



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO

---

---

FACULTAD DE INGENIERÍA

**DESALACIÓN DE AGUA DE MAR APOYADA CON  
ENERGÍA EÓLICA EN GUERRERO NEGRO, BCS**

**T E S I S**

PARA OBTENER EL GRADO DE:  
**INGENIERO MECÁNICO**

P R E S E N T A:

**ANGEL SÁNCHEZ GARCÍA**

DIRECTOR DE TESIS:

**Dr. GERARDO HIRIART LE BERT**



*Ciudad Universitaria, México D.F. Abril 2010*



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**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.

AGRADECIMIENTOS

## AGRADECIMIENTOS

A Mamá y Papá, por ser las personas que más amo en esta vida, por darme las cosas fácilmente pero enseñándome que no son así, he aquí el resultado. Le doy gracias a la vida por ser parte de ustedes y que nunca me haya faltado un vaso de Leche con Chocolate y Dinero para mis pasajes.

Daniel, por 20 años de hermandad apache, en verdad te quiero, respeto y estoy muy orgulloso de lo que has logrado, ahora si me encantaría ver perder a los PUMAS. Espero pronto estar plasmado en tus agradecimientos, no me importa que sea del IPN.

Gracias Pille, por decirme como agarrar el lápiz. Puchika! mira lo que pasa por enseñar a sumar restar, multiplicar y dividir, Gracias, te agradezco eso y mucho mas.

Al Football Americano, a los Leopardos P8, Escorpiones de Ingeniería y a los Pumas de la Universidad, que por defender a mi prepa, facultad y universidad, me llevo muchas cicatrices de enseñanza. Gracias coach "Chino" Muñoz y coach Rentería por la disciplina que me inculcaron, como olvidar a la flaca Marilú (la tablita).

A mis grandes amigos del tocho, los cuales no acabaría nunca de nombrar, con los que corrí, sudé, gané, perdí, bebí, reí, lloré y me di de golpes durante la mejor etapa de mi vida.

Al precioso estado de OAXACA, que me puso un reto enfrente para madurar y vientos fuertes para distraerme, a mis compañeros de trabajo del parque eólico Eurus.

Gracias Keso por abrirme los ojos y permitirme ver lo bello que es México, por ti nunca tuve miedo de ir al Istmo, sigue siendo como eres y bailando como lo sabes hacer. A mis amigos del Valle, Pollola por toda la ayuda que me brindaste, a ti y a tu familia Gracias muchas veces Gracias.

Y a ti en especial, que nunca me dejaste sólo a pesar de la distancia, por soportar mis tonterías y estar presente en mis logros, porque a pesar de lo que pase, eres muy importante en mi vida y te debo demasiado, mucho éxito en lo que venga y eres parte de esto, Te Quiero Mucho MAGALIY

Finalmente a TiTiNo, porque a veces es muy difícil ser uno mismo y que gracias a todos y cada uno de las personas arriba nombradas, me han hecho ver la diferencia entre Soberbia y Orgullo.

Procura ser claro,  
especialmente si tienes  
fama de ser sutil.

Salvor Hardin

*FUNDACIÓN*  
Isaac Asimov

## RESUMEN

Agua y Energía, son dos temas íntimamente ligados en el desarrollo económico de una sociedad, su fuerte dependencia, hace necesaria la presencia de ambos recursos con el fin de satisfacer las necesidades de la población, sin perturbar el equilibrio social y ambiental de la región.

En México se vive una gran disparidad entre el escaso recurso hídrico, contra la intensa actividad industrial en la región norte del país, efecto contrario ocurre en los estados del sur, donde el volumen de agua es abundante pero existe un rezago económico-social entre su gente.

Tal es el caso de Mulegé en el estado de Baja California Sur, especialmente en la región del Valle del Vizcaíno, lugar donde la actividad agrícola ha venido incrementándose durante los últimos años, trayendo como consecuencia una mayor demanda de agua potable.

La principal fuente de agua para el Valle del Vizcaíno y Guerrero Negro, la compone el acuífero del Vizcaíno, el cual ya enfrenta problemas de sobreexplotación e intrusión marina, con un déficit anual de **2.03[Mm<sup>3</sup>]**, según el equilibrio entre descargas y recargas de sus aguas.

El principal atractivo de esta tesis consiste en desalar agua de mar con la finalidad de abastecer con agua de riego al Valle del Vizcaíno, una zona de enorme potencial agrícola. Para ello se estudia la implementación de una planta desaladora por Ósmosis Inversa, con una capacidad parecida a la que se tiene en la desaladora mas grande del país, localizada en Los Cabos, BCS.

Se tendrá una producción de agua potable de 200[lp] anuales, cantidad que además de cubrir el déficit en el acuífero, aporta en un 18% con el volumen de descargas por bombeo utilizadas en el sector agropecuario.

La ubicación de la desaladora será cercana a uno de los canales de llamada de Exportadora de Sal, SA, la empresa productora de sal más grande del mundo que basa su producción por medio de evaporación natural. Ya que el proceso de desalación genera un rechazo de salmuera, la cual alcanza un valor de concentración del doble de la alimentación, esto abarata los costos de producción de sal al reducir el tiempo y el área de evaporación.

Esta medida a su vez resuelve el problema de la disposición final de la salmuera, evitando sea reintroducida al mar, ya que por las características del ecosistema puede ser restringida.

La desalación por Ósmosis Inversa uno de los procesos de mayor eficiencia energética, tiene para este estudio un consumo eléctrico específico de **2.8[kWh/m<sup>3</sup>]**. El aprovechamiento del viento para suministrar energía a la planta desaladora, el cual tiene un potencial atractivo, es una medida compatible con el ambiente por tratarse del Valle del Vizcaíno zona protegida.

Se analiza el recurso eólico en la región, con ayuda de datos proporcionados de la Central Eólica Guerrero Negro de CFE y de la estación meteorológica de CONAGUA en la localidad de Díaz Ordaz, tales datos reflejan la viabilidad del sitio en la región de Guerrero Negro, lugar donde se propone la instalación del parque, cercano a la ubicación de la desaladora.

El análisis estadístico llevado a cabo a dos tipos de aerogeneradores, arrojan que el modelo AW-1500[kW] es el más factible debido a consideraciones técnicas, calculándose un factor de planta del **28.14%** en sitio, capaz de producir anualmente 3,697.95[MWh] por cada unidad.

## RESUMEN

Con la generación de cada máquina y con la energía eléctrica demandada por la desaladora y sistema de conducción, se requiere instalar un parque eólico compuesto por cinco aerogeneradores AW-1500, conectados a la red local a una tensión de 34.5[kV]. El costo nivelado de generación eléctrica se obtiene de **5.94[¢US/kWh]**, siendo un costo competitivo dentro de la industria eólica.

Se propone un contrato de interconexión con CFE el cual estable que cuando la generación eólica sea mayor a la demanda, el excedente podrá ser entregado a la red y ser consumido durante temporadas de bajo viento.

En esta tesis el objetivo es conocer la factibilidad técnico-económica de la desalación apoyada con energía eólica, para ello se considera un caso base de producción a un 100% con energía de la red, esta consideración arroja un costo nivelado de **88.29[¢US/m<sup>3</sup>]**.

Dos alternativas de operación del sistema Desaladora-Parque Eólico son analizadas para su comparación:

**Alternativa I.-** Operación a un 100% de la capacidad de producción de agua, energizada con la generación del parque eólico y respaldo de la red. De esta manera se obtiene un costo nivelado de **72.97[¢US/m<sup>3</sup>]**.

**Alternativa II.-** Producción de agua conforme al potencial eólico instantáneo, se energizará únicamente con la generación del parque eólico, produciéndose 3.67[Mm<sup>3</sup>] al año, siendo el costo nivelado de **108.95[¢US/m<sup>3</sup>]**.

Esto se debe a que la planta desaladora no tiene la capacidad de operar intermitentemente, por lo cual se propone un plan de operación en el que algunos de los módulos de desalación puedan quedar en estado de “*stand by*” mientras el potencial eólico sea bajo y que operen mientras se tenga un viento estable capaz de despachar energía constante.

Finalmente se realizan análisis de sensibilidad al costo de los 65[km] de tubería, que formará parte del acueducto GN-Vizcaíno un costo bastante significativo en la inversión, pero que puede ser cubierto con la venta de salmuera la cual también fue analizada en esta tesis.

La venta de la salmuera es muy importante desde el punto de vista económico, puesto que en la región la producción de sal es una de las principales industrias y que por las características de la salmuera reduce considerablemente los costos, con lo cual se puede alcanzar un buen precio a futuro.

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>CAPÍTULO 1 AGUA, RECURSOS Y NECESIDADES</b>	
1.1 Recursos hidráulicos.....	2
1.2 Región Hidrológica-Administrativa I.....	4
1.2.1 Abastecimiento de agua potable en la región.....	4
1.2.1.1 Precipitación pluvial.....	5
1.2.2 Usos del agua.....	6
1.3 Baja California Sur.....	8
1.3.1 Generalidades.....	8
1.3.2 Municipio de Mulegé.....	10
1.3.2.1 Actividades económicas.....	11
1.3.2.1.1 Minería.....	11
1.3.2.1.2 Agricultura.....	11
1.3.3 Acuífero el Vizcaíno.....	12
1.3.3.1 Generalidades.....	12
1.3.3.2 Distribución del uso de agua subterránea.....	12
1.3.3.3 Situación administrativa.....	13
1.3.3.4 Balance de aguas subterráneas.....	14
1.3.3.4.1 Recargas.....	14
1.3.3.4.2 Descargas.....	15
1.3.3.4.3 Disponibilidad.....	16
<b>CAPÍTULO 2 DESALACIÓN DE AGUA DE MAR</b>	
2.1 Generalidades.....	17
2.2 Conceptos de desalación de agua .....	18
2.2.1 Agua a desalar.....	19
2.2.1.1 Agua de mar.....	20
2.2.2 Procesos de desalación de agua de mar.....	21
2.2.2.1 Procesos de destilación.....	21
2.2.2.2 Ósmosis Inversa.....	21
2.2.2.3 Comparación entre procesos de desalación.....	23
2.2.3 Toma de agua de alimentación.....	24
2.2.3.1 Toma cerrada.....	24
2.2.3.2 Toma abierta.....	24
2.2.4 Pre-tratamiento del agua a desalar.....	25
2.2.4.1 Pre-tratamientos físicos.....	25
2.2.4.2 Pre-tratamientos químicos.....	25
2.3 Descripción de la desaladora propuesta para Guerrero Negro.....	26
2.3.1 Agua de alimentación.....	27
2.3.2 Toma de agua de alimentación, Guerrero Negro.....	28
2.3.3 Membrana seleccionada.....	29
2.3.4 Configuración del módulo de desalación.....	30
2.3.5 Requerimientos energéticos de la desaladora.....	31

## ÍNDICE

2.3.5.1	Recuperador de energía ERI.....	32
2.3.5.2	Impulsión de agua producto.....	34
2.3.6	Disposición final de la salmuera.....	36
<b>CAPÍTULO 3 ENERGÍA EÓLICA</b>		
3.1	Generalidades.....	37
3.1.1	Antecedentes de la Energía Eólica.....	38
3.2	Aspectos técnicos de la energía eólica.....	40
3.2.1	Origen del viento.....	40
3.2.1.1	Vientos de montaña.....	41
3.2.1.2	Brisas marinas.....	41
3.2.2	Energía del viento.....	41
3.2.2.1	Ley de Betz.....	43
3.3	Propuesta de un parque eólico en Guerrero Negro, BCS.....	45
3.3.1	Fase I. Preselección del sitio.....	46
3.3.1.1	Aspectos Técnico-Económicos.....	47
3.3.1.2	Aspectos Legales.....	49
3.3.1.3	Aspectos Medioambientales.....	49
3.3.2	Fase II. Estudio de Prefactibilidad.....	50
3.3.2.1	Medición y análisis del viento.....	51
3.3.2.2	Selección del aerogenerador.....	55
3.3.2.3	Configuración del parque.....	59
<b>CAPÍTULO 4 ANÁLISIS DE RESULTADOS</b>		
4.1	Acoplamiento planta desaladora – parque eólico.....	61
4.1.1	Configuración del sistema.....	62
4.2	Análisis económico.....	63
4.2.1	Caso Base.....	63
4.2.2	Alternativa I (Energía Eólica + Consumo de la red, producción 100%) .....	64
4.2.3	Alternativa II (Energía Eólica, producción variable).....	66
4.3	Costo de tubería del acueducto de agua desalada.....	67
4.4	Venta de la Salmuera.....	67
<b>CONCLUSIONES.....</b>		<b>68</b>
<b>ANEXOS.....</b>		<b>69</b>
<b>REFERENCIAS.....</b>		<b>80</b>



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Contraste regional entre desarrollo y disponibilidad hídrica
Figura 1.2	Ciclo hidrológico en México
Figura 1.3	Disponibilidad media per cápita del agua
Figura 1.4	Regiones Hidrológicas administrativas
Figura 1.5	Clasificación de acuíferos Región I
Figura 1.6	Disponibilidad de los acuíferos en la región
Figura 1.7	Uso del agua
Figura 1.8	Municipios de BCS
Figura 1.9	Municipio de Mulegé
Figura 1.10	Volumen de la producción minera en el municipio de Mulegé
Figura 1.11	Volumen de la producción agrícola en el municipio de Mulegé
Figura 1.12	Acuíferos del estado
Figura 1.13	Acuíferos El Vizcaíno y San Ignacio, usos del agua
Figura 2.1	Proceso de Ósmosis
Figura 2.2	Proceso de Ósmosis Inversa
Figura 2.3	Características del agua de alimentación
Figura 2.4	Lagunas de sal, Guerrero Negro
Figura 2.5	Canales de llamada ESSA
Figura 2.6	Sitio propuesto desaladora
Figura 2.7	Configuración sistema
Figura 2.8	Configuración por paso
Figura 2.9	Configuración de los tubos de presión
Figura 2.10	Sistema recuperador ERI
Figura 2.11	Diagrama Desaladora-ERI
Figura 2.12	Diagrama del proyecto
Figura 2.13	Elevación Guerrero Negro – Vizcaíno
Figura 3.1	Vientos geostróficos
Figura 3.2	Aprovechamiento energético del viento
Figura 3.3	Efecto estela
Figura 3.4	Análisis ley de Betz
Figura 3.5	Potencial eólico de México
Figura 3.6	Localización estación meteorológica Díaz Ordaz
Figura 3.7	Análisis estadístico del viento, Agosto 2002
Figura 3.8	Perfil vertical del viento
Figura 3.9	Distribución Rayleigh, Guerrero Negro
Figura 3.10	Curva de potencia G58-850
Figura 3.11	Curva de potencia AW-1500
Figura 3.12	Aerogenerador AW-1500
Figura 3.13	Propuesta localización, Parque eólico Guerrero Negro
Figura 4.1	Diagrama planta desaladora
Figura 4.2	Potencial diario mensual

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1	Acuíferos importantes subregión BCS
Tabla 1.2	Usos Consuntivos del agua
Tabla 1.3	Fuentes de agua en la región
Tabla 1.4	Cabecera municipal y superficie territorial por municipio en BCS
Tabla 1.5	Regiones hidrológicas BCS
Tabla 1.6	Temperatura máxima, mínima y media anual por municipio en BCS
Tabla 1.7	Volumen, rendimiento y valor de la producción agrícola, por municipio en BCS
Tabla 1.8	Población por delegación Mulegé
Tabla 1.9	Pozos acuífero el Vizcaíno
Tabla 1.10	Volumen de agua concesionada acuífero el Vizcaíno
Tabla 2.1	Procesos de desalación
Tabla 2.2	Espectro de salinidad
Tabla 2.3	Análisis químico del agua de mar
Tabla 2.4	Análisis químico Océano Pacífico
Tabla 3.1	Dirección vientos geostróficos
Tabla 3.2	Permisos de construcción Parque Eólico
Tabla 3.3	Velocidades de viento Central Eólica Guerrero Negro, CFE
Tabla 3.4	Frecuencia del viento
Tabla 3.5	Potencial estadístico del viento Guerrero Negro
Tabla 3.6	Clasificación norma IEC 61400-1
Tabla 3.7	Producción estadística G58-850
Tabla 3.8	Producción estadística AW-1500
Tabla 4.1	Costos de producción Desaladora
Tabla 4.2	Inversión Desaladora
Tabla 4.3	Inversión Parque Eólico
Tabla 4.4	Costos de explotación Parque Eólico
Tabla 4.5	Módulos en operación
Tabla 4.6	Producción de agua [m <sup>3</sup> ]
Tabla 4.7	Precio de tubería
Tabla 4.8	Precio de la Salmuera

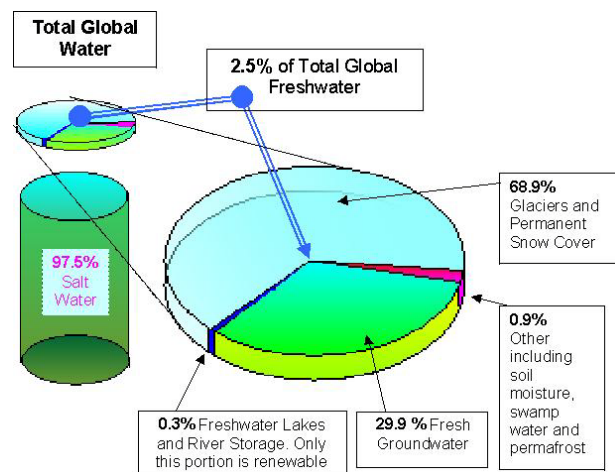
# INTRODUCCIÓN

La Tierra es el único planeta que puede albergar vida como la conocemos, por esta razón tiene ciertas características climáticas las cuales hacen posible el desarrollo de los seres vivos. El agua es el recurso natural más indispensable, directa o indirectamente es necesario su consumo pero al igual su uso en las actividades diarias.

