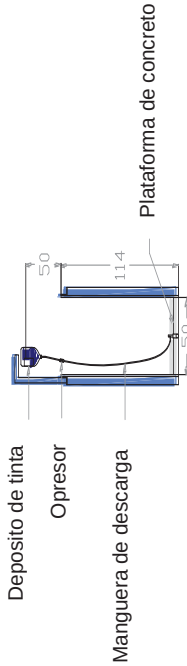


Figura No 4.1c Sección transversal del canal y equipo para inyección de tinta.

Figura No 4.1. Croquis del modelo hidráulico visto de perfil, en planta y corte. (Figura realizada por López Chávez M.)

4.4.2. EQUIPO UTILIZADO

Para la realización de las pruebas y su posterior análisis para así obtener los resultados, se tuvo la necesidad de videografiar las pruebas de los diferentes difusores, por lo que se contó con dos videocámaras digitales, una cámara fotográfica, un cronómetro y un equipo de cómputo.

4.4.3. PROCEDIMIENTO DE TRABAJO

El procedimiento con el cual se trabajó consistió básicamente en suministrar, por medio de la instalación ya descrita, un gasto constante de salmuera por los diferentes diseños de difusores para formar un chorro el cual se videograbó durante medio minuto (para cada diseño de difusor). Esta videograbación se realizó simultáneamente en perfil así como en planta, para posteriormente analizar cada grabación detalladamente. Para hacer visible y poder diferenciar la salmuera del agua del medio, se utilizó la técnica de la línea de inyección (o inyección de tinta). Para modelar la salmuera se utilizó una mezcla de agua con sal en varias concentraciones, para lo cual se siguió con un programa experimental.

Las etapas del procedimiento descrito se detallan en el Anexo 3.

a) Suministro del gasto constante

Para descargar un gasto constante de salmuera por medio de los difusores se utilizaron de manera conjunta los dos tanques. Del tanque elevado se descargó salmuera hacia el tanque inferior procurando mantener un nivel constante (carga hidráulica), para cumplir con la condición anterior, se operó manualmente la válvula entre ambos tanques, una vez hecha una prueba se anotaba la diferencia de niveles en el depósito superior (el cual estaba graduado), habiéndose tomado el tiempo de la descarga con un cronómetro en mano y de esta manera obtener el gasto (medición volumétrica).

b) Carga hidráulica

La carga hidráulica está dada por la diferencia de niveles, entre la superficie libre del agua en el tanque inferior (SLA_1) y la superficie libre del agua del Canal Largo (SLA_2). Por otro lado se tomó como nivel cero la plancha de concreto (Ver Fotografía No 4.2). Se utilizaron tres cargas en el tanque inferior, las cuales fueron: Nivel superior generando una carga hidráulica de 1.289 m.; Nivel medio y más utilizado con una carga

hidráulica de 1.25 m.; Nivel bajo con una carga hidráulica de 1.215 m. La profundidad del agua dulce en el canal fue de 0.80 m.

Por ejemplo, si tenemos en el tanque un Nivel medio (1.25 m), la carga hidráulica sobre cualquier difusor (5, 20 y 40 cm.) será de 0.45 m. Es decir, la carga hidráulica no depende de la altura del difusor, sino de la diferencia de (SLA_1) y la (SLA_2).



Fotografía No 4.2. Carga hidráulica entre la SLA_1 en el depósito y la SLA_2 del Canal Largo.

c) Gasto suministrado

Se suministraron tres gastos diferentes a los diferentes difusores, los cuales se denominaron: Gasto chico, mediano y grande, para ello se opero la válvula de esfera, cuya palanca de apertura y cierre funciona en un cuadrante de 0° a 90° donde la posición de 0° indica que esta cerrada la válvula, y 90° indica que la válvula esta completamente abierta. (Ver Figura No 4.2). Para dar el gasto chico, la válvula se abrió 27° a partir de la posición cerrada, para suministrar el gasto mediano, se abrió 43° y para cumplir con el gasto grande, se dio una abertura de 59° . No se trabajo con la abertura total debido a que físicamente se observó que era un gasto

muy grande y por consiguiente difundía demasiado la tinta y no se podía observar el fenómeno.

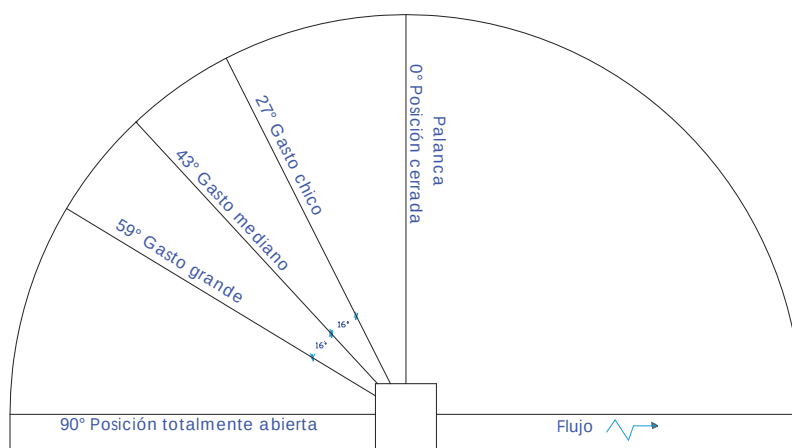


Figura No 4.2. Plantilla que se utilizó para suministrar los diferentes gastos por medio de la apertura y cierre de la válvula

d) Visualización del chorro

Dado que la salmuera tiene el mismo color que el agua dulce, para poder ver y diferenciar en los videos el comportamiento del chorro, se utilizó la técnica de visualización de tinta descrita en el *Capítulo 3.3.3. Técnicas de visualización y cuantificación*.

e) Análisis de la descarga

Para realizar el análisis de la dilución de los chorros de salmuera dentro del canal se realizaron videograbaciones digitales, tanto en planta como en perfil. Las mallas que se utilizaron en planta y perfil tienen la finalidad de mantener la escala de las imágenes y poder determinar las dimensiones de los chorros en estudio. El poder conocer las dimensiones de los chorros de salmuera es de suma utilidad para así poder estimar la superficie afectada en el fondo marino, realizando previamente el análisis de escala entre los datos del modelo y las descargas del prototipo en el fondo del mar.

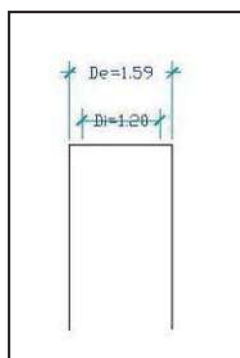
f) Análisis del campo cercano

Como ya se menciona en el *Capítulo 3.2.2. Campo cercano y Campo lejano*, el análisis de una descarga submarina se puede hacer dividiendo el área de influencia en dos zonas. Para nuestro caso se analizara únicamente el campo cercano ya que este se localiza en la cercanía de

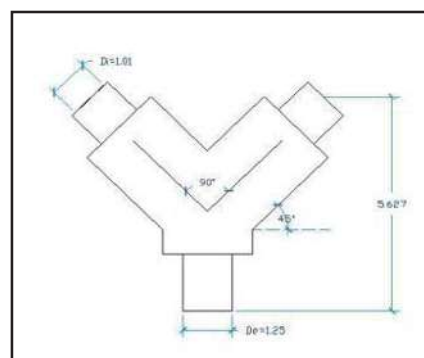
la descarga (inmediaciones del difusor), y por otro lado, debido a que la modelación se realizó en un canal (zona confinada) con agua estanca, no se llevó a cabo el análisis del campo lejano.

4.5. DISEÑO DE DIFUSORES

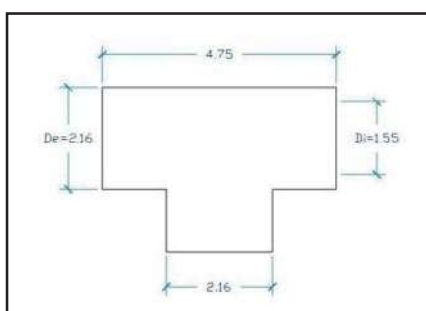
A continuación aparecen los diferentes diseños de difusores utilizados durante el tercer ciclo de pruebas, aparece tanto el nombre del difusor como sus dimensiones.



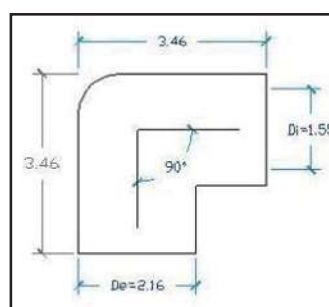
Difusor vertical o estándar



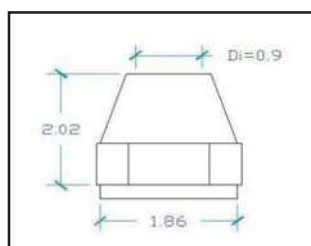
Difusor Y



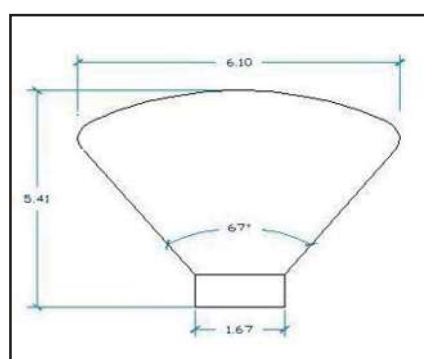
Difusor T



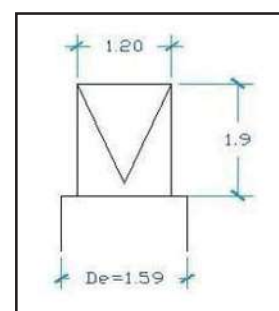
Codo de 90°



Difusor cono
ó reducción gradual



Difusor peine o abanico



Difusor cono invertido

Figura No 4.3. Diseño de los diferentes difusores utilizados.

Cabe señalar que de acuerdo con la literatura consultada, así como el software CORMIX, alrededor del mundo, las plantas desaladoras descargan con los difusores denominados "vertical" o "estándar"; difusor en "Y"; difusor en "T" así como el "codo de 90°". Por lo que en el laboratorio se propuso el diseño y uso de los difusores "cono ó reducción gradual"; "peine" o abanico" y "cono invertido".

4.6. PLANEACIÓN Y PROGRAMA EXPERIMENTAL

Dentro del programa experimental se realizaron tres ciclos de pruebas, ya que para trabajar con los diferentes diseños de difusores, primero se tuvieron que definir y corregir algunos parámetros.

a) Primer ciclo de pruebas

Iniciamos por probar las diferentes variables que nos permitieron identificar cuales eran las más representativas para poder comprender mejor el fenómeno, las variables fueron:

La carga hidráulica, la cual nos define el gasto descargado por medio del difusor, iniciamos proponiendo tres cargas (alta-50, media-40 y baja-30) para posteriormente definir una.

Otra de las variables fue trabajar con cinco diferentes concentraciones de mezcla salina para observar su comportamiento dentro del canal (20 g/l, 25 g/l, 30 g/l, 35g/l, 40 g/l).

Se propusieron tres alturas de difusores (baja, difusor con una altura de 5 cm; media que correspondía al difusor con una altura de 20 cm. Y finalmente alta, con una altura de difusor de 40 cm.)

También se trabajo con dos aberturas en la válvula de alimentación así como con dos diámetros de difusor, los cuales fueron de $\frac{1}{2}$ " y $\frac{3}{4}$ ". Por lo que al final tuvimos un total de 14 pruebas realizadas.

A continuación se muestran las tablas con el resumen de las pruebas realizadas en el primer ciclo, así como la ampliación del mismo ciclo teniendo al final un número de 26 pruebas.

Ensayo No.	Carga Hidráulica	Concentración de sal (g/l)	Altura difusor	Gasto	Diámetro difusor	No. pruebas a realizar	Etiqueta
1	alta-50	35	baja 5 cm.	completo	1/2"	3	UM-E1-C1-01
	media-40						UM-E1-C1-02
	baja-30						UM-E1-C1-03
2	media-40	35	baja 5 cm.	reducido	1/2"	1	UM-E1-C1-04
3	media-40	35	media-20 cm.	completo	1/2"	1	UM-E1-C1-05
4	media-40	35	media-20 cm.	reducido	1/2"	1	UM-E1-C1-06
5	media-40	35	alta-40 cm.	completo	1/2"	1	UM-E1-C1-07
6	media-40	35	alta-40 cm.	reducido	1/2"	1	UM-E1-C1-08
7	media-40	35	baja 5 cm.	completo	3/4"	1	UM-E1-C1-09
8	media-40	20	baja 5 cm.	completo	1/2"	5	UM-E1-C1-10
		25					UM-E1-C1-11
		30					UM-E1-C1-12
		35					UM-E1-C1-13
		40					UM-E1-C1-14

Tabla No 4.2. Resumen de las diferentes variables con las que se trabajo en el primer ciclo de pruebas.

