

5



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

ABASTECIMIENTO DE AGUA DULCE PARA
OPERACIONES DE PERFORACION Y TERMINACION
DE POZOS EN PLATAFORMAS MARINAS A PARTIR
DE LA DESALINIZACION DEL AGUA DE MAR.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO PETROLERO

P R E S E N T A :

JORAM CARRILES DIAZ



DIRECTOR DE TESIS: QUIM. ROSA DE JESUS HERNANDEZ ALVAREZ

MEXICO, D. F.

ENERO DE 2001



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
60-I-014

SR. JORAM CARRILES DIAZ

Presente

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso la profesora Quím. Rosa de Jesús Hernández Álvarez y que aprobó esta Dirección para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de Ingeniero Petrolero:

**ABASTECIMIENTO DE AGUA DULCE PARA OPERACIONES DE PERFORACION Y
TERMINACION DE POZOS EN PLATAFORMAS MARINAS A PARTIR DE LA
DESALINIZACION DEL AGUA DE MAR**

- I **INTRODUCCION**
- I **ESPECIFICACIONES DEL AGUA Y SU CLASIFICACION EN CUATRO TIPOS**
- II **GENERALIDADES DE LOS FLUIDOS DE PERFORACION Y TERMINACION**
- III **DESALINIZACION DEL AGUA DE MAR**
- IV **APLICACIÓN DEL METODO DE OSMOSIS INVERSA UTILIZADO EN PLATAFORMAS MARINAS DE LA SONDA DE CAMPECHE**
- V **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**
- BIBLIOGRAFIA**

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

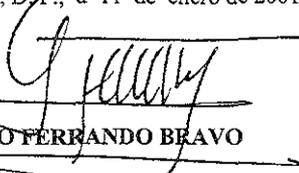
Asimismo, le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que se deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar examen profesional.

Atentamente

“POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU”

Cd. Universitaria, D. F., a 11 de enero de 2001

EL DIRECTOR


ING. GERARDO FERRANDO BRAVO

GFB*KLER*gtg

fl



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

NOMBRE: **Joram Carriles Díaz**

No. DE CUENTA: **9359516-4**

TEMA DE TESIS:

“Abastecimiento de Agua Dulce para Operaciones de Perforación y Terminación de Pozos en Plataformas Marinas a partir de la Desalinización del Agua de Mar”

SINODALES:

Presidente: Dr Daniel García Gavito

Secretario: Ing José Martínez Pérez.

Vocal: Quím. Rosa de Jesús Hernández Álvarez

1er. Suplente: Ing Joaquín Mendiola Sánchez.

2o. Suplente: M.I Néstor Martínez Romero.

Daniel García Gavito

José Martínez Pérez

Rosa de Jesús Hernández Álvarez

Joaquín Mendiola Sánchez

Néstor Martínez Romero

A Dios

Por mostrarme su reflejo en el
milagro de la existencia y por permitirme
apreciar la belleza de la naturaleza y
la del ser humano.

A mi madre, Eréndira

Por dejarme ser libre y acompañarme con
su amor, paciencia y cuidado.
Porque sé que este logro también es suyo.
¡Gracias toda la vida!

A mi hermana, Eva del Carmen

Porque me gustaría dejarle un buen ejemplo
y para que sepa que deseo lo
mejor para ella Aunque la regañe ..

A mis papás, Eva y Fausto

Por considerarme su hijo el menor,
apoyarme de manera incondicional en
todo momento y por enseñarme con su cariño
la fuerza de la fidelidad y la lealtad

Al Mayor, Raúl Orduña

Por ofrecerme desinteresadamente esa
parte vital y complementaria para cualquier
persona... un padre Esto también es
parte de su fruto.

**A mis tíos y tías, Fausto; Zirahuén;
Lizette; Cuauhtémoc y Xochitl**

Por su ayuda, preocupación y comprensión
cuando los he necesitado.

A mis primos y primas, ¡todos!

Porque quiero motivarlos y expresaries que cada logro que tengan y cada meta que cubran dará una gran satisfacción para sí mismos y para toda la familia ¡Ánimo!

A mis amigos

Por las increíbles experiencias y lecciones que hemos pasado a lo largo de nuestra amistad, por los buenos y malos tiempos, por compartir, departir y demás... ¡Gracias mis hermanos!

A mi directora de tesis, Rosita

Por su valioso tiempo, por su incansable trabajo como docente y por sus buenas enseñanzas, recomendaciones y motivaciones.

A todos mis maestros

Por haber aportado cada uno su granito de arena para llegar y formar hoy a un profesionista.

A mi Alma Mater

¡MÉXICO! ¡PUMAS! ¡UNIVERSIDAD
¡GOOOOYA! ¡GOOOOYA!
CACHÚN CACHÚN RA RA
CACHÚN CACHÚN RA RA
¡GOOOOYA! ¡UNIVERSIDAD!

**A una persona muy especial que
también vive en mi corazón, a ti Ere**

Por animarme en los momentos difíciles, por escucharme, dar alegría y serenidad a mi ser, por compartir buena parte de tu vida conmigo y porque veamos contruidos nuestros sueños Aquí estoy...

ÍNDICE

	Pág.
Introducción.	...1
CAP. I. Especificaciones del agua y su clasificación en 4 tipos.	.. 4
1 1. La importancia del agua en la perforación de pozos.	...5
1 1 1 Propiedades físicas del agua.	...6
1 1 2 Propiedades químicas del agua	.8
1 1 3. Sales presentes en el agua.	...10
1 1 4 Metales alcalinos presentes en el agua	. 13
1 1 5. Gases disueltos presentes en el agua	. 15
1.2 Clasificación del agua en 4 tipos	.17
1 2.1 Agua dulce.	. 17
1 2.2 Agua de mar	. 18
1 2 3. Agua potable	.. 21
1 2 4. Agua residual	.23
CAP. II. Generalidades de los fluidos de perforación y terminación.	...27
2 1. Introducción	. 28
2 2. Funciones de los fluidos de perforación y terminación.	28
2 2 1. Composición de los fluidos de perforación y terminación	30
2.3 Propiedades de los fluidos de perforación y terminación	.31
2.4 Selección del fluido de perforación y terminacion	.35
2 5. Aspectos que comprende el consumo de agua dentro de un programa de fluidos para pozos exploratorios direccionales.	.37
2.5 1 Estado mecánico del pozo	. 38
2.5.1 1. Lodos bentoníticos.	.43
2 5.1.2 Lodos bentoníticos tratados	. 43
2.5.1.3 Lodos poliméricos	. 44

	Pág.
2.6. Limitaciones en cuanto al uso del agua salada para elaborar fluidos de perforación y terminación.	...45
CAP. III. Desalinización del agua de mar.	...51
3 1. Importancia de la desalinización.	. 52
3.2. Sistemas para desalinizar el agua de mar.	. 53
3.2 1. Ósmosis inversa	. 53
3.2 2 Evaporacion	.. 56
3 2.2.1. Evaporación de un solo efecto	. 59
3 2.2.2. Evaporación multietapas instantánea (flash)	...60
3 2.2.3. Evaporación de efectos y etapas múltiples.	...63
3 2.2.4. Compresión de vapor	.. 65
3.2.2.5. Evaporación solar	. 66
3.3 Comparación entre métodos	.69
CAP. IV. Aplicación del método de ósmosis inversa utilizado en plataformas marinas de la Sonda de Campeche.	...73
4.1. Planta de ósmosis inversa para agua salada modelo SE265ROAS (SPCL)	.74
4 1.1. Filtración lineal o normal	. 74
4 1.2. Filtración transversal.	. 74
4 1 3. Descripción del sistema.	.. 75
4 1.3 1. Parámetros de diseño del sistema.	. 78
4 1 3 2 Aplicación	78
4 1.3.3. Funcionamiento del sistema	. 79
4 1.3.4. Dimensiones del sistema	.79
4.1.3 5. Conexiones	79
4.1.3 6 Requisitos electricos.	..79
4.1.4. Panel de control	...80
4 1.5. Panel de instrumentos	...82

	Pág.
4.1 6. Parámetros que afectan la vida de las membranas	...89
4.1.6 1. Temperatura.	...89
4.1.6 2. Compactación.	...90
4.1.6 3 Efecto del pH.	.91
4.1.6 4 Presencia de gases	91
4.2 Aspecto ambiental	92
Conclusiones y recomendaciones.	95
Bibliografía.	. 99

ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS

	Pág.
CAP. I. Tabla 1-1 Concentración de elementos en el agua de mar	. 19
Tabla 1-2. Sales más abundantes en el agua de mar.	...20
Tabla 1-3 Valores típicos para los residuos sólidos presentes en el agua	.. 25
CAP. II. Tabla 2-1 Densidades de componentes comunes del lodo.	..31
Tabla 2-2. Selección del fluido de perforación	...36
Fig. 2-1 Estado mecánico del pozo direccional Hom Hom-1	. .38
Tabla 2-3 Salmueras comúnmente usadas como fluidos de terminación.	.47
Tabla 2-4. Salmuera de cloruro de potasio	..48
Tabla 2-5. Salmuera de cloruro de sodio.	...48
Tabla 2-6 Salmuera de cloruro de calcio	...49
Tabla 2-7 Salmuera de cloruro de sodio/bromuro de sodio	. 49
CAP. III. Fig. 3-1. Ilustración de la ósmosis y la ósmosis inversa.	.55
Fig 3-2. Diagrama de flujo típico de una planta de ósmosis inversa	. 56
Fig 3-3. Diagrama simplificado de un sistema de evaporación instantánea (flash)	. .62
Fig. 3-4 Diagrama simplificado de un sistema de evaporación de efectos y etapas múltiples	..64
Fig 3-5. Diagrama de un destilador solar de una etapa.	.68
Tabla 3-1. Comparación de tres sistemas innovadores de desalinización	..72
CAP. IV. Fig. 4-1. Diagrama de proceso e instrumentación del sistema de ósmosis inversa para agua salada.	.85
Fig. 4-2 Efecto de la temperatura sobre el gasto de flujo de las membranas	..90

Para la perforación y terminación de un pozo petrolero se requiere de un sistema hidráulico que proporcione las siguientes funciones básicas: acarreo y suspensión de partículas generadas durante la perforación, control de presiones y estabilidad del agujero. Complementarias a éstas, están el disipar temperaturas de fondo, lubricar, controlar gases tóxicos puros y fluidos presentes de las formaciones. Dependiendo de la calidad de los sistemas hidráulicos podrán optimizarse las operaciones de perforación y terminación para reducir costos.

Dada la naturaleza de estos sistemas, se requiere de enormes consumos de agua dulce para su elaboración. El uso del agua dulce es debido a que la mayoría de los fluidos de perforación tradicionales llevan en su composición arcilla montmorillonita; lo cual presenta limitaciones en cuanto al empleo de agua de mar o salada. En lo referente a la utilización de esta agua en los lodos base aceite, presenta también inconvenientes ya que da lugar a la desestabilización del lodo.

El abastecimiento de agua y su aprovechamiento máximo representa un gran reto en el presente y en el futuro, debido a que cada día se hace más difícil el suministro de este líquido a nivel mundial y por lo tanto se convierte en un problema altamente costoso.

En las operaciones que se realizan en el mar, en las plataformas petroleras, uno de los principales puntos a resolver es el abastecimiento del agua y el uso apropiado al que ésta será destinada.

Como bien es sabido, la cantidad de fluido de perforación y terminación va a estar en función de la profundidad a la que se esté perforando el pozo, su estado mecánico, las características de las formaciones a ser atravesadas, de la

temperatura y presión del pozo, de los parámetros de calidad del lodo para evitar su pérdida por filtraciones hacia las paredes del pozo, entre otros.

Por lo tanto, en éste trabajo de tesis, que es de carácter bibliográfico, se dará a conocer la posibilidad de utilizar una fuente alterna de abastecimiento de agua, como es el caso del agua de mar, a través de procesos de desalinización que se emplean en el mundo para la elaboración de fluidos de perforación y terminación de pozos.

El proceso de desalinización que sea el más viable para este caso, deberá cubrir todas las necesidades que las operaciones requieran, ya que las plantas de desalinización de agua de mar utilizadas en las plataformas de zona marina de Campeche no pueden abastecer esta demanda.

CAPÍTULO I
ESPECIFICACIONES DEL AGUA Y
SU CLASIFICACIÓN EN 4 TIPOS

1.1. LA IMPORTANCIA DEL AGUA EN LA PERFORACIÓN DE POZOS

El agua es la sustancia simple más importante envuelta en la tecnología de los fluidos de perforación. El agua en las formaciones perforadas es usualmente el factor limítrofe en la perforación con aire, muy pocos pozos son perforados con aire seco. En todas las otras instancias, en algún tiempo del curso de la perforación, el agua es el mayor componente, en volumen, del fluido de perforación. Aún cuando el uso del lodo base agua está discontinuado a favor del lodo base aceite o una espuma, el agua continúa jugando un papel importante en la elaboración de fluidos de perforación. Las características inusuales del agua afectan cada paso de la operación de perforación desde su inicio hasta su terminación, y la disponibilidad y contenido químico del agua debe ser considerado en la etapa de planeación.

El agua es una sustancia peculiar. Franks, en la introducción para un tratamiento en materia de agua¹, escribió "... de todos los líquidos conocidos, el agua es probablemente el más estudiado y el menos comprendido, además muchas de sus propiedades están aceptadas como estándares internacionales...". Algunas de las propiedades inusuales del agua en comparación con otros líquidos son: la tensión superficial más alta, constante dieléctrica, calor de fusión, y calor de vaporización, y la habilidad superior del agua para disolver varias sustancias. Una de las propiedades más importantes es que el agua, a diferencia de la mayoría de otras sustancias, se expande cuando se congela bajo presión normal.

¹ Franks, F. "Introduction-Water, the Unique Chemical", *Water-A Comprehensive Treatise*, vol. 1, first ed Franks, F. ED Plenum Press, New York, 1972

El agua pura, H_2O , no existe en estado natural, sin embargo es conveniente repasar algunas de sus propiedades fisicoquímicas para comprender el complejo papel que juega en muchos fenómenos en que se manifiesta.

1.1.1. PROPIEDADES FÍSICAS DEL AGUA

Sabor y Olor

El sabor y olor del agua son determinaciones organolépticas de determinación subjetiva, para las cuales no existen instrumentos de observación, ni registro, ni unidades de medida. Tiene un interés evidente en las aguas potables destinadas al consumo humano. Las aguas adquieren un sabor salado a partir de los 300 ppm de ión cloro, y un gusto salado y amargo con más de 450 ppm de ión sulfato. El CO_2 libre le da un gusto picante. Trazas de fenoles u otros compuestos orgánicos le confieren un olor y sabor desagradables.

Color

El color es la capacidad de absorber ciertas radiaciones del espectro visible. No se puede atribuir a ningún constituyente en exclusiva, aunque ciertos colores en algunas aguas naturales son indicativos de la presencia de ciertos contaminantes. El agua pura sólo es azulada en grandes espesores. En general presenta colores inducidos por materiales orgánicos de los suelos vegetales, como el color amarillento debido a los ácidos húmicos. La presencia del hierro puede

darle un color rojizo, y la del manganeso un color negro. El color afecta estéticamente la potabilidad de las aguas y se refleja también en la confianza que puede dar para su uso en la industria. Según el origen del color de las aguas, pueden ser utilizados diversos tratamientos para la eliminación de contaminantes.

Turbidez

La turbidez es la dificultad del agua para pasar la luz debido a los materiales insolubles en suspensión de carácter coloidal o partículas muy finas, que se presentan principalmente en las aguas superficiales. Son difíciles de decantar y filtrar, y pueden dar lugar a depósitos de sedimentos en la conducción del agua equipos de proceso, etc. Además interfiere con la mayoría de procesos a que se pueda destinar el agua.

Conductividad y Resistividad

La conductividad eléctrica es la medida de capacidad del agua para conducir la electricidad. Es indicativa de la materia ionizable total presente en el agua. El agua pura contribuye mínimamente a la conductividad, sólo en caso de la presencia de iones debido a las impurezas presentes. La resistividad es la medida recíproca de la conductividad.

1.1.2. PROPIEDADES QUÍMICAS DEL AGUA

pH

El pH es una medida de la concentración de los iones de hidrógeno, y se define como $\text{pH} = \log 1/\text{H}^+$. Es una medida de la naturaleza ácida o alcalina de la solución acuosa que puede afectar a los usos específicos de la calidad del agua. La mayoría de las aguas dulces tienen un pH entre 6 y 8.

Dureza

La dureza, debida a la presencia de sales disueltas de calcio y magnesio, mide la capacidad de agua para producir incrustaciones. Afecta tanto a las aguas domésticas como a las industriales, siendo la principal fuente de depósitos e incrustaciones los intercambiadores de calor, tuberías, etc.

Para disminuir la dureza del agua se puede someter a un tratamiento de ablandamiento o desmineralización.