A su vez es uno de los recursos más abundantes sobre la Tierra, con un aproximado de 1,386 millones de [km<sup>3</sup>] donde el 97.5% es salina, mientras el 2.5% restante se encuentra como agua dulce. El agua se puede encontrar en el ambiente en sus tres estados físicos, líquido (océanos, mares, ríos, etc.), sólido (glaciares, nieve, etc.) y gaseoso (vapor de agua).

De un 100% de agua dulce en el planeta, 68.7% está en forma de hielo y nieve permanentemente, el 29.9% se encuentra en acuíferos subterráneos, pero únicamente el 0.26% del total se encuentra disponible en lagos y ríos, siendo esta la manera más económica de explotarla.

El agua se mantiene en un ciclo dinámico causado por condiciones climáticas y de terreno. Al haber un desbalance del ciclo, acarrea problemas en la distribución del recurso, representado por grandes sequías y en contraparte las inundaciones, que ya son notorias en nuestro país.



Gran parte del territorio mexicano, primordialmente en el norte, tiene este severo problema, ya que además es una zona que demanda gran cantidad de agua por las actividades económicas que se realizan, razón por la cual el abastecimiento a estas regiones tiene que ser económico, confiable y de buena calidad. Actualmente se proveen de la explotación de mantos acuíferos con la problemática de sobreexplotación e intrusión de agua marina al cuerpo de agua.

La desalación de agua de mar alivia esta problemática, los avances tecnológicos han permitido reducir los costos de producción de agua dulce, la Ósmosis Inversa es un claro ejemplo, método el cual tiene un requerimiento energético (electricidad) mínimo en comparación con otras técnicas.

La explotación de fuentes alternas de energía (solar, eólico, hídrico, geotérmico, etc.) ha permitido una producción de energía eléctrica viable en lo técnico y en lo económico, pero lo más importante es que es amigable con el medio ambiente, logrando el objetivo de generación sin quema de hidrocarburos.

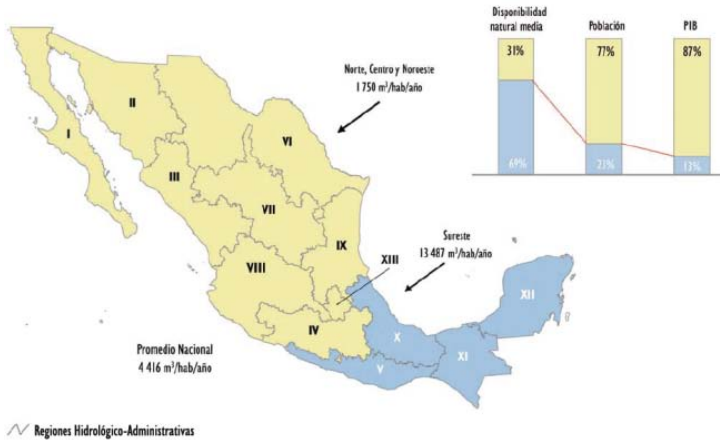
La energía eólica es uno de los métodos más sustentables, con experiencia en la interconexión con sistemas de desalación. México tiene sitios importantes con disponibilidad del recurso eólico y grave escasez de agua, la región de la península de Baja California es uno de ellos, sitio que además debe ser preservado debido a su riqueza arqueológica y natural.

# CAPÍTULO 1

## 1 AGUA, RECURSOS Y NECESIDADES

### 1.1 RECURSOS HIDRÁULICOS

México tiene una disparidad entre abundancia y escasez de recursos hidráulicos, dividiéndose en dos grandes regiones, basadas en la necesidad de agua y las actividades y costumbres de la población que concentra.



La región Norte que abarca las zonas centro, norte y noroeste, concentra un 77% de la población, genera el 87% del PIB<sup>1</sup>, pero cuenta con tan sólo el 31% de agua en el país, mientras que la región Sur que abarca las zonas sur y sureste, mantiene al 23% de la población, una generación del 13% del PIB y dispone del 69% de agua.

Regiones Hidrológico-Administrativas

Figura 1.1 Contraste regional entre desarrollo y disponibilidad hídrica (CONAGUA. Estadísticas del Agua en México 2008)

La disponibilidad media anual en el país, es de 465,137 millones de m<sup>3</sup>, este valor proviene del balance de precipitación, escurrimientos, evapotranspiración del suelo, recarga de acuíferos y un volumen muy importante proveniente de las importaciones, debido a que se comparten cuencas hidrológicas con Guatemala, Belice y Estados Unidos, siendo Estados Unidos el país con el cual México está comprometido a exportar cierto volumen<sup>2</sup>.



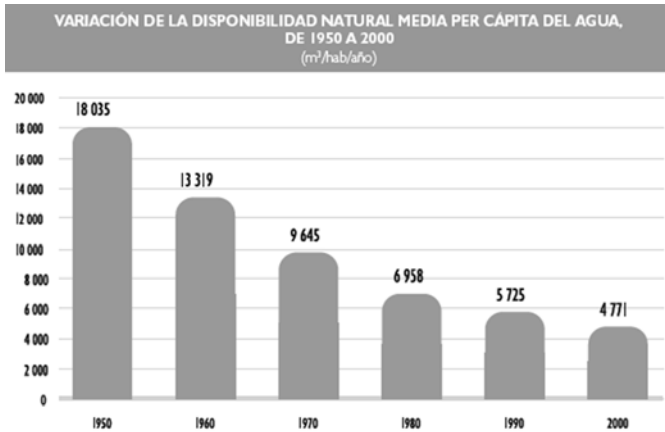
Figura 1. 2 Ciclo Hidrológico en México (CONAGUA. Estadísticas del Agua en México 2008)

<sup>1</sup> Producto Interno Bruto

<sup>2</sup> Tratado de Aguas Internacionales México -Estados Unidos, 1944

México recibe al año 1.51 billones de [m<sup>3</sup>] de agua en forma de precipitación, de la cual el 72.5% se evapora y regresa a la atmósfera, el 25.6% escurre por los ríos, mientras el 1.9% restante se infiltra al subsuelo y recarga los acuíferos, es por eso que anualmente el país cuenta con 465 mil millones de [m<sup>3</sup>] de disponibilidad natural media[1].

Esta disponibilidad ha venido decayendo desde 1950, pues se contaba con un volumen de 18,035[m<sup>3</sup>/hab/año] y para el 2006 únicamente 4,416[m<sup>3</sup>/hab/año], esto refleja una grave escasez de agua, acentuándose en algunas regiones del país principalmente en la zona norte.



Cabe aclarar que estos índices no reflejan las problemáticas de abastecimiento del recurso, ya que no toman en cuenta la distribución temporal ni espacial, que ocurre en todo el año y a lo largo y ancho del país.

Figura 1. 3 Disponibilidad media per cápita del agua (CONAGUA. Estadísticas del Agua en México 2008)

Para administrar el recurso hídrico, la República Mexicana se encuentra dividida en 13 regiones Hidrológico-Administrativas, agrupadas según las características de las cuencas hidrológicas cercanas.

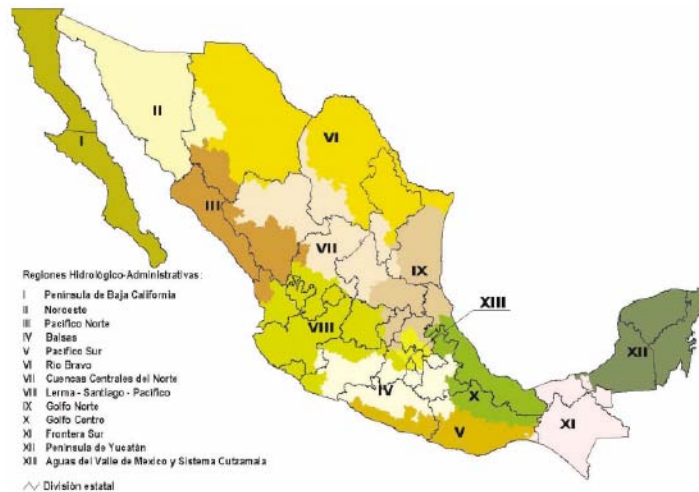


Figura 1. 4 Regiones Hidrológicas Administrativas (CONAGUA. Estadísticas del Agua en México 2008)

La región I Península de Baja California, que es la que tendrá lugar en este trabajo, se encuentra a su vez dividida en dos subregiones, la primera Baja California, la cual abarca el estado del mismo nombre y parte del municipio de San Luis Río Colorado en el estado de Sonora, y la otra subregión que comprende el estado de Baja California Sur.

1.2 REGIÓN HIDROLÓGICA-ADMINISTRATIVA I

La región Hidrológica-Administrativa I, compuesta por las subregiones Baja California y Baja California Sur, se encuentra localizada en el lugar con menores recursos hidráulicos en el país y con menores índices de precipitación. Esto agrava aún más la situación de los pobladores por las condiciones climatológicas existentes, por lo que el abastecimiento es en mayor medida con aguas subterráneas.

1.2.1 ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE EN LA REGIÓN

El abastecimiento de agua potable se obtiene de varias fuentes, divididas en aguas superficiales y subterráneas, también se puede obtener agua por métodos no convencionales, como lo es la desalación de agua, caso de la planta desaladora mas grande del país en Los Cabos, BCS<sup>3</sup>.

En lo que refiere a aguas superficiales, los principales cuerpos de agua se encuentran en la subregión de Baja California, siendo las aguas del río Colorado, proveniente de los Estados Unidos, las que más aportan al estado. Esta agua es utilizada para abastecer las ciudades fronterizas y las zonas industriales del lugar, una gran cantidad es transportada por el acueducto Río Colorado-Tijuana y otro tanto hacia los complejos agrícolas de Mexicali y Ensenada, aunque en Ensenada ya se tienen implementadas plantas desaladoras de baja capacidad.

El mayor recurso hidráulico de la región lo componen las aguas subterráneas, de las cuales se tienen identificados 88 acuíferos, con una recarga total de 1,507 [hm<sup>3</sup>/año]. Muchos de estos acuíferos, debido a la sobreexplotación, tienen el grave problema de salinización a causa de la intrusión de agua marina, provocando que su disponibilidad decaiga por dicha contaminación.

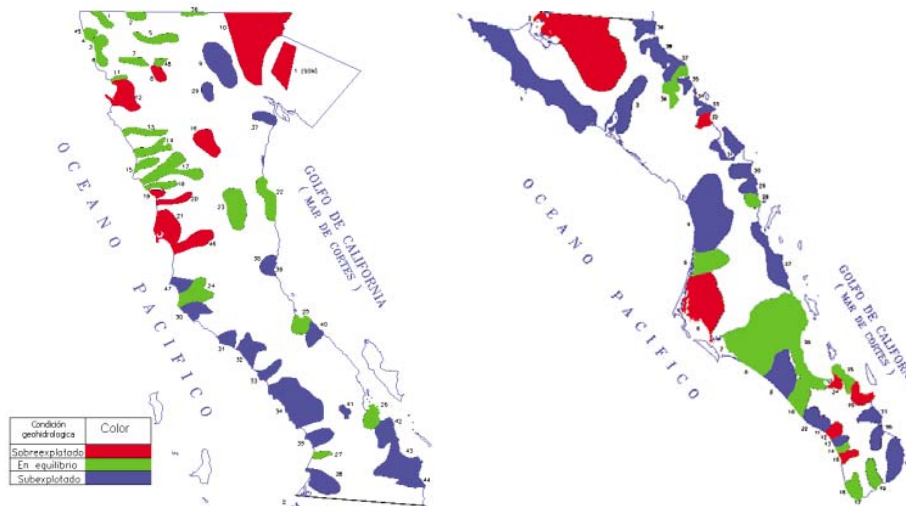


Figura 1. 5 Clasificación de acuíferos Región I (Programa Regional Hídrico 02-06, Región I)

En las figuras anteriores se muestran los acuíferos existentes en la región, representado en colores el nivel de explotación, referido a la relación entre recarga y extracción de agua.

<sup>3</sup> Planta desaladora Los Cabos, producción 200[lps]

El 16 de enero del 2003, el director general de la CONAGUA<sup>4</sup>, emitió un acuerdo publicado el día 31 de enero de 2003 a través del DOF<sup>5</sup>, por el que se dan a conocer los límites de 188 acuíferos de los Estados Unidos Mexicanos y los resultados de los estudios realizados para determinar su disponibilidad media anual. Dentro de estos acuíferos analizados fueron 17 los correspondientes a la región I Península de Baja California [2].

Para la subregión de Baja California Sur se analizaron los siguientes:

Clave Acuífero	Acuífero	Recarga media	Volumen de extracción estudios técnicos	Descarga natural comprometida	Volumen concesionado (Repda) 30 abril 2002	Disponibilidad media de aguas subterráneas	Déficit
302	Vizcaíno	40.70	42.0	5.000	37.398865	0.000000	-1.698865
306	Santo Domingo	188.00	307.0	9.000	180.098317	0.000000	-1.098317
319	San José Del Cabo	24.00	25.5	3.000	26.240350	0.000000	-5.240350
320	Santiago	24.50	13.2	4.600	15.090517	4.809483	0.000000
324	La Paz	27.80	28.4	0.000	30.781946	0.000000	-2.981946

Tabla 1.1 Acuíferos importantes Subregión BCS (Programa Regional Hídrico 02-06, Región I)

De la tabla anterior, la disponibilidad es uno de los puntos más importantes, pues muestra el balance general entre recarga y extracción, hay que decir que los datos corresponden al Registro Público de Derechos de Agua en abril del 2002, por lo que hay que tomar en cuenta que la disponibilidad varía a lo largo del tiempo dependiendo de la recarga natural, el manejo del agua y los volúmenes concesionados.

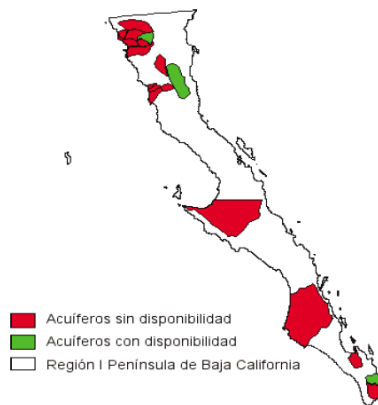


Figura 1. 6 Disponibilidad de los acuíferos en la región (Programa Regional Hídrico 02-06, Región I)

### 1.2.1.1 PRECIPITACIÓN PLUVIAL

Las lluvias son escasas en la mayor parte de la región, ocurren de manera irregular y no uniforme, por lo que las estadísticas sobre precipitación son poco confiables.

En la subregión Baja California las mayores precipitaciones se encuentran durante los meses de diciembre a marzo, mientras que las menores se hayan de mayo a octubre, lo que quiere decir que en la subregión se tiene un régimen de lluvias en invierno.

<sup>4</sup> Comisión Nacional del Agua

<sup>5</sup> Diario Oficial de la Federación

Para la subregión Baja California Sur las mayores precipitaciones ocurren en los meses de agosto y septiembre y las menores precipitaciones son de febrero a junio, por lo que contrariamente a la subregión Baja California el régimen de lluvias es en verano.

Baja California Sur es la entidad con menor precipitación pluvial durante el año, registrando, para el periodo comprendido entre 1971-2000, una capa promedio de 161[mm/año], seguido por Baja California con 175.7[mm/año][1].

En el lugar de estudio, Guerrero Negro y el Vizcaíno, muestra aún mas lo agravante de la situación, al ser las localidades donde menos lluvia se observa, esto repercute en el manejo del agua por parte de los pobladores y en la recarga del propio acuífero que los abastece.

### 1.2.2 USOS DEL AGUA

El uso del agua se puede caracterizar en dos tipos, Uso No Consuntivo y Uso Consuntivo, el primero se refiere en el que el agua regresa naturalmente a su ciclo sin ser alterada, tal es el caso de la utilizada durante la generación de electricidad en centrales hidroeléctricas y la acuicultura, en donde el agua no sufre efectos contaminantes ó cambios de temperatura, lo que hace que pueda retornar al ciclo hidrológico.

Mientras que el Uso Consuntivo, es aquel en el que el agua utilizada se consume, contamina ó se pierde, ya sea por evaporación ó infiltración. Entre los Usos Consuntivos se distinguen el público-urbano, industrial, agrícola, pecuario y para el enfriamiento de centrales termoeléctricas, etc.

Según estimaciones de la Gerencia Regional de la Península de Baja California, para el año 2001[2] se tiene la siguiente distribución de los usos consuntivos:

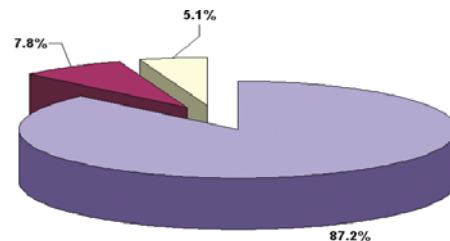


Figura 1. 7 Uso del agua (CONAGUA. Estadísticas del Agua en México 2008)

Usos Consuntivos	Volumen de Extracción (hm <sup>3</sup> )			%
	Superficial	Subterráneo	Total	
Agropecuario	1 896	1 839	3 735	87.2
Público-Urbano	102	231	333	7.8
Industrial	4	213	217	5.1
<b>Suma</b>	<b>2 002</b>	<b>2 283</b>	<b>4 285</b>	<b>100.0</b>

Tabla 1. 2 Usos Consuntivos del agua (CONAGUA. Estadísticas del Agua en México 2008)



La tabla muestra el volumen de extracción según el tipo de agua explotada, sea superficial ó subterránea, para cada Uso Consuntivo, encontrándose nuevamente la actividad agropecuaria, como la mayor demandante de agua potable con un 87% del total, demanda que a su vez debe ser cubierta con cierto grado de pureza, según el tipo de cultivo lo permita.