Ensayo No.	Carga Hidráulica	Concentración de sal (g/l)	Altura difusor	Gasto	Diámetro difusor	No. pruebas a realizar	Etiqueta
1	alta-50	35	baja 5 cm.	completo	1/2"	3	UM-E1-C1-01
	media-40						UM-E1-C1-02
	baja-30						UM-E1-C1-03
2	media-40	35	baja 5 cm.	reducido	1/2"	1	UM-E1-C1-04
3	media-40	35	media-20 cm.	completo	1/2"	1	UM-E1-C1-05
4	media-40	35	media-20 cm.	reducido	1/2"	2	UM-E1-C1-06'
	media-40	35	media-20 cm.	reducido	1/2"		UM-E1-C1-06
5	media-40	35	alta-40 cm.	completo	1/2"	2	UM-E1-C1-07
	media-40	35	alta-40 cm.	completo	1/2"		UM-E1-C1-07'
6	media-40	35	alta-40 cm.	reducido	1/2"	1	UM-E1-C1-08
7	media-40	35	baja 5 cm.	completo	3/4"	1	UM-E1-C1-09
8	media-40	20	baja 5 cm.	reducido	1/2"	3	UM-E1-C1-10
			media-20 cm.				UM-E1-C1-10.1
			alta-40 cm.				UM-E1-C1-10.2
8	media-40	25	baja 5 cm.	reducido	1/2"	3	UM-E1-C1-11
			media-20 cm.				UM-E1-C1-11.1
			alta-40 cm.				UM-E1-C1-11.2
8	media-40	30	baja 5 cm.	reducido		3	UM-E1-C1-12
			media-20 cm.		1/2"		UM-E1-C1-12.1
			alta-40 cm.				UM-E1-C1-12.2
8	media-40	35	baja 5 cm.	reducido		3	UM-E1-C1-13
			media-20 cm.		1/2"		UM-E1-C1-13.1
			alta-40 cm.				UM-E1-C1-13.2
8	media-40	40	baja 5 cm.	reducido		3	UM-E1-C1-14
			media-20 cm.		1/2"		UM-E1-C1-14.1
			alta-40 cm.				UM-E1-C1-14.2

Tabla No 4.3. Resumen del primer ciclo de pruebas ampliado.

b) Segundo ciclo de pruebas

Concluyendo del primer ciclo de pruebas que las principales variables del chorro son el gasto descargado, el diámetro y altura del difusor así como la densidad de la mezcla salina, por lo que para el segundo ciclo de pruebas se vio en la necesidad de trabajar con un programa que básicamente constó de:

Trabajar con una concentración de sal de 35 g/l, con una carga hidráulica de 40, teniendo como únicas variables los tres gastos y tres alturas de difusor, para cada uno de los gastos.

Se vio también en la necesidad de trabajar con un diámetro de 3/8", esto debido a que el diámetro de 1/2" resultaba grande para el gasto descargado. Por lo que al final se tuvo un total de 18 pruebas realizadas.

No. de ensayo	Concentración de sal (g/l)	Carga Hidráulica	Diámetro difusor	Gasto por apertura	Altura de difusor en cm	Etiqueta
1	35	40	1/2"	Chico 27°	5	UM-E1-01
					20	UM-E1-02
					40	UM-E1-03
2				Mediano 43°	5	UM-E2-04
					20	UM-E2-05
					40	UM-E2-06
3				Grande 59°	5	UM-E3-07
					20	UM-E3-08
					40	UM-E3-09
4			3/8"	Chico 27°	5	UM-E4-10
					20	UM-E4-11
					40	UM-E4-12
5				Mediano 43°	5	UM-E5-13
					20	UM-E5-14
					40	UM-E5-15
6				Grande 59°	5	UM-E6-16
					20	UM-E6-17
					40	UM-E6-18

Tabla No 4.4. Resumen del segundo ciclo de pruebas.

c) Tercer ciclo de pruebas

Por último y ya con las variables definidas, se trabajo en el tercer ciclo de pruebas ya con el objetivo principal de probar siete diferentes diseños de difusores y determinar en su posterior análisis, cual de ellos tiene la mayor eficiencia en cuanto a la dilución de la salmuera en el medio se refiere.

No. de ensayo	Concentración de sal (g/s)	Carga Hidráulica	Diámetro de difusor	Altura de difusor en cm.	Diseño de difusor	Gasto por apertura	Etiqueta
1	35	40	3/8"	20	Estándar o Vertical	Mediano 43°	UM-3C-E1-01
						Grande 59°	UM-3C-E1-02
2					"Y"	Mediano 43°	UM-3C-E2-03
						Grande 59°	UM-3C-E2-04
3					"T"	Mediano 43°	UM-3C-E3-05
						Grande 59°	UM-3C-E3-06
4					Codo 90°	Mediano 43°	UM-3C-E4-07
						Grande 59°	UM-3C-E4-08
5					Cono o Reducción gradual	Mediano 43°	UM-3C-E5-09
						Grande 59°	UM-3C-E5-10
6					Abanico o Peine	Mediano 43°	UM-3C-E6-11
						Grande 59°	UM-3C-E6-12
7					Cono Invertido	Mediano 43°	UM-3C-E7-13
						Grande 59°	UM-3C-E7-14

Tabla No 4.5. Tercer ciclo de prueba en el cual se utilizaron los diferentes diseños de difusores.

5. DATOS OBTENIDOS

A continuación se muestran los datos de los programas de pruebas que se obtuvieron para cada ciclo de pruebas, en estas tablas aparece información para su posterior verificación. Dentro de las tablas aparecen los siguientes datos, que a continuación se describen de manera muy breve:

Etiqueta, indicándonos el número de cada prueba dentro de cada ciclo.

Gasto por apertura, muestra la apertura que se le dio a la válvula del tanque inferior, (27° chico, 43° mediano, 59° grande).

Diámetro del difusor, indica el diámetro de tubería con la que se realizó la descarga, manejándose diámetros de 1/2" 3/4" y 3/8".

Altura del difusor, indicándonos si el difusor media 5 cm, 20 cm, o 40 cm.

Gasto de la descarga (l/s).

Altura del chorro, distancia de la boca del difusor a la altura máxima alcanzada por el chorro, mostrada en cm.

Altura total del chorro, distancia desde la plancha de concreto hasta la altura máxima alcanzada por el chorro, mostrada en cm.

Diámetro del difusor en m.

Velocidad de salida de la descarga en m/s

Froude Densimétrico. Es el valor del Número de Froude Densimétrico para cada descarga realizada.

La densidad de la mezcla salina con la que se trabajó, así como la densidad del agua del laboratorio donde se descargó, representada en $\frac{Kgs^2}{m^4}$

Carga hidráulica, representa la carga con la que se trabajó en cada prueba, dada en cm.

5.1. CUADRO DE RESÚMENES DEL PRIMER CICLO DE PRUEBAS

Etiqueta	Gasto por apertura	Diámetro del difusor	Altura difusor (cm)	Gasto Q (l/s)	Altura del chorro (cm)	Altura total del chorro	Diámetro de difusor (m)	Velocidad del chorro (m/s)	Froude densimétrico
UM-E1-01	Chico 27°	1/2"	5	0.06319	12.5	17.5	0.01472	0.3713	6.574
UM-E1-02			20	0.06521	13.8	33.8	0.01472	0.3832	6.784
UM-E1-03			40	0.04913	15.4	55.4	0.01472	0.2887	5.112
UM-E2-04	Mediano 43°		5	0.10684	25	30	0.01472	0.6278	11.115
UM-E2-05			20	0.09064	27	47	0.01472	0.5326	9.430
UM-E2-06			40	0.10593	28.1	68.1	0.01472	0.6225	11.021
UM-E3-07	Grande 59°		5	0.12303	30	35	0.01472	0.7230	12.800
UM-E3-08			20	0.10614	31.9	51.9	0.01472	0.6237	11.042
UM-E3-09			40	0.11445	33.1	73.1	0.01472	0.6725	11.907
UM-E4-10	Chico 27°	3/8"	5	0.06435	18.5	23.5	0.01123	0.3781	7.324
UM-E4-11			20	0.05236	20	40	0.01123	0.3077	5.959
UM-E4-12			40	0.04037	21.2	61.2	0.01123	0.2372	4.595
UM-E5-13	Mediano 43°		5	0.08871	31.5	36.5	0.01123	0.5213	10.096
UM-E5-14			20	0.08926	34	54	0.01123	0.5245	10.159
UM-E5-15			40	0.08981	37.4	77.4	0.01123	0.5277	10.221
UM-E6-16	Grande 59°		5	0.10663	39	44	0.01123	0.6266	12.135
UM-E6-17			20	0.10011	41	61	0.01123	0.5883	11.394
UM-E6-18			40	0.09353	42.4	82.4	0.01123	0.5496	10.644

Densidad mezcla = $103.772 \frac{Kgs^2}{m^4}$
Densidad agua = $101.529 \frac{Kgs^2}{m^4}$
Carga Hidráulica = 125cm

Tabla No 5.1. Resumen de los resultados obtenidos de la modelación en el primer ciclo de pruebas.

5.2. CUADRO DE RESÚMENES DEL SEGUNDO CICLO DE PRUEBAS

Etiqueta	Gasto por apertura	Diámetro del difusor	Altura del difusor (cm)	Gasto Q (l/s)	Altura del chorro (cm)	Altura total del chorro (cm)	Diámetro del difusor (m)	Velocidad del chorro (m/s)	Froude densimétrico	
UM-E1-01	Chico 27°	1/2"	5	0.06319	12.5	17.5	0.01472	0.3713	6.574	
UM-E1-02			20	0.06521	13.8	33.8	0.01472	0.3832	6.784	
UM-E1-03			40	0.04913	15.4	55.4	0.01472	0.2887	5.112	
UM-E2-04	Mediano 43°		5	0.10684	25	30	0.01472	0.6278	11.115	
UM-E2-05			20	0.09064	27	47	0.01472	0.5326	9.430	
UM-E2-06			40	0.10593	28.1	68.1	0.01472	0.6225	11.021	
UM-E3-07	Grande 59°		5	0.12303	30	35	0.01472	0.7230	12.800	
UM-E3-08			20	0.10614	31.9	51.9	0.01472	0.6237	11.042	
UM-E3-09			40	0.11445	33.1	73.1	0.01472	0.6725	11.907	
UM-E4-10	Chico 27°	3/8"	5	0.06435	18.5	23.5	0.01123	0.3781	7.324	
UM-E4-11			20	0.05236	20	40	0.01123	0.3077	5.959	
UM-E4-12			40	0.04037	21.2	61.2	0.01123	0.2372	4.595	
UM-E5-13	Mediano 43°		5	0.08871	31.5	36.5	0.01123	0.5213	10.096	
UM-E5-14			20	0.08926	34	54	0.01123	0.5245	10.159	
UM-E5-15			40	0.08981	37.4	77.4	0.01123	0.5277	10.221	
UM-E6-16	Grande 59°		5	0.10663	39	44	0.01123	0.6266	12.135	
UM-E6-17			20	0.10011	41	61	0.01123	0.5883	11.394	
UM-E6-18			40	0.09353	42.4	82.4	0.01123	0.5496	10.644	

Densidad mezcla = $103.772 \frac{Kgs^2}{m^4}$
Densidad agua = $101.529 \frac{Kgs^2}{m^4}$
Carga Hidráulica = 125cm

Tabla No 5.2. Resumen de los resultados obtenidos de la modelación en el segundo ciclo de pruebas.

5.3. CUADRO DE RESÚMENES DEL TERCER CICLO DE PRUEBAS

Etiqueta	Gasto por apertura	Diseño del difusor	Diámetro del difusor	Altura del difusor (cm)	Gasto Q (l/s)	Altura del chorro (cm)	Altura total del chorro (cm)		
UM-3C-E1-01	Mediano 43°	Estándar o Vertical	3/8"	20	0.0164	8.7	28.7		
UM-3C-E1-02	Grande 59°				0.0328	11	31		
UM-3C-E2-03	Mediano 43°	"γ"			0.0081	11.3	31.3		
UM-3C-E2-04	Grande 59°				0.0247	13.8	33.8		
UM-3C-E3-05	Mediano 43°	"T"			0.0249	7.5	27.5		
UM-3C-E3-06	Grande 59°				0.0328	10	30		
UM-3C-E4-07	Mediano 43°	Codo 90°			0.0082	12.5	32.5		
UM-3C-E4-08	Grande 59°				0.0322	14.4	34.4		
UM-3C-E5-09	Mediano 43°	Cono o Reducción gradual			0.0244	11.5	31.5		
UM-3C-E5-10	Grande 59°				0.0327	14.2	34.2		
UM-3C-E6-11	Mediano 43°	Abanico o Peine			0.0163	7.5	27.5		
UM-3C-E6-12	Grande 59°				0.0242	8.1	28.1		
UM-3C-E7-13	Mediano 43°	Cono Invertido			0.0157	4	24		
UM-3C-E7-14	Grande 59°				0.0240	4.7	24.7		

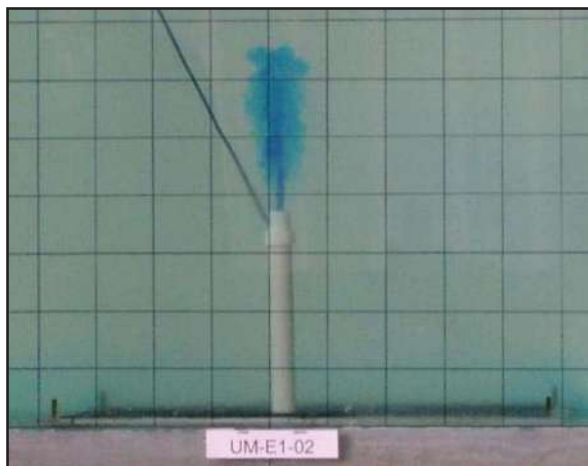
Densidad mezcla = 103.772 (Kg s2/m4)
Densidad agua = 101.529 (Kg s2/m4)
Carga Hidráulica = 121cm, 125cm, 128cm

Tabla No 5.3. Resumen de los resultados obtenidos de la modelación en el tercer ciclo de pruebas, en el cual se utilizaron los diferentes diseños de difusores.

6. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN OBTENIDA

6.1. PROCEDIMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS E IMÁGENES

Para llevar a cabo el análisis de las imágenes, se siguió una metodología la cual se describe a continuación: Utilizándose las imágenes obtenidas de las videograbaciones, se midió de manera muy cuidadosa la altura del chorro, el procedimiento se llevo a cabo por encima de la pantalla del monitor de una computadora, para hacer esto mas fácil se utilizo la retícula en la imagen (Ver fotografía No. 6.1) la cual además nos da a conocer la altura real alcanzada del chorro. Se midieron 5 alturas a lo largo del video para así obtener una altura promedio. Para cada una de las pruebas se siguió la misma secuencia. En la elaboración de las graficas me referiré a la altura del chorro solamente, eliminando la palabra promedio.



Fotografía No 6.1. Retícula sobre la imagen que sirvió de auxiliar para conocer la altura real del chorro.

Para encontrar la eficiencia de los difusores en el tercer ciclo de pruebas, la metodología a seguir fue la siguiente: aproximadamente a los 15 segundos de transcurrida la descarga, se detuvo la videograbación y sobre la imagen detenida se trazo sobre un acetato el perfil de la zona teñida (esto se realizo para la imagen videograbada de perfil como en planta), y de igual manera la retícula sirvió como auxiliar para medir el área de la descarga. Las áreas obtenidas se emplearon para poder hacer la comparación de la eficiencia de cada uno de los diseños de difusores empleados, ver figura No 6.1.

Las imágenes obtenidas a los 15 segundo de transcurrida la descarga, se pueden ver en el Anexo No 4. En este apartado aparece la fotografía vista en planta y perfil para cada uno de los diferentes diseños de difusores utilizados. En estas se pueden apreciar claramente al área de afectación de cada uno de los difusores.

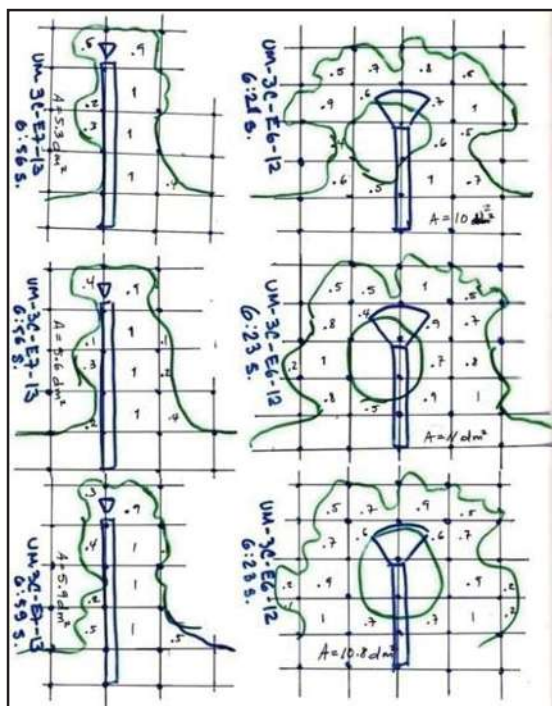


Figura No 6.1. Ejemplo de los acetatos obtenidos sobre la imagen de la videograbación a los 15 segundos de transcurrida la descarga, los cuales fueron utilizados para medir las áreas de las descargas. La línea verde delimita el área abarcada por la salmuera, la línea azul representa al difusor y la línea negra es la retícula (imágenes de la descarga en perfil).

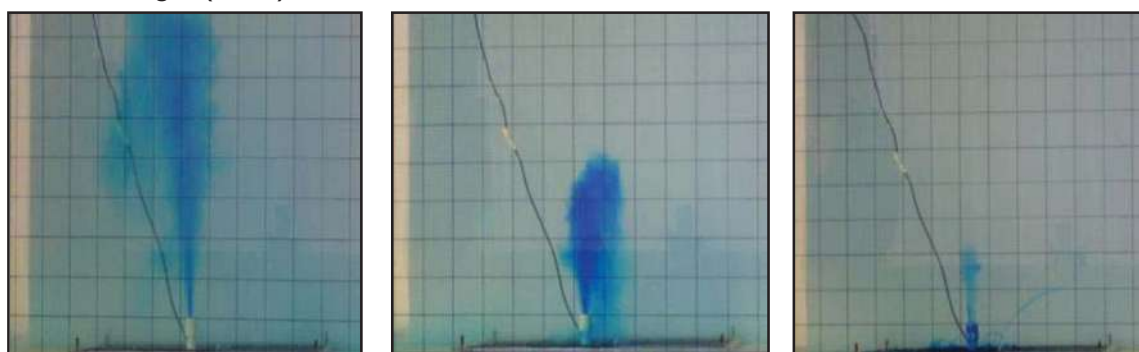
A la izquierda de la imagen se observa el difusor denominado “Cono invertido” y a la derecha aparece el denominado “peine” o abanico”.

6.2. ELABORACIÓN Y ANÁLISIS DE GRAFICAS

6.2.1. PRIMER CICLO DE PRUEBAS

a) Carga hidráulica

Como ya se menciona en el *Capítulo 4.4.3. Procedimiento de trabajo*; La carga hidráulica esta dada por la diferencia de niveles, entre la superficie libre del agua en el tanque inferior (SLA_1) y la superficie libre del agua del Canal Largo (SLA_2).

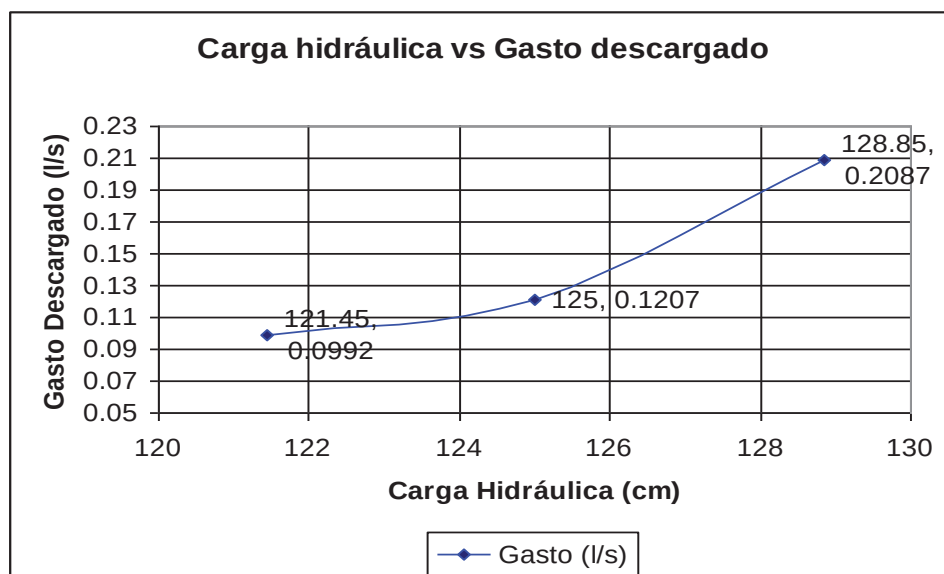


1.289 m (Nivel superior)

1.25 m (Nivel medio)

1.215 m (Nivel bajo)

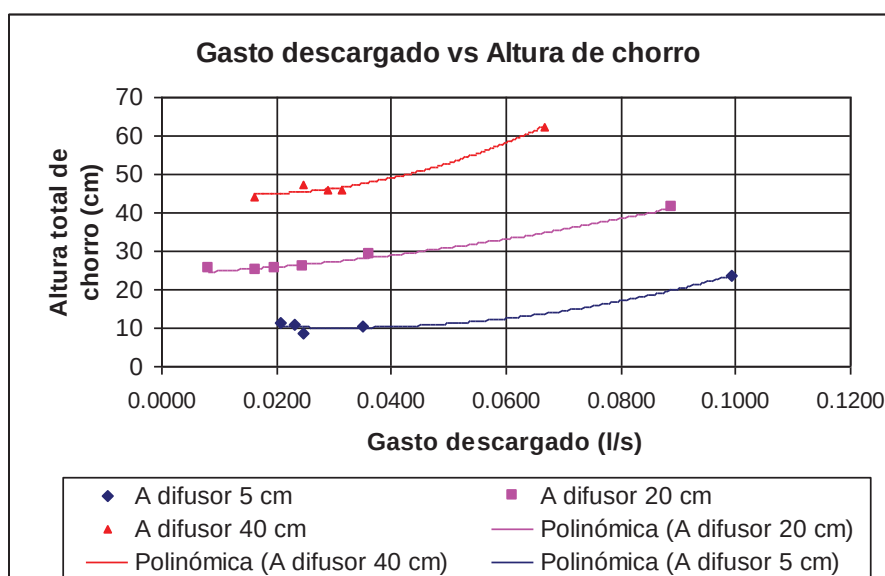
Fotografía No 6.2. Diferentes niveles de carga hidráulica.



Grafica No 6.1. Se muestra la variación del gasto descargado al incrementarse la carga hidráulica.

En la secuencia de fotos y en la grafica anterior se puede ver de manera muy clara que al crecer la carga hidráulica se incrementa el gasto y por consiguiente la altura del chorro de salmuera. La carga hidráulica que nos proporcionó el tamaño de chorro mas adecuado y funcional fue dado por el nivel medio (1.25 m), por lo que a partir de la prueba UM-E1-C1-10 (del primer ciclo de pruebas) se siguió utilizando hasta el final del ciclo.

Por lo que se elaboró una grafica donde se observa la variación de la altura del chorro al incrementarse el gasto:

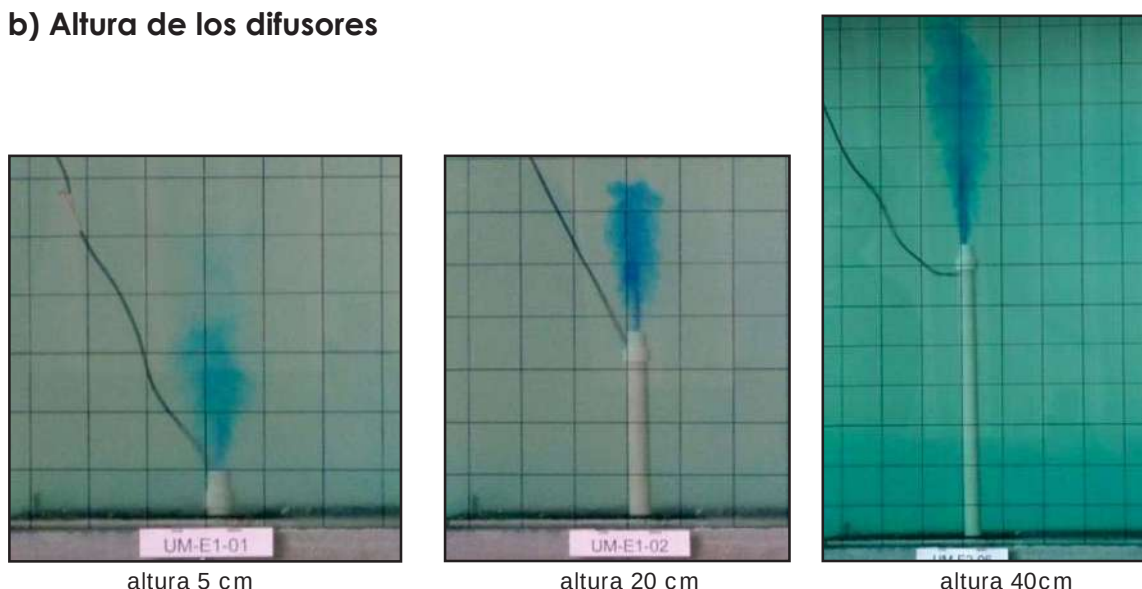


Grafica No 6.2. Se muestra la variación de la altura del chorro de salmuera contra el gasto descargado.