Alcalinidad

La alcalinidad es una medida de la capacidad para neutralizar los ácidos. Contribuyen a la alcalinidad principalmente los iones bicarbonato HCO_3^- y carbonato $\text{CO}_3^{=}$, pero también los fosfatos y los carbonatos silícicos u otros ácidos de carácter débil. Los bicarbonatos y los carbonatos pueden producir $\text{CO}_2 \uparrow$ en el

vapor, que es una fuente de corrosión en las líneas de condensado. También pueden producir espumas, provocar arrastre de sólidos con el vapor y fragilizar el acero de las tuberías.

Coloides

Es una medida del material en suspensión en el agua, que por su tamaño alrededor de los 10^{-4} ó 10^{-5} mm, se comporta como una solución verdadera, por ejemplo, atraviesa el papel filtro. Los coloides pueden ser de origen orgánico, como macromoléculas de origen vegetal, o inorgánico, como óxidos de hierro y manganeso.

Acidez Mineral

La acidez es la capacidad para neutralizar bases. Es raro que las aguas dulces presenten acidez, sin embargo las aguas superficiales pueden estar contaminadas con ácidos de drenajes mineros o industriales. Pueden afectar a las tuberías u otros equipos hidráulicos por corrosión.

Sólidos Disueltos

Los sólidos disueltos o salinidad total es una medida de la cantidad de materia disuelta en el agua, determinada por evaporación de un volumen de agua previamente filtrada. En los usos industriales la concentración elevada de sólidos

disueltos puede ser objetable por la posible interferencia en los procesos de fabricación.

Sólidos en Suspensión

Los sólidos en suspensión son una medida de los sólidos sedimentables no disueltos que pueden ser retenidos en un filtro. Se pueden determinar pesando el residuo que queda en el filtro, después de secado. Son indeseables en las aguas de proceso porque pueden causar depósitos en las conducciones, tuberías, equipos, etc.

1.1.3. SALES PRESENTES EN EL AGUA

Cloruros

El ión cloruro, Cl^- , forma sales en general muy solubles. Suele ir asociado al ión sodio, Na^+ , especialmente en aguas muy salinas. Las aguas dulces contienen entre 10 y 250 ppm de cloruros, pero no es raro encontrar valores mucho mayores. Las aguas salobres pueden tener centenares e incluso millares de ppm. El agua de mar contiene alrededor de 20000 ppm.

El contenido de cloruros afecta la potabilidad del agua y su potencial en el uso industrial. A partir de 300 ppm el agua empieza a adquirir un sabor salado, además de que las aguas con cloruros suelen ser muy corrosivas debido al

tamaño reducido del ión que puede penetrar en la capa protectora en la interfase óxido-metal y reaccionar con el hierro estructural.

Sulfatos

El ión sulfato, $\text{SO}_4^{=}$, corresponde a las sales que van de moderadamente solubles a muy solubles. Las aguas dulces contienen de 2 a 150 ppm, y el agua de mar cerca de 3000 ppm. Aunque en agua pura se satura a unos 1500 ppm, como CaSO_4 , la presencia de otras sales aumenta su solubilidad.

Nitratos

El ión nitrato, NO_3^- , forma sales muy solubles y bastante estables, aunque en medio reductor puede pasar a nitrito, nitrógeno o amoníaco. Las aguas dulces contienen menos de 10 ppm, y el agua de mar hasta 1 ppm, pero las aguas contaminadas, principalmente por fertilizantes, pueden llegar a varios centenares de ppm.

Concentraciones elevadas en las aguas de bebida pueden ser la causa de cianosis infantil. Industrialmente no tienen efectos muy significativos, e incluso es útil para controlar la fragilidad del metal a temperaturas elevadas.

Fosfatos

Los iones fosfato, PO_4^{3-} , en general son sales muy poco solubles y precipitan fácilmente como fosfato cálcico. Al responder a un ácido débil, contribuye a la alcalinidad de las aguas. En general no se encuentra en el agua más de 1 ppm.

Fluoruros

El ión fluoruro, F^- , corresponde a sales de solubilidad en general muy limitada. No suele hallarse en cantidades superiores a 1 ppm. Tiene un efecto benéfico sobre la dentadura si mantiene su contenido alrededor de 1 ppm, por este motivo se añade al agua potable.

Sílice

La sílice, SiO_2 , se encuentra en el agua disuelta como ácido silícico, H_4SiO_4 , y como materia coloidal. Contribuye ligeramente a la alcalinidad del agua. Las aguas naturales contienen entre 1 y 40 ppm, pudiendo llegar a 100 ppm, especialmente si son aguas bicarbonatadas sódicas.

Bicarbonatos y Carbonatos

Existe una estrecha relación entre los iones bicarbonato, HCO_3^- , carbonato CO_3^{2-} , el CO_2 gas y el CO_2 disuelto. A su vez el equilibrio está afectado por el

pH. Estos iones contribuyen fundamentalmente a la alcalinidad del agua. Los carbonatos precipitan fácilmente en presencia de iones de calcio. Las aguas dulces suelen contener entre 50 y 350 ppm de ión bicarbonato, y si el pH es inferior a 8.3, no hay prácticamente ión bicarbonato. El agua de mar contiene unos 100 ppm de ión bicarbonato

1.1.4. METALES ALCALINOS PRESENTES EN EL AGUA

Sodio

El ión sodio, Na^+ , corresponde a sales de solubilidad muy elevada y difíciles de precipitar. Suele estar asociado al ión cloruro. El contenido en aguas dulces suele estar entre 1 y 150 ppm. El agua de mar contiene cerca de 11000 ppm. Es un indicador potencial de corrosión.

Potasio

El ión potasio, K^+ , corresponde a sales de solubilidad muy elevada y difíciles de precipitar. Las aguas dulces no suelen contener más de 10 ppm y el agua de mar contiene alrededor de 400 ppm, por la cual es un catión mucho menos significativo que el sodio.

Calcio

El ión calcio, Ca^{+} , forma sales desde moderadamente solubles a muy insolubles. Precipita fácilmente como carbonato de calcio, CaCO_3 . Contribuye muy especialmente a la dureza del agua y a la formación de incrustaciones. Las aguas dulces suelen contener de 10 a 250 ppm, o incluso 600 ppm. El agua de mar contiene unas 400 ppm.

Magnesio

El ión magnesio, Mg^{+} , tiene propiedades muy similares a las del ión calcio, pero sus sales son, en general, más solubles y difíciles de precipitar; por el contrario, su hidróxido $\text{Mg}(\text{OH})_2$, es menos soluble. Las aguas dulces suelen contener entre 1 y 100 ppm, y el agua de mar contiene unos 1300 ppm. Cuando el contenido en agua alcanza varios centenares le da un sabor amargo y propiedades laxantes, que pueden afectar su potabilidad. Contribuye a la dureza del agua y a pH alcalino. Puede formar incrustaciones de hidróxido.

Hierro

El ión hierro se puede presentar como ión ferroso, Fe^{+} , o en la forma más oxidada de ión férrico, Fe^{+3} , la estabilidad de las distintas formas químicas depende del pH, condiciones oxidantes o reductoras del medio, composición de la solución, presencia de materias orgánicas acomplejantes, etc. La presencia del hierro puede afectar la potabilidad del agua, y en general, es un inconveniente en aguas industriales por dar lugar a depósitos, incrustaciones y corrosión.

Manganeso

El ión manganeso se comporta en muchos aspectos de forma similar al hierro. Además de actuar con 2 y 3 cargas positivas, actúa con valencia +4 formando el MnO insoluble. Rara vez el agua contiene más de 1 ppm, adquiriendo entonces un pH ácido.

Metales Tóxicos

Los más comunes son el arsénico, el cadmio, el plomo, el cromo, el bario y el selenio. Todos ellos deben ser estrictamente controlados en el origen de la contaminación

1.1.5. GASES DISUELTOS PRESENTES EN EL AGUA

Dióxido de Carbono

El dióxido de carbono, CO₂, es un gas relativamente soluble que se hidroliza formando iones bicarbonato y carbonato, en función del pH del agua. Las aguas subterráneas profundas pueden contener hasta 1500 ppm, pero en las aguas superficiales se sitúa entre 1 y 30 ppm. Un exceso de CO₂↑ hace al agua corrosiva, factor importante en las líneas de transporte de vapor y condensados.

Oxígeno

El oxígeno, O_2 , por su carácter oxidante juega un papel importante en la solubilización o precipitación de iones que presentan una forma insoluble. Es el parámetro más importante en el control de la calidad de las aguas superficiales en causas naturales. Provoca la corrosión de los metales, de líneas y de equipos; pero su ausencia puede representar la presencia de otros gases objetables tales como el metano, sulfhídrico, etc.

Ácido Sulfhídrico

El ácido sulfhídrico, H_2S , es un gas venenoso que se distingue por su olor a azufre, es causa de corrosión en tuberías y equipos.

Amoniaco

El amoníaco, NH_3 , es un indicador de contaminación del agua y en forma no iónica es tóxico para los peces. Al clorar el agua a partir del amoníaco se forman cloraminas, también tóxicas. Provoca la corrosión de las aleaciones de cobre y zinc, formando un complejo soluble.

1.2. CLASIFICACIÓN DEL AGUA EN 4 TIPOS

Se ha realizado la siguiente clasificación del agua para tener en claro las diferencias, en lo que al contenido de sólidos y contaminantes disueltos se refiere, en 4 tipos que considero, son de mayor importancia en este trabajo, y además, poder ubicar la presencia del agua de mar dentro del enorme contexto que abarca el estudio del agua.

1.2.1. AGUA DULCE

Se define por lo general al agua dulce como agua conteniendo sales disueltas en cantidad inferior a 1000 ppm de ión Cl⁻. La dureza del agua depende del uso al que se destine. El agua para beber, de acuerdo con el Servicio de Salud Pública de Estados Unidos, debe tener no más de 1000 ppm de ión Cl⁻ y, preferiblemente, menos de 500 ppm de éste. En general, la salinidad del agua destinada al riego agrícola no debe ser superior a 1200 ppm de cloro, dependiendo en último extremo la concentración permisible del contenido salino específico. Para algunos usos industriales, como pueden ser la refrigeración y el lavado, puede utilizarse agua de mar no depurada; por otra parte, en las calderas de alta presión puede ser necesario utilizar agua casi pura, con un contenido salino no mayor a 2 ó 3 ppm.

El agua dulce puede contener una gran variedad de impurezas, características del ciclo hidrológico que haya experimentado previamente. Esta puede llegar directamente a la industria desde una captación independiente o a través de una red de suministro que probablemente entregará el agua con algunas

modificaciones en su composición original. Cuando las impurezas representan elementos nocivos para el uso al que va a ser destinada el agua, las denominamos contaminantes. Por lo tanto, es el grado de calidad requerido el que determina si una impureza es contaminante o no.

1.2.2. AGUA DE MAR

La sal común, el cloruro de sodio, provoca la mayor parte de la salinidad del agua marina. No obstante el agua de mar también contiene pequeñas cantidades de muchas otras sales; en total, unos 57 elementos disueltos. Véase Tabla 1-1.

La salinidad de las aguas susceptibles de depuración es muy variable. Los océanos presentan una notable uniformidad, con 35,000 ppm, véase Tabla 1-2, de sales disueltas como término medio. Pero en el Golfo Pérsico asciende a casi 40000 ppm; en la bahía de Chesapeake es de alrededor de 15000 ppm, y en el Mar Báltico, sólo de 7000 ppm.

Tabla 1-1

CONCENTRACIÓN DE ELEMENTOS EN EL AGUA DE MAR

Elemento	tons/km ³	Elemento	tons/km ³	Elemento	tons/km ³
Cloro	22 375 000	Zinc	12	Criptón	0.25
Sodio	12 375 000	Hierro	12	Neón	0.12
Magnesio	1 600 000	Aluminio	12	Cadmio	0.12
Azufre	1 050 000	Molibdeno	9	Tungsteno	0.12
Calcio	475 000	Selenio	5	Xenón	0.12
Potasio	450 000	Estaño	4	Germanio	0.07
Bromo	76 500	Cobre	4	Cromo	0.05
Carbono	33 000	Arsenico	4	Torio	0.05
Estroncio	9 500	Uranio	4	Escandio	0.05
Boro	7 500	Níquel	2	Plomo	0.02
Silice	3 500	Vanadio	2	Mercurio	0.02
Flúor	1 525	Manganeso	2	Galio	0.02
Argón	700	Titanio	1.25	Bismuto	0.02
Nitrogeno	600	Antimonio	0.5	Niobio	0.01
Litio	200	Cobalto	0.5	Talio	0.01
Rubidio	142	Cesio	0.5	Helio	0.007
Fosforo	82	Cerio	0.5	Oro	0.005
Yodo	70	Itrio	0.25		
Bario	35	Plata	0.25		
Indio	23	Lantano	0.25		

Tabla 1-2

SALES MÁS ABUNDANTES EN EL AGUA DE MAR	
Sales	Partes por millón de agua de mar (aproximadas)
Cloruro de sodio NaCl	27 213
Cloruro de magnesio MgCl ₂	3 807
Sulfato de magnesio MgSO ₄	1 658
Sulfato de calcio CaSO ₄	1 260
Sulfato de potasio K ₂ SO ₄	863
Carbonato de calcio CaCO ₃	123
Bromuro de magnesio MgBr ₂	76
TOTAL	35 000
IONES	
Cationes	
Sodio Na ⁺	10 722
Magnesio Mg ⁺	1 297
Calcio Ca ⁺	417
Potasio k ⁺	382
TOTAL	12 818
Aniones	
Cloro Cl ⁻	19 337
Sulfato SO ₄ ⁼	2 705
Bicarbonato HCO ₃ ⁻	97
Bromo Br ⁻	66
Carbonato CO ₃ ⁼	7
TOTAL	22 212

1.2.3. AGUA POTABLE

Los países tienen legislaciones relacionadas con las aguas de consumo humano, las que sirven para determinar las responsabilidades de los distintos sectores involucrados en la producción y distribución del agua potable o agua de bebida, de su monitoreo y de su control.

Los países cuentan asimismo, con reglamentaciones que definen qué se entiende por agua potable; es decir, los patrones que debe seguir para que la misma sea inocua para la salud humana. Dentro de esas reglamentaciones hay una muy específica que se denomina la "Norma de Calidad de Agua Potable"

Allí se establece qué sustancias pueden estar presentes en el agua y las concentraciones máximas permisibles que no signifiquen riesgo para la salud.

No existe ningún país que no considere como herramienta principal para la confección y actualización periódica de sus Normas Nacionales, a las Guías de la Organización Mundial de la Salud, OMS, para la Calidad del Agua Potable.

Valor Guía

Las Guías OMS giran alrededor de un nuevo concepto que es importante destacar y difundir. Ese concepto es el de valor guía, que sirve para estimar la calidad del agua de bebida y que se define de la siguiente forma:

Un valor guía representa la concentración de un componente que no supone un riesgo significativo para la salud del consumidor si éste bebe el agua

durante toda su vida. La calidad definida en las Guías para la calidad del agua potable, es la adecuada para el consumo humano y para todos los usos domésticos habituales, incluida la higiene personal. Sin embargo, se puede necesitar una mejor calidad para propósitos especiales, como la diálisis renal. Cuando se sobrepasa un valor guía, esto se debe considerar como una indicación de que es preciso:

- i) Investigar la causa con miras a tomar medidas correctivas.
- ii) Solicitar el asesoramiento de las autoridades responsables de la salud pública.

Las desviaciones por un periodo breve durante el cual se sobrepasan los valores guía, no significan necesariamente que el agua no sea apta para el consumo. La proporción en que pueda rebasarse un valor guía y el período durante el cual pueda prolongarse esta situación sin que ello repercuta en la salud pública dependerá de la sustancia de que se trate. Cuando se sobrepase un valor guía, se recomienda que se consulte al organismo de vigilancia competente, por lo general, la autoridad responsable de la salud pública, para que aconseje medidas adecuadas, teniendo en cuenta la ingesta de la sustancia procedente de fuentes distintas del agua de bebida, si se trata de componentes químicos, la toxicidad de la sustancia, la probabilidad de efectos negativos y la naturaleza de éstos, las posibilidades prácticas de adoptar medidas correctivas y otros factores similares. Al elaborar las normas nacionales para el agua potable basadas en estos valores guía, será necesario tener en cuenta una serie de condiciones geográficas, socioeconómicas, alimentarias y de otro tipo que influyen en la exposición potencial. Esto puede hacer que las normas nacionales difieran apreciablemente de los valores guía.

1.2.4. AGUA RESIDUAL

El origen, composición y cantidad de los desechos están relacionados con los hábitos de vida vigentes. Cuando un producto de desecho se incorpora al agua, el líquido resultante recibe el nombre de agua residual.

Las aguas residuales tienen un origen doméstico, industrial, subterráneo y meteorológico, y estos tipos de aguas residuales suelen llamarse respectivamente, domésticas, industriales, de infiltración y pluviales.

Las aguas residuales domésticas son el resultado de actividades cotidianas de las personas. La cantidad y naturaleza de los vertidos industriales es muy variada, dependiendo del tipo de industria, de la gestión de su consumo de agua y del grado de tratamiento que los vertidos reciben antes de su descarga. Una acería, por ejemplo, puede descargar entre 5700 y 151000 litros por tonelada de acero fabricado. Si se practica el reciclado, se necesita menos agua.