La demanda es cubierta por cuerpos de agua subterráneos en un 53% y superficiales con el 47% restante. Aunque se sabe que la península tiene pocas fuentes de agua superficial, 43% del 47% total se obtiene del río Colorado, mientras que el otro 4% se obtiene de otras fuentes superficiales diseminadas en la península, especialmente en la parte norte.

Origen	Volumen	%
	Hm <sup>3</sup> /año	
Aguas Subterráneas	2 283	53
Aguas Superficiales	152	4
Río Colorado	1 850	43
<b>Suma</b>	<b>4 285</b>	

Tabla 1. 3 Fuentes de agua en la región (CONAGUA. Estadísticas del Agua en México 2008)

Baja California Sur el estado con menos recursos hídricos de la república, se abastece de agua extraída del subsuelo, contando con grandes acuíferos pero con la problemática de que los más importantes, como lo es el acuífero del Vizcaíno, se encuentra en mal estado debido a la sobreexplotación y la intrusión marina.

En el área de aprovechamiento de este acuífero, conocido como Valle del Vizcaíno, se tienen grandes complejos agrícolas, obteniendo productos de alta calidad. Para esto, la cantidad y calidad del agua obtenida del acuífero, debe ser vigilada.

Como hemos visto hasta aquí, existen dos grandes necesidades en la región del Vizcaíno, agua y energía, las cuales deben ser atendidas de manera confiable, económica y amigable con el medio ambiente, esto con la finalidad de aumentar la capacidad productiva del sector agrícola. Esto se puede lograr implementando las nuevas tecnologías en el aprovechamiento de los recursos energéticos renovables y la desalación de agua de mar.

La Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, en su artículo 27 párrafo 5<sup>to</sup>, establece que: *“La propiedad de las aguas comprendidas dentro de los límites del territorio nacional corresponde originalmente a la nación, por lo que, las aguas nacionales son bienes del dominio público, inalienables e imprescriptibles. Por lo que la explotación, uso o aprovechamiento de las aguas nacionales por parte de las personas físicas o morales se realizará mediante concesión otorgada por el Ejecutivo Federal a través de la Comisión Nacional del Agua, de acuerdo con las reglas y condiciones que establece la Ley de Aguas Nacionales y su reglamento.”*

Lo anterior es de tomar en cuenta, considerando las concesiones que la CONAGUA estatal, otorga a los productores agrícolas y el costo que representa para ellos el poder explotar un pozo de agua, pero también, *¿Qué sucedería en el caso de tomar agua de mar y desalarla, que al ser un agua comprendida dentro del territorio nacional, que compromisos se adoptan jurídicamente con las autoridades correspondientes?* Esto último debido a su carácter jurídico-administrativo queda fuera de los alcances de esta tesis, pero es importante tener una idea de este tipo de detalles que finalmente terminan siendo claves en la factibilidad del proyecto.

1.3 BAJA CALIFORNIA SUR

1.3.1 GENERALIDADES

El estado de Baja California Sur, se encuentra ubicado en la parte sur de la Península de Baja California al noroeste del país, tiene una extensión de 73,677[km<sup>2</sup>], 3.7% del territorio nacional. Dividido en cinco municipios (Mulegé, La Paz, Comondú, Loreto y Los Cabos) y su capital, La Paz.



CABECERA MUNICIPAL Y SUPERFICIE TERRITORIAL POR MUNICIPIO EN B.C.SUR

MUNICIPIO	Cabecera municipal	Superficie (km <sup>2</sup> ) <sup>1</sup>
Comondú	Ciudad Constitución	12,547.30
Mulegé	Santa Rosalía	33,092.21
La Paz	La Paz	20,274.98
Los Cabos	San José del Cabo	3,451.51
Loreto	Loreto	4,311.00
<b>B.C.Sur</b>		<b>73,677.00</b>

Tabla 1. 4 (Cuaderno de datos básicos 2006, GEBCS)

Figura 1. 8 Municipios de BCS (Cuaderno de datos básicos 2006, GEBCS)

El estado se divide en tres regiones geológicas:

- Sierra de la Giganta
- Vizcaíno
- Los Cabos

La orografía se caracteriza por sierra y planicies costeras, la sierra de la Giganta corre paralela a la costa con suaves pendientes por el oeste y escarpada hacia el este, con una altura media dentro de los 600[m]. La altitud va desde la mínima al nivel del mar, hasta los 2,080[m] correspondientes a la sierra La Laguna.

A su vez se divide en cuatro regiones hidrológicas:

- RH 2 – Baja California centro-oeste
- RH 3 – Baja California suroeste
- RH 5 – Baja California centro-este
- RH 6 – Baja California sureste

Región Hidrológica	Volumen precipitado	Escurremientos	Recargas	Evapotranspiración
RH-2	2,519	16	50.8	2,452
RH-3	7,005	61	230.4	6,714
RH-5	276	3	17.5	255.5
RH-6	2,348	25	106.6	2,216
<b>TOTAL</b>	<b>12,148</b>	<b>105</b>	<b>405.3</b>	<b>11,637.5</b>

Tabla 1. 5 Regiones hidrológicas BCS (CONAGUA 2005)

Valores en Mm<sup>3</sup> = Millones de metros cúbicos

Capítulo 1

El clima es seco desértico en las partes bajas, con vientos provenientes del noreste y temperaturas máximas de 40°C en verano y mínimas de 0°C en invierno, es sólo en la región de Los Cabos donde se observa un clima cálido subhúmedo causado primordialmente por ciclones y temporales.

**TEMPERATURA MAXIMA, MINIMA Y MEDIA ANUAL POR MUNICIPIO EN B.C.SUR, 2004 (grados centigrados)**

MUNICIPIO	2004		
	Máx °C	Min °C	Media °C
Comondú	45.0	-4.5	20.9
Mulegé	46.5	-3.0	19.3
La Paz	46.0	0.0	21.4
Los Cabos	47.0	0.0	22.8
Loreto	47.0	0.0	23.2
B.C.Sur	47.0	-4.5	21.5

Tabla 1. 6 (Cuaderno de datos básicos 2006, GEBCS)

Se registran lluvias escasas e irregulares, siendo los meses entre septiembre y diciembre los que presentan mayores precipitaciones con alturas de 20[mm], por lo que la media mensual se estima en 8.12[mm].

La economía se basa en el turismo, la industria de la sal y la agricultura [3], siendo esta última muy valiosa para el estado, ya que genera numerosas fuentes de empleo, tanto locales como de migrantes temporales provenientes del sur del país. Este sector agrícola, genera productos de alto valor comercial pero sigue siendo el mayor consumidor de agua potable.

**VOLUMEN, RENDIMIENTO Y VALOR DE LA PRODUCCIÓN AGRÍCOLA<sup>11</sup> POR MUNICIPIO EN B.C.SUR, 2003 - 2004 Y 2004-2005**

MUNICIPIO	Volumen de producción (toneladas)		Rendimiento (toneladas/hectárea)		Valor de producción (miles de pesos)	
	2003-2004	2004-2005	2003-2004	2004-2005	2003-2004	2004-2005
Comondú 21	230,447.70	248,923.48	8.34	9.31	556,582.66	825,840.50
Mulegé	62,306.96	75,492.10	21.03	25.44	637,242.10	537,443.44
La Paz	118,082.66	132,320.45	29.34	34.29	620,162.81	955,640.07
Los Cabos	17,721.56	14,851.61	9.36	8.32	300,699.92	161,815.50
B.C.Sur	428,558.88	471,587.64	11.73	13.34	2,114,887.48	2,480,739.50

Tabla 1. 7 (Cuaderno de datos básicos 2006, GEBCS)

1.3.2 MUNICIPIO DE MULEGÉ

El municipio de Mulegé localizado en la parte norte del estado, limita al norte con el estado de Baja California, al sur con el municipio de Comondú, al este con el Golfo de California y al oeste con el océano Pacífico, es uno de los municipios de mayor extensión en el país, con 33,092[km<sup>2</sup>] siendo el 44.91% del total territorial del estado.

Mulegé tiene como cabecera municipal al poblado de Santa Rosalía y se encuentra dividido a su vez en 6 delegaciones y 28 subdelegaciones.



Figura 1. 9 Municipio de Mulegé (Estadísticas Municipales, GEBCS)

La población total en el municipio para el año del 2005 es de 52,743 habitantes, con una densidad poblacional de 1.6 [hab/km<sup>2</sup>], la más baja en el estado, debido principalmente a la amplia extensión territorial.

La tabla siguiente, muestra el crecimiento poblacional de las localidades más importantes del municipio, representando el 71.2% del total del mismo [3]. Se observa que en la mayoría de las localidades, hay una disminución en la población, caso contrario en Guerrero Negro y V. Alberto Alvarado Arámuro, donde la población se incrementa a causa de fenómenos de migración.

Localidad	1990	2000	2005
Guerrero Negro	7,231	10,235	11,894
Santa Rosalía	10,190	10,609	9,768
V.Alberto Alvarado Arámuro	n.d.	3,174	5,757
Mulegé	3,111	3,434	3,317
Bahía Tortugas	2,640	2,437	2,347
Bahía Asunción	1,133	1,463	1,242
Gustavo Díaz Ordaz	2,339	1,095	1,038
La Bocana	974	1,103	901
San Ignacio	799	754	719
Punta Abrejos	700	742	583

Tabla 1. 8 Poblacional por delegación Mulegé (INEGI, Estadísticas Municipales, GEBCS)

1.3.2.1 ACTIVIDADES ECONÓMICAS

1.3.2.1.1 MINERÍA

Los productos obtenidos de la actividad minera en el municipio, son la sal y el yeso, teniendo como fuente, el agua de mar. La sal encabeza la lista de producción y aporta el mayor capital económico al municipio, comparado con las demás actividades desarrolladas.

En la región de Guerrero Negro se encuentra la empresa Exportadora de Sal S.A., la productora de sal más grande del país y del mundo.

Su proceso basado en evaporación natural de agua de mar, requiere inundar extensas áreas, donde después de aproximadamente 2 a 3 años, la sal cristaliza y posteriormente es colectada y procesada para su consumo [3].

ESSA<sup>6</sup> da empleo a un gran número de personas del municipio, pero primordialmente a los habitantes de Guerrero Negro, siendo la actividad más importante en la región.

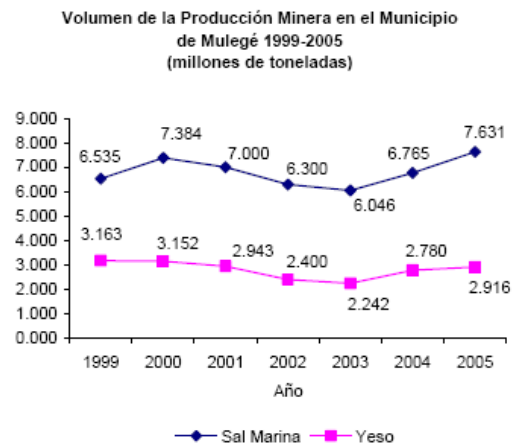


Figura 1.10 (Estadísticas Municipales, GEBCS)

1.3.2.1.2 AGRICULTURA

Dentro del municipio, la principal zona agrícola se encuentra en el Valle del Vizcaíno que durante el periodo 2004-2005 la superficie cosechada fue de 2,967[ha], con una tendencia a la baja respecto a ciclos agrícolas anteriores [3].

La entrada de capital ha ido en aumento en esta actividad, de los 500 a los 600 mil pesos anuales, donde los cultivos más importantes son: jitomate, chile, fresa, higuera, calabacita y forrajes.

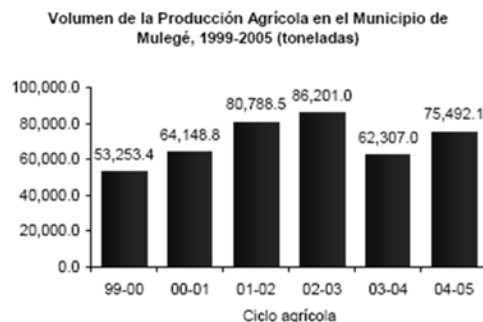


Figura 1. 11 (Estadísticas Municipales, GEBCS)

Esta actividad demanda una gran cantidad de agua, de más del 90% del volumen total disponible.

<sup>6</sup> Exportadora de Sal, S.A.

### 1.3.3 ACUÍFERO EL VIZCAÍNO

La sobreexplotación de los mantos acuíferos en Baja California Sur, se ha venido incrementando en los últimos años, en consecuencia se tienen serios problemas de intrusión salina y contaminación de las aguas subterráneas, siendo este el caso del acuífero el Vizcaíno, que ha sido uno de los más aprovechados por la industria agrícola.

La escasez del recurso, limita el crecimiento económico y social de la región, pero a su vez, plantea nuevos retos en la disposición de agua a los sectores productivos. Esto se debe atender utilizando los nuevos avances tecnológicos en desalación de agua, reutilización de aguas residuales así como la implantación de mecanismos más eficientes en el uso y manejo del agua, pero más importante aún, en el fomento de una cultura que abarque todos los niveles sociales y productivos, que capacite y oriente hacia un mejor cuidado del recurso.

#### 1.3.3.1 GENERALIDADES

Dentro del mapa, denominado con el número 2, se encuentra el acuífero el Vizcaíno, el tercero de mayor área en el estado con 10,588[km<sup>2</sup>].

Se localiza sobre la cuenca hidrográfica del Vizcaíno, en la cabecera noroccidental del estado de Baja California Sur, con un 75% dentro del municipio de Mulegé y el 25% restante en el municipio de Ensenada, BC.



Figura 1. 12 Acuíferos del estado (CONAGUA 2005)

#### 1.3.3.2 DISTRIBUCIÓN DEL USO DE AGUA SUBTERRÁNEA

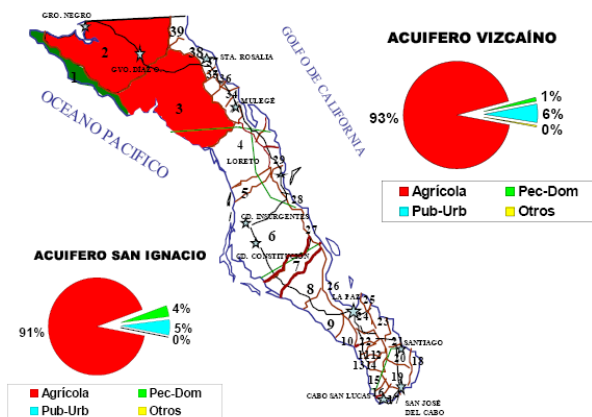
En los acuíferos de BCS nos encontramos con diferencias en los usos del agua extraída, dependiendo del tipo de actividad económica que se realiza en cada región [6]. Entre los usos más comunes se encuentran los siguientes:

- Agrícola
- Público – Urbano
- Pecuario
- Otros

Baja California Sur cuenta con importantes desarrollos agropecuarios diseminados a lo largo del estado, actividad que demanda una gran cantidad del recurso. En las costas de la región sur

debido al auge turístico y comercial, la mayor demanda se tiene por el sector Público-Urbano dejando atrás al agrícola.

La siguiente figura detalla el aprovechamiento en cada sector para los acuíferos Vizcaíno y San Ignacio, presentes en la región.



El acuífero Vizcaíno, tiene una explotación por parte del sector agrícola del 93% de sus aguas [7], ya que a pesar de ser la producción de sal la principal industria en el municipio, la agricultura en la región, juega un importante papel debido a la calidad de sus productos.

Esto genera la necesidad de apoyo tecnológico a agricultores.

Figura 1. 13 Acuíferos El Vizcaíno y San Ignacio, usos del agua (CONAGUA 2005)

### 1.3.3.3 SITUACIÓN ADMINISTRATIVA

Por mandato presidencial el día 6 de julio de 1954 es publicado en el DOF, el decreto de veda para la extracción de aguas subterráneas, en la región meridional del territorio de Baja California Sur. Actualmente se mantiene dicho decreto, ya que se emitió por tiempo indefinido, pero no se cuenta con algún reglamento que administre la explotación del acuífero.

Dentro de la región comprendida por el acuífero se encuentran las poblaciones de Ej. Emiliano Zapata, Ej. Gustavo Díaz Ordaz, Villa Alberto Alvarado Aramburo, Colonia Laguneros, Ej. Benito Juárez, Guillermo Prieto, Angel César Aramburo, Guerrero Negro.

El Comité Técnico de Aguas Subterráneas<sup>7</sup>, un organismo auxiliar del Consejo de Cuenca, el cual establece los niveles, rangos, reglas y mecanismos de seguimiento y control de la extracción de agua, actualmente se encuentra realizando este tipo de acciones además de conjuntar a los distintos sectores usuarios muy en particular al agropecuario, debido al creciente desarrollo agrícola en el Valle del Vizcaíno. Dentro del territorio comprendido se tienen instalados dos COTAS, el 0105 Valle del Vizcaíno instaurado desde el 18 de marzo de 1999 y el 0107 Valle de Mulegé desde el 29 de noviembre de 2001.