Como se puede observar, al aumentar el gasto descargado se incrementa gradualmente la altura total del chorro. Teniendo como altura total la suma de la altura alcanzada por el chorro de salmuera más la altura del difusor. Dentro del rango de gastos utilizados en el ensayo se puede observar que para un mismo gasto descargado, la altura total del chorro crece para cada altura de difusor utilizado. La pérdida de energía por fricción que se presenta en el difusor es insignificante.

Al analizar las graficas donde aparece la altura de chorro contra los pesos específicos utilizados de las diferentes mezclas salinas en las descargas, se concluyó que para dichas pruebas, el gasto descargado es independiente de la densidad de las mezclas, esto se debe a que el rango entre los pesos específicos es relativamente corto ($\gamma = 1,020 \text{ Kg/m}^3$ a $\gamma = 1040. \text{ Kg/m}^3$), por lo que parece inapreciable la variación del gasto descargado.

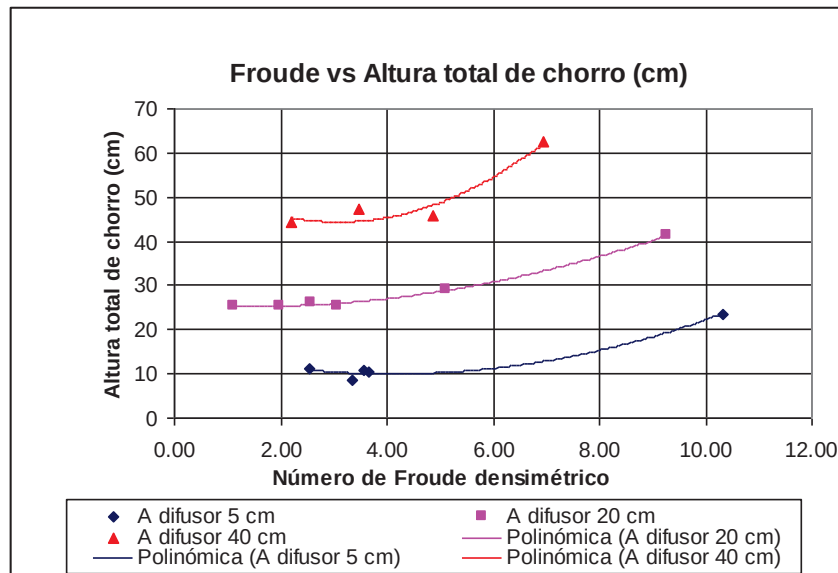
b) Altura de los difusores



Fotografía No 6.3. En las fotografías aparecen las diferentes alturas utilizadas para los difusores.

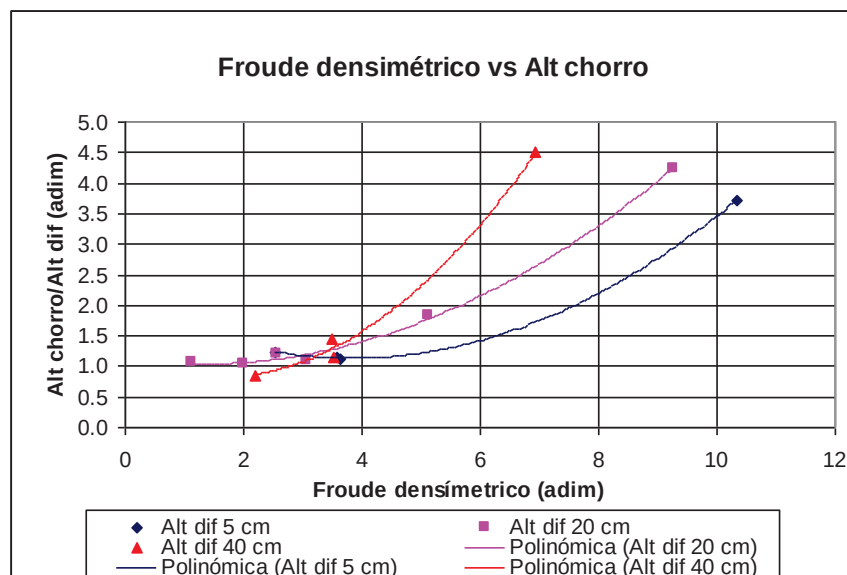
En la siguiente grafica (Grafica No 6.3) se pueden observar tres curvas bien definidas para cada altura de difusor utilizada. También se puede observar que estas curvas tienen el mismo comportamiento que las curvas de la grafica anterior (Grafica No 6.2), concluyendo que cada curva tiene un crecimiento gradual, o lo que es lo mismo, al crecer el número de Froude Densimétrico Fr_d crece la altura total del chorro. Un aspecto importante que se pudo observar en la modelación es que a mayor altura del difusor, el volumen de la descarga se dispersaba en su caída, en un mayor volumen de agua dentro del canal, lo cual nos lleva a concluir que a

mayor altura del difusor se incrementa la eficiencia de este. Pero por otro lado, esta altura se verá limitada debido a que se produce un mayor brazo de palanca ante la presencia de corrientes horizontales.



Grafica No 6.3. Se muestra la variación del Froude Densimétrico contra la altura del difusor.

Para corroborar el comportamiento de las curvas anteriores, se grafico el valor del Fr_d contra la altura del chorro adimensionalizada con la altura del difusor:



Grafica No 6.4. Se muestra la variación de Froude Densimétrico contra la altura del chorro adimensionalizada con la altura del difusor.

En la grafica anterior se encontró que; para bajos valores del Fr_d se tiene una altura de 1.2 aproximadamente, pero que al crecer los valores del Fr_d , las curvas se separan presentando el siguiente comportamiento:

a) Para el difusor más alto (40 cm) se alcanza la altura más alta (4.5) y a un menor Froude Densimétrico (6.5).

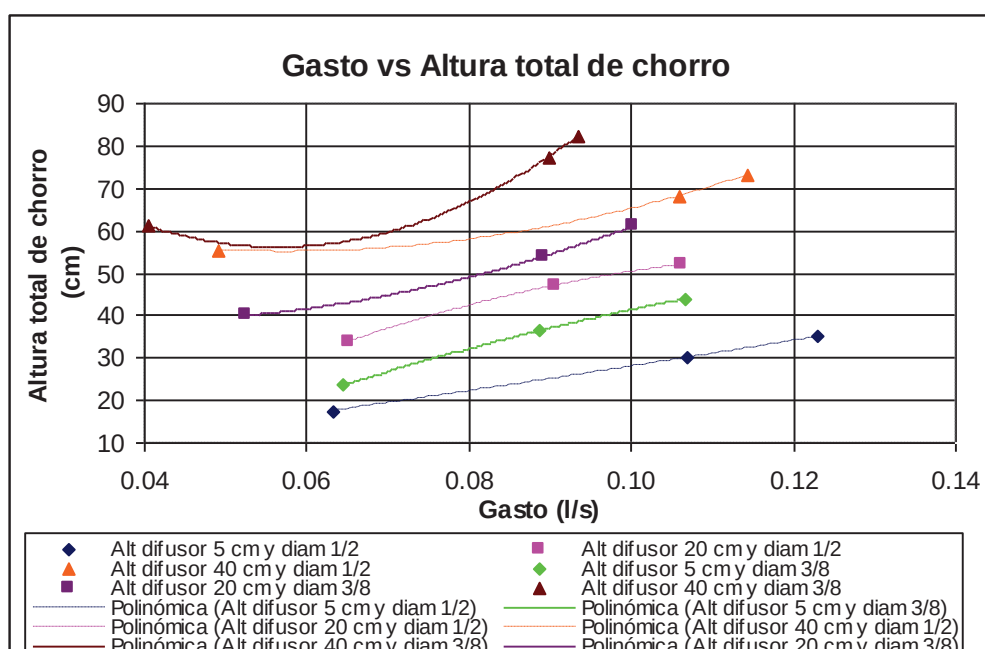
b) Para el difusor más bajo (5 cm) se logra una altura de (3.72) para un Froude Densimétrico mucho más alto (10.33)

Por lo anterior se puede llegar a concluir lo mismo que en las dos graficas anteriores, que una mayor altura del difusor contribuye a incrementar la eficiencia del mismo, pero con las limitaciones que le pueden imponer corrientes horizontales.

6.2.2. SEGUNDO CICLO DE PRUEBAS

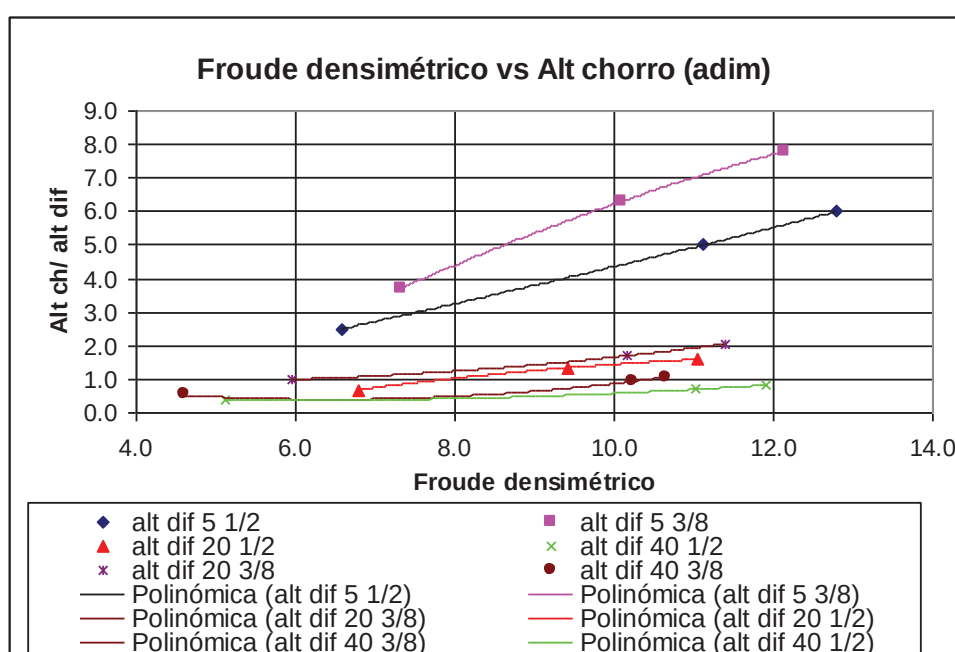
a) Diámetros nominales de 1/2" y 3/8" así como alturas de difusores 5cm, 20cm y 40cm.

Dentro del segundo ciclo de pruebas, se trabajo con diámetros nominales de difusor de (1/2" y 3/8") presentando unas curvas casi paralelas:



Grafica No 6.5. Se muestra la variación de la altura total del chorro de salmuera contra el gasto descargado mediante difusores con diámetros nominales de 1/2" y 3/8" así como alturas de difusores de 5cm, 20cm y 40cm.

Lo que se encontró es que para un mismo gasto descargado, en los difusores de menor diámetro se alcanza una mayor altura del chorro de salmuera. También se ha podido observar en las pruebas del segundo ciclo que a mayor altura total del chorro se tiene un mayor volumen de difusión, pero sin embargo es obvio que el diámetro del difusor no puede disminuirse indefinidamente para así lograr un chorro más alto, por lo que habrá siempre un límite. Al crecer el gasto se tiene una variación gradual de la altura total del chorro, casi lineal para las alturas de difusores de 5 cm y 20 cm.

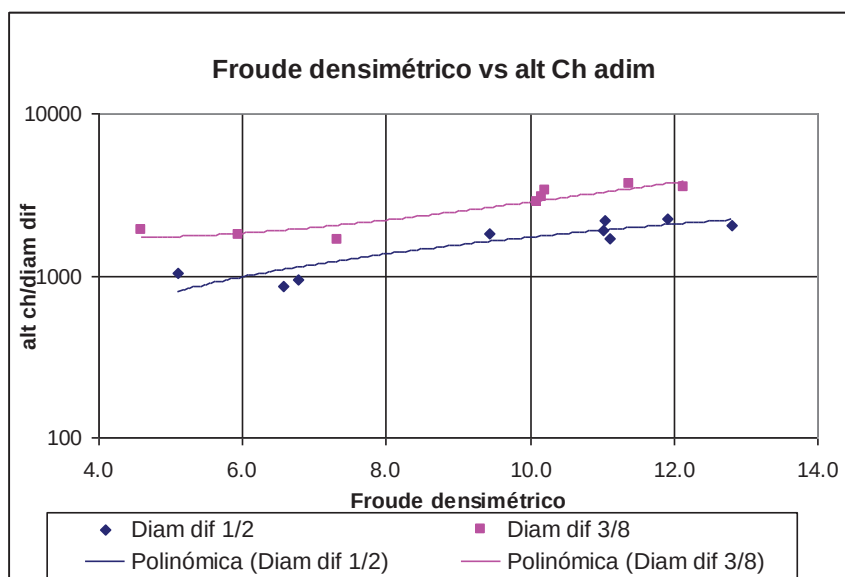


Gráfica No 6.6. Gráfica que muestra la variación del Froude Densimétrico contra la altura del chorro adimensionalizada con la altura del difusor, considerando dos diámetros de difusor.