La infiltración se produce cuando se sitúan conductos de alcantarillado por debajo del nivel freático o cuando el agua de lluvia se filtra hasta el nivel de la tubería. Esto no es deseable, ya que impone una mayor carga de trabajo al tendido general y a la planta depuradora. La cantidad de agua de lluvia que habrá que drenar dependerá de la pluviosidad así como de las escorrentías o rendimiento de la cuenca de drenaje.

Un área metropolitana estándar vierte un volumen de aguas residuales entre el 60 y el 80% de sus requerimientos diarios totales, y el resto se usa para lavar coches y regar jardines, así como en procesos como el enlatado y embotellado de alimentos.

Composición

La composición de las aguas residuales se analiza con diversas mediciones físicas, químicas y biológicas. Las mediciones más comunes incluyen la determinación del contenido de sólidos, la demanda bioquímica de oxígeno, DBO5, la demanda química de oxígeno, DQO, y el pH. Los residuos sólidos comprenden los sólidos disueltos y en suspensión. Los sólidos disueltos son productos capaces de atravesar un papel filtro, y los suspendidos los que no pueden hacerlo. Los sólidos en suspensión se dividen a su vez en depositables y no depositables, dependiendo del número de miligramos de sólido que se depositan a partir de 1 litro de agua residual en una hora. Todos estos sólidos pueden dividirse en volátiles y fijos, siendo los volátiles, por lo general, productos orgánicos y los fijos materia inorgánica o mineral.

DBO, demanda biológica de oxígeno: cantidad de oxígeno requerida por los organismos descomponedores aeróbicos para descomponer la materia orgánica disuelta o en suspensión.

La concentración de materia orgánica se mide con los análisis DBO5 y DQO. La DBO5 es la cantidad de oxígeno empleado por los microorganismos a lo largo de un periodo de cinco días para descomponer la materia orgánica de las aguas residuales a una temperatura de 20°C. De modo similar, la DQO es la cantidad de oxígeno necesario para oxidar la materia orgánica por medio de dicromato en una solución ácida y convertirla en dióxido de carbono y agua. El valor de la DQO es siempre superior al de la DBO5 porque muchas sustancias orgánicas pueden oxidarse químicamente, pero no biológicamente. La DBO5 suele emplearse para comprobar la carga orgánica de las aguas residuales municipales e industriales biodegradables, sin tratar y tratadas. La DQO se usa

para comprobar la carga orgánica de aguas residuales que, o no son biodegradables o contienen compuestos que inhiben la actividad de los microorganismos. El pH mide la acidez de una muestra de aguas residuales. Los valores típicos para los residuos sólidos presentes en el agua y la DBO5 del agua residual doméstica aparecen en la Tabla 1-3. El contenido típico en materia orgánica de estas aguas es un 50% de carbohidratos, un 40% de proteínas y un 10% de grasas; y entre 6.5 y 8.0, el pH puede variar.

Tabla 1-3

VALORES TÍPICOS PARA LOS RESIDUOS SÓLIDOS PRESENTES EN EL AGUA					
Tipos de sólidos	Sólidos (mg/l)			DBO5	DQO
	Fijos	Volátiles	TOTAL	mg/l	Mg/l
Suspendidos	70	175	245	110	108
Precipitables	45	100	145	50	42
No precipitables	25	75	100	60	66
Disueltos	210	210	420	30	42
TOTAL	350	560	910	250	258

Cada proceso industrial requiere unas características especiales del agua, exenta de determinados contaminantes. Para eliminarlos, el agua se somete a unos tratamientos de purificación; que a su vez, los procesos industriales introducen en el agua nuevos contaminantes. Las técnicas de tratamiento de agua cubren una amplia variedad de procesos de purificación. Si el agua fuese

siempre pura, o siempre tuviese una composición constante de los contaminantes presentes, su acondicionamiento para un uso industrial sería simple y uniforme. Sin embargo, este no es el caso, y la variabilidad de las impurezas, junto con las alternativas diferentes de tratamiento que podemos elegir, cada una óptima para las condiciones determinadas, requieren una valuación experta, basada en unos conocimientos especializados.

CAPÍTULO II
GENERALIDADES DE LOS
FLUIDOS DE PERFORACIÓN
Y TERMINACIÓN

2.1. INTRODUCCIÓN

El éxito de la perforación y terminación de un pozo petrolero y su costo depende considerablemente de las propiedades de los fluidos, tanto de perforación como de terminación. El costo de los fluidos de cada uno por sí mismo es relativamente pequeño, pero la elección de un fluido correcto y el mantenimiento de las propiedades adecuadas mientras se perfora y termina influyen en los costos totales del pozo. Por ejemplo, el número de días que se requiere el aparejo para perforar y terminar una profundidad total depende del rango de penetración de la barrena, de anomalías causadas por derrumbes, tubería de perforación pegada a la pared del pozo, pérdida de circulación, y daño ocasionado al intervalo productor, los cuales están ligados a las propiedades de los fluidos.

2.2 FUNCIONES DE LOS FLUIDOS DE PERFORACIÓN Y TERMINACIÓN

Fluido de perforación

El fluido de perforación tiene varios requerimientos. Históricamente, el primer propósito del fluido de perforación era servir como un vehículo para la remoción de los recortes desde fondo del agujero, pero ahora las aplicaciones diversas para fluidos de perforación hacen la asignación de funciones específicas difíciles.

En la perforación rotatoria, las funciones principales realizadas por los fluidos de perforación son:

1. Acarrear los recortes producidos por la barrena, transportarlos hacia arriba por el espacio anular, y permitir su separación en la superficie.
2. Enfriar y limpiar la barrena
3. Reducir la fricción entre la sarta de perforación y las paredes del agujero.
4. Mantener la estabilidad de las secciones sin cementación de TR del agujero.
5. Prevenir la invasión de fluidos al pozo (aceite, gas, o agua) de rocas permeables atravesadas.
6. Formar una película que funcione como un filtro de baja permeabilidad (enjarre) la cual selle los poros y otras aberturas en formaciones penetradas por la barrena.
7. Asistir en la colección e interpretación de información disponible por recortes de perforación, núcleos y registros geofísicos.

En conjunción con las funciones descritas anteriormente, algunas limitaciones (o requerimientos adicionales) son necesitadas en el fluido de perforación. El fluido **no** debe:

1. Causar heridas al personal de trabajo, no ser dañino u ofensivo al medio ambiente.
2. Requerir métodos inusuales o costosos de terminación del agujero perforado.
3. Interferir con la productividad normal del fluido de la formación.
4. Corroer o causar deterioro del equipo de perforación.

Fluidos de terminación

Los fluidos de terminación son básicamente similares a los fluidos de perforación, salvo con la diferencia de que los de terminación se deben escoger de tal manera, que se produzca el mínimo daño a la formación productora.

Usualmente estos fluidos se elaboran con la mínima cantidad de sólidos, solubles en ácidos, y se densifican con sales disueltas para evitar daño a la formación.

2.2.1. COMPOSICIÓN DE LOS FLUIDOS DE PERFORACIÓN Y TERMINACIÓN

Los fluidos de perforación y terminación están clasificados de acuerdo a su base:

- ❖ *Lodos base agua.* Compuestos por partículas sólidas que están suspendidas en el agua o en salmueras. El aceite puede estar emulsificado en el agua, en cuyo caso el agua es determinada como fase continua.

- ❖ *Lodos base aceite.* Compuestos por partículas sólidas que están suspendidas en el aceite, el agua o salmuera puede estar emulsificada en el aceite. En este caso al aceite se le determina como fase continua.

- ❖ *Lodos aerados.* Con estos "lodos", los recortes son removidos por una corriente de aire o gas natural a altas velocidades. Agentes espumantes son adicionados a la corriente para remover los flujos menores de agua.

2.3. PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS DE PERFORACIÓN Y TERMINACIÓN

Densidad

La densidad está definida como la masa por unidad de volumen. La presión ejercida por una columna estática de lodo depende de la densidad y de la profundidad. A fin de prevenir la invasión de fluidos de la formación y de permitir la formación del enjarre en las paredes del pozo, la presión de la columna de lodo debe exceder la presión de poro o presión de formación por lo menos en 200 psi (14 kg/cm²). La presión de poro depende de la profundidad de la formación, la densidad de los fluidos de la formación y de las condiciones geológicas

Tabla 2-1

DENSIDADES DE COMPONENTES COMUNES DEL LODO					
Material	g/cm ³	Lb/gal	lb/pie ³	lb/bbl	kg/m ³
Agua	1.0	8.33	62.4	350	1000
Acete	0.8	6.66	50	280	800
Barita	4.3	35.8	268	1500	4300
Arcilla	2.5	20.8	156	874	2500
Sal	2.2	18.3	137	770	2200

Filtración

La filtración es la habilidad del lodo para sellar las formaciones permeables expuestas por la barrena con un enjarre; esto es otro de los mayores requerimientos de mayor importancia para tener éxito en la perforación y terminación, ya que la presión de la columna de lodo debe ser más grande que la presión de formación para prevenir que los fluidos de la misma ingresen al agujero, porque de otra forma el lodo invadiría continuamente las formaciones permeables si el enjarre no se formara.

pH

El pH es expresado por la acidez o alcalinidad relativa de un líquido. Definido como el logaritmo negativo (referido en base 10) de la concentración del ión hidrógeno, las unidades del pH decrecen con el incremento de la acidez con un factor de 10. Para un pH de 7, la concentración del ión hidrógeno es igual a la concentración del ión hidroxil, y el líquido es considerado neutro, como el agua pura. El control óptimo de algunos sistemas de lodos están basados en el pH, como lo es la detección y tratamiento de ciertos contaminantes. Un lodo hecho con bentonita y agua dulce, por ejemplo, tendrá un pH de 8 a 9.

Alcalinidad

Las mediciones de la alcalinidad son hechas para determinar la cantidad de cal en lodos tratados con cal. El lodo es analizado por titulación para determinar la cantidad total de limos, solubles e insolubles, en el sistema (P_m). El

filtrado es analizado por titulación para determinar la cantidad de limos en solución (P_f). La cantidad de limos sin disolver se calcula con $P_m - P_f$. Las mediciones de alcalinidad de muestras de agua y de filtrados de lodos químicamente tratados de manera muy ligera, pueden ser utilizadas para calcular las concentraciones de hidroxil (OH), carbonato (CO_3), y de iones de bicarbonato (HCO_3) en solución.

Capacidad de intercambio de catión: prueba de azul de metileno

La prueba de azul de metileno sirve para indicar la cantidad de arcilla activa en un sistema de lodo o en una muestra de lutita. La prueba mide la capacidad total de intercambio de catión de las arcillas presentes y es útil en conjunción con la determinación del contenido de sólidos como una indicación de las características coloidales de los minerales de la arcilla. Similarmente, los recortes de lutitas pueden ser caracterizados y se pueden hacer algunas estimaciones considerando las propiedades del lodo y los efectos posibles en la estabilidad del agujero.

Conductividad eléctrica

La resistividad de los lodos base agua puede ser medida y controlada, cuando sea deseado, para permitir una mejor evaluación de las características de la formación con los registros eléctricos. La sal es usada para disminuir la resistividad. El agua dulce es agente para incrementar la resistividad. La determinación de la resistividad envuelve la medición de la resistencia al flujo de corriente eléctrica a través de una muestra de configuración conocida. En la lectura directa de resistividad-metro, la medición de la resistencia es convertida a

resistividad en ohm-metro. La prueba de estabilidad eléctrica es utilizada como una indicación de la estabilidad de emulsiones de agua en aceite (lodos base aceite).

Poder Lubricante

Una de las funciones del fluido de perforación es lubricar la sarta de perforación. El requerimiento para la lubricación es especialmente crítico en pozos direccionales o desviados. El probador lubricante Timken ha sido modificado y se ha desarrollado un método para comparar resultados sobre los cuales se basan las recomendaciones para el tratamiento del lodo.

Corrosión

Se ha encontrado que la corrosión es la principal causa de fallas en la tubería de perforación. En la planeación del programa de fluidos de perforación y terminación se debe dar atención no sólo a los posibles efectos corrosivos, sino también a los efectos de los inhibidores de corrosión en los fluidos de perforación y terminación por sí mismos. Algunos inhibidores de corrosión, por ejemplo, pueden afectar severamente las propiedades de los lodos base agua. Las fuentes de agentes corrosivos, su composición y métodos de sus contradicciones son factores que deben ser considerados para la selección de un fluido de perforación y terminación apropiado.

2.4. SELECCIÓN DEL FLUIDO DE PERFORACIÓN Y TERMINACIÓN

Al pasar de los años, un número considerable de formulaciones de fluidos de perforación y terminación han sido desarrollados para satisfacer varias condiciones superficiales. La selección del mejor fluido, para conocer condiciones anticipadas, minimizará los costos del pozo y reducirá el riesgo de problemas; tales como pegadura de tubería de perforación, pérdida de circulación, y brotes de gas.

Los distintos tipos de fluidos de perforación y terminación que están disponibles han sido propuestos por Hutchison y Anderson¹ (ver Tabla 2-2).

Las consideraciones que afectan la elección de los lodos para conocer las condiciones específicas se mencionan a continuación:

- ❖ Localización de la perforación.
- ❖ Perforación de lutitas.
- ❖ Formaciones geopresionadas.
- ❖ Altas temperaturas.
- ❖ Inestabilidad del agujero:
 - ◆ Por contracción
 - ◆ Por alargamiento.
- ❖ Perforación rápida.
- ❖ Perforación de domos salinos.
- ❖ Agujeros con altos ángulos.
- ❖ Evaluación de formaciones.
- ❖ Terminación y reparación de pozos.
- ❖ Deterioro en la productividad.

¹ Hutchison, S. O., and Anderson, G. W., "What to Consider When Selecting Drilling Fluids" World Oil (Oct., 1974) Pp. 83-94

Tabla 2-2

SELECCIÓN DEL FLUIDO DE PERFORACIÓN

Clasificación	Principales Ingredientes	Características
GAS:		
Aire seco	Aire seco	Perforación rápida en seco, rocas duras Sin afluencia de agua Polvo
Niebla	Aire, agua o lodo	Formaciones húmedas con pequeña afluencia de agua Alta velocidad anular
Espuma	Aire, agua, agente espumante.	Rocas estables Flujo moderado de agua
Espuma estable	Aire, agua con polímeros y/o bentonita; agente espumante	Todas las condiciones de "presión-reducida", altos volúmenes de agua, remoción de recortes grandes a baja velocidad anular Selección de polímero y agente espumante para proporcionar estabilidad al agujero y tolerar sales La espuma puede ser formada en superficie
AGUA:		
Dulce	Agua dulce	Perforación rápida en formaciones estables Se necesita amplio abastecimiento de agua y de fácil disposición.
Salada	Agua de mar.	Salmueras para incrementar la densidad y disminuir puntos de congelación Limitado para rocas de baja permeabilidad
Lodos bajos en sólidos	Agua dulce, polímero, bentonita.	Perforación rápida en rocas inestables Se contaminan con cemento y sales solubles.
Lodo para iniciar perforación	Agua y bentonita.	Económicos
Lodos de agua salada	Agua de mar, salmueras, arcillas con agua salada, polímeros celulósicos, almidón.	Perforación de domos salinos Reparación de pozos En perforación de sales tales como halitas, se puede requerir tratamiento especial
Lodos de cal	Agua dulce o salobre, bentonita, cal, lignosulfonato de calcio, lignito, cromato de sodio y surfactante para alta temperatura	Perforación de lutitas Mantenimiento simple a densidades medias Temperatura máxima 300°F (150°C) con adición de lignito Algo de tolerancia a la sal No se ve afectado por anhídrido o cemento El pH es de 11-12
Lodos de yeso ¹	Igual que para lodos de cal, excepto por el sustituto de almidón por cal	Perforación de lutitas Mantenimiento simple Temperatura máxima 325°F (165°C) No se ve afectado por anhídrido, cemento o cantidades moderadas de sal. El pH es de 9-10

- NOTAS:**
- (1) Para cualquier composición de agua se deben adherir detergentes, lubricantes, y/o inhibidores de corrosión
 - (2) La densidad de los lodos puede ser elevada por la adición de carbonato de calcio o barita
 - (3) El cloruro de calcio es adicionado para la fase de agua emulsificada para incrementar la estabilidad del agujero cuando la barita es adicionada para elevar la densidad de esos lodos, estos son llamados lodos "no dispersos"
- ¹ El aceite diesel cada vez que es adicionado a esos lodos, frecuentemente va acompañado con un agente emulsificante
- ² La estabilidad de la temperatura de esos lodos es incrementada por la remoción de calcio y la adición de lignito y surfactante (DMS)

Tabla 2-2 (Continuación)

SELECCIÓN DEL FLUIDO DE PERFORACIÓN

Clasificación	Principales Ingredientes	Características
Lodos potasicos	Cloruro de potasio, acrílico, polímero bio o celulósico, algo de bentonita	Estabilidad del agujero. Equipo necesario para la remoción mecánica de sólidos. Perforación rápida en contenido mínimo de sólidos
ACEITE:		
Acete	Acete crudo intemperizado, crudo asfáltico mas jabón mas agua	Terminación y reparación de pozos de baja presión. Perforación poco profunda y zonas productivas de baja presión. Agua para incrementar densidad y habilidad para el acarreo de recortes.
Lodos asfálticos	Acete diesel, asfalto, emulsificantes, agua (2-10%).	Para satisfacer cualquier requerimiento de densidad y estabilidad del agujero y temperaturas de 600°F (315°C).
Lodos no asfálticos ("Inversos")	Diesel, emulsificantes, arcilla oleofílica, resina y jabón modificados, agua (5-40%).	Costos iniciales altos y restricciones ambientales, pero bajo costo de mantenimiento

2.5. ASPECTOS QUE COMPRENDE EL CONSUMO DE AGUA DENTRO DE UN PROGRAMA DE FLUIDOS PARA POZOS EXPLORATORIOS DIRECCIONALES*

El estado mecánico de un pozo proporciona información que es necesaria para realizar cálculos de los volúmenes de agua que se necesitarán durante la perforación y terminación, esto se puede conocer de datos de capacidades del agujero y TR's. Por otra parte, la información que arrojan perforaciones de otros pozos es muy útil para saber el tipo de formaciones a atravesar (por correlación). Puede determinarse cuáles son zonas de posibles pérdidas de fluido o zonas donde debe tenerse cuidado con el filtrado del lodo, lo que implica que exista una prevención en el consumo del agua de perforación y terminación.