En diciembre de 1998 personal del departamento de aguas subterráneas de la gerencia estatal de BCS, realizó el censo de los pozos existentes en el acuífero, identificándose 252, dividiéndose según su uso [6]:

# Pozos	USO
122	Agrícola
123	Público Urbano
6	Servicios
1	Domésticos

Tabla 1. 9 Pozos acuífero el Vizcaíno (CONAGUA 2005)

<sup>7</sup> COTAS

1.3.3.4 BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

La disponibilidad se refiere a la capacidad que tiene un cuerpo de agua de abastecer las necesidades de los usuarios. Las concesiones serán otorgadas en base al cálculo de disponibilidad media anual de las aguas nacionales, que se establece en la NOM-011-CNA-2000 y que para el caso de aguas subterráneas se obtiene según la expresión siguiente:

$$\boxed{\text{Disponibilidad media anual de agua subterránea en una unidad hidrogeológica}} = \boxed{\text{Recarga total media anual}} - \boxed{\text{Descarga natural comprometida}} - \boxed{\text{Volumen anual de agua subterránea concesionado e inscrito en el REPDA}}$$

Las fuentes de recarga de un acuífero se presentan por el flujo horizontal de aguas subterráneas entre cuencas contiguas, a la inducida mediante pozos de reinyección, pero principalmente a la infiltración natural de aguas superficiales, el agua pluvial la más importante de ellas.

La descarga al igual que la recarga de un acuífero puede ser natural o inducida. El flujo horizontal subterráneo y en menor medida la evapotranspiración, son algunos de los procesos naturales de descarga, mientras que el bombeo en pozos, es la principal forma de descarga inducida.

1.3.3.4.1 RECARGAS

Para el acuífero el Vizcaíno se presenta una zona muy importante de recarga en la franja que comprende desde el ejido Emiliano Zapata hasta la zona de Guerrero Negro, donde ocurre la mayor precipitación pluvial en la región.

La infiltración de agua de lluvia es de 24.64[Mm<sup>3</sup>/año] distribuidos en la porción norte, en menor proporción en la zona oriental y en mayores proporciones en la zona de planicie.

En lo que corresponde a recarga inducida, no se tiene registro de obra alguna referida a la reinyección del acuífero.

Durante el periodo de lluvias ciclónicas, el agua precipitada no alcanza a escurrir en su totalidad hacia el mar, infiltrándose a lo largo del cauce de los arroyos San Luis y San Pablo, produciéndose un flujo horizontal del orden de los 16.05[Mm<sup>3</sup>/año].



1.3.3.4.2 DESCARGAS

En la parte occidental estratigráficamente existe una barrera que impide el flujo subterráneo hacia la línea costera, por lo que no existe descarga por este medio.

En la mayoría de los casos, la Evapotranspiración representa una pequeña fracción de la descarga, de tal forma que en ciertas circunstancias tiende a no ser considerada, pero las condiciones climatológicas y estratigráficas en la región hacen que deba ser tomada en cuenta.

Al no existir flujo de agua debido a la barrera estructural formada en la franja costera, se ha estimado una pérdida por evapotranspiración del 75% del agua que llega a ese punto, lo cual representa unos 2000[mm/año] a una profundidad de 10[m], lo que a su vez, teniendo 85[km] de costa en un ancho de 5[km], llega a ser un aproximado de 4.25[Mm<sup>3</sup>/año].

***Volumen anual de agua subterránea concesionada e inscrita en el REPDA***

Para el Vizcaíno según los títulos de concesión inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua<sup>8</sup>, de la Subdirección General de Administración del Agua con fecha del 30 de abril de 2002, el volumen concesionado para bombeo es de 37,398,865[m<sup>3</sup>/año][7].

Para tener una mayor aproximación, se utiliza el promedio de datos que CONAGUA estableció para los años de 1993 a 1999, mostrados en la tabla a continuación, obteniéndose un volumen de 38.47[Mm<sup>3</sup>/año]:

Año	Volumen [Mm <sup>3</sup> /año]
1993	38.9
1994	40.0
1995	38.5
1996	35.0
1997	40.4
1998	39.1
1999	37.4

Tabla 1. 10 Volumen de agua concesionada acuífero el Vizcaíno (CONAGUA)

<sup>8</sup> REPDA

1.3.3.4.3 DISPONIBILIDAD

Para conocer la disponibilidad del acuífero se debe realizar un balance volumétrico referido a la recarga y descarga de sus aguas, basado en la ecuación referida con anterioridad:

$$\text{RECARGA} - \text{DESCARGA} = \text{DISPONIBILIDAD}$$

La recarga se conforma por:

Infiltración de agua de lluvia: 24.64[Mm<sup>3</sup>/año]  
 Flujo horizontal subterráneo: 16.05[Mm<sup>3</sup>/año]  
 Reinyección inducida: 0[Mm<sup>3</sup>/año]

Mientras que la descarga incluye:

Flujo horizontal subterráneo: 0[Mm<sup>3</sup>/año]  
 Evapotranspiración: 4.25[Mm<sup>3</sup>/año]  
 Bombeo: 38.47[Mm<sup>3</sup>/año]

Con lo anterior se pueden obtener los totales, que para recarga es de 40.69[Mm<sup>3</sup>/año] y para descarga de 42.72[Mm<sup>3</sup>/año].

$$40.69[\text{Mm}^3/\text{año}] - 42.72[\text{Mm}^3/\text{año}] = -2.03[\text{Mm}^3/\text{año}]$$

De tal manera que calculando la disponibilidad, vemos que existe un déficit en el acuífero de 2.03[Mm<sup>3</sup>/año], que indica que no existe volumen disponible para nuevas concesiones en la unidad hidrológica, acuífero el Vizcaíno en el Estado de Baja California Sur.

Este hecho es alarmante en la actualidad, agudizado por la creciente actividad agrícola, la proliferación de sitios turísticos y aumento en la demanda del servicio público, esto se refleja en la disminución de los niveles estáticos y dinámicos, menores cantidades de agua extraída y algo aún más importante, la intrusión de agua salina, que contamina e inutiliza las aguas subterráneas.

Se ha detectado que el 93% de la demanda de agua en el estado se obtiene del subsuelo, razón por la cual, de los 39 acuíferos con los que se cuenta, 7 se encuentran sobre-explotados, 25 en equilibrio y 7 sub-explotados.

## CAPÍTULO 2

### 2 DESALACIÓN DE AGUA DE MAR

#### 2.1 GENERALIDADES

El agua es el elemento más importante en la vida de los seres vivos, juega un papel crucial en el crecimiento de toda sociedad, debido a la fuerte dependencia en las actividades económicas.

Las necesidades humanas como beber, lavarse y cocinar, pueden ser cubiertas con un volumen de agua potable de 100[l/día], lo que equivale a 35[m<sup>3</sup>/año] por cada persona, esta cantidad puede abastecerse a toda la población mundial, aunque el problema radica en la mala distribución del recurso en el planeta.

Actividades del hombre como la industria, agricultura, ganadería, etc., requieren volúmenes considerables de agua, además de tener en cuenta que durante los procesos de tales actividades, se tienen desperdicios, contaminación y otros efectos, que hacen que el agua no pueda ser reutilizada.

Del volumen total de agua en el planeta Tierra, 97% se encuentra en mares y océanos, considerada como agua no útil para las necesidades humanas. El 3% restante se podría afirmar que es agua potable, útil para el ser humano, pero su disponibilidad, calidad y distribución en el globo, no permite que lo sea, dejándonos únicamente disponible un 13% de este volumen.

Grande es la cantidad de agua potable de la que no se puede disponer, esta se encuentra congelada en los polos, confinada en capas subterráneas ó simplemente, evaporada en el ambiente, siendo imposible su explotación.

La mala distribución en el planeta del recurso hídrico, genera problemas de escasez en varias regiones del planeta, lo que a su vez puede ser agravado por las condiciones climáticas que prevalezcan en cada región.

Con todo lo anterior, se podría pensar que los países con mayores recursos hídricos son los más ricos, sin embargo esto no siempre es así. El grado tecnológico determina las condiciones en la que cada nación se encuentra, verificándose en la utilización, manejo y post-tratamiento que se le dé al agua, tomando en consideración, el ahorro de esta.

La escasez de agua es un fenómeno relativamente reciente en la historia del hombre. Durante los años 50<sup>rs</sup> afectaba únicamente a un pequeño número de países que por sus condiciones, parecía cosa natural, pero a finales de los 90<sup>rs</sup>, ya eran 26 países con una población de 300 millones de habitantes y según proyecciones ya realizadas para el año 2050, se estima que sean 66 países afectados por la escasez, en los cuales se concentra ⅓ de la población mundial.

Las principales fuentes de agua potable se encuentran en ríos, lagos, arroyos, etc., además de existir gran parte del recurso, bajo la superficie terrestre. Ante la sobreexplotación actual en la que se encuentran estas fuentes, se han implementando nuevas formas de aprovechamiento más eficientes, así como métodos tecnológicos de producción de agua potable.

El principal contaminante del agua utilizada para consumo humano son las sales, de las cuales se encuentran diluidas de manera natural, como en el agua de mar, ó pueden ser inducidas a cuerpos hídricos por procedimientos industriales, como el caso de los productos químicos usados en la agricultura, los cuales contaminan suelos, infiltrándose hacia aguas subterráneas.

La desalación de agua de mar, es una de las soluciones de abastecimiento de agua potable para muchos países, ya que se cuenta con un insumo del 97% del agua total del planeta, recurso que se puede considerar infinito debido a su volumen.

## 2.2 CONCEPTOS DE DESALACIÓN DE AGUA

La desalación, como su nombre lo dice, se trata de un procedimiento por el cual se intenta remover cierto grado de sales del agua, dependiendo de la utilización posterior de la misma.

Los métodos por los cuales se quiera alcanzar este objetivo son varios, que dependen de la fuente de energía utilizada, la forma de aplicación de esta y los volúmenes esperados de agua producto.

Entre estos métodos se encuentran los procesos térmicos de destilación, de separación física ó filtración de sales y los electroquímicos, de donde además el concepto de desalación difiere entre separación de agua de las sales y separación de sales del agua:

Clase de separación	Energía utilizada	Proceso	Sistema
Separación agua de sales	Vapor	Evaporación	Destilación solar
			Destilación súbita simple
			Destilación súbita multietapa (MSF)
			Destilación multiefecto (MED)
			Compresión mecánica de vapor
	Frío	Cristalización	Formación de hidratos
			Congelación
	Presión	Membrana	Filtración
			Ósmosis Inversa
Separación sales del agua	Carga eléctrica	Membrana selectiva	Electrodialisis
	Atracción química	Resina	Intercambio Iónico

Tabla 2. 1 Procesos de desalación (Medina, 2000)

La factibilidad de aplicar un método de desalación, depende mucho de la capacidad que exista en el lugar de disponer de la fuente de energía, como claro ejemplo se tiene a los países de Medio Oriente, donde los hidrocarburos son muy abundantes y el agua escasea, en este caso se utilizan desaladoras térmicas. Es necesaria la quema de estos hidrocarburos para la generación de vapor, el cual es utilizado dentro del proceso de desalación.

## 2.2.1 AGUA A DESALAR

El tipo de agua se caracteriza por cuatro principales parámetros desde el punto de vista químico:

- Conductividad eléctrica ó salinidad
- Dureza
- pH
- Anhídrido carbónico libre

La conductividad ó salinidad, es el más general de estos parámetros, pues en lo que a desalación respecta, es muy importante para decidir en el proceso más adecuado a utilizar. Los otros tres parámetros permiten configurar de manera más específica el proceso, en el diseño y la operación.

La salinidad del agua se refiere a la cantidad de sales disueltas en la misma, se expresa como residuo seco a 105°C ó TDS<sup>1</sup> midiéndose en [ppm] ó [mg/l], esta cantidad de sales permite su clasificación:

ESPECTRO DE SALINIDADES, TDS	[ppm]
Salmuera	300,000
Agua de mar	30,000
Agua salobre	3,000
Agua potable	300
Agua industrial	30
Agua desionizada	3
Agua pura de calderas	0.3
Agua ultrapura	0.03

Tabla 2. 2 Espectro de salinidad (Medina, 2000)

Para determinar la salinidad, inicialmente se pesa una muestra de agua y se calienta a 105°C, finalmente es vuelta a pesa y la diferencia entre estas, representa el valor buscado. Debido a la complejidad y al tiempo que lleva tomar esta medición en el sitio, se determina la conductividad eléctrica [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ] del agua, aprovechando la propiedad conductora, respecto a las sales disueltas.

La relación existente entre conductividad eléctrica y salinidad, conlleva correcciones que dependen del tipo de agua ó la fuente de donde se extrae, como ejemplo se tiene la relación:

$$\text{TDS [mg/l]} = \text{CE } [\mu\text{S/cm}] \times 0.64$$

Esta relación varía para otras aguas en base a su composición química, pues para el caso de aguas desaladas por Ósmosis Inversa que contienen más sodio y cloruros que calcio, magnesio y sulfatos, debido a las propiedades de las membranas utilizadas, la conversión sería:

$$\text{TDS [mg/l]} = \text{CE } [\mu\text{S/cm}] \times 0.5 \quad (\text{entre } 0.51 \text{ ó } 0.53 \text{ para ser más exactos})$$

La cantidad de los elementos disueltos en el agua, antes y después de ser desalada, trasciende tanto en el consumidor como en el proceso de desalación utilizado. Algunos de estos elementos se encuentran en mayor proporción que otros, pero todos son de gran importancia ya que pueden tener un alto grado de afectación al sistema.

<sup>1</sup> Total de Sólidos Disueltos (por sus siglas en inglés)

## 2.2.1.1 AGUA DE MAR

Se puede hablar de agua de mar cuando se tiene una salinidad por encima de las 30,000[ppm]<sup>2</sup>, esta varía en diferentes zonas del planeta, que depende de factores físico-químicos en el agua, la atmósfera y el fondo marino. Dicha variación puede notarse también, durante el año y a través del tiempo.

Algunas variaciones muy comunes se pueden dar por los siguientes factores:

- Los deshielos cerca de los polos reducen la salinidad
- Aire seco que atraviesa zonas desérticas aumenta la salinidad
- Zonas afectadas por monzones reducen la salinidad
- Lugares donde se producen fuertes lluvias, como en los trópicos, reducen la salinidad
- Lugares con fuerte insolación, como el caso de mares cerrados, se aumenta la salinidad

Un caso muy especial ocurre en zonas del Pacífico Sur, en donde tiene lugar una corriente marina conocida como El Niño, responsable de variaciones en la composición del agua, durante el verano y el invierno, que oscilan entre los 35,000 y 38,000[ppm].

A continuación se muestra el análisis químico promedio de diferentes mares y océanos:

ión [ppm]	Golfo Arabia	Mediterráneo	Golfo Pérsico	Omán	Pacífico	Atlántico
Na <sup>+</sup>	17,572	11,177	12,300	11,800	12,220	11,520
K <sup>+</sup>	486	478	470	490	286	460
Ca <sup>++</sup>	620	471	570	472	300	450
Mg <sup>++</sup>	2,098	1,355	1,700	1,355	730	1,320
Cl <sup>-</sup>	25,600	20,530	24,500	21,772	18,760	20,600
SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	4,277	2,488	3,400	2,880	3,890	2,910
CO <sub>3</sub> H <sup>-</sup>	122	208	185	160	170	134
<b>TDS</b>	<b>55,775</b>	<b>36,720</b>	<b>47,000</b>	<b>39,510</b>	<b>35,860</b>	<b>37,830</b>
<b>pH</b>	<b>8.2</b>	<b>7.9</b>	<b>8.2</b>	<b>8.06</b>	<b>7.6</b>	<b>8.1</b>

Tabla 2. 3 Análisis químico del agua de mar (Medina, 2000)

La península de Baja California colinda al este con el Golfo de California y al oeste con el Océano Pacífico, Guerrero Negro tiene costa con este último, por lo que las aguas que serán desaladas en este proyecto provendrán del Pacífico, con un contenido promedio de sales disueltas de 35,860[ppm] y un pH de 7.6 [11].

Esta agua tiene una temperatura y condiciones óptimas para la fauna marina, durante el invierno se convierte en punto importante para la reproducción de muchas especies, la más importante la Ballena Gris, además de tener una masiva migración de aves provenientes del norte.

Debido a la importancia ecológica del litoral, las Lagunas de San Ignacio y Laguna Ojo de Liebre han sido decretadas por la UNESCO en 1993, como patrimonio natural de la humanidad, por esta razón se debe tener una gran consideración en la implantación de una desaladora de agua de mar, con respecto a la toma de agua y descarga de salmuera.

<sup>2</sup> [ppm] Partes Por Millón

## 2.2.2 PROCESOS DE DESALACIÓN DE AGUA DE MAR

Anteriormente ya se ha hecho una clasificación de los procesos de desalación de agua, aunque en el caso de agua de mar, que es considerada como la más salina, técnicamente puede aplicarse la mayoría de los ya citados, siendo algunos de ellos realmente factibles y utilizados actualmente.

Los procesos más utilizados son los de destilación (MED, MSF y VC) y la Ósmosis Inversa, su selección obedece varios factores como la calidad y el volumen del agua producto, la fuente y el consumo energético, y aspectos técnico-ambientales, entre otros.

## 2.2.2.1 PROCESOS DE DESTILACIÓN

Requieren de una fuente de calor externa en forma de vapor, por lo general dicho vapor proviene como subproducto de algún tipo de industria, pero también puede ser producido para tal motivo, este calor es transmitido y aprovechado de diferentes maneras según el proceso:

- **MSF (Multistage Flash Distillation), Destilación súbita multietapa**
- **MED (Multi Effect Distillation), Destilación multiefecto**
- **VC (Vapour Compression), Compresión de vapor**

## 2.2.2.2 ÓSMOSIS INVERSA

La Ósmosis es un proceso natural por el cual se alcanza un equilibrio en la concentración de dos sustancias separadas por una membrana semipermeable, la cual únicamente permite el paso de agua pero no de sales. Este fenómeno se encuentra en la captación de nutrientes en las células.

Una forma de explicar este proceso es suponer dos recipientes del mismo volumen con sustancias a diferente concentración de sales, ambos recipientes conectados entre sí, se encuentran aislados por una membrana semipermeable. En un principio las sustancias estarán a la misma altura dentro del recipiente, pues tienen el mismo volumen.