En la gráfica anterior, se presentan las mismas variables que la gráfica No 6.4. perteneciente al primer ciclo de pruebas, y se encuentra con que las conclusiones son similares pero pudiéndose agregar lo siguiente: en la gráfica No 6.6 se puede ver que las curvas para la altura del difusor de 5cm. (curva rosa y azul) se separan notablemente de las curvas para las otras dos alturas de difusor, a lo que se interpreta que la altura neta del chorro alcanzada por el difusor de 5 cm es mayor que para los otros dos difusores de 20 cm y 40 cm.

Ahora bien, graficando el Froude Densimétrico contra la altura del chorro adimensionalizada, pero en este caso con el diámetro del difusor (ver gráfica No 6.7), se puede leer de las curvas obtenidas que la altura del

chorro para el difusor de 3/8" de diámetro es mayor que la del difusor de 1/2" de diámetro. Concluyendo lo mismo que el primer ciclo de pruebas, el diámetro del difusor no se podrá reducir indefinidamente.



Grafica No 6.7. Grafica del Froude densimétrico contra la altura del chorro adimensionalizada con el diámetro del difusor.

6.2.3. TERCER CICLO DE PRUEBAS

a) Diseño de difusores

La eficiencia de los diferentes diseños de difusores probados se determinará solamente comparando las superficies cubiertas por la salmuera (tanto en planta como en perfil); pero teniendo en consideración a la altura total del chorro como una medida de la eficiencia de dilución de la descarga submarina en el modelo por las conclusiones ya vistas en los capítulos (6.1.1. *Primer ciclo de pruebas* y 6.1.2. *Segundo ciclo de pruebas*).

En el capítulo 4.5. *Diseño de difusores* se pueden observar los diferentes diseños de difusores probados.

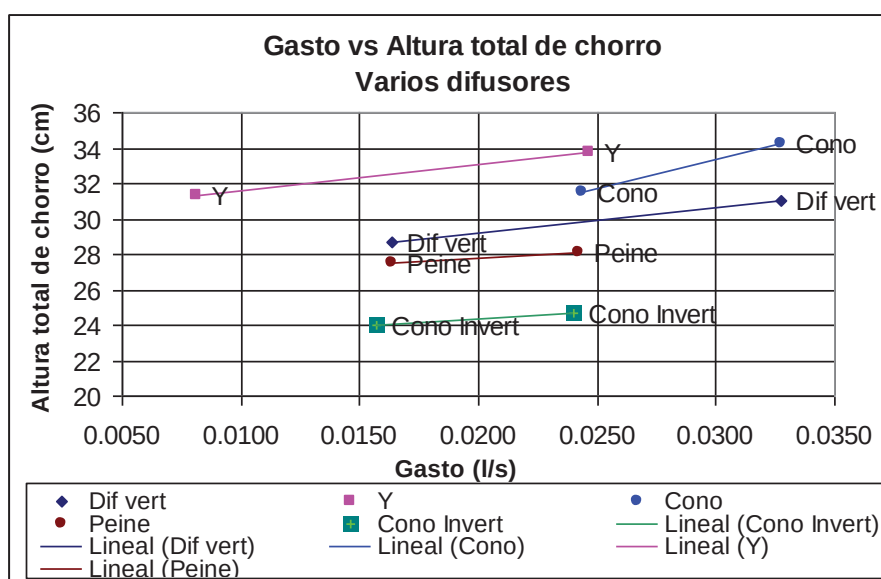
Observando la Gráfica No 6.8, Gasto vs. Altura total del chorro, y considerando la altura del chorro como medida de la eficiencia en la dilución, se pueden hacer las siguientes observaciones:

En cinco de los siete difusores probados se pudo medir una distancia vertical del chorro, y debido a sus características geométricas, los difusores “T” y “Codo de 90°” quedan fuera de esta grafica ya que su descarga se realiza horizontalmente.

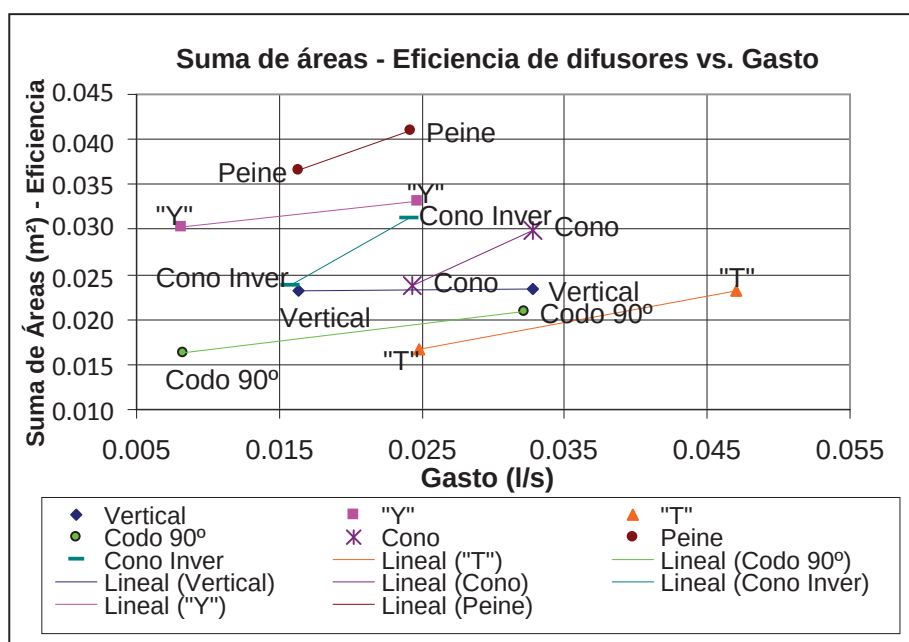
El difusor que su descarga logro tener una mayor altura total del chorro fue el difusor “Y”, y por el contrario, el que logro una menor altura fue el “Cono Invertido”.

El difusor “Y” parece ser una buena alternativa, pero el difusor “Peine” ó “Abanico” aun teniendo una menor altura, por lo que se vio en la modelación, su área de difusión es mayor, más adelante se analiza esto ultimo.

Al ir creciendo el gasto la altura total del chorro también va en aumento. Las rectas se observan paralelas unas con otras, por lo que la eficiencia relativa es independiente del gasto, dentro del rango de pruebas.



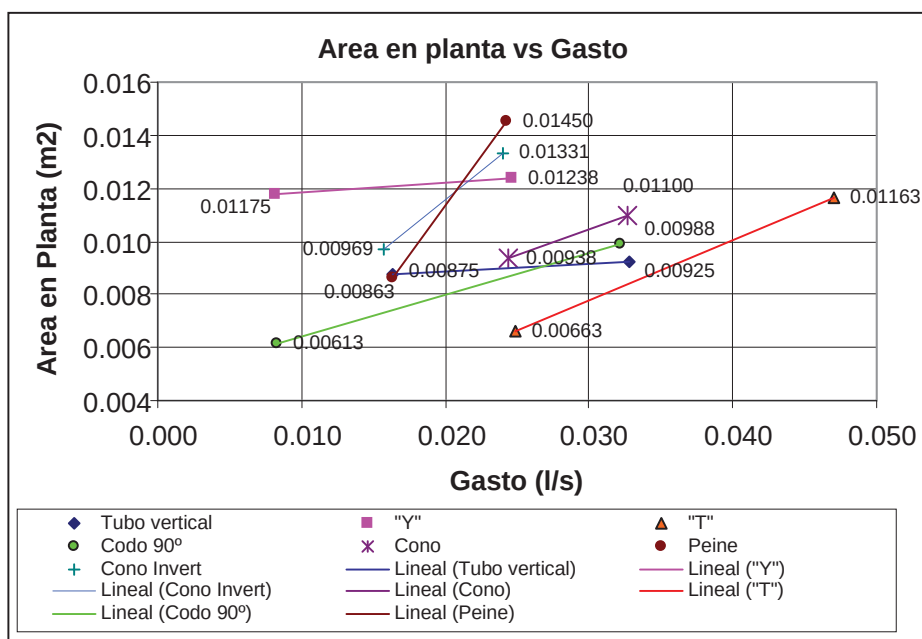
Grafica No 6.8. En la grafica se observan cinco rectas de la altura total del chorro para cada diseño de difusor probado, excluyendo los difusores que realizan su descarga de manera horizontal.



Grafica No 6.9. Grafica que permite comparar las áreas o superficies teñidas por cada tipo de difusor.

En la grafica anterior se puede observar claramente la eficiencia de los diferentes diseños de difusores comparando sus áreas teñidas. Siendo esta una medida de eficiencia de dilución. Recordando que el área de cada uno de los difusores es la suma del área medida en planta con el área medida en perfil.

La malla que se utilizo en el modelo, tanto en planta como en perfil, fue de 5cm x 5cm, la cual nos da una superficie de 25 cm², esta superficie la denominaremos Unidad de aquí en adelante, esto por la facilidad de medición. Por lo que es lo mismo, una Unidad vale 0.25 de un decímetro cuadrado y a 0.0025 de un metro cuadrado. De esta manera se puede estimar la superficie de afectación en el fondo marino por la descarga en función del gasto descargado, aplicándose las escalas encontradas en el diseño del modelo.



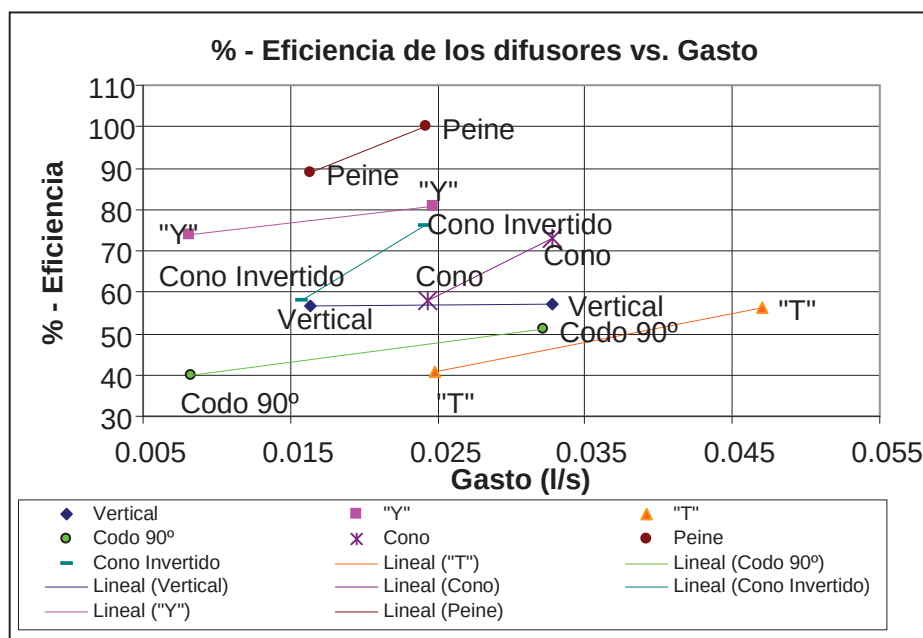
Grafica No 6.10. En esta gráfica se muestra el área en planta para cada tipo de difusor contra el gasto descargado.

Partiendo del análisis de la grafica anterior, se obtiene al área en el modelo para un gasto de 0.025 l/s que para el prototipo serian 700 l/s, por lo que si escalamos el área de la descarga en planta obtenida para el fondo marino, tendríamos lo siguiente:

DIFUSOR	Área en el modelo (m²)	Área en el prototipo (m²)
"Peine" o "Abanico"	0.01450	52.20
Cono Invertido	0.01331	47.92
"Y"	0.01238	44.57
Reducción gradual (cono)	0.00950	34.20
Tubo Vertical (estándar)	0.00900	32.40
Codo 90°	0.00875	31.50
" T "	0.00663	23.87

Tabla No 6.1. Tenemos el área medida en el modelo en m² y el área de afectación en el fondo marino para el prototipo también en m².

Esta área en el prototipo dada en m², será la superficie afectada en el fondo marino, pero cabe resaltar que esta no es la tabla definitiva, ya que se tiene que considerar también el área en perfil.



Grafica No 6.11. Grafica que permita comparar la eficiencia de los difusores, partiendo de la Grafica No 9, solo que ahora visto en % -Eficiencia.

La grafica anterior es la misma grafica que la No 9, con la diferencia de que las áreas se presentan como porcentaje de la mayor área medida, que en este caso fue la del difusor "Peine" ó "Abanico". Por lo que de esta manera se puede hacer una comparación relativa de la eficiencia de cada uno de los diseños de difusores probados. Se puede decir que el difusor "Peine" es un 60% más eficiente que el difusor "T" y 19% mas eficiente que el difusor "Y".