* Información obtenida del pozo exploratorio direccional Hom Hom-1 realizada por el laboratorio de la compañía AMBAR en Cd. del Carmen, Camp.

2.5.1. ESTADO MECÁNICO DEL POZO

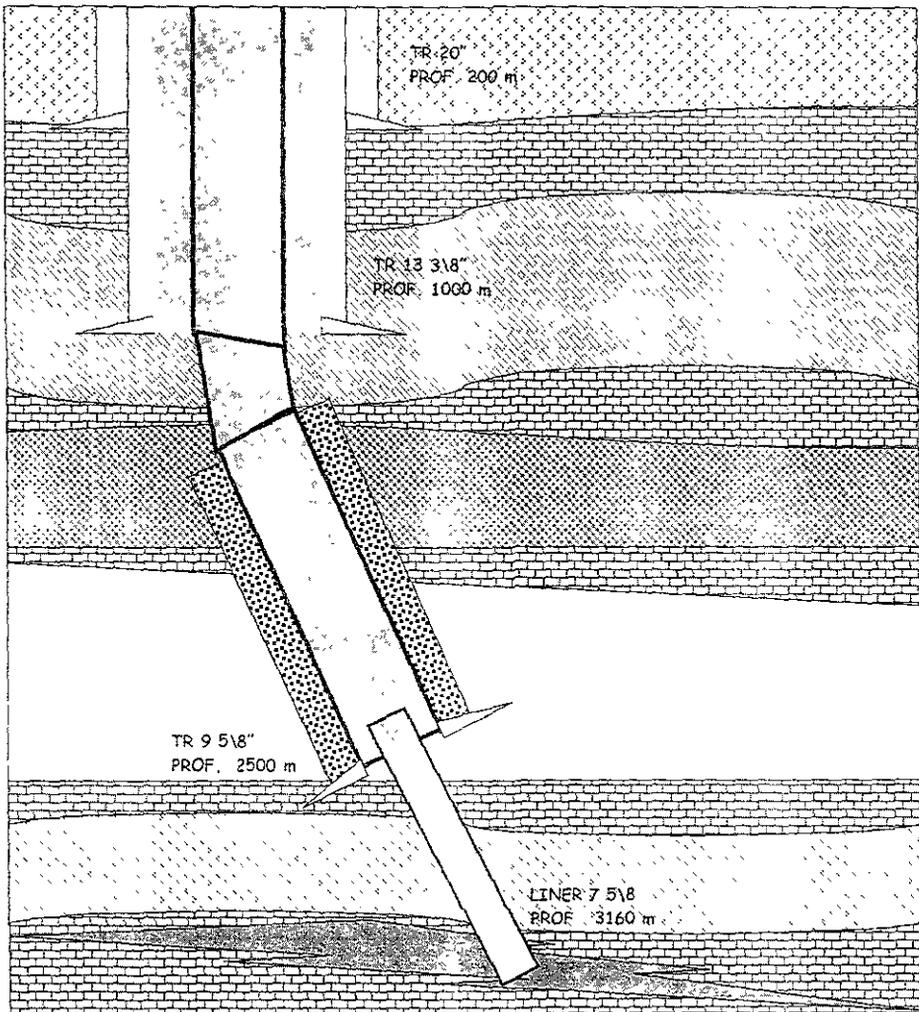


Fig. 2-1. Estado mecánico del pozo direccional Hom Hom-1

ETAPA I: 26"

TIPO DE LODO: BENTONÍTICO

TR: 20", K55, 94#, BCN

DÍAS DE OPERACIÓN: 3

INTERVALO:	0	200	200 metros
DIÁMETRO DE LA BARRENA	26	Pg	
DIÁMETRO DE TR ANTERIOR	0	Pg	
PROFUNDIDAD DE TR ANTERIOR:	0	Pies	0 M
VOLUMEN EN SUPERFICIE.	440	Bbl	70 M ³
VOLUMEN EN TR ANTERIOR:	0	Bbl	0 M ³
VOLUMEN DEL AGUJERO	560	Bbl	89 M ³
VOLUMEN DE MANTENIMIENTO	952	Bbl	151 M ³
VOLUMEN RECUPERADO:	0	Bbl	0 M ³
VOLUMEN A TRATAR:	1,952	Bbl	310 M³

PRODUCTOS	CONCENTRACIONES	CANTIDADES
Bentonita	50 kg/m ³	310 sacos
Sosa Cáustica	5 kg/m ³	62 sacos
Óxido de Calcio (Cal)	4 kg/m ³	50 sacos
Barta	0 kg/m ³	0 sacos

PROPIEDADES PROPUESTAS:

Densidad	1.03 g/cm ³
Sólidos	5-8 %
Filtrado API	6-8 MI
Geles.	4-8/10-16 Lb/100 pies ²
Viscosidad Plástica.	25-35 Cps
Temperatura.	70 °C
Punto de Cedencia:	18-24 Lb/100 pies ²

CÁLCULOS:

Volumen total del intervalo	560 Bbl
Volumen de sólidos no removido:	168 Bbl
Volumen de fluidos requerido por sólidos	952 Bbl
Volumen de dilución requerido:	151 m ³

ETAPA II: 17 1/2"

TIPO DE LODO: BENTONÍTICO TRATADO

TR: 13 3/8", N80, 68#. BCN

DÍAS DE OPERACIÓN: 10

INTERVALO:	200	1,000	800 metros
DIÁMETRO DE LA BARRENA	17.5 Pg		
DIÁMETRO DE TR ANTERIOR.	20 Pg		
PROFUNDIDAD DE TR ANTERIOR	656 Pies		200 M
VOLUMEN EN SUPERFICIE	440 Bbl		70 M ³
VOLUMEN EN TR ANTERIOR	230 Bbl		37 M ³
VOLUMEN DEL AGUJERO:	897 Bbl		143 M ³
VOLUMEN DE MANTENIMIENTO	1,615 Bbl		257 M ³
VOLUMEN RECUPERADO.	0 Bbl		0 M ³
VOLUMEN A TRATAR:	3,182 Bbl		507 M³

PRODUCTOS	CONCENTRACIONES	CANTIDADES
Bentonita	50 kg/m ³	506 sacos
Sosa Caustica	4 kg/m ³	81 sacos
Óxido de Calcio (Cal)	6 kg/m ³	121 sacos
Lignosulfonato	4 kg/m ³	89 sacos
Barita	150 kg/m ³	76 TM

PROPIEDADES PROPUESTAS:

Densidad:	1.08-1.14 g/cm ³	Pf	2 ml
Sólidos	7-10 %	Pm	10 ml
Filtrado API	6-8 MI	Exc de cal	8 kg/m ³
Geles	6-10/15-20 lb/100 pies ²	PH	11
Viscosidad Plástica	25-40 Cps	Calcio	150 ppm
Temperatura:	70 °C		
Punto de Cedencia	18-25 lb/100 pies ²		

CÁLCULOS:

Volumen total del intervalo:	897 Bbl
Volumen de solidos no removido	179 Bbl
Volumen de fluidos requerido por solidos.	1,615 Bbl
Volumen de dilucion requerido	257 m ³

ETAPA III: 12 1/4"**TIPO DE LODO: BASE AGUA POLIMÉRICO TEMPERATURA MEDIA**

TR: 9 5/8", TRC-95, 53.5#, VFJL
 PROF. VERTICAL: 2,500 m
 INICIO A DESVIAR: 1,050 m

DÍAS DE OPERACIÓN: 23

INTERVALO:	1,000	2,770	1770 metros
DIAMETRO DE LA BARRENA:	12.25	pg	
DIÁMETRO DE TR ANTERIOR:	13.75	pg	
PROFUNDIDAD DE TR ANTERIOR:	3,281	pies	1,000 m
VOLUMEN EN SUPERFICIE:	440	bbf	70 m ³
VOLUMEN EN TR ANTERIOR:	508	bbf	81 m ³
VOLUMEN DEL AGUJERO:	973	bbf	155 m ³
VOLUMEN DE MANTENIMIENTO:	2,238	bbf	356 m ³
VOLUMEN RECUPERADO:	0	bbf	0 m ³
VOLUMEN A TRATAR:	4,159	bbf	662 m³

PRODUCTOS	CONCENTRACIONES	CANTIDADES
Bentonita	40 kg/m ³	529 sacos
Sosa Cáustica	5 kg/m ³	132 sacos
Lignito libre de Cromo	6 kg/m ³	175 sacos
Lignosulfonato	6 kg/m ³	175 sacos
Oxido de calcio (Cal)	15 kg/m ³	397 sacos
Lubricante Glicólico	12 kg/m ³	38 tambores
Barrita	674 kg/m ³	446 TM
Supresor de Hidratación	10 L/m ³	32 tambores

PROPIEDADES PROPUESTAS:

Densidad	1.50-1.54 g/cm ³	Pf	3 ml
Sólidos	12-14 %	Pm	20 ml
Filtrado API	4-6 Mi	Exc de cal	12 kg/m ³
Geles	6-10/15-20 lb/100 pies ²	pH	12
Viscosidad Plástica	25-45 Cps	Calcio	250 ppm
Temperatura	70 °C		
Punto de Cedencia	20-25 lb/100 pies ²		

CÁLCULOS:

Volumen total del intervalo	973 bbf
Volumen de sólidos no removido	195 bbf
Volumen de fluidos requerido por sólidos	2,238 bbf
Volumen de dilución requerido	356 m ³

ETAPA IV: 8 1/2"

TIPO DE LODO: POLIMÉRICO INHIBIDO TEMPERATURA ALTA

TR 7 5/8", TRC-95, 39#, SLX, 2,570-3,595 m.
 PROF. VERTICAL: 3,160 m
 B.L. 7 5/8" 2,570 m

DÍAS DE OPERACION: 18

INTERVALO:	2,770	3,595	825 metros
DIAMETRO DE LA BARRENA	8.5	pg	
DIAMETRO DE TR ANTERIOR:	9.625	pg	
PROFUNDIDAD DE TR ANTERIOR	9,088	pies	2,770 m
VOLUMEN EN SUPERFICIE:	440	bbf	70 m ³
VOLUMEN EN TR ANTERIOR	653	bbf	104 m ³
VOLUMEN DEL AGUJERO.	209	bbf	33 m ³
VOLUMEN DE MANTENIMIENTO	1,381	bbf	220 m ³
VOLUMEN RECUPERADO	0	bbf	0 m ³
VOLUMEN A TRATAR:	2,683	bbf	427 m³

PRODUCTOS	CONCENTRACIONES	CANTIDADES
Bentonita	30 kg/m ³	256 sacos
Sosa Cáustica	8 kg/m ³	137 sacos
Lignito libre de Cromo	5 kg/m ³	94 sacos
Polydnlf	4 kg/m ³	68 sacos
Óxido de calcio (Cal)	12 kg/m ³	205 sacos
Lubricante Glicólico	15 kg/m ³	31 tambores
Barita	1,003 kg/m ³	428 TM
Supresor de Hidratacion	10 L/m ³	21 tambores

PROPIEDADES PROPUESTAS:

Densidad	1.78-1.83 g/cm ³	Pf	3 ml
Sólidos	12-14 %	Pm	20 ml
Filtrado APf.	4-6 Ml	Exc. de cal	12 kg/m ³
Geles	6-18/15-25 lb/100 pies ²	pH	12
Viscosidad Plástica	25-45 Cps	Calcio	250 ppm
Temperatura	140 °C		
Punto de Cedencia.	14 lb/100 pies ²		

CÁLCULOS:

Volumen total del intervalo	209 bbf
Volumen de sólidos no removido	31 bbf
Volumen de fluidos requerido por sólidos	1,381 bbf
Volumen de dilución requerido:	220 m ³

2.5.1.1. LODO BENTONÍTICO

Este sistema de fluido es de usos muy variados, ya que se adapta a diferentes condiciones de los pozos, se utiliza con éxito tanto en los pozos exploratorios, como de desarrollo, formando un enjarre para prevenir principalmente del derrumbe de las paredes y para el acarreo del recorte generado en la perforación.

El agua que se utiliza para la preparación del lodo bentonítico se trata previamente con sosa cáustica para precipitar el calcio (225 ppm), teniendo en consideración que para precipitar 100 ppm de calcio se requiere 0.21 kg/m³ de sosa cáustica.

La utilización de la sosa cáustica es con el fin de acelerar la hidratación de la bentonita.

2.5.1.2. LODO BENTONÍTICO TRATADO

Es uno de los sistemas de lodo más versátil que existen, ya que se adaptan a diferentes condiciones de los pozos. Este sistema se utiliza con éxito en pozos de desarrollo y en los cuales la temperatura no excede los 300°F. Se pueden utilizar para temperaturas mayores, incrementando la concentración de lignito y agregando productos adicionales. Este sistema puede ser tratado con pequeñas cantidades de cal para contrarrestar los efectos adversos del gas CO₂. Este sistema se desempeña en forma estable con reologías y control de filtración óptimos.

El lodo bentonítico tratado tiene las ventajas de que es un lodo de fácil mantenimiento, es de bajo costo y es estable hasta temperaturas de 300°F.

El área de uso es principalmente en la perforación de lutitas de baja conductividad y formaciones de carbonatos.

2.5.1.3. LODO POLIMÉRICO

Con relación a los fluidos de perforación y terminación, el término *polímero orgánico* es aplicado a algunas variedades y sustancias versátiles las cuales están compuestas de un número de unidades repetidas o similares, o grupos de átomos (llamados *monómeros*) consistentes principalmente de compuestos de carbono.

Los materiales coloidales que son utilizados en los fluidos de perforación son para reducir filtrado, estabilizar arcillas, flocular sólidos perforados, incrementar la capacidad de acarreo, y (secundariamente) sirven como emulsificantes y lubricantes.

2.6. LIMITACIONES EN CUANTO AL USO DEL AGUA SALADA PARA ELABORAR FLUIDOS DE PERFORACIÓN Y TERMINACIÓN

El agua salada o el agua de mar no puede ser utilizada directamente para elaborar lodos bentoníticos y algunos de carácter polimérico, ya que son alteradas sus propiedades y funciones por el contenido de sales de magnesio y calcio disueltas que presenta.

Propiedades y funciones afectadas por el uso de agua de mar

1. Viscosidad y filtración

Las primeras experiencias de campo, así como también estudios de laboratorio, establecieron que la bentonita fue el material más práctico para mejorar la viscosidad y las propiedades del enjarre de los lodos de agua dulce. A medida que el contenido de sales disueltas aumentaba, la bentonita venía perdiendo efectividad progresivamente. En agua salada saturada la bentonita no se hidrataba y contribuía a pequeñas reducciones de filtrado.

Para lodos salados, la bentonita era mezclada con agua dulce y la lechada resultante era vertida en el lodo de agua salada. Después de un corto tiempo, la salinidad del lodo disminuía y se reconoció que este tratamiento era necesario para mejorar la capacidad de acarreo de los recortes de los lodos salados.

2. Estabilidad del agujero

Los lodos base aceite fueron usados en un principio para solucionar problemas de perforación donde existían formaciones de lutitas, generalmente con éxito, pero con algunas fallas, los problemas de hinchamiento, derrumbes y/o fracturas, habitualmente se presentan en áreas de lutitas delesnables sensibles a la hidratación.

Estudios de laboratorio hechos por Mondshine y Kercheville² demostraron que estos problemas se pueden solucionar empleando salinidades altas, por lo que se hace imposible el uso directo del agua de mar, a menos que se salinice. Además en estas zonas de lutitas (zonas de presión anormal) se hayan comúnmente presentes ácido sulfídrico (H_2S) y bióxido de carbono (CO_2) disueltos, lo que permite que se tenga que agregar aditivos para inhibir estos compuestos.

Otros estudios³ demostraron que la salinidad del agua en las lutitas era más alta que la del agua del lodo base aceite, el agua migraba del lodo hacia la lutita; además, la ganancia o pérdida del agua de la lutita estaba determinada por la presión osmótica, por lo que no ocurría movimiento del agua cuando la presión de hidratación superficial de la lutita era igual a la presión osmótica del lodo.