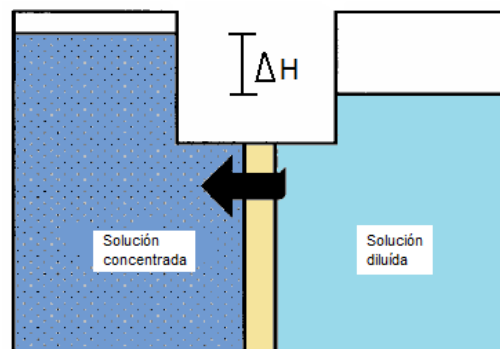


Figura 2. 1 Proceso de Ósmosis

Al estar separadas por una membrana semipermeable, únicamente el agua tiende a fluir de la sustancia con menor a la de mayor concentración, hasta alcanzar el equilibrio en la solución, esto trae consigo una diferencia de alturas en ambos recipientes.

Esa diferencia en altura  $\Delta H$ , se traduce en una presión aplicada naturalmente del lado de menor concentración, capaz de mantener el flujo de agua a través de la membrana, esta presión se conoce como Presión Osmótica y su valor varía en función de las características de la membrana y la cantidad de sales diluidas.

El proceso de desalación por Ósmosis Inversa, se refiere al fenómeno de la ósmosis pero de manera contraria, al aplicar físicamente presión del lado del concentrado. Esto provoca un flujo de agua a través de la membrana hacia la parte con menor concentración, produciendo agua libre de sales.

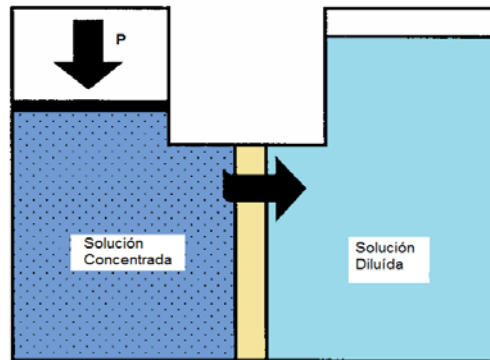


Figura 2. 2 Proceso de Ósmosis Inversa

Las sales retenidas por la membrana, elevan aún más la concentración en el lado de concentrado, razón por la cual la presión aplicada debe ser mayor a la osmótica.

Un flujo de alimentación se divide en dos flujos al final del proceso, uno de agua fresca con baja cantidad de sales y otro conocido como salmuera por su alta concentración. Para llevar a cabo la desalación es necesario aplicar una presión constante, la cual se aplica por medio de una bomba de alta presión, la cual demanda una cantidad considerable de energía eléctrica.

Las membranas son los elementos más importantes, mayoritariamente son utilizadas las de enrollamiento en espiral, donde un máximo de 8 membranas se enrollan a un tubo perforado que capta el agua producto, mientras que la alimentación y salmuera, fluyen alrededor del enrollamiento produciéndose la separación de sales en las membranas.



### 2.2.2.3 COMPARACIÓN ENTRE PROCESOS DE DESALACIÓN

Teniendo en cuenta lo anterior sobre el funcionamiento de cada método de desalación, se compararan con el fin de demostrar que la Ósmosis Inversa, es el método más viable para una desaladora en Guerrero Negro.

En términos generales, la destilación necesita energía en forma de calor para provocar el cambio de estado del agua de alimentación (líquido-vapor), que es independiente de la salinidad que tenga. En la Ósmosis Inversa es necesario vencer la presión osmótica del agua a desalar, por lo que una mayor salinidad supone una mayor presión osmótica.

A continuación se muestran las principales características diferenciadoras entre dichos métodos:

#### Destilación

- Elevado consumo energético.
- Elevada inversión inicial.
- Requiere de importante extensión de terreno.
- Baja Eficiencia.
- Es independiente de la salinidad del agua.
- Necesita de una fuente de vapor que puede o no ser independiente del proceso.
- Produce una calidad de agua casi pura.
- Puede ser acoplada a una central generadora eléctrica (Termoeléctricas).

#### Ósmosis Inversa

- Tiene el menor consumo energético.
- Se utiliza tanto en agua salobre como de mar.
- La inversión está ligada con las características del agua y es inferior a los demás sistemas.
- Requiere de pre-tratamientos físico-químicos.
- Precisa de una extensión de terreno del tipo medio.
- Necesita de una fuente de energía exterior.
- La presencia de iones específicos limita su capacidad de aplicación.
- La operación se complica en función de las características físico-químicas.

En base a esto, las recomendaciones tienden a que los procesos por destilación sean empleados a nivel comercial por su gran volumen de producción, mientras que la ósmosis inversa es más flexible en cuanto a producción, por lo que para pequeñas aplicaciones es idónea, pero a su vez puede ser implementada a grandes escalas, pudiendo competir económicamente con otras tecnologías aún más rentables.

Por esta razón y por otras de carácter técnico que veremos más adelante, la Oi<sup>3</sup> es el proceso elegido para ser implementado en este proyecto.

---

<sup>3</sup> Ósmosis Inversa

### 2.2.3 TOMA DE AGUA DE ALIMENTACIÓN

El diseño de una planta desaladora, sin importar el proceso, comienza con la obra de toma ó punto de captación del agua a desalar, esta difiere respecto al tipo de agua, salobre ó de mar.

Se consideran dos tipos fundamentales, toma abierta ó cerrada, ambas con ventajas y desventajas, reflejadas en la viabilidad económica y ambiental, según la situación del lugar y del proyecto.

#### 2.2.3.1 TOMA CERRADA

Este tipo de obra es la más favorable por muchos factores operativos en el proceso de desalación, además requiere una menor infraestructura. Entre las ventajas más significativas se tienen:

- Pre-filtrado del agua de alimentación en el terreno
- Ausencia de actividad orgánica y biológica
- Bajo contenido de oxígeno disuelto
- Estabilidad de la temperatura

Mientras que algunas desventajas, se citan las siguientes:

- Elementos como: hierro, aluminio, sílice, flúor, etc., contenidos en el terreno que afectan el proceso
- Contaminación por nitratos, pesticidas, etc.
- Variación en la composición química a lo largo del tiempo.

La construcción de pozos playeros representa una dificultad importante, pues se tiene que considerar el gran caudal requerido por la desaladora. Es necesario un estudio de suelo previo a la perforación del pozo, pues se corre el riesgo de suelos muy permeables, capaces de inducir el flujo de agua de mar hacia mantos acuíferos.

#### 2.2.3.2 TOMA ABIERTA

Una toma abierta o superficial tiene las características contrarias a una toma de pozo o cerrada:

- Actividad orgánica y biológica importante
- Mayor contenido de sólidos disueltos, que varían según las condiciones en sitio
- Exposición mayor a la contaminación
- Elevado contenido de oxígeno disuelto
- Amplio margen de variación de la temperatura
- Composición química homogénea

Este tipo de obra se realiza cuando las condiciones impermeables del terreno no permiten su aplicación. Se requiere instalar una tubería o canal de entrada sobre la costa, además de recorrer una distancia considerable bajo el lecho marino, con daños al ecosistema costero.

Una ventaja importante es que se asegura un caudal constante de agua de alimentación, teniendo la capacidad de almacenarla, previo a ser desalada.

#### 2.2.4 PRE-TRATAMIENTOS DEL AGUA A DESALAR

Todo tipo de agua contiene una serie de componentes orgánicos e inorgánicos, los cuales son perjudiciales para el consumo o cualquiera que sea la aplicación.

En el caso de la desalación y referido primordialmente a la ósmosis inversa, es importante tener controlado dentro de ciertos límites la presencia de estos componentes, con la finalidad de proteger las membranas contra su deterioro.

Por lo tanto, según las características físico-químicas del agua, debe acondicionarse bajo una serie de tratamientos antes de ingresar al sistema, divididos en dos tipos:

- Físicos.- Eliminan la presencia de sólidos suspendidos, gases y materia orgánica.
- Químicos.- Previene la deposición de materia orgánica en la superficie de la membrana, así como de ataques químicos sobre la misma.

##### 2.2.4.1 PRE-TRATAMIENTOS FÍSICOS

Los componentes en suspensión en el agua van desde arenas hasta partículas coloidales, que proceden principalmente de la erosión de terrenos, la disolución de sustancias minerales y la descomposición de sustancias orgánicas.

Una instalación de pequeña capacidad requiere generalmente de filtros de arena y filtros cartucho, requeridos en la etapa de pre-tratamiento.

Antes de entrar a la membrana, el agua de alimentación pasa a través de filtros arena que reducen la presencia de la misma a una cierta medida de grano, luego pasa a través de filtros cartucho para afinar la calidad.

Otras técnicas ayudan a mejorar la filtración, como la decantación, la coagulación-floculación y la coagulación-floculación-decantación.

##### 2.2.4.2 PRE-TRATAMIENTOS QUÍMICOS

El pre-tratamiento químico sirve para contrarrestar dos fenómenos ocurrentes en el agua de alimentación, la contaminación y procesos químicos naturales o inducidos. Los procesos químicos ocasionan afectación a la estructura de la membrana y reacciones químicas precursoras de precipitados insolubles en la superficie de la membrana.

La contaminación se produce de forma natural, debido a la presencia de bacterias, virus y hongos que pueden atacar ó inclusive desarrollarse sobre la membrana, la cual se compone de material nutritivo para este tipo de microorganismos.

La aplicación de agentes químicos, es importante también para la desinfección y regulación de pH, así como la dosificación de coagulantes, reductores y estabilizantes.

### 2.3 DESCRIPCIÓN DE LA DESALADORA PROPUESTA PARA GUERRERO NEGRO

La Ósmosis Inversa ha demostrado ser uno de los procesos de desalación más factibles tanto en lo técnico como en lo económico, su fácil operación y mantenimiento, además del relativo poco espacio que ocupan sus instalaciones, hacen que sea la mejor opción para la implantación en el proyecto de desalación en Guerrero Negro.

Los requerimientos energéticos de la OI, son de los más bajos y por este caso se hará uso de la energía eólica en el sitio como se verá más adelante. Todo esto también favorece a la OI en el sentido de ser utilizada en regiones aisladas en donde la red eléctrica no exista o no sea capaz de soportar tales consumos de electricidad.

El agua desalada será prevista para el riego de los campos agrícolas de las regiones del Vizcaíno y Díaz Ordaz, actualmente estos complejos demandan la mayor cantidad del recurso disponible, extrayéndose del subsuelo del acuífero el Vizcaíno que por tal razón padece de problemas de sobreexplotación e intrusión marina.

El total de agua de riego en la región es un volumen demasiado grande para ser cubierto con agua desalada, este volumen representa el 93% del bombeo total del acuífero [7] que corresponde a un gasto de 35.78[Mm<sup>3</sup>/año] ó en otros términos 1,134.58[lps].

Por esta razón se propone desalar un volumen que permita amortiguar tal déficit en el acuífero y así contribuir en un 18% con los requerimientos hídricos de los complejos agrícolas, siendo un gasto de **200[lps]**. De esta manera se espera alcanzar una recuperación sistemática en el balance de aguas del acuífero el Vizcaíno.

Para llevar a cabo el análisis de producción de agua desalada, se utiliza un software elaborado por la DOW Chemical Company, este programa llamado ROSA<sup>4</sup> tiene la virtud de elaborar el diseño del módulo de desalación y poder hacer optimizaciones al sistema [ANEXO 2.1].

En este programa el usuario ingresa variables de entrada, como características del agua y la configuración del módulo de desalación, tomando en cuenta la cantidad de tubos y el número de elementos (membranas) por tubo. Las respuestas tienen que ver con las presiones tanto del producto como de la salmuera (importantes para la distribución posterior de ambos flujos), así como la presión aplicada en cada tubo y la energía demandada en el bombeo de alta presión

---

<sup>4</sup> Reverse Osmosis System Analysis

## 2.3.1 AGUA DE ALIMENTACIÓN

Para el caso de Guerrero Negro en donde el agua de alimentación provendrá de la costa oeste de la península, se tomará en cuenta la cantidad de sólidos disueltos promedio del Océano Pacífico de 36,365[mg/l], una temperatura promedio de 25°C y un pH de 7.6 [11].

Las sales disueltas en las aguas del Pacífico se distribuyen de la siguiente manera, según el tipo de iones:

IÓN	[mg/l]
Na <sup>+</sup>	12,220
K <sup>+</sup>	286
Ca <sup>++</sup>	300
Mg <sup>++</sup>	730
Cl <sup>-</sup>	18,760
SO <sub>4</sub>	3,890
CO <sub>3</sub>	9
HCO <sub>3</sub>	170

Tabla 2. 4 Análisis químico Océano Pacífico (Correa, UABC)

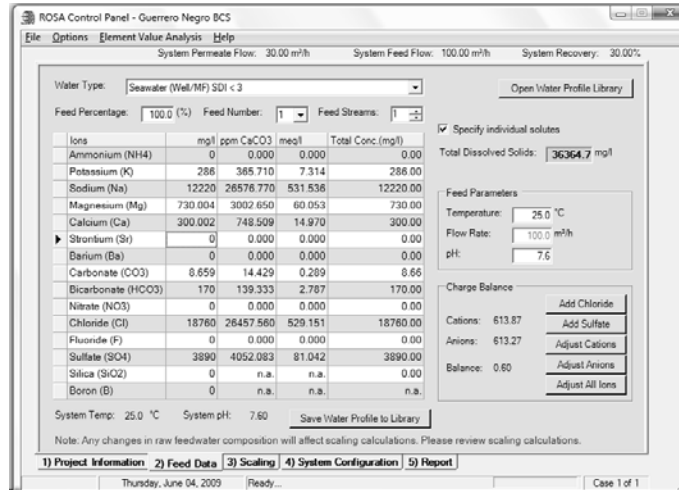


Figura 2. 3 Características del agua de alimentación (ROSA, Dow Chemical)

Los datos de concentración fueron ingresados al programa por cada tipo de ión correspondiente, además de la temperatura y el pH promedio. El programa puede hacer un análisis únicamente seleccionando el tipo de agua e ingresando la cantidad total de sólidos disueltos, lo realiza mediante un balance entre la composición de Sodio y Cloro, según la elección del tipo de agua registrada en su base de datos, pero al contar con información se realizó el análisis completo obteniendo una mejor aproximación al problema.

## 2.3.2 TOMA DE AGUA DE ALIMENTACIÓN, GUERRERO NEGRO

Guerrero Negro es una población cercana a la costa que tiene como principal industria la producción de sal, la empresa Exportadora de Sal S.A. representa una de las mayores productoras de sal en el mundo. Para llevar a cabo esta tarea, inundan con agua de mar cierta superficie con la finalidad de que por efecto del clima el agua evapore, permitiendo posteriormente recoger la sal asentada en el suelo.



Figura 2. 4 Lagunas de sal, Guerrero Negro (Google Earth)



Los canales de llamada y estaciones de bombeo son las obras hidráulicas por medio de las cuales se suministra agua de mar de la laguna Ojo de Liebre hacia las áreas de concentración de las salinas. Exportadora de Sal cuenta con dos estaciones de bombeo equipadas con 10 y 5 bombas axiales respectivamente, con capacidad aproximada de 35,000[gpm] cada bomba, movidas por motores diesel de 375[hp] montadas sobre una plataforma piloteada.



Figura 2. 5 Canales de llamada ESSA ([www.essa.com.mx](http://www.essa.com.mx))



De esta manera es factible aprovechar el flujo de agua de mar proveniente de uno de los canales de llamada de Exportadora de Sal, con el fin de proveer de agua de alimentación a la planta desaladora, de tal forma se tiene que recalcular el bombeo de dicho canal para no perder el volumen llevado a la salinas y proveer un caudal de agua de alimentación a la desaladora y producir así el volumen propuesto de agua dulce.

El agua proveniente del canal se irá almacenando en una cisterna, para posteriormente entrar al sistema de pretratamiento e ir alimentando los módulos de desalación. De esta manera se asegura un flujo constante de agua de mar.

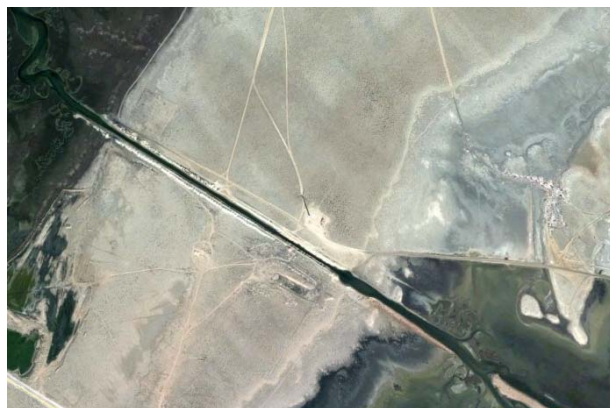


Figura 2. 6 Sitio propuesto desaladora (Google Earth)

### 2.3.3 MEMBRANA SELECCIONADA

Un aspecto fundamental es la selección de la membrana, pues relaciona la producción de agua con el consumo de energía, tomando en cuenta las características del agua a desalar.

Esto se debe a que el punto de mayor interés en los sistemas por membrana, es el factor de ensuciamiento (fouling factor) ya que afecta la vida útil de las membranas, siendo la acumulación sobre la superficie de la membrana de partículas y sustancias coloidales, que bloquean los poros de filtración de esta. El factor de ensuciamiento aumenta con el incremento del flujo de permeado, pero hace que disminuya el porcentaje de recuperación en el sistema.

En este punto entra en juego el pre-tratamiento que se le dé al agua de alimentación, pues ayuda a reducir considerablemente este factor, además de que el tipo de toma de agua seleccionada también es importante. En el caso de toma por pozo playero sirve de filtro al agua de mar minimizando la presencia de organismos y residuos sólidos.