Podemos hacer a demás las siguientes observaciones:

Para el caso del difusor "estándar", al aumentar el gasto no crece el área teñida o su porcentaje de eficiencia, aunque se recomienda realizar más pruebas para comprobar esta tendencia.

Por otro lado, el difusor "cono" ó "reducción gradual" así como el difusor "cono invertido" muestran claramente que al crecer el gasto crece notablemente el área teñida o eficiencia, con respecto del resto de los difusores.

El difusor “codo 90°” y el difusor “T”, son los menos eficientes de acuerdo con las pruebas realizadas, concluyéndose que esto es debido a la pérdida de energía local dentro del difusor por los cambios bruscos de dirección.

Por ultimo, se puede observar que los difusores más eficientes son el “peine” y el “Y”, obviamente comparados para el mismo gasto descargado.

7. RESULTADOS

A continuación se plasman los principales resultados obtenidos de la investigación realizada.

Para los difusores “vertical” ó “estándar” (ver Grafica No 6.2 y grafica No 6.3), se pueden observar curvas bien definidas para cada altura de difusor (5cm, 20cm y 40cm) en la que para el mismo gasto descargado la altura total del chorro crece proporcionalmente para cada difusor más alto. Un aspecto observado en la modelación es que a mayor altura del difusor el gasto de salmuera se diluía, al caer al fondo, dentro de un mayor volumen de agua dentro del canal lo que lleva a incrementar la eficiencia del difusor. Pero por otro lado, la altura del difusor puede estar limitada, ya que se tendrá un mayor momento ó brazo de palanca ante posibles corrientes horizontales.

Observando la Grafica No 6.5, se puede concluir que para el mismo gasto descargado, en el difusor de menor diámetro (para este caso es de 3/8") se logra una altura mayor de la descarga en comparación el de mayor diámetro, sin embargo es evidente que para alcanzar chorros mucho más altos, el diámetro del difusor no podrá disminuirse indefinidamente.

En las Graficas No 6.6 se ve claramente que las curvas para el difusor de 5cm de altura se separan en relación con las otras curvas de los diámetros de 20cm y 40cm, lo que nos indica que la altura neta del chorro es mayor para el difusor más corto con respecto de las otras dos alturas probadas. La altura del chorro neta es muy similar para los difusores de 20cm y 40 cm.

7.1. CUADROS RESUMEN

Se probaron siete diferentes diseños de difusores considerando que tanto la altura total del chorro como las áreas teñidas de cada difusor son una medida de la eficiencia del mismo. Por lo que el difusor que alcanzo una mayor altura total de chorro fue el difusor “Y” por encima del difusor “estándar” o “vertical”. Las curvas de la Grafica No 6.8 se presentan casi paralelas unas con otras, por lo que se puede concluir, que la eficiencia de cada difusor no varía con el gasto que se descarga a través del mismo dentro del rango de pruebas.

En la Grafica No 6.11, se puede realizar una comparación relativa en porcentaje de la eficiencia de cada uno de los difusores. De manera que como ejemplo, el difusor “peine” o “abanico” es un 60% más eficiente que un “codo de 90°”.

A continuación se presenta el porcentaje de eficiencia de los diferentes diseños de difusores:

Eficiencia (%) de los difusores probados en el modelo	
Diseño de difusor	% eficiencia
peine o abanico	100.0
"Y"	80.9
Cono invertido	76.0
cono ó reducción gradual	59.0
vertical o estándar	56.7
Codo de 90°	47.5
"T"	40.6

Tabla No 7.1. Cuadro resumen de los diferentes diseños de difusores con su respectiva eficiencia mostrada en porcentaje.

Es evidente que los difusores de menor eficiencia son el "codo de 90°" y la "T", lo cual se debe a la pérdida de energía local en los cambios bruscos de dirección.

La Grafica No 6.10. se puede utilizar para estimar la superficie de afectación de la descarga de salmuera en función del gasto descargado por el difusor, pudiéndose aplicar las escalas de la Tabla No 7.2. donde se resumen las áreas de afectación:

DIFUSOR	Área en el modelo (m ²)	Área en el prototipo (m ²)
"Peine" o "Abanico"	0.01450	52.20
Cono Invertido	0.01331	47.92
"Y"	0.01238	44.57
Reducción gradual (cono)	0.00950	34.20
Tubo Vertical (estándar)	0.00900	32.40
Codo 90°	0.00875	31.50
"T"	0.00663	23.87

Tabla No 7.2. Tenemos el área medida en el modelo en m² y el área de afectación en el fondo marino para el prototipo también en m².

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1. CONCLUSIONES

a) En los difusores estándar, a mayor altura del mismo, el gasto descargado de salmuera se difunde en un mayor volumen de agua en su caída al fondo, por lo que es recomendable utilizar difusores lo más alto que se pueda, pero evidentemente teniendo como límite de seguridad un posible volteamiento producto del momento que se presenta por las eventuales corrientes horizontales.

b) Para un mismo diámetro de conducción y gasto, en el difusor de menor diámetro se presenta una altura mayor del chorro, sin embargo es obvio que para alcanzar descargas mucho más altas, el diámetro no podrá disminuirse indefinidamente.

c) La altura neta de chorro es mayor para el difusor mas corto (para este caso es de 5cm) y va disminuyendo la altura neta al crecer la altura del difusor, hasta hacerse casi igual para los difusores más altos (20cm y 40cm).

Pero por otro lado, aunque la altura neta del chorro es más grande para los difusores cortos, es mejor utilizar difusores altos ó largos, debido a que la salmuera se difunde en un mayor volumen de agua del medio durante su caída. Sin embargo, como ya se menciona en el *inciso a*, la altura del difusor puede verse limitada.

d) De los siete diferentes diseños de difusores probados, el que proporcionó la mayor altura total de chorro fue el difusor "Y" por arriba del difusor "reducción gradual" ó "cono" y del difusor "vertical" ó "estándar".

e) Para que el difusor tenga una mayor eficiencia, es necesario que la corriente de salmuera en su interior pierda la menor cantidad de energía cinética (sobre todo en perdidas locales) para que la dilución sea máxima en el agua del medio al momento de ser descargada a través del difusor. Es por esta razón que **el diseño de difusor abanico**, al no tener cambios bruscos de dirección, **es más eficiente** que los otros difusores probados.

8.2. RECOMENDACIONES

a) Se propone realizar un ciclo de pruebas en el cual se pruebe la incorporación de aire al interior de la tubería que conduce la mezcla salina, esperando que la mezcla agua-aire contribuya a una mejor dilución de la salmuera al ser descargada en el medio. Esto se debe realizar siempre y cuando al incorporarse el aire se utilice energías alternativas, no contaminantes.

b) Por otro lado se propone también probar diseños de difusores no circulares (cuadrados y triangulares).

c) Otra propuesta es realizar descargas, pero ahora dentro de un ambiente agitado, es decir, introducir oleaje al sistema, para acercarnos un poco más al comportamiento real que se presenta en el fondo marino. Así como volver a hacer la comparación de descargas entre el difusor Vertical (estándar) contra el difusor "peine" ó "abanico". A demás de que se tendría la posibilidad de estudiar el campo lejano de la descarga de salmuera.

e) Se hace la recomendación de hacer una comparación del comportamiento de las descargas dentro de la zona de rompiente y en aguas someras, esto con la finalidad de poder observar donde se realiza una dilución más rápida de la salmuera en el fondo marino.

d) Por último se propone modelar las descargas de salmuera en el software CORMIX (Sistema Experto en la Mezcla dentro de la Zona de Cornell), ya que este sirve para la planeación, el análisis, la predicción y el diseño de ciertas descargas en cuerpos de agua (ríos, lagos, lagunas y mares) así como observar el impacto ambiental que estas pueden ocasionar, (Doneker L. R. et al. 2007). Las descargas pueden ser de origen industrial o municipal, así como aguas de enfriamiento, termales y de salmuera con o sin contenido de sedimentos en suspensión.

Se propone el uso de este sistema debido a que es el más utilizado en todo el mundo para realizar proyectos de ingeniería y de investigación, ya que los estudios hechos por este software se pueden certificar por medio de la USEPA (Agencia de Protección ambiental de los Estados Unidos), (Doneker L. R. et al. 2007).

9. BIBLIOGRAFÍA

Abu Qdais, H. A. (1999) **Environmental Impacts of Desalination Plants on the Arabian Gulf**. IDA World Congress on Desalination and Water Reuse. San Diego, USA, 1999.

Ahmed M.; Shayya W. H.; Hoey D.; Mahendran A.; Morris R.; Al-Handaly J. (2000). **Use of evaporation ponds for brine disposal in desalination plants**. Desalination, 130: 155-168.

Alcocer, S.M.; Hiriart G. (2008). **An Applied Research Program on Water Desalination with Renewable Energies**. American Journal of Environmental Sciences 4 (3): 190-197, 2008.

Al-Gobaisi, D.M.K. (1997). **Sustainable augmentation of fresh water resources through appropriate energy and desalination technologies**. IDA World Congress on Desalination and Water Reuse. Madrid, España, 1997.

Altman, T. (2000). **New Power and Water Co-generation Concept with Application of Reverse Osmosis (RO) Desalination**. Salzgitter Anlagenbau GmbH, 2000.

Antequera, M.; Ruiz-Mateo, A.; González, F.J. ; Álvarez, A. (2008). **Vertidos hipersalinos al mar procedentes de estaciones desaladoras**. XXXIII Congreso Latinoamericano de hidráulica, Cartagena de Indias, Colombia, septiembre 2008.

Arreguín, C.F.; Martín D.A. (2000), **Desalinización del agua**. Ingeniería Hidráulica en México. Vol. XV, Núm. 1, pags. 27-49, enero-abril del 2000.

Bleninger, T.; Jirka, G.H. (2007). **Towards Improved Design Configurations for Desalination Brine Discharges into Coastal Waters**. IDA World Congress, Maspalomas Gran Canaria, Spain, October 21-26, 2007.

CNA (1993). Comisión Nacional del Agua, **Informe 1989-1993**, México, D.F., 1993.

CNA (2002). Comisión Nacional del Agua, **Compendio Básico del Agua en México**, México, D.F., 3-25, 2002.

CNA (2007). Comisión Nacional del Agua, **Estadísticas del Agua en México**, México, D.F., 2007.

CNA (2008). Comisión Nacional del Agua, **Programa Nacional Hídrico 2007-2012**, México, D.F., Junio de 2008.

DBK (2007), Informe especial de DBK, **Empresas Desaladoras**, Madrid, España, Febrero de 2007, 2ª edición.

Del Bene, J.V.; Jirka, G.; Largier, J. (1994). **Ocean brine disposal**. Desalination, 97: 365-372.

Doneker, L.Robert and Jirka, H.Gerhard (2007). **CORMIX USER MANUAL, A Hydrodynamic Mixing Zone Model and Decision Support System for Pollutant Discharges into Surface Waters**, Office of Science and Technology U.S. environmental Protection Agency, Washington, DC 20460.

Echaniz, J., Rodero, A., Sallangos, O., Santamaria F. J. (1997). **Dhekelia (Cyprus) Seawater Desalination Plant Design, Construction and Commissioning of the 20,000 m³/day R.O. Plant**. IDA World Congress on Desalination and Water Reuse. Madrid, España. Vol. II, pp. 371-392.

Einav, R.; Harussi, K.; Perry, D. (2002). **The footprint of the desalination processes on the environment**. Submitted to the EuroMed 2002 conference on Desalination strategies in South Mediterranean Countries. Desalination 152 (2002) 141–154.

Einav, R.; Lokiec, F. (2003). **Environmental aspects of a desalination plant in Ashkelon**. Desalination, 156: 79-85.

FAO (2007). Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Information System on Water and Agriculture**, Aquastat. Junio, 2007.

Fariñas, M. (1999) **Ósmosis Inversa. Fundamentos, tecnología y aplicaciones**. Ed. McGraw Hill, 1999.

Fuentes, D.M.; Ramírez, G.A. (2003). **Desalación del agua: Una alternativa para resolver la demanda de agua potable en el sur de la República Mexicana**. Agua Latinoamérica, volumen 3 - número 5, Septiembre/Octubre 2003.

García O.C.; Álvarez S.J.; Luque R.S.; Coca P.J. (2008). **Modelación de la Ósmosis Inversa y Nanofiltración en la obtención de agua ultrapura**. XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Cartagena de Indias Colombia, Septiembre, 2008.

Gleick, P. H. (1998). **The World's Water – The Biennial Report on Freshwater Resources, 1998/1999**. Island Press. Washington DC.

Hanbury, W.T., Hodgkiess, T., Morris, R. (1993). **Desalination Technology 93**. An Intensive Course. Porthan Ltd., Easter Auchinloch. Lenzie, Glasgow, UK. 1993.