Se determinó con esto, que la salinidad requerida para mantener la estabilidad del pozo podría ser estimada entonces por la medición de la salinidad del agua de perforación y la salinidad del agua contenida en las lutitas.

² Mondshine, T. C. and Kercheville, J. D. "Shell Dehydration Studies Point Way to Successful Gumbo Shale drilling", Oil Gas J (March 28, 1966) Pp 194-205

³ Mondshine, T. C. "New Technique Determines Oil-Mud Salinity Needs in Shale Drilling" Oil Gas J (July 14, 1969) Pp 70-75

3. Densidad en terminación y reparación de pozos

Varias salmueras son utilizadas como fluidos de control para terminación y reparación de pozos. En la Tabla 2-3 se muestran estas salmueras.

La densidad de la salmuera está ajustada por la alteración de la concentración de la sal o de las sales disueltas en solución. Debido a que estas sales están solubles en el agua, los cálculos de la composición de la salmuera no son directos.

Las composiciones dependen de la temperatura. En las Tablas 2-4 a 2-7 se muestran los porcentajes de sales para diferentes densidades.

La densidad inadecuada del fluido de terminación afecta la permeabilidad y porosidad de la formación productora y es necesario el uso de materiales densificantes solubles en agua o solubles a tratamientos con ácidos.

Tabla 2-3

SALMUERAS COMÚNMENTE USADAS COMO FLUIDOS DE TERMINACIÓN	
Rango de densidad (lb/gal)	Composición
8.3 - 9.7	KCl
8.3 - 10.0	NaCl
8.3 - 11.8	CaCl ₂
10.0 - 12.7	NaCl/NaBr
11.8 - 15.2	CaCl ₂ /CaBr ₂
14.5 - 19.2	CaCl ₂ /CaBr ₂ /ZnBr ₂
14.2 - 20	CaBr ₂ /ZnBr ₂
13.5 - 21.0	ZnBr ₂

Tabla 2-4

SALMUERA DE CLORURO DE POTASIO			
Considerar 1 bbl (42 gal)			
Densidad (lb/gal a 70°F)	KCl (%)	H ₂ O (bbl)	KCl (lb)
8.4	1.1	0.995	4.0
8.6	5.2	0.976	18.9
8.8	9.0	0.960	33.4
9.0	12.7	0.943	47.9
9.2	16.1	0.924	62.4
9.4	19.5	0.907	76.9
9.6	22.7	0.890	91.5
9.7	24.2	0.881	98.7

* Basado en el uso de 100% KCl

Tabla 2-5

SALMUERA DE CLORURO DE SODIO			
Considerar 1 bbl (42 gal)			
Densidad (lb/gal a 70°F)	NaCl (%)	H ₂ O (bbl)	NaCl (lb)
8.4	1.0	0.995	3.1
8.6	4.5	0.985	16.4
8.8	7.5	0.973	27.8
9.0	10.8	0.960	40.7
9.2	13.9	0.947	53.7
9.4	17.0	0.933	67.2
9.6	20.0	0.918	80.7
9.8	23.0	0.902	94.8
10.0	26.0	0.888	109.0

* Basado en el uso de 100% NaCl

Tabla 2-6

SALMUERA DE CLORURO DE CALCIO

Considerar 1 bbl (42 gal)

Densidad (lb/gal a 70°F)	CaCl ₂ (%)	H ₂ O (bbl)	CaCl ₂ (lb)
84	0.9	0.999	3.2
85	2.2	0.995	8.1
90	8.8	0.979	35.1
95	15.2	0.955	64.0
100	21.2	0.931	93.9
105	26.7	0.905	123.8
110	31.8	0.877	154.8
115	36.7	0.849	185.6
116	37.6	0.840	193.0
118	39.4	0.828	205.5

* Basado en el uso de 100% CaCl

Tabla 2-7

SALMUERA DE CLORURO DE SODIO/BROMURO DE SODIO

Considerar 1 bbl (42 gal)

Densidad (lb/gal a 70 °F)	H ₂ O (bbl)	NaCl ⁺ (lb)	NaBr ⁺ (lb)
84	0.685	115.0	0.0
86	0.87	85.5	46.4
88	0.856	69.3	92.3
90	0.841	48.8	139.0
92	0.825	25.5	186.0
94	0.812	8.7	232.0
96	0.805	0.0	251.0

* Basado en el uso de 100% NaCl y 95% NaBr

4. Pérdida de circulación

Debido al potencial de daño de la formación causado por la pérdida de fluido hacia la formación⁴, las salmueras usadas en la terminación y reparación sobre zonas altamente permeables, pueden requerir la adición de sólidos asociados para controlar ésta pérdida. Comúnmente se aplica el uso de obturantes granulados finos y gruesos, que sean solubles a tratamientos con ácido (por ejemplo CaCO_3 ó Na_2CO_3).

Las salmueras pueden además dificultar su uso cuando el horizonte productor contenga arenas no consolidadas porque no previenen derrumbes y socavamientos.

Las salmueras transparentes pueden requerir incremento de viscosidad o el uso de viscosificantes cuando se tenga que limpiar el pozo de recortes, basura (trozos de hule, barrenas, valeros) ya que estas partículas tienen bajas viscosidades y no tienen punto de cedencia, por lo que su capacidad de acarreo es baja.

⁴ Millhone, R. S. "Completion Fluids for Maximizing Productivity-State of the art", J. Petrol. Technol. (Jan, 1983) Pp 47-55

CAPÍTULO III
DESALINIZACIÓN DEL
AGUA DE MAR

3.1. IMPORTANCIA DE LA DESALINIZACIÓN

La importancia de la desalinización de las aguas saladas aumenta rápidamente, debido a que el abastecimiento de agua dulce en el mundo es insuficiente por la variabilidad de la precipitación en tiempo y lugar, lo que a menudo la hace escasa y carente para cubrir las necesidades de las poblaciones. Existen además, otras áreas deficientes en agua dulce y se presentan situaciones especiales en que esta agua no se puede obtener; estas áreas no son las denominadas desérticas o áridas, podemos mencionar como ejemplo las áreas marinas.

Puesto que la situación general en el abastecimiento del agua impone la necesidad de incrementar la utilización del agua de mar como materia prima para obtener agua dulce para emplear en las plataformas petroleras, se hace necesario conocer las tecnologías para llevar a cabo los procesos de desalinización para su utilización en el abastecimiento en los fluidos de perforación y terminación, donde la cantidad de consumo es muy grande.

Desde 1952, el Congreso de los Estados Unidos, reconociendo la gravedad de la situación, aprobó una disposición sobre la conversión del agua salada, autorizando un programa de investigación y desarrollo. En dicho país se encuentra en marcha, bajo la administración del Departamento del Interior, una campaña coordinadora de investigación, en la que colaboran otros países. Las agencias gubernamentales, la industria privada y otras instituciones están comprometidas en algo más que unos simples resultados obtenidos por medio de investigaciones de laboratorio, parte de lo cual ha progresado hasta llegar a la creación de plantas desaladoras

En nuestro país, en el Estado de Baja California se cuenta con procesos de desalinización para realizar los trabajos que envuelven a la industria del atún y para la obtención de sal de mesa.

3.2. SISTEMAS PARA DESALINIZAR EL AGUA DE MAR

- I. Ósmosis inversa.
- II. Evaporación de un solo efecto.
- III. Evaporación multietapas instantánea (flash).
- IV. Evaporación de efectos y etapas múltiples
- V. Compresión de vapor.
- VI. Destilación solar.

De estos seis procesos que separan el agua de la solución, en el primero no existe cambio de fase; mientras que en los cinco restantes existe un cambio de fase para llevar a cabo la separación de la solución.

3.2.1. ÓSMOSIS INVERSA

La ósmosis inversa es una derivación científica del proceso de ósmosis natural, descubierta en 1748 por Nollet. Sin embargo, la tecnología de las membranas no se comenzó a desarrollar sino hasta la primera mitad del siglo XX, cuando se encuentran ya establecidos los fundamentos de las leyes físicas que

describen la permeabilidad de las membranas naturales y sintéticas a los gases y a los líquidos.

La ósmosis es un fenómeno que se produce cuando las soluciones de concentraciones diferentes están separadas por una membrana semipermeable y que consiste en el paso de líquido más disuelto al más concentrado, tal como se muestra en la Fig. 3-1.

Una membrana semipermeable tiene la propiedad de dejar pasar el agua de una solución, pero no los cuerpos disueltos en la misma. La ósmosis inversa consiste en aplicar una presión del lado de la solución más concentrada, invirtiendo la dirección del flujo del agua pura. Fig. 3-1.

En el sistema de ósmosis inversa, el agua más salada, bajo presión, es impulsada a través de una membrana sintética que permite el paso de las moléculas de agua. Las moléculas de sal no pueden pasar y se desechan en una corriente de agua salina secundaria. El producto final es agua pura con un contenido de sales de 500 ppm. Fig. 3-2.

Las delgadas membranas, semejantes a un cabello humano, que se utilizan en el proceso de ósmosis inversa, son en realidad fibras de poliaramida aromáticas (aramidas). Cada membrana tiene un diámetro de menos de 100 micras o milésimas de milímetro.

El agua se introduce al módulo por un extremo, circula alrededor del haz de fibras huecas para fluir por el canal interior de cada fibra y en contraste en el extremo de las mismas como agua de producto.

Las partículas de sales y de otros minerales disueltos en el agua de alimentación no pasan fácilmente a través de las paredes de la fibra y son llevadas hacia fuera del módulo como agua de desecho.

Otros sistemas de ósmosis inversa utilizan las membranas planas o en espiral, generalmente de nylon o de acetato de celulosa, pero éstas tienen durabilidad, resistencia a la abrasión y una amplia gama de operación que pueden ser logradas con las fibras de aramida.

Este proceso tiene aplicación mundial en regiones desérticas, en áreas donde existen aguas salobres e impuras, en plataformas de perforación, en plantas termoelectricas, etc.

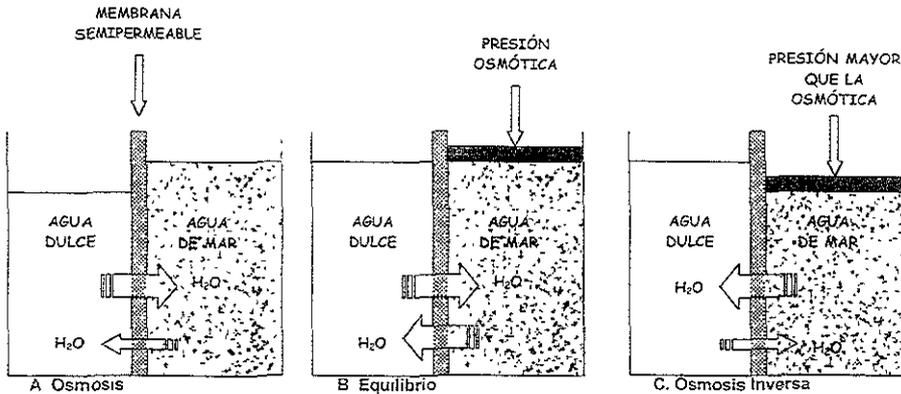


Fig. 3-1. A-Ilustración de un sistema simple de ósmosis en el cual la difusión pasa a través de una membrana semipermeable que separa las soluciones de agua dulce y agua de mar. B-Existe una condición de equilibrio cuando la presión es igual a la presión osmótica aplicada a la solución más concentrada. C-Cuando la presión es mayor que la presión osmótica que se aplica sobre la solución salada, ocurre la ósmosis inversa.

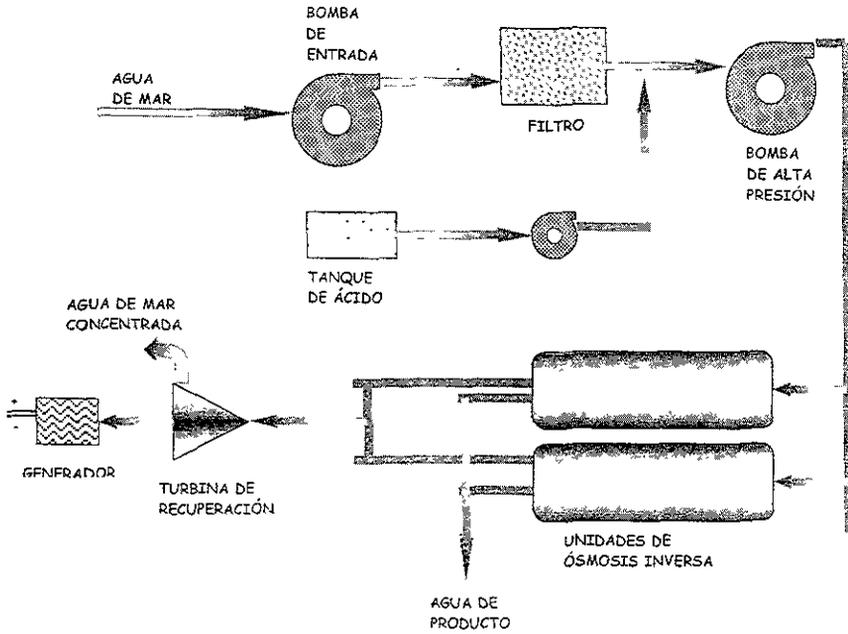


Fig. 3-2. Diagrama de flujo típico de una planta de ósmosis inversa.

3.2.2. EVAPORACIÓN

La evaporación es un proceso de desalinización que remueve las impurezas del agua alimentada por ebullición, colectando el vapor y enfriándolo hasta condensarse. El agua condensada, libre de algunos contaminantes es llamada agua destilada o condensados.

El proceso de evaporación es el más viejo conocido para producir agua dulce a partir del agua de mar. Aunque por siglos se usó un simple laboratorio, la evaporación no llegó a ser un proceso comercial importante hasta la época de la navegación, cuando la buena calidad del agua fue necesaria para abastecer las calderas de vapor de los barcos.

El primer diseño de evaporadores fue el de tubos sumergidos, en el cual el agua destilada fue producida por condensación del vapor de los tubos sumergidos en el agua. Al condensarse el vapor, el calor de vaporización es transferido al depósito de agua donde se produce la ebullición y el vapor resultante es condensado como agua destilada.

Pocos cambios ocurrieron en la tecnología de estos procesos, hasta 1930, cuando la idea de usar más de cuatro etapas en el diseño de evaporación fue adoptada como un método para mejorar la utilización de calor e incrementar la capacidad.

Existen muchos tipos de evaporadores y su selección depende de varios factores. Entre ellos se consideran: la facilidad de operación, el control de la formación de incrustaciones, la accesibilidad para limpieza y pureza del vapor, etc. Debe tomarse en cuenta el balance térmico específico y los requisitos de espacio para cada instalación antes de poder hacer una evaluación y selección del equipo.

Durante muchos años sólo hubo cambios menores en el diseño de evaporadores y la calidad del vapor obtenido no era siempre satisfactoria. Sin embargo conforme aumentó el número de instalaciones de alta presión, las dificultades demandaron una mejoría en el diseño de los evaporadores para disminuir el arrastre de sólidos producido, con objeto de asegurar un condensado

de alta calidad. Estas mejoras incluyeron: medios superiores para prevenir el arrastre, corrección de la formación de espuma y desprendimiento más efectivo de las incrustaciones.

Los primeros tipos de evaporadores para plantas estacionarias fueron similares a los empleados para servicios marinos. No incluían pretratamiento del agua de alimentación al evaporador y se depositaban incrustaciones dentro de los aparatos. Para evitar estas dificultades, se dio inicio al pretratamiento de las aguas de abastecimiento para alimentar a los evaporadores; tal tratamiento es hoy una práctica común y generalmente se justifica con el mejor funcionamiento de los evaporadores.

Se emplean varios tipos de tratamientos para estos servicios. Entre ellos se encuentran los acondicionamientos misceláneos con productos químicos; ablandamiento químico del agua; procesos e intercambio iónico; etc.

Existen en disponibilidad diferentes clases de evaporadores para servicios de plantas de fuerza, la mayor convergencia entre los diseños son los tipos y la colocación del intercambiador de calor en la superficie y la temperatura de operación. Como son:

1. Evaporación de un solo efecto.
2. Evaporación multietapa instantánea (flash).
3. Evaporación de efectos y etapas múltiples
4. Compresión de vapor.
5. Destilación solar.

3.2.2.1. EVAPORACIÓN DE UN SÓLO EFECTO

La evaporación de un sólo efecto se ha utilizado durante siglos, es el método más antiguo de purificación de agua. Es un proceso térmico que abarca tres etapas:

1. Una fase de cambio al estado de vapor.
2. Una separación del vapor del líquido.
3. Un cambio de fase subsiguiente del estado de vapor al estado líquido.