Las membranas comerciales se encuentran alojadas dentro de tubos en diferentes configuraciones, siendo más comunes las de arrollamiento en espiral que como su nombre lo dice, cada tubo contiene cierta cantidad de membranas enrolladas dentro del mismo, incrementando de tal manera la superficie activa en un menor espacio.

En el mercado existen aún muy pocos fabricantes, razón por la cual se han normalizado las dimensiones de las membranas, se pueden encontrar tubos con diámetros exteriores de 4" u 8" y longitudes de 1[m] o 1.5[m].

La membrana se seleccionó en base al catálogo y a las recomendaciones de DOW [9], que es uno de los fabricantes más importantes en este rubro, tomando en cuenta los requerimientos del caso.

Se trata de una membrana *SW30HRLE-400*, diseñada para agua de mar con una superficie activa de 400[ft<sup>2</sup>] ó 37.2[m<sup>2</sup>] y un rechazo de sales del 99.75%. Es considerada de bajo consumo energético y una alta recuperación con un máximo de 8%, referido a la razón existente entre el flujo de agua producto y el flujo de alimentación.

## 2.3.4 CONFIGURACIÓN DEL MÓDULO DE DESALACIÓN

Considerar las condiciones operativas del sistema es muy importante, desde la membrana utilizada hasta el bastidor seleccionado que soporte las fuerzas que se generan en la estructura a causa de las altas presiones que maneja, todo esto con el fin de obtener buen funcionamiento, bajo mantenimiento y una larga vida útil del mismo. Tales condiciones son limitadas por lo siguiente:

- Máxima recuperación
- Flujo máximo de permeado
- Flujo máximo de concentrado
- Flujo máximo de alimentación por elemento

Finalmente estos puntos dependen de la tendencia del factor de ensuciamiento, en donde un mal diseño conlleva el hecho de tener que aumentar la presión del agua de alimentación y la reducción del tiempo de vida útil de la membrana, entre otras cosas.

En una planta desaladora en general, existe una amplia gama de configuraciones las cuales dependen de si hay o no recirculación tanto del producto como del concentrado. Las decisiones entre un tipo de configuración y otra tienen que ver de nueva cuenta, con la calidad del agua de alimentación y el uso del agua producto.

Para este análisis se tiene una configuración de un solo paso, donde no existe ninguna recirculación de cualquiera de los flujos, por lo que el agua de alimentación entra a los tubos y se divide en dos flujos; permeado (producto) y concentrado (salmuera).

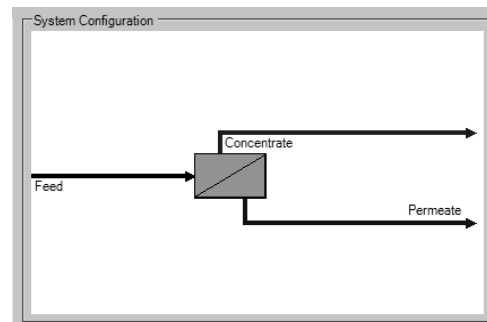


Figura 2. 7 Configuración Sistema (ROSA, Dow Chemical)

El agua producto esperada corresponde a un caudal de **720[m<sup>3</sup>/hr]**, para ello se utilizarán 8 módulos de desalación, con un gasto por módulo de 90[m<sup>3</sup>/hr]. Al usar tal tipo de membranas, el sistema permite una recuperación de producto del 40% respecto al agua de alimentación. Una recuperación de 40% requiere una alimentación de 225[m<sup>3</sup>/hr] con el fin de obtener los 90[m<sup>3</sup>/hr] de producto.

Configuration for Pass 1	
Stages in Pass:	1
Fouling Factor:	0.85
Operating Temp:	25.0 °C
Permeate Flow:	89.98 m <sup>3</sup> /h
Recovery:	40.00 %
Feed Flow:	225.00 m <sup>3</sup> /h
Permeate Flux:	15.76 l/mh
Recirculation Loops	
<input type="checkbox"/> Blend Permeate	None m <sup>3</sup> /h
<input type="checkbox"/> Pass 1 Conc to Pass 1 Feed	None m <sup>3</sup> /h
<input type="checkbox"/> Pass 2 Conc. to Pass 1 Feed	None m <sup>3</sup> /h
	Max

Figura 2. 8 Configuración por paso (ROSA, Dow Chemical)



Cada módulo consta de 24 tubos de presión conteniendo cada uno 8 membranas, lo que habla de un total de 192 membranas por módulo, a esta decisión se llegó tras iteraciones en el programa ROSA, donde se variaba el número de tubos y de membranas por tubo, teniendo como parámetro el consumo específico de energía.

Figura 2. 9 Configuración de los tubos de presión (ROSA, Dow Chemical)

### 2.3.5 REQUERIMIENTOS ENERGÉTICOS DE LA DESALADORA

Siendo ingresados los datos de agua de mar, seleccionada la membrana y configurado el módulo de desalación conforme al apartado anterior, el programa ROSA arroja que la presión del agua de alimentación debe ser de 51.26[bar]. A partir de este dato se dimensionará la bomba de alta presión y de tal forma se conocerá el consumo energético por  $m^3$  de agua producido.

Dimensionamiento de la bomba de alta presión:

$$P_a = 51.26 [bar] = 5,126 [kPa]$$

$$Q_a = 225 \left[ \frac{m^3}{hr} \right] = 62.5 * 10^{-3} \left[ \frac{m^3}{s} \right]$$

$$Pot_{AP} = P_a * Q_a = 5,126 * 62.5 * 10^{-3} = 320.38[kW]$$

La eficiencia de la bomba de alta presión y el motor que la gobierna, se establece a un valor del  $\eta=85\%$ . Por lo tanto la potencia real de la bomba será:

$$Pot_{AP} = \frac{320.38}{0.85} = 376.91[kW]$$

Por lo tanto para los 8 módulos de desalación propuestos, se tiene que la potencia demandada será: **3,015.29[kW]**

De esta manera el consumo de energía por  $m^3$  de agua producida es:

$$Pot_{AP} = 3,015.29[kW]$$

$$Q_p = 720 \left[ \frac{m^3}{hr} \right]$$

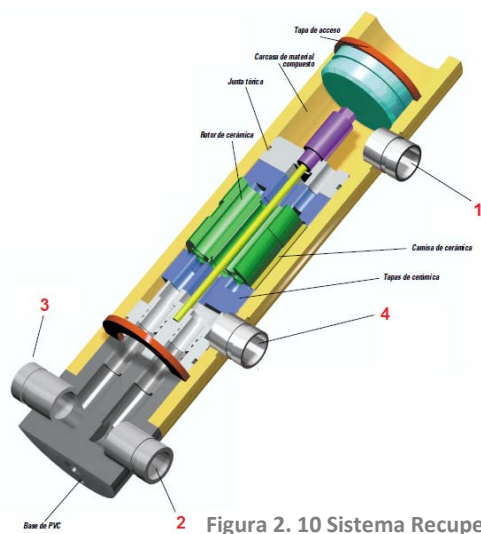
$$\dot{E} = \frac{Pot_{AP}}{Q_p} = \frac{3,015.29}{720} = 4.19 \left[ \frac{kWh}{m^3} \right]$$

## 2.3.5.1 RECUPERADOR DE ENERGÍA ERI

Otro dato importante le corresponde a la salmuera ó mejor conocido como rechazo del proceso, pues le corresponde un gasto de 135[m<sup>3</sup>/hr] a una presión de 49.15[bar], esta alta presión es normalmente desperdiciada si no se cuenta con un sistema de recuperación de energía.

Existen diferentes sistemas recuperadores de energía tales como turbocargadores y rodets Pelton, pero actualmente son utilizados los recuperadores ERI<sup>5</sup>, su bajo costo, alto rendimiento y facilidad operativa, los hacen idóneos para este proyecto.

El sistema ERI-PX se basa en el intercambio de presión utilizando el principio de desplazamiento positivo en la presurización del agua de mar, esto se logra al tener contacto directo con la salmuera interponiéndose un pistón que se mueve a través de cámaras cilíndricas.



Un cilindro rotórico contiene 8 de estas cámaras y gira conforme al intercambio de presión.

- 1 Entrada de salmuera a alta presión
- 2 Salida de salmuera a baja presión
- 3 Entrada de agua de mar a baja presión
- 4 Salida de agua de mar a alta presión

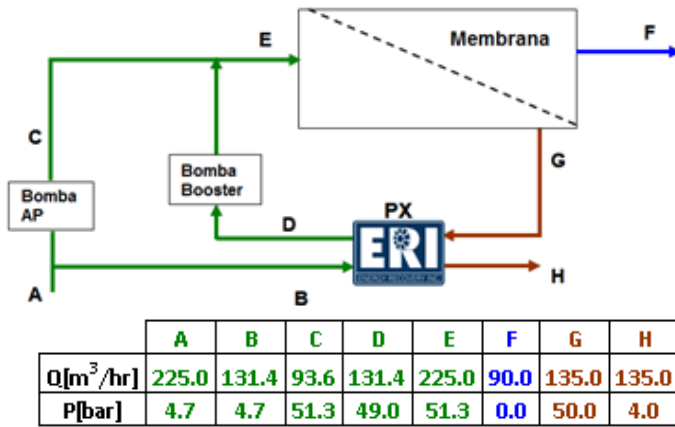
Figura 2. 10 Sistema Recuperador ERI ([www.es.energyrecovery.com](http://www.es.energyrecovery.com))

De esta manera se reduce el consumo eléctrico de la bomba de alta presión, pues es dimensionada para un caudal menor correspondiente al mismo del agua producto, ya que el resto pasa por el sistema de recuperación. Así mismo, el agua de mar que pasa por el recuperador, requiere ser ligeramente presurizada para igualarse con el flujo proveniente de la bomba de alta presión, para ello es utilizada una bomba Booster, la cual también tiene un consumo eléctrico.

La aplicación de tal sistema requiere una serie de modificaciones en los equipos de bombeo, todo en base a las características del recuperador de energía, analizado para un módulo de desalación con producción de 90[m<sup>3</sup>/hr] y recuperación  $\alpha=40\%$  [ANEXO 2.2].

El diseño requiere de 3 tubos recuperadores modelo PX-220, por los cuales atraviesa un caudal de un total de 135[m<sup>3</sup>/hr] (45[m<sup>3</sup>/hr] por cada cilindro), menos 3.7[m<sup>3</sup>/hr] que sirve como medio lubricante del rotor. Por lo tanto la bomba de alta presión impulsa 90[m<sup>3</sup>/hr] mas los 3.7[m<sup>3</sup>/hr] con el fin de mantener el equilibrio de flujos.

<sup>5</sup> Energy Recovery Incorporated



Los caudales y presiones en cada punto se muestran en la tabla.

Existen pérdidas en el recuperador de 1[bar] del lado de alta y 0.7[bar] en baja presión.

Como se busca que la presión de la salmuera sea de 4[bar] para su posterior tratamiento, es necesario que la presión de alimentación sea la misma mas los 0.7[bar] debido a pérdidas.

Figura 2. 11 Diagrama Desaladora-ERI (www.es.energyrecovery.com)

Con esta información se puede calcular la potencia de las bombas alta presión y booster.

Bomba de alta presión

$$Q = 93.7 \left[ \frac{m^3}{hr} \right] \quad \eta_{bomba} = 73\%$$

$$\Delta P = (51.26 - 4.7) = 46.56[bar] \quad Pot_{AP} = \frac{Q * \Delta P}{\eta_{bomba} * \eta_{motor}} = 178.31[kW] \quad \eta_{motor} = 93\%$$

Bomba Booster

$$Q = 131.4 \left[ \frac{m^3}{hr} \right] \quad \eta_{bomba} = 72\%$$

$$\Delta P = (51.26 - 49) = 2.26[bar] \quad Pot_{booster} = \frac{Q * \Delta P}{\eta_{bomba} * \eta_{motor}} = 12.45[kW] \quad \eta_{motor} = 92\%$$

Cada módulo de desalación demanda una potencia de **190.76[kW]**, por lo que la potencia total de los 8 módulos instalados, es de **1,526[kW]**.

Es necesario contar con bombas de agua de mar que alimenten a los 8 módulos de desalación, capaces de elevar la presión a 4.7[bar], por lo tanto la potencia necesaria, manejando un caudal de 1,800[m<sup>3</sup>/hr], será de:

Bomba de alimentación

$$Q = 1,800 \left[ \frac{m^3}{hr} \right] \quad \eta_{bomba} = 85\%$$

$$\Delta P = 4.7[bar] \quad Pot = \frac{Q * \Delta P}{\eta_{bomba}} = 276.47[kW]$$

La potencia total que finalmente requerirá la planta desaladora es de **1,802.47[kW]**, con una disminución en el consumo energético a **2.5[kWh/m<sup>3</sup>]**.

## 2.3.5.2 IMPULSIÓN DE AGUA PRODUCTO

El agua producto tiene como objetivo cubrir una necesidad hídrica muy importante, la producción ayudará a mantener un equilibrio en el acuífero el Vizcaíno, favoreciendo al sector agrícola de las regiones de Díaz Ordaz y el Vizcaíno.

El programa ROSA, en base a los datos de concentración de sales disueltas del agua de mar suministrados, arroja también el dato de concentración del agua producto que va de las **198.74[ppm]** con un pH de 5.92, esto lleva a considerar los posteriores tratamientos que dependan de la utilización y de la calidad requerida. Para el caso de la agricultura los rangos de concentración van de las 500 a los 2,000[pmm] en el agua de riego, así mismo la regulación del pH es de suma importancia tanto para el riego como en los sistemas de conducción, pudiendo causar problemas de corrosión en tuberías y tanques de almacenamiento.

La planta desaladora se propone sea instalada en las costas de Guerrero Negro, cercana a uno de los canales de llamada de la salina, por lo cual el agua producto deberá ser conducida 65[km] hacia el sitio de consumo.



Figura 2. 12 Diagrama del Proyecto (www.impulsa4.unam.mx)

La línea de conducción se analizará con base a la trayectoria de la carretera, teniendo en cuenta la elevación del terreno a lo largo de la misma, de esta manera se conoce la carga hidráulica a vencer por medio de bombeo.

La tabla muestra la elevación a lo largo de la trayectoria, las mediciones fueron medidas con equipo GPS<sup>6</sup> obteniendo el dato puntual cada 287.56[m] horizontales. Finalmente se sabe que la trayectoria tiene una longitud total de 64,989.44[m] con una elevación respecto al nivel del mar de 82.43[m].

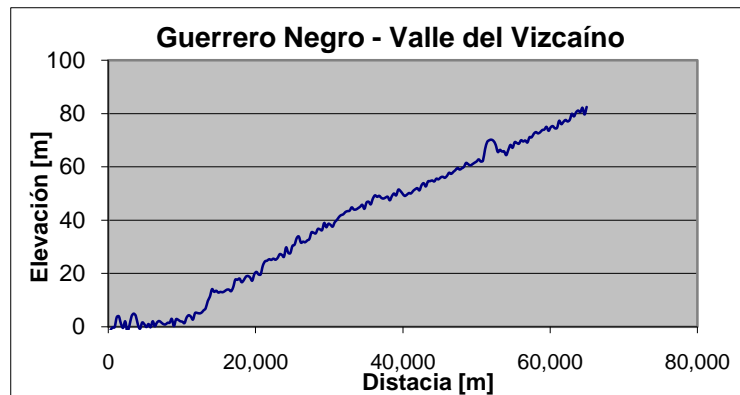


Figura 2.13 Elevación Guerrero Negro-Vizcaíno

<sup>6</sup> Sistema de Posicionamiento Global

Conociendo la carga estática  $h_e$  de 82.43[m], se procede al cálculo de la potencia de bombeo, sin dejar de lado las pérdidas por rozamiento en tuberías  $h_f$ .

$\rho$  - densidad del agua = 1,000[kg/m<sup>3</sup>]  
 $g$  - constante gravitacional = 9.82[m/s<sup>2</sup>]  
 $Q$  - caudal = 0.2[m<sup>3</sup>/s]  
 $\eta_s$  - eficiencia del sistema = 80%  
 $h_T$  - carga hidráulica total [m]

$$Pot = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot h_T}{\eta_s}$$

Carga hidráulica total:

$h_e$  - carga estática = 82.43[m]  
 $h_f$  - pérdidas por rozamiento [m]

$$h_T = h_e + h_f$$

Con base a la fórmula de Darcy-Weisbach, para el caso de pérdidas hidráulicas en tuberías:

$f$  - coeficiente de fricción  
 $L$  - longitud de tubería = 64,989[m]  
 $D$  - diámetro de tubería = [m]

$$h_f = \frac{8 \cdot f \cdot L \cdot Q^2}{g \cdot \pi^2 \cdot D^5}$$

Coefficiente de fricción  $f = f(Re, \epsilon)$ :

$\epsilon$  - rugosidad absoluta de la tubería [mm]  
 $Re$  - número de Reynolds

$$f = \frac{0.25}{\left[ \log \left\{ \left( \frac{1}{3.7065} \cdot \frac{\epsilon}{D} \right) - \frac{5.0452}{Re} \log \left( \frac{1}{2.8257} \cdot \left( \frac{\epsilon}{D} \right)^{1.1098} + \frac{5.8506}{Re^{0.8981}} \right) \right\} \right]^2}$$

$\nu$  - viscosidad cinemática del agua = 0.000001[m<sup>2</sup>/s]

$$Re = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D \cdot \nu}$$

Por lo tanto se realiza el cálculo para una tubería de hierro dúctil con revestimiento interno, el cual tiene una rugosidad absoluta  $\epsilon = 0.2$ [mm]. El diámetro propuesto es de 1[m], que al igual que el material de la tubería son suposiciones iniciales que pueden cambiar en base a estudios posteriores de factibilidad técnica y económica.