Hiriart, L.G. (1983) **Manual de Diseño de Obras Civiles**, CFE. A.2.14. Obras de Toma y Sistemas de Enfriamiento para Plantas Termoeléctricas. México, DF. 60 pp.

IMPULSA IV. **Desalación de agua de mar con energías renovables**.
http://www.impulsa4.unam.mx/Default_espanol.htm (Ingresada en agosto del 2008).

Intermón (1998) **Relaciones Norte-Sur. Conceptos clave. Dossiers para entender el mundo**. Ed. Octaedro.

Jefferson, T. (1791). **Obtaining Fresh from Salt Water**, History of Congress, Appendix. Philadelphia, 1791, 1042–1046.

Jibril, B.E.; Ibrahim, A.A. (2001) **Chemical conversions of salt concentrates from desalination plants**. Desalination, 139: 287-295.

Lattemann S.; Höpner T. (2003). **Seawater desalination. Impacts of brine and chemical discharges on the marine environment**. Desalination Publications. L'Aquila, Italy, 142 pp.

Medina, J.A. (2003). **“Desalación de Aguas Salobres y de Mar”**, Ósmosis Inversa, Ed. Mundi-Prensa, 15-120, 2000.

Millar D.S., Brighthouse B.A. (1984) **THERMAL DISCHARGES, A guide to power and process plant cooling water discharge into rivers, lakes and seas**. British Hydromechanics Research Association, 1984.

Nakayama Y., Woods W.A., Clark D.G. (1988). **Visualized Flow: Fluid Motion in Basic and engineering situations revealed by flow visualization**. Pergamon Press, Oxford, 1988.

Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.

OMS, 2006. **Guías para la calidad del agua potable, PRIMER APÉNDICE A LA TERCERA EDICIÓN**, Volumen 1, Recomendaciones Organización Mundial de la Salud. ISBN 92 4 154696 4, 2006

Prabhakar, S., Hanra, M. S., Misra, B. M., Sadhukan, H. K. (1997). **Small Desalination Units to Provide Safe Drinking Water in Remote Rural Areas in India**. IDA World Congress on Desalination and Water Reuse. Madrid, España. Vol. I, pp. 3-16.

PSU, (2003). **Multiport Diffusers**. CORMIX Website, Dr. Rodert Doneker, Portland State University, Portland Oregon.
<http://www.cormix.info/CORMIX2.php>

Sadhwani J.J., Veza, J.M., Santana C. (2005) **Case studies on environmental impacto f seawater desalination**, Desaalination, 185:1-8, Presentado en la conferencia: Desalination and the Environment, Santa Margherita, Italia, Mayo 2005.

Semiat, R. (2000). **Desalination: Present and Future**. International Water Resources Association, Water International, Volume 25, Number 1, Pages 54.65, March 2000.

Shiklomanov, I. (1999) **World Water Resources: Modern Assessment and Outlook for 21-st Century**. Hidrological Institute, San Petersburg.

Torres, (1999). **La desalación de agua de mar**. Tecnologías de vanguardia. Informe privado.

Torres Corral M. (2004). **Avances técnicos en la desalación de aguas**. Ambianta. Octubre 2004.

Torres Miguel. (2004). **La desalación de agua de mar y el vertido de la salmuera**. Ambianta Julio-Agosto 2004.

United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2007). **World Population Prospects: The 2006 Revision**, Highlights, Working Paper No. ESA/P/WP.202.

Valero, A.; Uche, J.; Serra, L. (2001). **La desalación como alternativa al Plan Hidrológico Nacional de España**. Reporte técnico, CIRCE (Centro De Investigación de Recursos y Consumos Energéticos) y Universidad de Zaragoza.

Vergara Miguel A. (1993). **“Técnicas de modelación en hidráulica”**. Alfaomega-IPN, México, DF.

WA DOE (1998). **Criteria for Sewage Works Design**, State of Washington, Department of Ecology, Olympia, WA, December 1998.

Winston, W.S.; Sirkar, K. (1992). **Membrane Handbook**.

World Resources Institute (1999). World Resources.

ANEXOS

ANEXO 1. RANGOS DE SALINIDAD EN EL AGUA, SALINIDAD EN LOS MARES Y OCÉANOS.

A continuación se presentan los diferentes rangos de salinidad para los diferentes tipos de agua, así como la salinidad que se presenta en los mares y océanos.

Denominación del agua	Salinidad (ppm de TDS)
Ultrapura	0.03
Pura	0.3
Desionizada	3
Dulce (potable)	≤ 1,000
Salobre	1,000 - 10,000
Salina	10,000 - 30,000
Marina	30,000 - 50,000
Salmuera	≥ 50,000

Tabla No a1.1 Rangos de salinidad de los diferentes tipos de agua. (Fariñas, M. 1999), (Medina J.A. 2003).

Mar/Océano	Salinidad (ppm de TDS)
Mar Báltico	28,000
Mar del Norte	34,000
Océano Pacífico	33,600
Océano Atlántico Sur	35,000
Mar Mediterráneo	36,000
Mar Rojo	44,000
Golfo Pérsico	43,000-50,000
Mar Muerto	50,000-80,000
MEDIA MUNDIAL	34,800

Tabla a1.2. Salinidad Media de los mares y océanos principales del planeta. (Abu Qdais, 1999); (Handbury Hodgkiess y Morris, 1993) y (Medina, 2000)

ANEXO 2. INSTALACIÓN EXPERIMENTAL DEL MODELO HIDRÁULICO.



Fotografías No a2.1. Vista del Canal Largo donde se albergo la instalación experimental.



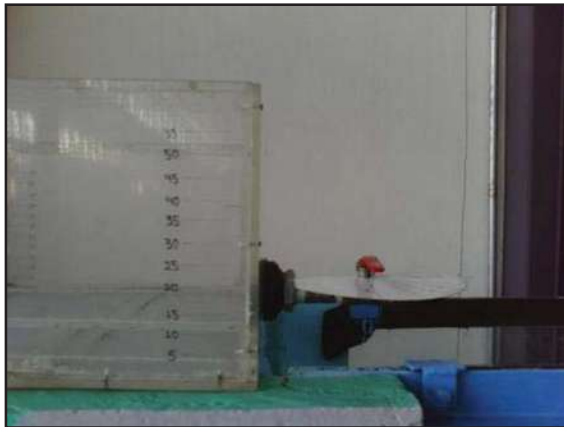
Fotografías No a2.2. y No a2.3 Ventanas de visualización.



Fotografías No a2.4 y No a2.5. Tanque elevado y tanque inferior.

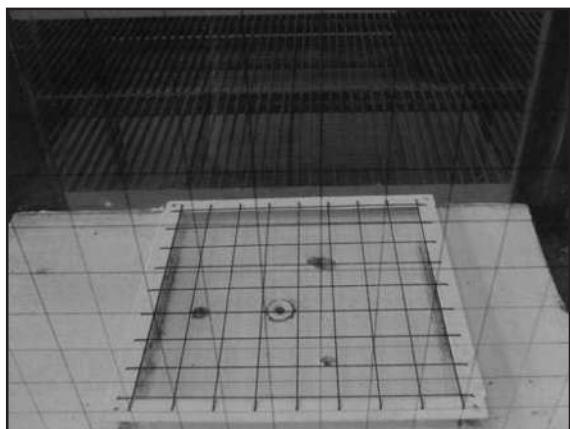


Fotografía No. a2.6 Apoyo donde se colocó la cámara digital y el brazo donde se colocó el equipo de venoclisis.



Fotografías No a2.7. y No a2.8. Graduación del tanque inferior y válvula de esfera graduada para dar los diferentes gastos.

Fotografía No a2.9. Cuadrícula situada en la plancha de concreto y en la ventana de visualización donde se realizaron las descargas



ANEXO 3. ELABORACIÓN DE LA MEZCLA SALINA (SALMUERA) Y PROGRAMA EXPERIMENTAL.

Con el objeto de obtener experiencia en la elaboración de la salmuera que se utilizaría en la pruebas de descarga así como conocer la variación del peso específico y por consiguiente de la densidad al cambiar la concentración de sal, se realizó el siguiente trabajo:

Primero cabe señalar que se trabajó todo el tiempo con sal de grano "tipo Colima".

Se prepararon ocho mezclas con diferentes concentraciones de sal cada una, que variaron de los 35 gramos por litro de agua dulce (g/l) hasta los 120 g/l, y posteriormente se hizo el cálculo del peso específico, densidad y densidad relativa.

Iniciamos obteniendo el peso específico del agua dulce del laboratorio a 21°C, la cual fue de 996.0476 Kg/m³.

Al irse preparando las mezclas salinas, se tuvo una variación de peso específico de 1,015.2619 Kg/m³ para una concentración de 35 g/l, hasta 1,064.500Kg/m³ para una concentración salina de 120 g/l.

El procedimiento con el que se trabajó fue el siguiente: Primero se agregó la cantidad de sal deseada para cada litro de agua, la cantidad de sal primeramente era pesado en una báscula digital, luego esta se agregaba al agua y se agitaba hasta que la sal quedara totalmente disuelta.

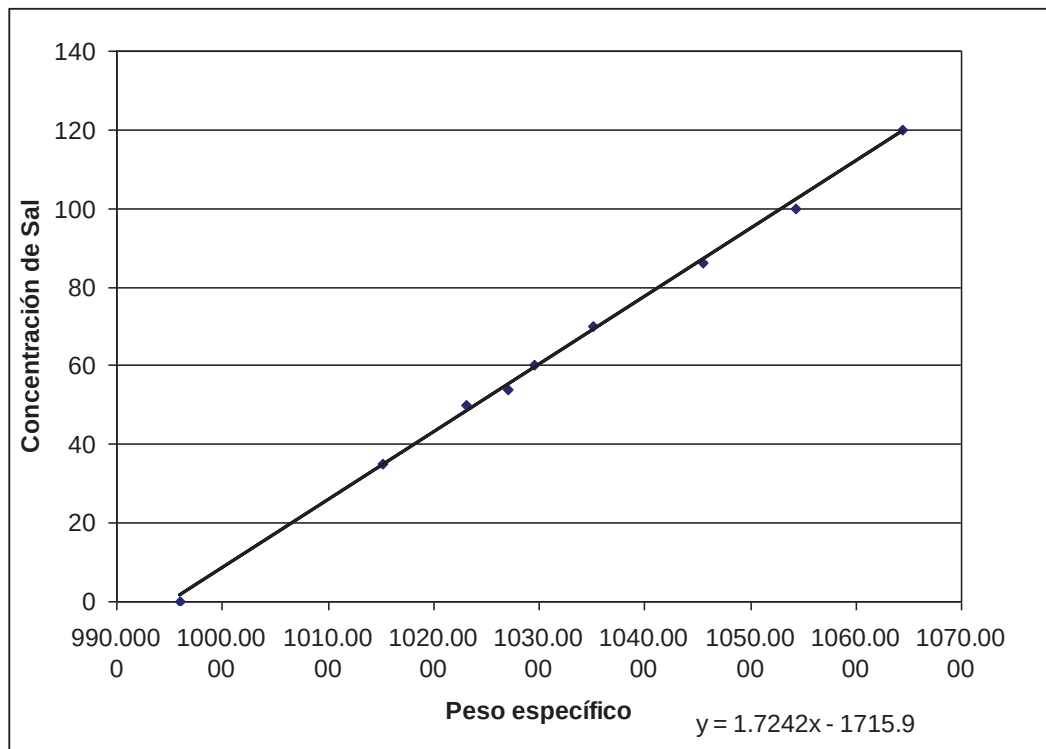
Posteriormente se tomaba una muestra de la mezcla salina en una probeta y se pesaba (este paso se repetía tres veces para tener una mayor precisión del resultado). Después el peso (del líquido) se dividía entre su volumen, para obtener el peso específico. A continuación se calculaba la densidad al dividir el peso específico entre la gravedad. Y por último se dividía la densidad entre la densidad del agua dulce para obtener la densidad relativa.

A continuación aparece la tabla que muestra las diferentes variaciones para cada mezcla salina.

LIQUIDO	CONCENTRACIÓN DE SAL (gr/lts)	TARA (gr)	W BRUTO (gr)	VOLUMEN (ml)	W NETO (gr)	W/Vol	PESO ESPECÍFICO (kg/m³)	DENSIDAD $\frac{Kgs^2}{m^4}$	DENSIDAD RELATIVA Dr
AGUA	0	380	729	350	349	0.9971	996.0476	101.5339	1.0000
			778	400	398	0.9950			
			878	500	498	0.9960			
	35	380	735	350	355	1.0143	1015.2619	103.4925	1.0193
			787	400	407	1.0175			
			887	500	507	1.0140			
	50	380	738	350	358	1.0229	1023.1190	104.2935	1.0272
			789	400	409	1.0225			
			892	500	512	1.0240			
	54	380	739	350	359	1.0257	1027.0714	104.6964	1.0311
			791	400	411	1.0275			
			894	500	514	1.0280			
	60	380	740	350	360	1.0286	1029.5238	104.9464	1.0336
			792	400	412	1.0300			
			895	500	515	1.0300			
	70	380	742	350	362	1.0343	1035.0952	105.5143	1.0392
			794	400	414	1.0350			
			898	500	518	1.0360			
	86	380	746	350	366	1.0457	1045.5714	106.5822	1.0497
			798	400	418	1.0450			
			903	500	523	1.0460			
	100	380	749	350	369	1.0543	1054.2619	107.4681	1.0584
			801	400	421	1.0525			
			908	500	528	1.0560			
	120	380	751	350	371	1.0600	1064.5000	108.5117	1.0687
			807	400	427	1.0675			
			913	500	533	1.0660			

Tabla No a3.1. Calculo del peso específico, densidad y densidad relativa de las diferentes mezclas salinas.