Este proceso puede describirse simplemente como la eliminación de las impurezas del agua por la aplicación de calor, haciendo que el agua hierva y se evapore. Las impurezas que originalmente estaban disueltas en el agua permanecen en el agua y se descargan a través de una corriente de desechos. La utilización de un equipo de diseño apropiado, particularmente del sistema de separación, resulta en la eliminación de la mayoría de las impurezas orgánicas e inorgánicas que contenga el agua efluente

En su forma clásica una destiladora consiste de un evaporador y un condensador. Tanto el evaporador como el condensador pueden llamárseles intercambiadores de calor y en un sentido primordial esto es todo lo que se requiere para destilar el agua.

Tiene que diseñarse una destiladora de un sólo efecto para que el vapor se separe del líquido sin acarrear partículas contaminantes en su arrastre. Esto significa que el evaporador de la destiladora debe ser de diámetro y diseño

apropiados para producir una condición óptima en la superficie de separación del líquido calentado.

3.2.2.2. EVAPORACIÓN MULTITAPAS INSTANTÁNEA (FLASH)

La destilación por multietapas está basada en el principio en el cual el punto de ebullición del agua es afectado por una escala de presión-temperatura.

La salmuera es bombeada a través de un intercambiador de calor y después al interior de la primera cámara de evaporación, donde la presión se reduce drásticamente. Algo del agua de la salmuera es vaporizada súbitamente y después es condensada en un cambiador de calor que contiene una entrada de salmuera en una sección de la misma cámara.

La vaporización súbita de la salmuera baja la temperatura de la salmuera remanente, la cual fluye a la cámara siguiente donde la presión es más baja que en la cámara anterior, donde más agua es vaporizada y la temperatura de la salmuera es reducida nuevamente.

Al condensarse el vapor transfiere su calor al agua de mar alimentada que pasa a través de un cambiador de calor. Esta transferencia de energía reduce la cantidad de calor necesario para calentar la salmuera.

El destilado resultante es tomado del interior de cada cámara y enviado al sistema de distribución.

A la etapa final se le llama etapa de calor de desecho, el propósito de esta etapa es únicamente para disipar la energía térmica remanente.

El agua de mar fresca a temperatura ambiente fluye por el interior del cambiador de calor en la última etapa, absorbiendo el calor remanente del vapor.

Una pequeña cantidad de condensados se forma en la etapa de desecho de calor y otra cantidad de salmuera es descargada de esta.

La recirculación de la salmuera es frecuentemente usada para minimizar la reposición de agua alimentada. La salmuera remanente de la etapa de desecho es mezclada con el agua de mar que está entrando, esta mezcla pasa a través de las etapas de evaporación, de la última a la primera, dentro de los tubos del cambiador de calor, recuperando el calor del vapor condensado antes de llegar a la salmuera más caliente. Fig. 3-3.

Es recomendable aplicar un pretratamiento al agua de mar para inhibir la corrosión que se produce y para reducir costos. Sin embargo, la alta concentración de la salmuera que resulta por la recirculación incrementa el punto de ebullición e incrementa la cantidad de energía necesaria de suministro al sistema. Además que se tiene un mayor riesgo de que se presente una pronta corrosión en el equipo.

Un proceso de este tipo generalmente tiene una temperatura límite de 200°F y puede ocasionar problemas de corrosión en la primera etapa debido a los altos niveles de oxígeno (O₂) y dióxido de carbono (CO₂) disueltos, y la gran cantidad de agua de reposición.

Un diseño típico de multietapas moderno tiene 3 ó 4 etapas de desecho de energía, además de 20 etapas flash, aún cuando el número de etapas puede variar significativamente

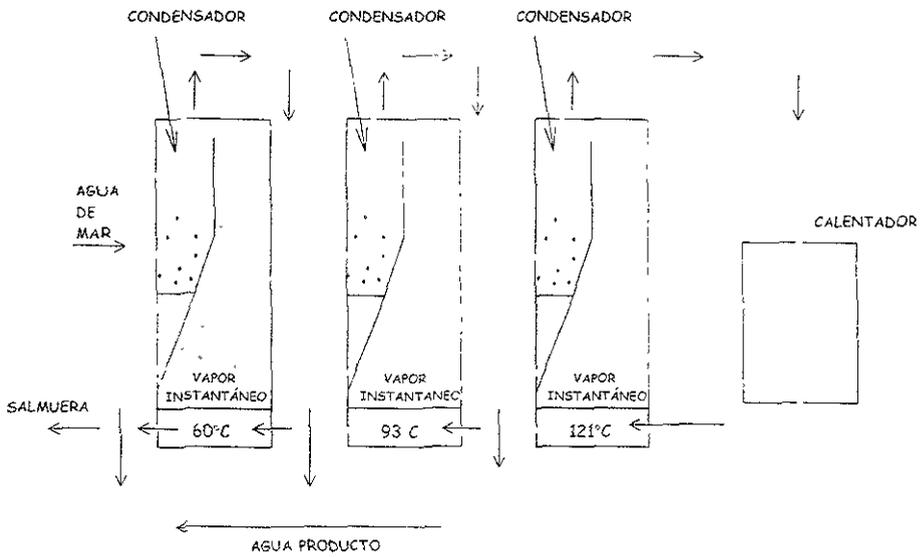


Fig. 3-3 Diagrama simplificado de un sistema de evaporación instantánea (flash).

3.2.2.3. EVAPORACIÓN DE EFECTOS Y ETAPAS MÚLTIPLES

Otra forma de aplicar el calor latente de la vaporización es utilizar el vapor como fuente de calor en un evaporador que opere a presión y temperatura más baja que el evaporador precedente. Esta es la base para el diseño de la tecnología más reciente de evaporación por etapas o efectos múltiples. Fig. 3-4 Un evaporador de efectos múltiples consiste en un condensador, un precalentador, tres u ocho efectos o columnas de destilación y un número correspondiente de intercambiadores de calor de etapas intermedias.

El principio del diseño de estos evaporadores es de la siguiente manera: el agua de alimentación a la temperatura ambiente entra al precalentador y fluye por un lado de cada intercambiador de calor de etapa intermedia. Durante este flujo, cada galón de agua pasa por el primer efecto y se calienta a una temperatura que depende de la presión de vapor de entrada y del tiempo de permanencia. Cuando el agua de alimentación precalentada llena el primer efecto automáticamente se transfiere el agua de alimentación por el haz de tubos de intercambiador de calor de etapa intermedia al siguiente efecto. Esto continua hasta que el último efecto llega al nivel de agua apropiado, en este punto, una purga menor del último efecto retarda la acumulación de impurezas en el evaporador.

Una fuente externa de vapor bajo una presión específica calienta el lado del revestimiento del primer efecto. Esta acción hace que se evapore el agua de alimentación en el lado del tubo, dado que existe la presión necesaria o diferencial de temperatura bajo una presión inferior que la presión de la fuente de vapor del primer efecto.

La cámara de separación funciona por fuerza centrífuga y crea la alta velocidad del vapor necesaria para la eliminación efectiva de las gotas y partículas arrastradas. La alta velocidad permite el uso de un sistema pequeño de tubería y un sistema de efecto de tamaño pequeño, lográndose una construcción extremadamente compacta.

Los sistemas de deflexión varían según el fabricante, pero el choque contra una superficie mojada por medio de un cambio mecánico de dirección, ha demostrado ser lo mejor para eliminar cualquier arrastre de gotas de agua en el vapor ascendente. El destilado fluye de la destiladora debido a la fuerza de la gravedad y llega a una temperatura cercana a los 200°F.

3.2.2.4. COMPRESIÓN DE VAPOR

La idea en que se basa el método tiene más de cien años; la patentó por primera vez un francés, Pierre Pelletan, en 1840.

En los últimos años ha aumentado el interés por la compresión de vapor, a causa de una notable innovación, proyectada por Kenneth C. D. Hickman. En esencia, lo que Hickman ha añadido es un dispositivo para incrementar enormemente la cantidad de calor que se transfiere al agua, por el simple procedimiento de extenderla de modo que forme una delgada capa. La característica sobresaliente del dispositivo estriba en la presencia de un tambor rotatorio. Se rocía agua salada a 125°F (unos 52°C) sobre la superficie interior del tambor, la fuerza centrífuga de rotación esparce el agua sobre esta superficie como una capa muy fina y turbulenta. Parte del agua se evapora (el residuo sin

evaporar o salmuera se elimina constantemente mediante una paleta). El vapor de agua abandona el tambor por un conducto en el que un compresor hace subir su presión, aumentando su temperatura. El vapor comprimido y calentado circula entonces por la superficie externa del rotor, donde se condensa y al que da su calor latente; la cubierta del rotor transmite el calor a la película de agua de superficie interna, acelerando la evaporación. Se recoge el calor condensado como agua destilada.

Este sistema es recomendable no sólo por su simplicidad, sino por otra gran ventaja: las bajas temperaturas con las que opera (de 125 a 150°F, entre 52 y 65°C). En los procesos de destilación donde utilizan temperaturas mucho más elevadas, las sales de agua marina se depositan sobre las superficies metálicas como incrustaciones. La formación de incrustaciones, que impiden la transferencia de calor al agua, es el mayor enemigo de los esfuerzos para reducir los costos de la destilación. En el aparato de Hickman se forman pocas incrustaciones, gracias a la baja temperatura necesaria.

3.2.2.5. DESTILACIÓN SOLAR

El sol, que derrama sobre nosotros una enorme cantidad de energía gratuita, nos proporciona nuestro suministro natural de agua, evaporándola de los mares. Se han diseñado algunos ingeniosos destiladores solares.

El más sencillo de los destiladores solares consiste en una vasija que contiene una delgada capa de agua salada, de unos 2 cm, y que se encuentra cubierta a por una placa de vidrio inclinada. El cristal transparente a los rayos

solares, retiene el calor, reirradiándolo a la vasija. El agua que se evapora de ésta se condensa en el cristal y resbala por su inclinada superficie, recogiéndola en otro recipiente. Este tipo de destilador, en el que se utiliza sólo la mitad de la energía solar incidente, puede producir poco más de medio litro de agua dulce por metro cuadrado de superficie y día, incluso en climas tan cálidos y poco nubosos como el de Arizona.

Reduciendo el costo de los aparatos puede lograrse cierta economía. Las láminas transparentes de plástico reemplazan al cristal con un costo mucho menor. Uno de los plásticos que se utiliza es el teflón, el cual resiste todas las condiciones climáticas. Ver Fig. 3-5.

Se encuentran en estudio varios dispositivos radicalmente nuevos para la destilación solar. En Denver se realiza la construcción de un destilador. En él, la tierra actúa como un acumulador para el calor solar. Se coloca un recipiente con unos 30 cm de agua directamente sobre la tierra, de esta forma que se transmita el calor absorbido por el agua. Este almacén de calor continuará evaporando el agua cuando el sol se haya puesto. Se calcula que si la pérdida de calor por radiación no es demasiado grande, éste tipo de destilador puede producir 0.75 cm³ de agua por metro cuadrado al día a un costo muy bajo.

María Telkes, de la Universidad de Nueva York, ha diseñado un destilador solar de 10 etapas que opera sin maquinaria y no necesita otra energía que la del sol, o un calor igual de bajo procedente de otra fuente. El trabajo consiste en una superposición de capas alternadas de materiales absorbentes y condensadores. Un fieltro negro o una plancha de un tejido similar al que se utiliza para fabricar mechas de quinqué absorbe el calor solar. El agua evaporada se condensa en la capa siguiente, proporciona calor para calentar a la inmediata, de fieltro, y así

sucesivamente. Este dispositivo produce seis o siete veces más de agua por metro cuadrado expuesto al sol que un destilador solar de una sola etapa.

Se están desarrollando destiladores solares de varios tipos en Estados Unidos, África del Norte, Australia, España, Italia y otros países

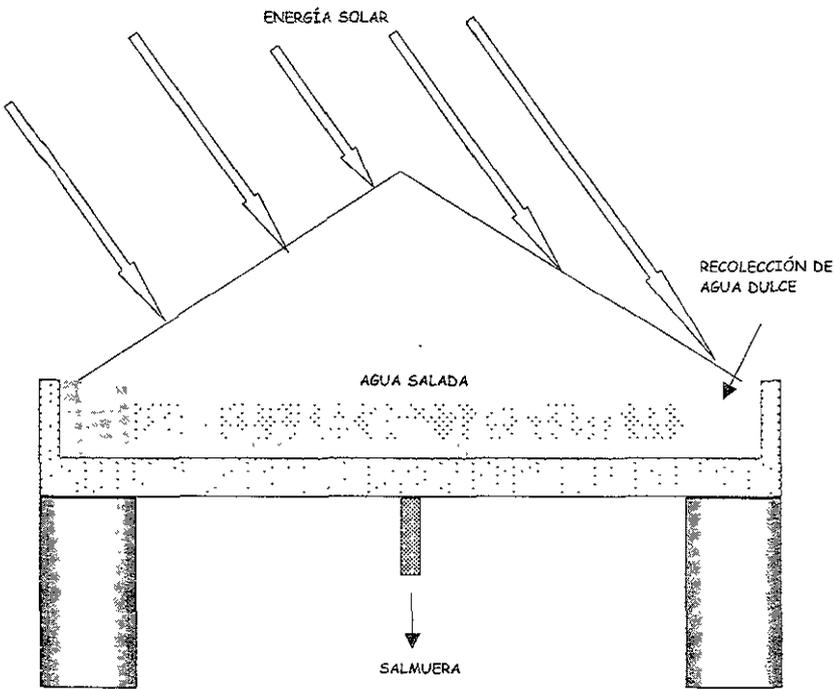


Fig. 3-5. Diagrama de un destilador solar de una etapa.

3.3. COMPARACIÓN ENTRE MÉTODOS

Aunque la complejidad, arranque y operatividad del sistema que no implica cambio de fase (ósmosis inversa) son mínimos, la parte modular de cada sistema requiere de mucho cuidado

La calidad del agua de mar tiene gran impacto, pues si no se tiene un pretratamiento adecuado se puede dañar el sistema, lo que hace que en la mayoría de los casos el pretratamiento requiera de atención y limpieza química especial.

El problema de las incrustaciones se genera por dos razones fundamentales que son:

- ❖ Sólidos en suspensión.
- ❖ Precipitación de sales por alta concentración.

En el caso de la ósmosis inversa, el pretratamiento es muy complejo a pesar de no existir una elevación de la temperatura, pero como es un sistema comparable a un filtro, es muy sensible a las dos causas de incrustación; sin embargo, este problema se ha visto disminuido en una gran proporción con la utilización de componentes de PVC donde se eliminan en gran parte las incrustaciones.

En el caso de la evaporación instantánea multietapas, el sólo hecho de separar los 70°F del agua de mar, provoca la descomposición de carbonatos y por lo tanto la formación de incrustaciones de calcio y de magnesio. Por esta razón es necesaria la adición de un ácido (generalmente sulfúrico), la decarbonatación y la

deareación, para evitar la corrosión y la disminución de los coeficientes de transmisión de calor. También se acostumbra el uso de secuestrantes, limitando la temperatura a 92°C.

En el caso de los compresores de vapor a vacío o baja temperatura, y las plantas de evaporación de un sólo efecto, este fenómeno se ve reducido, aunque en el caso de los compresores de vapor, debido al diseño de la película externa, las boquillas sufren taponamientos por materia orgánica y los depósitos generan posteriormente mala distribución de flujo y finalmente incrustaciones en el exterior de los tubos, difíciles de remover. En cambio en los evaporadores de un sólo efecto, el fenómeno es mínimo, debido por un lado a la baja concentración y por el otro porque la superficie de intercambio de calor es en el interior de los tubos y cuenta con una cierta velocidad de flujo que reduce la posibilidad de que partículas se adhieran al tubo.

Los principales inconvenientes en la instalación de cualquiera de los procesos en los que existen cambios de fase, son que el consumo de energía requerido para su operación se aprecia que es más elevado en comparación con el consumo que es necesario para un sistema de ósmosis inversa y, por otro lado, el espacio que se necesita para su instalación en las plataformas petroleras es considerado como parte esencial debido al alto costo que genera el adecuar un espacio lo suficientemente grande y apto para poner a funcionar una planta del tipo de evaporación o de compresión de vapor.

En el caso de la destilación solar, se descarta la posibilidad de instalar una planta, puesto que con la tecnología que actualmente está en uso se necesita de un espacio de dimensiones incosteables y el método no resulta tan económico como habría de esperarse.

Puesto que se desea un sistema para obtener agua dulce que ofrezca un mínimo de problemas, tanto en su operación, mantenimiento, consumo de energía, adquisición de piezas de repuesto y asesoramiento técnico, se tienen la comparación de tres procesos en la siguiente tabla. Ver Tabla 4-1.

Tabla 3-1

COMPARACIÓN DE TRES SISTEMAS INNOVADORES DE DESALINIZACIÓN.