A partir de los datos anteriores, se llega a los siguientes resultados:

$D = 1$ [m]

$$Re = 254,647.91$$

$\epsilon = 0.2$ [mm]

$$f = 0.01662$$

$$\therefore h_f = 3.567[m]$$

Por lo cual la carga total hidráulica es de  $h_T = 85.997$ [m] y finalmente se obtiene la potencia requerida para bombear el agua producto de la desaladora en Guerrero Negro al sitio de consumo en el valle del Vizcaíno.

$$\therefore Pot = 211.12[kW]$$

### 2.3.6 DISPOSICIÓN FINAL DE LA SALMUERA

La planta desaladora proyectada con un 40% de recuperación, es capaz de producir un caudal de agua dulce de 720[m<sup>3</sup>/hr], pero por otro lado se obtiene otro caudal de 1,080[m<sup>3</sup>/hr] conocido como rechazo. Este último por su gran cantidad y alto concentrado de 60,500[ppm], representa un serio problema para su disposición final, esta salmuera al no tener alguna utilidad específica, lo más usual es que sea reintegrada al mar, pero esto a su vez puede acarrear daños ambientales al ecosistema marino.

Las instalaciones se encuentran a orillas de la laguna Ojo de Liebre, una de las zonas protegidas más importantes de México y el mundo, por lo que una descarga de salmuera ocasionaría un desequilibrio que inicialmente no sería permitido por las autoridades competentes.

La gran ventaja de la localización del proyecto, es que se encuentra cerca de las instalaciones de Exportadora de Sal, la planta productora de sal más grande del mundo que basa su producción por medio de la evaporación natural del agua de mar, recogiendo el sedimento salino y procesándolo posteriormente. El periodo que tarda el proceso de producción de sal, va de los 2 y 3 años desde el momento en el que son inundadas las lagunas de evaporación

De esta manera, la idea es enviar el caudal de alto concentrado generado por la desaladora por el mismo canal de llamada de donde se obtuvo el agua de alimentación, pues al alimentar las lagunas de evaporación de ESSA con agua de mayor concentración salina, se disminuyen los tiempos de cosecha de sal.

Aunque los volúmenes de agua que maneja ESSA en el proceso de producción de sal, son enormemente comparables con la cantidad de salmuera que se genera en la planta desaladora, el planteamiento anterior es una forma de deshacerse de este caudal generado y de alguna manera darle un uso, por demás pequeño pero que evita perturbaciones al entorno marino.

## CAPÍTULO 3

### 3 ENERGÍA EÓLICA

#### 3.1 GENERALIDADES

El viento se refiere al movimiento de masas de aire, producido principalmente por diferencias de presión atmosférica, debidas al desigual calentamiento de la superficie terrestre por parte del Sol, siendo la energía eólica, una transformación de la energía solar.

Son muchos los factores que influyen en la capacidad que tiene un lugar para aprovechar la energía eólica, tales condiciones son únicas de cada sitio, siendo la conjunción de algunas de estas lo que hace más factible llevar a cabo un proyecto eoloelectrico en un sitio que en otro.

En México las mediciones que se han realizado con el fin de caracterizar el recurso eólico son escasas, aunque ya se tienen bien definidas las zonas con mayor potencial de explotación del recurso. Algunas de estas mediciones han sido realizadas por el IIE<sup>1</sup>, la CFE<sup>2</sup> y el NREL<sup>3</sup>.

De los datos obtenidos las zonas con mayores recursos eólicos son algunas regiones de los estados de Veracruz, Tabasco, Tamaulipas, Oaxaca, Quintana Roo, Yucatán, Hidalgo, Zacatecas, Sonora Baja California y Baja California Sur, siendo algunas de estas regiones comparables con aquellos sitios con mejores recursos eólicos en el mundo, tal el caso de la zona de La Ventosa, Oaxaca donde se tiene mediciones de velocidad de viento de aproximadamente 7 a 10.5[m/s] a 40[m] de altura, esto ha llevado a que dicha región sea la más estudiada en el país y por ende la más aprovechada, ya que es ahí donde se tienen las mayores centrales eoloelectricas de México.

Dentro del Plan Nacional de Desarrollo 2007-2012 el cual define la sustentabilidad como punto de partida en el desarrollo futuro del país, la SENER<sup>4</sup> ha realizado el Programa Sectorial de Energía, el cual establece los lineamientos a seguir dentro del sector energético el cual promueve un uso eficiente de los energéticos, la aplicación de tecnologías en el aprovechamiento de fuentes renovables, reconversión de algunos sistemas de generación, entre otras medidas.

De lo anterior se espera que tanto el gobierno federal, estatales y el sector privado inviertan en investigación, en la instalación de equipo de medición que permita la caracterización de más puntos con potencial eólico, incrementado con esto la cartera energética del país con recursos renovables a expensas de los grandes complejos hidroeléctricos y geotérmicos. El sector eólico trae consigo la generación de empresas, creando empleos en varios niveles profesionales, ya que es una industria que demanda personal desde la planeación, construcción y operación de un parque eólico.

---

<sup>1</sup> Instituto de Investigaciones Eléctricas

<sup>2</sup> Comisión Federal de Electricidad

<sup>3</sup> National Renewable Energy Laboratory

<sup>4</sup> Secretaría de Energía

### 3.1.1 ANTECEDENTES DE LA ENERGÍA EÓLICA

En la antigüedad, antes de la aparición de la máquina de vapor, únicamente existían el agua y el viento como sistemas de fuerza motriz, exceptuando el trabajo realizado por animales, estas representaciones de energía en la naturaleza tenían lugar en zonas con mucha o poca factibilidad de ser explotadas, razón por la cual la mayoría de las civilizaciones se asentaban a orillas de ríos, lagos y sobre todo cercanas al mar, que además de proveerles de alimento, el agua funcionaba de medio por donde transportarse y comunicarse. El viento a su vez también tuvo un gran auge en la navegación por mar, con en uso de la vela, atribuida a los Egipcios en el IV y V milenio antes de J.C.

Dicho intercambio de tecnología fue muy notorio en la introducción de los molinos de viento de eje vertical conocidos como *Panemonas*, los cuales se cree fueron introducidos por los Persas y extendidos hasta China, pasando por civilizaciones del medio Oriente, pocos siglos antes de J.C.

Posteriormente fueron los griegos, italianos y franceses los que comenzaron con la utilización de molinos de eje horizontal en Europa, utilizados en la molienda y secado de granos. No se sabe con certeza como es que se extendió su uso por toda Europa, pero muchos autores lo atribuyen a las cruzadas, donde mucha tecnología de oriente fue llevada a occidente, aunque en Europa occidental tuvieron mayor auge los molinos de eje horizontal, por lo que se cree que desarrollaron su propia tecnología.

Para el siglo XIV Holanda llega a ser el país que mayor evolución tiene en la construcción de molinos, debido a mejoras en el diseño como la capacidad de orientar el eje en la dirección del viento y otras más, llegando al punto de ser utilizadas en el drenado de pantanos, aserramiento de maderas, extracción de aceites a semillas y elaboración de papel.

Dinamarca otro de los países con mayor avance en tecnología eólica hasta la fecha, tuvo a finales del siglo XIX una cantidad de 3,000 molinos utilizados en fines industriales y más de 30,000 en casas y granjas.

A partir de la revolución industrial y la aparición de la máquina de vapor a mediados del siglo XVIII, llevaron más a la mecanización de los procesos industriales y la mejora en el transporte, esto gracias a la ya citada máquina de vapor y posteriormente a la invención de los motores eléctricos y de combustión interna. Este hecho produjo un decaimiento en la utilización de molinos de viento como fuerza de trabajo, quedando relegados a fines.

Sin embargo a pesar de la confiabilidad y lo económico que resultó en aquellos tiempos el uso de máquinas térmicas, aún se continuó con el uso y la investigación en las ya llamadas turbinas eólicas, este hecho tuvo relevancia por los avances en la teoría aerodinámica, desarrollada en los primeros años del siglo XX, que permitió a los científicos conocer la interacción y comportamiento del viento.

La teoría de la aerodinámica surgió dentro de la aviación, teniendo aplicación en la industria de la energía eólica en el perfeccionamiento de las palas, llevando de la aviación a la industria eólica, tecnología que originó las bases en el diseño de los nuevos aerogeneradores.



En la década de 1920 se empieza a aplicar en las palas, perfiles aerodinámicos utilizados en alas de avión y hélices de helicópteros, logrando mejores rendimientos. Tal es el caso del holandés A.J. Dekker que construye el primer rotor provisto de palas con secciones aerodinámicas, capaz de alcanzar velocidades en punta de pala de hasta cinco veces la velocidad del viento incidente.

Pero aún con los nuevos desarrollos alcanzados quedaban problemas por resolver como el caso del almacenamiento de energía y la intermitencia del recurso eólico, lo que hizo inviable la proliferación de aerogeneradores, hasta finales de la 1<sup>era</sup> Guerra Mundial. Esto llevó a una fuerte dependencia de los combustibles fósiles, sobre todo del petróleo que fue el principal combustible en el periodo entre guerras.

Al final de la 1<sup>era</sup> guerra y venida la escasez por la crisis de 1929, países occidentales invirtieron en desarrollar el uso de energías alternativas, entre ellas la eólica, la cual emergió en dos distintas vertientes, en la construcción de pequeñas unidades aisladas de la red y proyectos de parques eólicos a gran escala para interconexión a la misma.

El interés de los nuevos desarrolladores se centró en aspectos como la evaluación del recurso disponible, tratamiento de datos meteorológicos, elaboración de mapas eólicos y selección de emplazamientos. Varios aerogeneradores fueron instalados en Europa y Estados Unidos, bajo este nuevo esquema, con un mayor ímpetu al finalizar la Segunda Guerra Mundial.

Posteriormente surge un periodo de altas y bajas para la industria eólica, de la mano de las variaciones en los precios del petróleo y las investigaciones realizadas respecto a las emisiones de gases de efecto invernadero, atribuidas a los combustibles fósiles.

Actualmente la energía eólica ya tiene un lugar importante en el despacho de energía de muchos países europeos como Alemania, Dinamarca y Holanda por mencionar a los más importantes, mientras que en América, Estados Unidos lidera esta cuenta. Latinoamérica cuenta con regiones de elevado potencial eólico, por lo que países desarrollados han venido realizando inversiones en la región, la cual luce muy prometedora en un largo plazo.

## 3.2 ASPECTOS TÉCNICOS DE LA ENERGÍA EÓLICA

### 3.2.1 ORIGEN DEL VIENTO

La Tierra realiza dos importantes movimientos en el espacio, que rigen las condiciones climatológicas en su superficie, estos son:

- Traslación.- Movimiento que realiza alrededor del sol, siguiendo una trayectoria elíptica con duración de 365 días, 5 horas, 48 minutos, 45.975 segundos, conocido como año trópico.
- Rotación.- El que mantiene sobre su propio eje, durando 23 horas, 56 minutos y 4 segundos.

La traslación origina las estaciones durante el año y la rotación hace posible la sucesión del día y la noche, pero aún más importante ambos contribuyen en la configuración del clima, esto aunado a la inclinación del eje terrestre  $23^{\circ} 27'$  con respecto a la eclíptica.

Los rayos de sol inciden de manera desigual en la superficie terrestre, tanto estacional como geoméricamente debido a la esfericidad del planeta, esto hace que la incidencia de luz y calor también varíe, dependiendo de igual forma con la orografía del lugar, por lo que las temperaturas en distintas zonas son muy diferentes al mismo tiempo.

El término “Viento”, se refiere al movimiento de masas de aire ocasionado por gradientes de presión en la atmósfera, mucho de esto tiene que ver con la desigualdad en temperatura. El aire varía su densidad con respecto a la temperatura como todo fluido, un aire caliente tiende a ser más ligero que uno frío, este aire caliente asciende mientras que el frío ocupa el lugar desplazado creando un flujo, siendo la componente horizontal la que es aprovechada por la industria eólica y que seguiremos llamando “viento”, mientras que para los flujos verticales, denominaremos “corrientes convectivas”.

A nivel global existen corrientes de aire denominadas “vientos geostróficos”, estos se desarrollan en la tropósfera que se extiende desde 1[km] hasta los 11[km] de altitud.

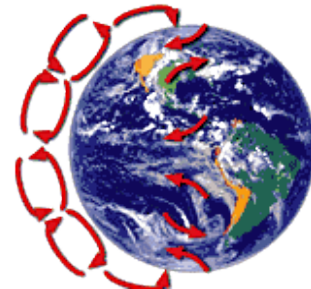


Figura 3. 1 Vientos geostróficos ([www.windpower.org](http://www.windpower.org))

El viento asciende en el ecuador (lat.  $0^{\circ}$ ) y se desplaza hacia el norte y sur en las capas más altas, a los  $30^{\circ}$  de latitud en ambos hemisferios, la fuerza de Coriolis evita que el aire vaya más allá y lo desvía haciendo que vuelva a descender debido a una zona de alta presión. Al ascender el viento en el ecuador, se crea una zona de baja presión en las capas inferiores atrayendo los vientos del norte (hemisferio Norte), finalmente el aire frío de los polos origina una alta presión que envía los vientos del norte hacia el sur.

La fuerza de Coriolis y la curvatura de la Tierra dan las siguientes direcciones de los vientos geostróficos:

Hemisferio	NORTE			SUR		
Latitud	0° - 30°	30° - 60°	60° - 90°	0° - 30°	30° - 60°	60° - 90°
Dirección	NE	SO	NE	SE	NO	SE

Tabla 3. 1 Dirección vientos geostróficos

Los vientos geostróficos tienen lugar a grandes alturas y aunque influyen de manera importante en el potencial eólico de una región, son los vientos locales los que tienen mayor relevancia.

Los vientos locales se desarrollan dentro de los primeros 1,000[m] de altura y son influenciados por las condiciones del terreno y del clima en el sitio, siendo dos fenómenos los que tienen mayor representación, los vientos de montaña y las brisas marinas.

#### 3.2.1.1 VIENTOS DE MONTAÑA

Sobre la cima de una montaña inciden en mayor intensidad los rayos solares, por lo que el aire circundante se calienta y asciende a capas más altas originando una zona de baja presión, que es ocupado por aire frío procedente del valle de la montaña. Esto genera una corriente de aire sobre la ladera, partiendo desde la base hacia la cima durante la exposición del sol.

Caso contrario ocurre en la noche cuando la radiación solar no tiene efecto sobre la superficie, lo que sucede es que ahora la cima, al tener mayor altura, irradia calor hacia el espacio exterior, enfriando el aire alrededor. El aire del valle tiene mayor temperatura, ya que se pierde calor en la superficie de manera más lenta en el valle que en la cima, por lo que ahora el sentido del viento es de la cima hacia el valle.

#### 3.2.1.2 BRISAS MARINAS

En el caso de las brisas marinas no únicamente se refiere también a zonas con cuerpos hídricos superficiales, el mar tiende a ser el más representativo debido a la gran cantidad de agua que alberga. Los mares y océanos son grandes colectores de energía, debido a la mayor capacidad térmica que tiene el agua de retener calor, comparada con la de la tierra.

En el día el terreno se calienta más rápido y el flujo de viento viene del mar hacia la tierra, pero durante la noche el mar disipa más lentamente la energía adquirida durante el día, mientras que la tierra se enfría más rápidamente, esto provoca que los vientos ahora vayan de la tierra al mar.

Para el caso de Guerrero Negro se aprovechara esta ventaja, ya que la zona propuesta se encuentra a orillas del mar, aunque como se verá más adelante, los vientos en la región tienen una procedencia en la que este tipo de fenómeno no contribuye en la captación del recurso.

3.2.2 ENERGÍA DEL VIENTO

El aire tiene una densidad de aproximadamente 1.225[kg/m<sup>3</sup>] a presión estándar a nivel del mar a 15°C, esta tiende a variar con la altura y la temperatura ambiente. Al originarse el movimiento del aire ó mejor dicho el viento, sabemos que esta masa de aire contiene energía cinética, aquello que hace que se traslade de un lado a otro.

La energía cinética se determina con la siguiente fórmula:

$$E_c = \frac{1}{2} m v^2 \quad \dots (2.1)$$

$E_c$  – Energía cinética del viento [J]  
 $m$  – masa de aire [kg]  
 $v$  – velocidad del viento [m/s]

Para el caso de un aerogenerador, en este caso de eje horizontal, el área de barrido de las palas será el área de captación de la energía, de lo cual podemos inferir la siguiente fórmula para el cálculo de la potencia que contiene el viento:

$$m = \rho \cdot \Psi \quad \dots (2.2) \quad \text{y} \quad \Psi = A \cdot L \quad \dots (2.3)$$

Y definiendo la velocidad como:

$$v = L/t \quad \dots (2.4)$$

Si suponemos que un cilindro del área de barrido de las palas  $A$  y una longitud  $L$ , pasa a través del aerogenerador en un tiempo  $t$ , entonces:

$$E_c = \frac{1}{2} \rho \cdot \Psi \cdot \left(\frac{L}{t}\right)^2$$

$$E_c = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot L \cdot \left(\frac{L}{t}\right)^2$$

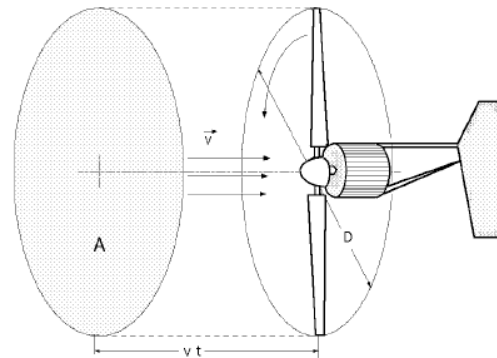


Figura 3. 2 Aprovechamiento energético del viento

Para finalmente obtener la potencia que puede desarrollar el viento, se dividen ambos lados por el tiempo, llegando a la fórmula utilizada en la industria eólica:

$$\frac{E_c}{t} = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot \frac{L}{t} \cdot \left(\frac{L}{t}\right)^2$$

$$Pot = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot v^3 \quad \dots (2.5)$$

Finalmente vemos que la potencia que puede ser aprovechada del viento está en función de la densidad, la cual a su vez depende de la temperatura y presión ambiente; del área de captación o barrido de las palas y en gran magnitud, de la velocidad del viento.