Al obtener las propiedades de las diversa mezclas salinas, se elaboró una grafica, en la cual se representa la concentración contra el peso específico. La grafica muestra claramente una variación lineal, en el rango medido.



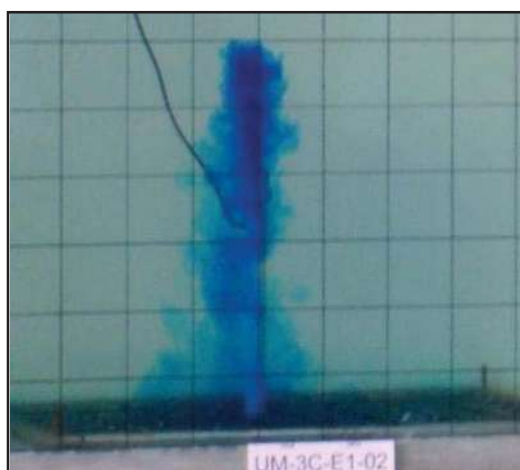
Grafica No a3.1. Grafica que muestra la variación lineal entre el peso específico y la concentración de la mezcla salina.

Antes de realizar cada prueba se tomó una muestra de la mezcla a la cual se le aplicó el procedimiento descrito y se calculó la densidad en cada caso, también se tomó la temperatura del agua dulce así como de la mezcla.

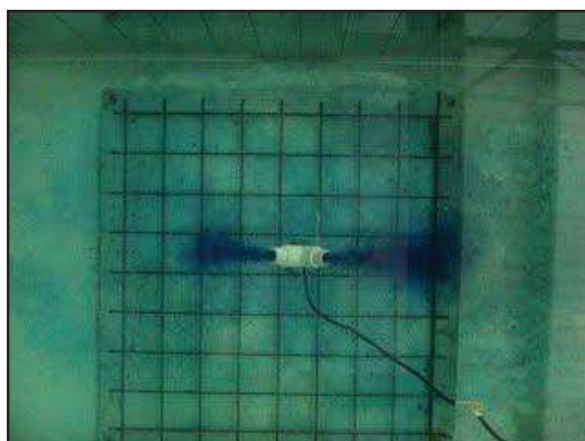
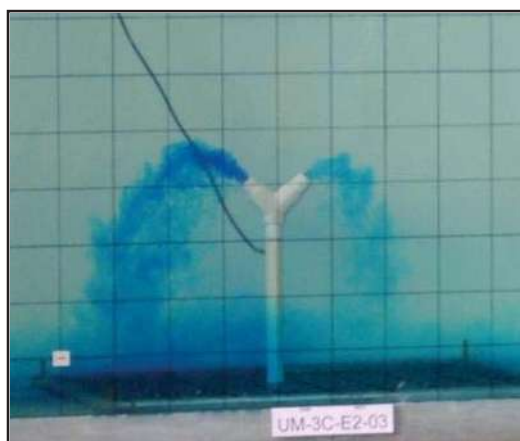
ANEXO 4. FOTOGRAFÍAS DE LAS DESCARGAS POR MEDIO DE LOS DIFERENTES DISEÑOS DE DIFUSORES, VISTA EN PERFIL Y EN PLANTA.

A continuación se presentan las imágenes obtenidas a los 15 segundos de transcurrida la descarga, la fotografías son vista en planta y perfil para cada uno de los diferentes diseños de difusores utilizados. Por lo que se pueden apreciar claramente las áreas de afectación provocada por cada uno de los difusores.

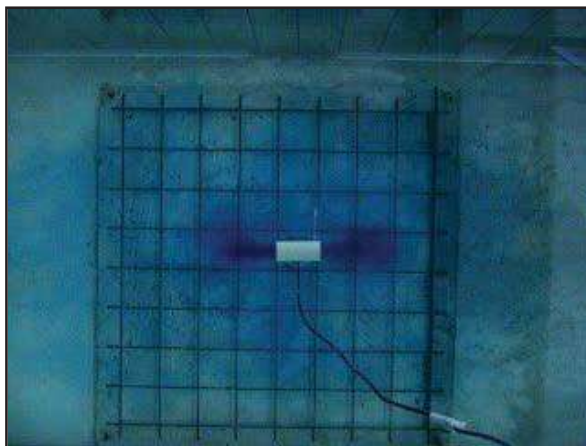
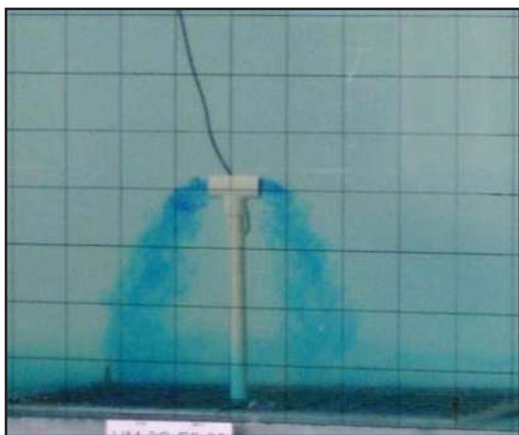
Las fotografías que a continuación aparecen, están en el siguiente orden, a la izquierda aparece la foto vista en perfil y a su derecha la foto vista en planta del mismo difusor.



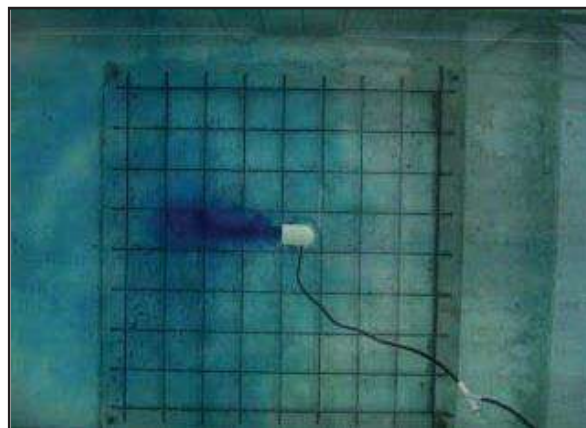
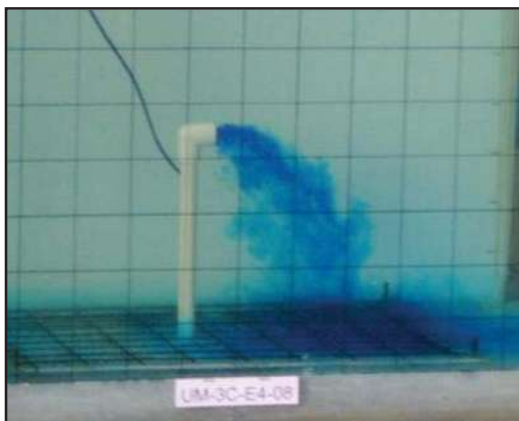
Par de fotografías No a4.1. Descarga del Difusor "vertical" o "estándar"



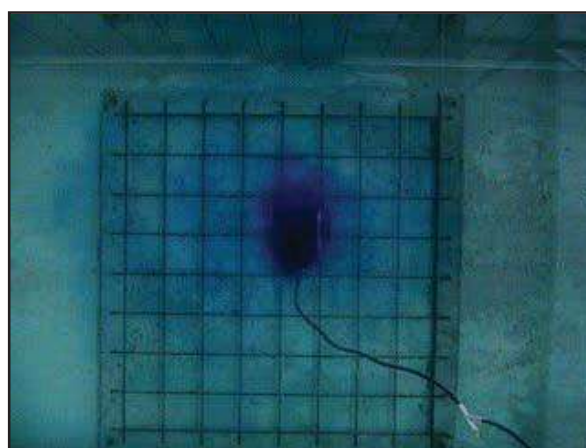
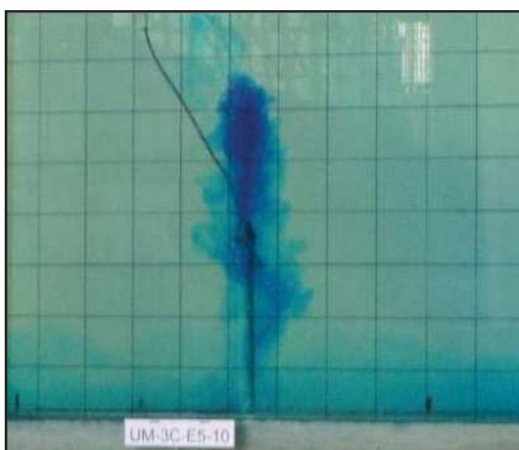
Par de fotografías No a4.2. Descarga del Difusor "Y"



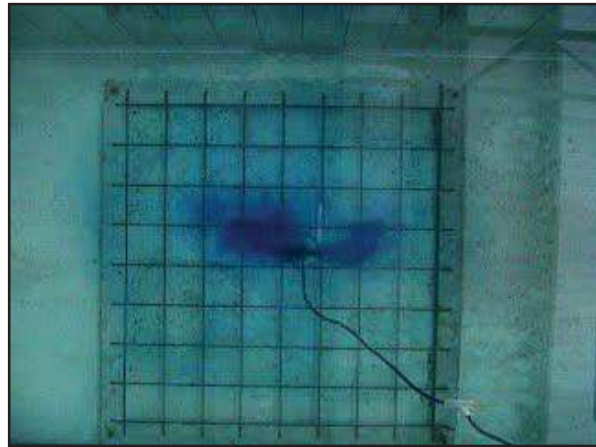
Par de fotografías No a4.3. Descarga del Difusor "T"



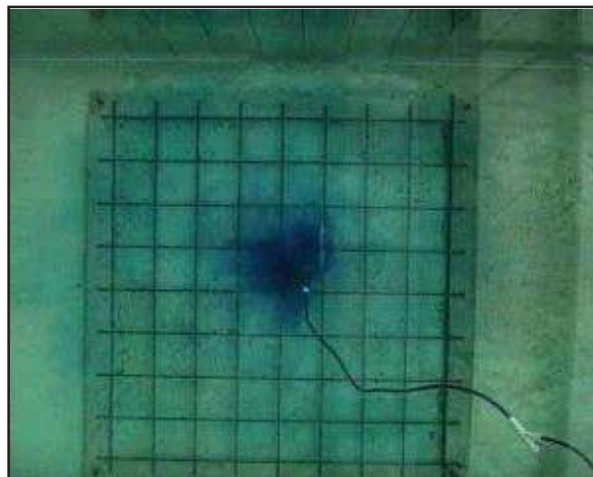
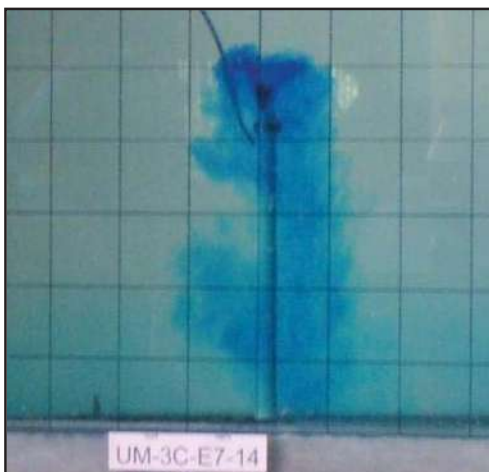
Par de fotografías No a4.4. Descarga del Difusor "codo de 90°"



Par de fotografías No a4.5. Descarga del Difusor "codo" ó "reducción gradual"



Par de fotografías No a4.6. Descarga del Difusor "peine" ó "abanico"



Par de fotografías No a4.7. Descarga del Difusor "cono invertido"

ANEXO 5. INTEGRANTES DEL EQUIPO TRABAJANDO.



Fotografía No a5.1. Control de la carga hidráulica.



Fotografía no a5.2 Grabación de video "vista en planta".



Fotografía No a5.3. Todo el equipo de trabajo, realizando sus correspondientes actividades.



Fotografía a5.4. Revisando últimos detalles.



Fotografía No a5.5. Manera en la que se hacia el cambio de los diferentes diseños de difusores.



Fotografía a5.6. Realizando otro cambio de difusor.



Fotografía a5.7. Revisando el tanque elevado así como el tanque inferior.



Fotografía a5.8. Medición volumétrica del gasto en el tanque elevado y control de la carga hidráulica.