Tipo de planta	Cap. de Prod.	Materiales de fabricación	Pretratamiento	Requerim. de energía	Ventajas	Desventajas	Potencial de aplic.
Osmosis inversa	100 a 2000 m ³ /día	Membranas de acetato de celulosa y poliamida, partes de PVC acero inoxidable y al carbon	Clarif. coagulantes y filtración	Menos de 3 kw-hr/m ³	<ol style="list-style-type: none"> Alta disponibilidad Muy bajo consumo de electricidad Requiere espacio reducido Altamente Automatizado (baja posibilidad de falla) Bajo costo específico de producción (0.60-1.20 US\$/m³) 	<ol style="list-style-type: none"> Capacidad máxima de producción de 2000 m³/día (sin inconvenientes) Requiere stock de refacciones 	Tanto en sitios aislados, como en urbanos. Se puede instalar en forma de planta individual o en grupo
Evaporación instantánea por etapas (flash)	2500 a 30000 m ³ /día	Cobre, níquel y acero al carbon	Deaeración y decarbonación con ácido sulfúrico	De 5 a 16 kw-hr/m ³	<ol style="list-style-type: none"> Muy alta capacidad de producción Alta disponibilidad Alta calidad del agua producida (menos de 50 ppm) Automatizado y manual Bajo costo específico de producción (0.50-0.85 US\$/m³) 	<ol style="list-style-type: none"> Uso terrestre para altas capacidades Requiere de construcciones civiles Requiere manito continuo Requiere operador calificado 	Sitios terrestres donde se necesitan mas de 2500 m ³ /día
Compresión de vapor	1200 a 25000 m ³ /día	Acero al carbon acero inoxidable aluminio cobre y níquel	Deaeración y decarbonación con ácido sulfúrico periódica	De 10 a 25 kw-hr/m ³	<ol style="list-style-type: none"> Alta capacidad de producción Alta calidad del agua producida (menos de 50 ppm) Automatizado y manual Bajo costo específico de producción (0.60-0.81 US\$/m³) 	<ol style="list-style-type: none"> Baja disponibilidad Requiere stock de refacciones Requiere manito continuo Requiere de construcciones civiles Requiere operador calificado 	Sitios terrestres donde se necesitan mas de 1200 m ³ /día

CAPÍTULO IV

**APLICACIÓN DEL MÉTODO DE ÓSMOSIS INVERSA
UTILIZADO EN PLATAFORMAS MARINAS DE LA SONDA
DE CAMPECHE**

4.1. PLANTA DE ÓSMOSIS INVERSA PARA AGUA SALADA MODELO SE265ROAS (SPCL)

Habiendo definido la ósmosis inversa como una forma de filtración, debemos considerar el tipo de filtración requerida para utilizar la teoría de ósmosis inversa en una aplicación práctica.

Existen básicamente dos tipos de filtración: normal o lineal y transversal

4.1.1. FILTRACIÓN NORMAL O LINEAL

En este tipo de filtración, el flujo completo de alimentación se filtra a través del medio de filtrado en un flujo perpendicular. Como ejemplos típicos pueden citarse los filtros de aire y aceite de un automóvil, así como los filtros multicapa y de cartucho para tratamiento de agua. En cualquiera de estos casos, el medio de filtrado atrapa los sólidos suspendidos y cuando se satura (indicado por el diferencial de presión de la entrada y la salida del filtro) ya sea que los filtros se retrolaven o se reemplacen.

4.1.2. FITRACIÓN TRANSVERSAL

En este tipo de filtración, sólo una porción el flujo de alimentación se filtra a través del medio de filtrado en un flujo perpendicular. El resto del flujo de alimentación fluye paralelamente al medio de filtrado y sale del aflojamiento del

filtro. Esta es la clase de filtrado que se requiere para la aplicación de la ósmosis inversa.

En la ósmosis inversa, como la presión fuerza al agua (permeado producido) a través de la membrana, la solución en el lado de alta presión de la membrana se incrementa en concentración. Para prevenir que esta solución alcance niveles de saturación y se precipite en la superficie de la membrana, una cantidad predeterminada de flujo de alimentación de concentrado deberá utilizarse para barrer las sales residuales. Este concentrado residual se conoce normalmente con el nombre de salmuera, concentrado o agua de rechazo.

La relación entre la cantidad de permeado producido por un sistema de ósmosis inversa y el flujo de alimentación, es conocida como rango de conversión, y es expresado en porcentaje. Por ejemplo, si 30 galones de permeado son producidos por cada 100 galones de alimentación, el rango de conversión es del 30%.

El rango de conversión de un sistema de ósmosis inversa particular es determinado primordialmente por la fuente de alimentación. Esto es, el número y tipo de sales disueltas en el agua, además de sus niveles de concentración.

4.1.3.1. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

El equipo de ósmosis inversa, recibe agua de mar a través de un sistema de bombeo independiente con una entrega óptima de 100 GPM, por medio de una tubería de 3" de diámetro, a una presión de 70 psi.

Se incluye un pretratamiento químico de agua de alimentación por medio de dos bombas de inyección y tanques de químicos, uno de ellos inyecta coagulante al agua en la entrada y el otro inyecta anti-incrustante cuando el agua sale de los filtros multicapa.

La filtración del agua de mar es un proceso de dos etapas. Ver Fig. 4-1.

La primera etapa consiste de tres filtros multicapa de 30" de diámetro, con antracita/granate. El sistema está diseñado para que operen los tres filtros en paralelo, pero además permite que un filtro sea retrolavado mientras que los otros dos operan normal. La segunda etapa de filtración consiste en un tanque que aloja cinco filtros de cartucho con una longitud de 40" y una capacidad de filtración de 5 micrones.

Después de este filtrado, el agua de mar es presurizada por una bomba triplex, accionada por un motor de 40 hp. La bomba está protegida contra cavitación de entrada por un switch en la succión de baja presión. La sobrepresión en el sistema se previene por un switch de alta presión y un disco de ruptura en la descarga de la bomba. Las pulsaciones de la bomba son minimizadas por amortiguadores en la entrada y en la salida de la bomba.

Existen dos membranas por tanque de presión, las cuales están configuradas en un arreglo 2:2. El agua de alimentación es descargada a través de la bomba de alta presión. El rechazo de estos dos tanques entra a los otros dos tanques de presión en paralelo.

La presión entre los tanques de presión es regulada por dos válvulas[✱] en el manifold de rechazo final. Una de estas válvulas es de 2" de diámetro. Esta válvula se abre automáticamente en el arranque y paro para permitir que el agua de mar y/o agua de producto efectúen un barrido de las membranas. Esta válvula se cierra automáticamente después de un intervalo de tiempo para operación normal.

La otra válvula es una válvula reguladora de rechazo que se ajusta manualmente. Esta válvula se utiliza para regular los rangos apropiados de rechazo y de producto.

El agua de rechazo es medida constantemente a través de un rotámetro de 2" que está conectado a una válvula de 2" de diámetro de 3 vías, la cual está localizada en el tanque de limpieza/barrido

Durante la operación normal, la válvula de bola de 3 vías, se encuentra en posición de "up", la cual deriva el tanque de limpieza/barrido y envía el agua de rechazo a la línea de 2" de diámetro de rechazo.

El agua producto se recolecta en un manifold de 1" y es conectado a un rotámetro de 1", el cual mide constantemente el flujo. La tubería desde el manifold hasta el rotámetro, tiene un manómetro de 2 1/2", un lector de 0 a 160 psi y un sensor de conductividad para monitorear la calidad del agua producto.

Después del rotámetro, el agua producto es entubada a una válvula de 3 vías de 1" de diámetro la cual está localizada en el tanque de limpieza/barrido. Este tanque se llena automáticamente con agua producto por medio de una

✱ Para lo referente al tipo de válvulas utilizadas, consultar diagrama, nomenclatura e identificación de válvulas. Páginas 85 a 88

válvula solenoide de 1", que es controlada a su vez por un switch de nivel alto localizado en este tanque.

El agua producto es entubada desde la válvula de 3 vías hasta otra divertidora de 3 vías de 1", la que está accionada por una motor. Esta válvula divertidora está controlada por el monitor de conductividad para enviar el agua producto al rechazo o a la línea de 2" de diámetro para su almacenaje; dependiendo de la calidad del agua o su nivel de sólidos disueltos totales (SDT).

4.1.3.1. PARÁMETROS DE DISEÑO DEL SISTEMA

- ❖ Agua de mar, bahía de Campeche.
- ❖ Salinidad: 35000 ppm (SDT).
- ❖ Temperatura: 25-30 °C.

4.1.3.2. APLICACIÓN.

- ❖ Para plataformas de perforación y producción
- ❖ Suministro de agua tipo boca abierta por bomba sumergible.

4.1.3.3. FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA:

- ❖ Flujo de producto: 100 m³/día
- ❖ Flujo de rechazo: 202 m³/día.
- ❖ Rango de recuperación: 33%.
- ❖ Promedio de rechazo de sal: 99 a 99.5%
- ❖ Presión de alimentación de la membrana: 800 psi

4.1.3.4. DIMENSIONES DEL SISTEMA:

- ❖ Altura (transporte): 213 cm.
- ❖ Altura (operación): 244 cm.
- ❖ Largo: 396 cm.
- ❖ Ancho: 213 cm.

4.1.3.5. CONEXIONES:

- ❖ Agua de alimentación: brida de 3"
- ❖ Agua de rechazo a drene: brida de 2".
- ❖ Agua de producto a tanque de almacenamiento: brida de 2".

4.1.3.6. REQUISITOS ELÉCTRICOS.

- ❖ Panel de control
 - 120 V
 - 15 amps.
 - 60 Hz.
 - 1 fase.

- ❖ Motores
 - 480 V
 - 100 amps
 - 60 Hz
 - 3 fases

4.1.4. PANEL DE CONTROL

- ❖ **Switch de potencia:** este switch de 2 posiciones controla la energía del panel de control. Cuando este switch se encuentra en posición “on” la lámpara indicadora se enciende y la energía se transmite al switch del sistema HOA.
- ❖ **Sistema HOA:** este switch de 2 posiciones permite la operación del sistema de ósmosis inversa en modo manual o automático. En la posición manual, el PLC es desviado (by-passed) y la energía es transmitida al resto de los switches en el panel. Este switch debe estar en la posición de manual para poder operar cualquier otro switch en la posición manual. En la posición de automático este switch envía energía al PLC. Este switch debe estar en posición de automático para operar cualquier otro switch en posición de automático.
- ❖ **Válvula de entrada:** este switch de 3 posiciones controla la válvula solenoide de entrada de 3”. En la posición manual, la válvula se abrirá no importando las condiciones o alarmas si el switch del sistema HOA se encuentra en el modo manual. En el modo automático esta válvula es controlada por el PLC. El indicador de 2 luces arriba del switch de la válvula de entrada se enciende en rojo para indicar que se encuentra cerrada y verde para indicar que está abierta (solamente en modo automático).
- ❖ **Bomba de alta presión:** el switch de 3 posiciones controla la bomba triplex. En el modo manual, la bomba se arrancará no importando las condiciones o alarmas si el switch del sistema HOA se encuentra en el modo manual. El indicador de 2 luces arriba del switch de la bomba de alta presión se enciende

en rojo para apagar la bomba por baja succión y/o alta descarga y se enciende en verde para operación normal (solamente en modo automático).

- ❖ **Bomba de inyección No. 1:** este switch de 3 posiciones controla la bomba de inyección del anti-incrustante. En la posición manual, la bomba operará no importando las condiciones o alarmas si el switch del sistema HOA se encuentra en el modo manual. En el modo automático esta válvula es controlada por el PLC. El indicador de 2 luces arriba del switch de la bomba de inyección No. 1 se enciende en rojo para indicar nivel bajo en el tanque o apagado y se enciende en verde para operación normal (solamente en modo automático).
- ❖ **Bomba de inyección No. 2:** se aplica lo mismo que para la bomba No. 1, sólo que el equipo es para coagular.
- ❖ **Bomba de barrido:** este switch de 3 posiciones controla la bomba de barrido. En la posición manual, la bomba operará no importando las condiciones o alarmas si el switch del sistema HOA se encuentra en el modo manual. En el modo automático esta válvula es controlada por el PLC. El indicador de 2 luces arriba del switch de la bomba de barrido se enciende en rojo para indicar una condición de nivel bajo en el tanque de barrido y se enciende en verde para operación normal (solamente en modo automático).
- ❖ **Alta presión del producto:** este indicador se enciende en rojo si el sistema se detiene debido a una alta presión en el producto.
- ❖ **Monitor de turbiedad:** este instrumento monitorea la turbiedad del agua de alimentación a la bomba de alta presión.

- ❖ **Monitor de conductividad:** este instrumento monitorea la conductividad del agua producto. El indicador de 2 luces arriba del medidor de conductividad se enciende en rojo para la condición de alta conductividad y verde para una conductividad normal (debajo de 500 ppm), sólo en modo automático.
- ❖ **Horómetro:** este medidor registra el tiempo de operación de la bomba de alta presión.
- ❖ **Restablecimiento de alarmas:** este botón momentario sirve para restablecer cualquier alarma que se encuentre encendida. Si alguna alarma que se encuentre activada apaga por completo al sistema de ósmosis inversa, el problema debe ser corregido y este botón deberá utilizarse para poner en operación al sistema.

4.1.5. PANEL DE INSTRUMENTOS

- ❖ **Medidor de flujo de rechazo:** se utiliza un rotámetro con escala de 5 a 100 GPM, el cual mide continuamente cualquier flujo a través de los tanques de presión.
- ❖ **Medidor de flujo de producto:** se utiliza un rotámetro con escala de 3 a 30 GPM, el cual mide constantemente el flujo de las membranas.
- ❖ **Manómetro de alta presión:** manómetro con escala de 0 a 1500 psi.

❖ **Switch bloque de 4 posiciones:** cuatro diferentes presiones se pueden leer con un sólo manómetro al mover la manija de este switch bloque a intervalos de 90°. Los puntos de *alta* presión son.

1. Descarga de la bomba/entrada a membranas
2. Entre la etapa A (primeros dos tanques de presión).
3. Entre la etapa B (segundos dos tanques de presión).
4. Rechazo final.

❖ **Manómetro de baja presión:** manómetro con escala de 0 a 160 psi

❖ **Switch bloque de 4 posiciones:** cuatro diferentes presiones se pueden leer con un sólo manómetro al mover la manija de este switch bloque a intervalos de 90°. Los puntos de *baja* presión son.

1. Entrada de agua de alimentación a filtros multicapa.
2. Salida de filtros multicapa.
3. Entrada a filtro de cartucho.
4. Salida de filtro cartucho

❖ **Sistemas de alarma/paro** las características de alarma/paro del sistema de ósmosis inversa son funcionales solamente cuando se opera en modo automático. Las bombas y válvulas no operan en el modo manual cuando el switch del sistema se encuentra en el modo automático. Las características de alarma/paro del sistema son.

1. Baja presión en la succión de la bomba (menor a 20 psi).
2. Alta presión en la descarga de la bomba (mayor a 900 psi).

3. Alta presión del producto (diferente de 40 psi).
4. Alta turbiedad en el agua de alimentación (mayor a 5 Unidades Nominales de Turbiedad por un periodo de 90 segundos consecutivos).
5. Alta conductividad en el producto (mayor a 500 ppm de STD).
6. Bajo nivel en tanque de químico No. 1
7. Bajo nivel en tanque de químico No. 2

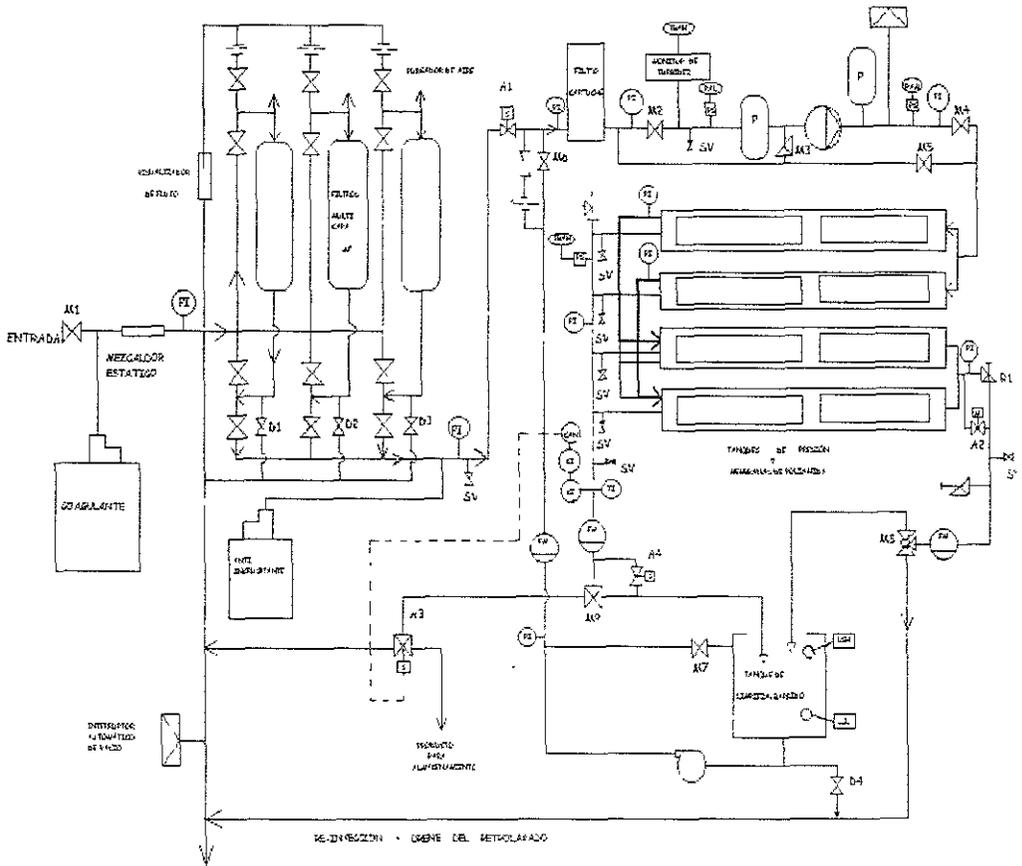
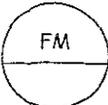
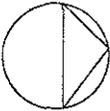


Fig. 4-1. Diagrama de proceso e instrumentación del sistema de ósmosis inversa para agua salada.

NOMENCLATURA

	-	Indicador de presión		-	Switch de nivel alto
	-	Switch de presión		-	Switch de nivel bajo
	-	Alarma presión de baja		-	Válvula muestreadora
	-	Amortiguador de pulsación		-	Válvula de bola
	-	Alarma de presión alta		-	Válvula de control de contrapresión
	-	Elemento de conductividad		-	Válvula de monitoreo
	-	Indicador de conductividad		-	Válvula solenoide
	-	Alarma de conductividad alta		-	Válvula check
	-	Alarma de turbidez alta		-	Orificio de flujo
	-	Dispositivo de alivio de presión		-	Purgador de aire
	-	Medidor de flujo		-	Tubo visualizador de flujo
	-	Indicador de temperatura		-	Bomba triplex
				-	Disco de ruptura

Identificación de válvulas

- A1. Válvula de entrada de 3" de diám., solenoide/diafragma. - PVC.
- A2. Válvula motorizada de bola de 2" de diám., desvío de rechazo. - acero inox.
- A3. Válvula de divergencia de producto de 1" de diám., motorizada. - PVC.
- A4. Válvula solenoide de 1" de diám., para barrido de tanque. - PVC.

- D1. Válvula de drene de 1" de diám., filtro multicapa # 1. - PVC.
- D2. Válvula de drene de 1" de diám., filtro multicapa # 2. - PVC.
- D3. Válvula de drene de 1" de diám., filtro multicapa # 3. - PVC.
- D4. Válvula de drene en el tanque limpieza/barrido. - PVC.
- D5. Válvula de drene de 1/2" de diám., en tanque del filtro de cartucho. - PVC.

- M1. Válvula de bola de entrada de 3" de diám., manual. - PVC.
- M2. Válvula de bola de 2" de diám., en sección de bomba, manual. - PVC.
- M3. Válvula de bola de 2" de diám., para diferir el agua de alimentación al drene, manual. - PVC.
- M4. Válvula de bola de 2" de diám., en descarga de la bomba, manual. - PVC.
- M5. Válvula de bola de 2" de diám., en el puerto de limpieza de alimentación a membrana, manual. - PVC.
- M6. Válvula de bola de 2" de diám., en la línea de limpieza al filtro cartucho, manual. - PVC.
- M7. Válvula de bola de 2" de diám., en la descarga de la bomba de limpieza, manual. - PVC.
- M8. Válvula de bola de 3 vías de 2" de diám., para el rechazo del tanque de limpieza, manual. - PVC.
- M9. Válvula de bola de 3 vías de 1" de diám., para producto del tanque de limpieza, manual. - PVC.

- R1. Válvula de restricción de rechazo de 1" de diám., manual. - Acero inox.

- S-4. Válvulas de muestreo de 1/4" de diám., en el puerto de producto de cada tanque de presión. - PVC.
- S-5. Válvula de muestreo de 1/4" de diám., en la línea de producto en el medidor de presión. - PVC.
- S-6. Válvula de muestreo de 1/4" de diám., en la línea de succión de la bomba. PVC.

- T1. Válvula de 1/4 de diám., para alimentar cámara de turbiedad.

4.1.6. PARÁMETROS QUE AFECTAN LA VIDA DE LAS MEMBRANAS

4.1.6.1. TEMPERATURA

El funcionamiento de las membranas o del sistema de ósmosis inversa es usualmente normalizado para una temperatura de 77°F ó 25°C. Los coeficientes del transporte del agua y del transporte de la sal incrementan cuando incrementa la temperatura y decrecen cuando decrece la temperatura, para las membranas comerciales en uso. La Fig. 4-2 es una gráfica que muestra la derivación en flujo que ocurre para una membrana de arreglo en espiral de acetato de celulosa contra la temperatura. Curvas similares han sido graficadas para membranas de fibras finas huecas. Se tiene una aproximación de 2.5% por cada grado centígrado.

Los incrementos en la temperatura de operación del agua de alimentación pueden además acelerar el rango de degradación y compactación de las membranas. Las especificaciones comunes muestran límites para las temperaturas de operación de 40°F a 90°F (4°C a 32°C). Recientemente ha habido algo de flexibilidad de los límites superiores en casos especiales para 100°F a 105°F (38°C a 41°C). Se ha encontrado que materiales de construcción diferentes a los de las membranas pueden ser un factor limitante para altas presiones y altas temperaturas.

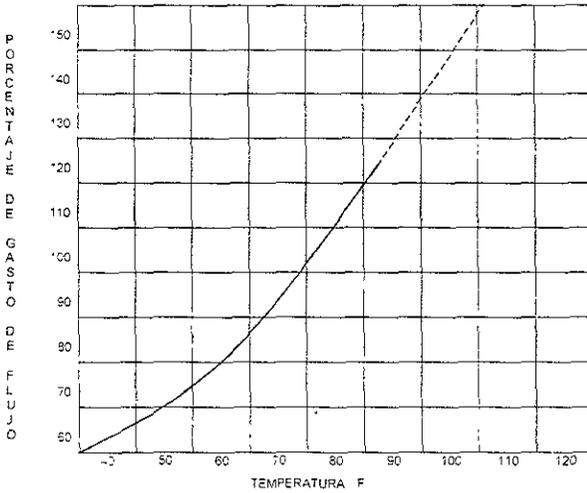


Fig. 4-2. Efecto de la temperatura sobre el gasto de flujo de las membranas. (Flujo a 77°F)

4.1.6.2. COMPACTACIÓN

Alguna densificación de la estructura de la membrana se puede llevar a cabo mientras se opera a presiones elevadas. El cambio es conocido como compactación y es acompañado con una reducción en el gasto de permeado. Las membranas comerciales en uso están sujetas a la compactación. Para minimizar este efecto se aplica en la membrana un compuesto de una película delgada.

4.1.6.3. EFECTO DEL PH

El pH de la solución puede tener un efecto significativo sobre la duración y funcionamiento de las membranas a pesar de estar hechas de esteres celulósicos o poliamidas. Para el acetato de celulosa, los límites del pH permisible varía de 3 a 8, un rango en el cual el gasto de hidrólisis de la membrana puede ser tolerado. Las membranas tienen un gasto mínimo de hidrólisis a un pH cercano a 5 para membranas de fibras finas huecas, el pH recomendado oscila entre 4 y 11.

El pH de la alimentación tiene un efecto muy reducido sobre la reinyección de sales ácidos fuertes y bases fuertes. Puede, sin embargo, tener un efecto pronunciado en la reinyección de ácidos o bases relativamente débiles.

4.1.6.4. PRESENCIA DE GASES

Frecuentemente se levantan preguntas concernientes a la inyección de gases disueltos, tales como O_2 , CO_2 , H_2S y SO_4 . como gases, la inyección es muy pobre. Algunos de estos gases reaccionan con el agua y las sales neutralizadas $NaCO_2$ y $NaSO_4$ de los ácidos formados son reinyectadas.

4.2. ASPECTO AMBIENTAL

Sabemos que toda actividad del hombre tiene un componente potencial contaminante al ambiente. El mismo aplica a toda técnica de desalinización de agua. Hay dos causas para la contaminación del ambiente en el proceso de desalación del agua:

- El consumo de electricidad.
- La descarga de la salmuera.

El consumo de electricidad

Para la producción de agua desalada, al menos en cantidades grandes, se necesita energía. En el caso normal, se utiliza electricidad. Como la mayor parte de la electricidad se genera por procesos que contaminan (generación por plantas térmicas, etc.), cada cliente de electricidad contribuye a la contaminación ambiental. Por eso, un objetivo ambiental debería ser, reducir el consumo de electricidad. En el caso de la desalinización podemos contribuir si escogemos los procesos menos consuntivos en energía. Eso vale también en términos económicos, porque la utilización de menos electricidad significa menos costos, además que se utiliza un proceso más eficiente.

Si aplicamos este principio consecuentemente, contribuimos a la protección del ambiente.

Podemos entonces observar que, según los datos que se obtienen del consumo de energía de la planta de ósmosis inversa utilizada en la zona marina

de Campeche, la contaminación ambiental que se produce a través de este proceso es significativamente menor y se realiza sin causar daños severos al ecosistema.

La descarga de la salmuera

No podemos evitar la producción de salmuera en los procesos de desalinización. Podemos únicamente manejar o transformarla de tal manera que la contaminación ambiental sea mínima.

Eso es un problema de menor dimensión, si la planta desaladora se encuentra a la orilla del mar y si la salmuera se descarga correctamente. Se recomienda construir dos pozos para la planta desaladora. El primero sirve como fuente del agua marina. Las ventajas al tener enfrente una toma directa al mar, son que no se necesitan construcciones marítimas y que el agua cruda es limpia.

El otro pozo sirve para infiltrar la salmuera en el agua marina subterránea. Así se evita la perturbación del sistema ecológico marítimo. La dilución de la salmuera se realiza paulatinamente sin daños ambientales. Hay que vigilar que los pozos deben tener una distancia suficiente uno del otro para evitar una influencia negativa al pozo fuente.

Un problema más crítico es el manejo de la salmuera, en el caso donde los recursos de agua salobre o salada se extraen de pozos distantes de la costa. Allá se puede también imaginar la infiltración de la salmuera en el subsuelo, pero con una profundidad suficiente para evitar que la salmuera entre el acuífero de

origen del agua y, que no contamine otros acuíferos. En ningún caso se debe descargar la salmuera en corrientes o vasos de agua superficiales.

Además se puede imaginar concentrar la salmuera en múltiples procesos de desalinización, para servir finalmente en un proceso de la producción de sal de mesa.

En todos los aspectos, la descarga de la salmuera no representa un obstáculo insuperable.

En el caso de la planta de ósmosis inversa instalada en las plataformas marinas, la salmuera remanente es vertida nuevamente al mar y, dado que las cantidades de desecho son pequeñas ésta se disuelve rápidamente y no se ve alterado el entorno marino.

**CONCLUSIONES
Y
RECOMENDACIONES**

Actualmente y desde sus inicios, la Sonda de Campeche se abastece de grandes volúmenes de agua dulce por medio de buques tanque, esto debido a que los sistemas de ósmosis inversa instalados en las plataformas petroleras resultan insuficientes para suministrar las cantidades de agua que se requieren. Con este método de desalinización sólo se provee el consumo humano y los servicios de limpieza y enfriamiento.

Para eliminar la problemática que representa el abastecimiento de agua dulce a las plataformas marinas y conforme a la información bibliográfica que se desprende de este trabajo, lo más viable sería la posibilidad de instalar una planta desalinizadora, ubicada sobre la costa, para poder extender una red de tuberías flexibles que corran por el lecho marino, por donde podría enviarse agua dulce y/o lodos preparados, y a su vez, podrían ser bombeados de regreso los desechos residuales para que sean tratados en tierra, lo cual reduciría los problemas ambientales que se generan por los derrames provocados por los transportes marítimos cuando descargan los lodos y cuando se limpian los contenedores. La instalación de la planta desalinizadora elimina también el problema del envío de lodo a las plataformas cuando se presenten inclemencias del tiempo (nortes), con lo que se evitaría que se suspendieran operaciones a bordo y se reflejaría esto claramente en la disminución de costos al no tener los equipos parados.

De acuerdo a la literatura consultada, el proceso más recomendable para la desalinización del agua de mar es el de evaporación multietapas instantánea (flash). Este sistema de evaporación flash se hace atractivo porque tiene las siguientes ventajas:

Ventajas de la evaporación flash

- ☑ Es un método de destilación que no requiere un alto consumo de energía durante su proceso. Es mayor el consumo que el de ósmosis inversa pero es rentable a largo plazo.
- ☑ La capacidad de producción por equipo es muy grande, suficiente para cubrir todas las necesidades a bordo de varias plataformas. La ósmosis inversa podría ofrecerlo pero a gran escala se encarece el sistema.
- ☑ La disponibilidad del equipo es alta y las refacciones se pueden encontrar fácilmente. La ósmosis inversa cuenta también esta posibilidad.
- ☑ La vida útil del sistema puede durar varias décadas, dependiendo del mantenimiento preventivo y correctivo. En la ósmosis inversa se cambian periódicamente las membranas, de 3 a 5 años y es lo más costoso del equipo.
- ☑ El costo de mantenimiento de la planta es bajo si se compara con los beneficios que se obtienen. El costo e mantenimiento de la planta de ósmosis inversa es un poco mayor.
- ☑ La planta no emite altas concentraciones de contaminantes por lo que no se ve afectado el medio ambiente. La ósmosis inversa tampoco es un medio contaminante.
- ☑ La calidad del agua destilada es altamente confiable, más que la que se obtiene con la ósmosis inversa.

Cabe mencionar aquí, que la calidad del agua de producto se monitorea constantemente, lo que permite que el agua dulce vaya libre de contaminantes y dentro de los parámetros necesarios; de la misma manera puede suceder con el bombeo de lodos por las tuberías flexibles. Durante el transporte por buques tanque no es posible constatar que no exista contaminación o que no se alteren las propiedades de los fluidos.

En este método de destilación se requiere lo siguiente:

- ❖ Un pretratamiento para prevenir corrosión e incrustación en el equipo. La ósmosis inversa también requiere del pretratamiento.
- ❖ La instalación del sistema requiere de construcciones civiles, lo que hace que su costo inicial sea alto. La ósmosis inversa, en éste sentido, resulta más económica en su costo inicial.
- ❖ Es necesaria la presencia de personal calificado para dirigir la operación de la planta. La planta de ósmosis inversa es más fácil de manejar debido a sus sistemas altamente automatizados.
- ❖ Se requiere de mantenimiento del equipo periódicamente por las incrustaciones. El mantenimiento de la planta de ósmosis inversa también es periódico para prevenir del daño de las membranas.

La industria petrolera mexicana está comprometida a estar a la vanguardia en los trabajos que se realicen en el mar. El abastecimiento del agua es un punto nodal de gran importancia, no únicamente para perforación y terminación en zonas marinas, sino también para las operaciones realizadas en tierra, donde el acarreo del agua se va convirtiendo en una situación cada vez más difícil, y puede facilitarse al hacer factible su dotación desde la fuente más abundante del mundo, el mar.

BIBLIOGRAFÍA

H. DARLEY, H. C. & GRAY; George Robert, Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids, ED Gulf Publishing Company, 5a ed , Houston Texas, USA. 1988.

LEMUS, James; AZAR, J. J., Drilling Fluids Optimization. A practical field approach, ED Penn Well Books, Tulsa, Oklahoma, USA, 1986

BENÍTEZ HERNÁNDEZ, Miguel Ángel; GARAICOCHEA PETRIRENA, Francisco; REYES ÁLVAREZ, Ciro, Apuntes de Fluidos de Perforación de Pozos, UNAM, F.I., México, D.F.

SUMER N., Levine, Selected Papers on Desalination and Ocean Technology, College of Engineering State University of New York, ED. Dover Publications Inc. N.Y., USA, 1968.

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, "Estado del Arte de la Desalinización del Agua", 1997.

PASSARELLI, Frank; The "Passarel" process. Water Desalination International, Los Angeles, California, USA, 1999

LUDVIGSEN, Freddy, Water to the World, HOH Canarias S A., Canary Islands, España, 2000.

DÜSSELDORF, F., Definición de una estrategia de abastecimiento de agua para las ciudades de Baja California, Comisión Nacional del Agua, 1998.

PONCE; STANLEY, JANKEL, Lisa; The Value of Water in the 21st Century - Impact on U.S. Desalination, Publicado por la International Desalination Association (IDA) en los "San Diego Proceedings" del "World Congress on Desalination", 1999.

KROEBER, Juergen, Cuadro sinóptico de plantas paquetes de desalinización por ósmosis inversa, 1999.

Selecciones de Scientific American, Oceanografía, H Blume Ediciones, Madrid, España, 1989.

RIGOLA LAPEÑA, Miguel, Tratamiento de Aguas Residuales: aguas de proceso y residuales, ED. MARCOMBO, S.A., Barcelona, España, 1989

SANKS, Robert L , Water Treatment Plant Design, ED. Butterworth-Heinemann, USA, 1978

MONTGOMERY, James M., Water Treatment Principles and Design, John Wiley and Sons, USA, 1985.

The American Water Works Association, Inc., Water Quality and Treatment, ED. McGraw-Hill, 3ª ed., USA, 1971.

Páginas consultadas en internet

<http://www.offshore-marine.com/oilrig1.html>

<http://www.arrakis.es>

<http://www.waterdesalination.com>

<http://www.hohcanarias.net>