La fórmula (2.5) demuestra que la potencia es proporcional al cubo de la velocidad, por lo que variaciones en la velocidad representa grandes efectos en la potencia que se pueda extraer.

A pesar de lo anterior, de las grandes cantidades de energía que se pueden extraer del viento, hay limitantes físicas que no permiten aprovechar el 100% de esta energía por una máquina eólica. Esto fue establecido por Albert Betz en 1919, donde demuestra que únicamente el 59% es útil en la generación de energía eléctrica.

### 3.2.2.1 LEY DE BETZ

El viento contiene una energía cinética, que como ya vimos depende fuertemente de su velocidad, esta energía no puede ser extraída en un 100%, debido a que un aerogenerador sirve a su vez como barrera que ralentiza el viento hasta 1/3 de la velocidad de entrada.

Si se intentara extraer toda la energía contenida en el viento, quiere decir que la velocidad al salir del aerogenerador sería nula o simplemente el aire quedaría estancado, por lo que no se obtendría energía al no existir un flujo de aire.



Figura 3. 3 Efecto estela ([www.windpower.org](http://www.windpower.org))

En 1919, Albert Betz<sup>5</sup> enunció su ley en la que demuestra este hecho con fundamento en lo anterior y llegando al siguiente resultado:

Se infiere que la velocidad que atraviesa el área de barrido es el promedio de ambas velocidades, tanto de entrada como de salida, esto es:

$$v_{promedio} = \frac{v_1 + v_2}{2} \quad \dots (2.6)$$

El gasto de aire a través del aerogenerador debe ser el mismo, por principio de conservación de la materia;

$$Q_a = \rho_1 \cdot A_1 \cdot v_1 = \rho_2 \cdot A_2 \cdot v_2 \quad \dots (2.7)$$

<sup>5</sup> "Wind-Energie" Albert Betz 1919

La densidad del aire no cambia, el área  $A_2$  es mayor que el área  $A_1$  que se debe a la caída de velocidad, que ocurre al atravesar el aire el aerogenerador. Las áreas  $A_1$  y  $A_2$  corresponden a los cilindros de aire que se producen a la entrada y a la salida.

El viento que cruza el aerogenerador de área  $A$ , lleva una velocidad de  $v_{promedio}$ , por lo tanto la ecuación (2.7) con (2.6) queda:

$$Q_a = \rho \cdot A \cdot \left(\frac{v_1+v_2}{2}\right) \quad \dots (2.8)$$

El cambio de energía cinética  $E_c$  entre ambos puntos representa la cantidad de energía que es aprovechada por el aerogenerador:

$$E_c = E_{c1} - E_{c2} \quad \dots (2.9)$$

Que manejado por unidad de tiempo se obtiene la diferencia de potencia o potencia que retiene el aerogenerador:

$$P = P_1 - P_2 = \frac{1}{2} \cdot Q_a \cdot (v_1^2 - v_2^2)$$

$$P = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot A \cdot (v_1^2 - v_2^2) \cdot (v_1 + v_2) \quad \dots (2.10)$$

Si ahora comparamos la ecuación (2.10) con la potencia  $P_0$  en donde no ocurra un bloqueo del flujo de aire por un aerogenerador, se tendría:

$$P_0 = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot v^3$$

Donde para este caso:  $v = v_1 = v_2$

La relación quedaría de la siguiente manera:

$$\frac{P}{P_0} = \frac{1}{2} \cdot \left[1 - \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^2\right] \cdot \left[1 + \left(\frac{v_2}{v_1}\right)\right] \quad \dots (2.11)$$

Si graficamos esta ecuación con  $\frac{P}{P_0}$  en el eje de las ordenadas y  $\frac{v_2}{v_1}$  en las abscisas, llegamos al gráfico siguiente:

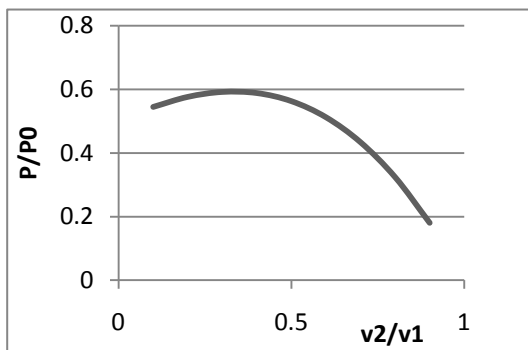


Figura 3. 4 Análisis ley de Betz

El máximo de la función se alcanza al ser  $\frac{v_2}{v_1} = \frac{1}{3}$  siendo el valor de la ordenada  $\frac{P}{P_0} = \frac{16}{27} = 0.5926$

Por lo tanto queda demostrado que únicamente el 59% de la energía del viento, puede ser aprovechada por una máquina eólica.

$$P = 0.59 \cdot P_0$$

### 3.3 PROPUESTA DE UN PARQUE EÓLICO EN GUERRERO NEGRO, BCS

La elección de un sitio, es la parte más importante en un proyecto eólico, depende de la factibilidad técnica, político-social, ambiental, y financiera, entre otras. Cada uno de estos factores tiene que ser resuelto de manera optima con el fin de obtener buenos resultados.

México cuenta con una limitada cobertura de estaciones anemométricas para la evaluación del potencial eólico. El Servicio Meteorológico Nacional (SMN) tiene una red de estaciones meteorológicas distribuida a lo largo del país, pero estas no son lo más óptimas para la caracterización del recurso.

Dependencias gubernamentales como el Instituto de Investigaciones Eléctricas y Comisión Federal de Electricidad, e internacionales como el National Renewable Energy Laboratories el cual ha intervenido en algunos proyectos en México, han estimado conjuntamente el potencial eólico del territorio nacional.

Con lo anterior se ha llegado a que el país cuenta con un potencial viable para instalar de entre los 3,000 y 5,000[MW], esto diseminado en varias regiones, como se ve en la imagen la cual fue elaborada en el año de 1999.



Figura 3. 5 Potencial eólico de México (IIE)

Con los importantes avances en medición y predicción del viento, se ha llegado a estimar un potencial mayor, siendo la parte sur del Istmo de Tehuantepec en el estado de Oaxaca, la región que alberga el mayor recurso que va de los 6,000[MW] hasta los 15,000[MW] potencialmente instalables.

La costa pacífica de la península de Baja California es otra de las regiones más estudiadas, ya que forma una barrera que corre perpendicular a los vientos occidentales. Lugares como la Rumorosa, las sierras de Juárez y San Pedro Mártir en Baja California y en Baja California Sur, el Cardón, Punta Eugenia, Laguna de San Ignacio, son puntos donde se ha instalado equipo de medición encontrándolos viables.

A todo esto, se encuentra lo ya hecho en Guerrero Negro, BCS, donde se tiene ya instalada una central eólica propiedad de CFE [4], la cual consta de un aerogenerador Gamesa V-44 de 600[kW]. Anteriormente en la misma región, se instaló una planta piloto con un aerogenerador Mitsubishi de 250[kW] por parte de la empresa Exportadora de Sal, actualmente fuera de servicio.

Como se puntualizó, México tiene sitios factibles para la implementación de parques eólicos, pero para alcanzar buenos resultados es necesario, en materia de aprovechamiento de energía eólica, seguir una metodología que cubra todos los aspectos involucrados. El Instituto de Investigaciones Eléctricas ha elaborado una guía, dentro del PLAN DE ACCIÓN PARA ELIMINAR BARRERAS PARA EL DESARROLLO DE LA GENERACIÓN EOLOELÉCTRICA EN MÉXICO [14], la cual tomaremos como base para llevar a cabo el análisis de la central eólica propuesta para Guerrero Negro.

### 3.3.1 FASE I. PRESELECCIÓN DEL SITIO

El primer paso para desarrollar un proyecto eólico es la selección de un sitio, donde los primordiales aspectos a considerar son de índole técnico-económicos, legales y ambientales.

Posteriormente, una serie de permisos deben ser concedidos por entidades federales y locales, que tomen en cuenta los aspectos ya mencionados. Se debe tener un panorama amplio de las repercusiones que puedan existir, durante la construcción y operación del parque eólico, razón por la cual es fundamental, además de cumplir con las normativas establecidas, tener el punto de vista que cada institución pueda aportar al proyecto.

Las dependencias representantes de gobierno, que avalarían la elaboración del proyecto, son:

- Comisión Reguladora de Energía (CRE)
- Comisión Federal de Electricidad (CFE)
- Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH)
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT)
- Instituto Nacional de Ecología (INE)

Algunas instituciones locales que intervienen dentro del mismo

- Gobierno Municipal de Mulegé, BCS.
- Gobierno local de Guerrero Negro
- Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR)
- Reserva de la Biósfera del Vizcaíno (por parte del INE)
- Propietarios de las tierras en Guerrero Negro

Finalmente para tener la mejor opción del sitio previsto para instalar la central, se tienen que recolectar datos de las características físicas del lugar, buscando siempre el que mayor potencial eólico tenga a su disposición, sin dejar de lado los requerimientos administrativos necesarios con instituciones gubernamentales. Cumplido lo anterior se puede decir que el sitio es adecuado para el proyecto, por lo que se procede a hacer un estudio de pre-factibilidad, donde intervienen puntos más técnicos dentro de la industria eólica.



3.3.1.1 ASPECTOS TÉCNICO-ECONÓMICOS

1. El sitio debe tener un buen recurso de viento, representado por una alta velocidad media anual, que de primera mano se puede evaluar físicamente en sitio con lo que se percibe.

Una herramienta útil, es la búsqueda de mapas eólicos que dan un panorama a gran escala del potencial en la región. Para el caso de Guerrero Negro, el NREL ha elaborado el mapa que abarca gran parte del municipio de Mulegé [ANEXO 3.1].

Como veremos más adelante, la única forma de cuantificar el viento en un sitio, es la medición mediante instrumentos anemométricos, siendo la parte más importante del proyecto.

2. El parque eólico debe tener cercanía con la red eléctrica local, en el caso de que ocurra interconexión para el sostenimiento del despacho de energía y la evacuación de la misma a la red.

La central eoloeléctrica de CFE, tiene conexión a una línea de 34.5[kV] que a su vez conecta con la central diesel de 16[MW], siendo esta la principal productora de energía eléctrica para Guerrero Negro.

La propuesta del parque eólico en esta tesis, significa la interconexión a la red local en un voltaje de 34.5[kV]. La energía eléctrica generada despachará a la planta desaladora proyectada y sistema de bombeo de agua producto a la región del Vizcaíno.

3. El objetivo principal es la venta de la energía generada, las leyes mexicanas en cuanto a servicio público dictan que Comisión Federal de Electricidad y es la única dependencia encargada de la generación, transmisión y distribución en el sector eléctrico.

Existen varias modalidades de negociar la energía siendo Productor Independiente, modelos de contratación que abarcan, la interconexión a la red para el aprovechamiento de la energía en otra región, venta de excedentes de energía generada tanto por energías renovables como convencionales, etc.

El AUTOABASTECIMIENTO será la vía por la cual se llevará a cabo este proyecto, ya que toda la energía que se pueda extraer del viento será utilizada en la planta desaladora.

4. Toda obra civil requiere de accesos viales y rutas logísticamente establecidas para el transporte de equipos, herramientas, materiales, personal, etc. En el caso de una central eólica se deben tener grandes vías de comunicación carreteras como portuarias, para el traslado de los equipos de grandes dimensiones, grúas, torres, palas, etc.

México actualmente no cuenta con industria eólica, algunas empresas nacionales se dedican indirectamente en este sector, razón por la cual la mayoría de los componentes provienen del extranjero, que en un principio llegan por mar y posteriormente son transportados por carretera.

La carretera federal #1, conocida como Carretera Transpeninsular, recorre de punta a punta la península, partiendo desde Tijuana en el estado de Baja California hasta los Cabos en Baja California Sur, esta vía es la más importante para la comunicación de Guerrero Negro con ciudades como Ensenada y por otro lado Santa Rosalía.

5. El estado de Baja California Sur es la entidad federativa con menor población por kilómetro cuadrado en promedio, por lo que cuenta con grandes extensiones de tierras sin uso particular, considerando que el estado cuenta con importantes reservas ecológicas, las cuales restringen la construcción de obras que impacten al desarrollo natural de la zona.

En promedio se pueden instalar un total de 12[MW] por cada [km<sup>2</sup>] de terreno [12] esto depende de las dimensiones del aerogenerador considerado, pues para instalar un parque con varias unidades es necesaria una configuración que tome en cuenta la interacción del viento con los aerogeneradores, ya que a pesar de que cuentan con sistemas de orientación individual, es factible orientar el diseño del parque respecto a la dirección de viento predominante.

Una separación muy pequeña entre filas de aerogeneradores, producen un efecto de estela sobre las máquinas que se encuentran en la parte posterior, originando una turbulencia que reduce la vida útil de las estructuras; por otra parte, una amplia separación implica una mayor inversión en infraestructura, como caminos, cableado eléctrico y comunicación, y el arrendamiento del terreno.

Una configuración recomendable [15], es adoptar una separación entre aerogeneradores de 10 diámetros en dirección del viento predominante y de 5 diámetros en dirección perpendicular a este. Estos diámetros se refieren al área de barrido por las palas y dichas medidas pueden variar respecto al tipo de máquina.

6. El territorio planeado para la instalación de los aerogeneradores en Guerrero Negro, es una barra costera, dentro de la cual se encuentran ya instalados los aerogeneradores de ESSA y CFE. Esta zona representa un área despejada de población y vegetación, y un terreno plano suave sin perturbaciones orográficas, lo que lo hace idóneo para la instalación de aerogeneradores.

Parte de esta región comprende ya el territorio de la reserva del Vizcaíno, por lo que se deben de tener consideraciones medioambientales.

7. Un sitio a nivel del mar tiene un mayor potencial comparado con otro donde la altitud es mayor. Este hecho es debido a la diferencia de presiones atmosféricas, que provoca una disminución de la densidad del aire conforme se va aumentando la altura.

Guerrero Negro y en especial el sitio específico de instalación, se encuentran prácticamente al nivel del mar, teniéndose altos valores de densidad que también se atribuye a la humedad que porta el aire proveniente del mar.

Un viento con mayor masa es un viento con mayor energía cinética, pudiéndose aprovechar si se toma en cuenta estos factores respecto a la densidad.

## 3.3.1.2 ASPECTOS LEGALES

8. Otro de los primeros pasos en la elección del sitio tiene que ver con la parte jurídica y social, ambas deben marcar sus pautas para una buena convivencia durante los trabajos de construcción y operación del parque.

Los terrenos por explotar deberán estar bien definidos y pactados con gobierno y propietarios, tomando en cuenta el arrendamiento del terreno por los promotores del parque, además se tiene que establecer el uso de suelo que se le vaya a dar al sitio con el fin de no repercutir en el desarrollo del proyecto y en las actividades de los terratenientes.

De manera general, los permisos que se deben obtener antes de comenzar con los trabajos son:

Permiso	Entidad otorgante
Permiso de Uso de Suelo	Gobierno Municipal
Permiso de Construcción	Gobierno Municipal
Permiso de Construcción y Generación	CRE
Convenio de Interconexión	CFE
Permiso Ambiental	SEMARNAT

Tabla 3. 2 Permisos de construcción Parque Eólico

9. Se deben establecer los precios y formas de pago de la venta ó renta de los terrenos que serán utilizados por el parque (camino, subestación, aerogeneradores, etc.), en muchas ocasiones los parques eólicos abarcan las tierras de varios dueños, razón por la cual es necesario conocer las dimensiones de la instalación.

Con frecuencia se establecen esquemas de pago, en la que un porcentaje de las ganancias por energía generada es pagada a los propietarios de las tierras, este porcentaje puede ser entre el 2 y 3%, según los acuerdos que se tomen por ambas partes.

Se desconoce la situación que se tiene en el territorio especificado, pero las máquinas eólicas se instalarán cercanas al aerogenerador de CFE.

## 3.3.1.3 ASPECTOS MEDIOAMBIENTALES

11. La parte ambiental es la más crítica en la preselección de un sitio, debido a que se pueden obtener los permisos legales y sociales, pero en los ambientales se tiene que tener mucho cuidado, ya que se trata de impactar en menor medida el ecosistema regional.

Una porción de la región de Guerrero Negro forma parte de la Reserva de la Biosfera del Vizcaíno, la cual tiene una superficie de 2,546,790[ha], teniendo 5[km] de costa hacia el océano Pacífico e igualmente con el Golfo de California. En el Pacífico se encuentra la zona de reproducción de la ballena gris en las lagunas Ojo de Liebre y San Ignacio, estas fueron decretadas como zonas protegidas por la UNESCO en 1993.

Se tienen que monitorear las rutas migratorias de las aves, que aunque representa un riesgo poco probable, la normativa lo señala. El borrego cimarrón y el berrendo otras de las especies nativas más representativas, que habitan específicamente en las cordilleras centrales de Mulegé, podrían representar un problema, aunque se descarta por la lejanía del sitio con la zona montañosa.

Así mismo el sitio deberá quedar alejado de asentamientos humanos, ya que preocupa que haya perturbaciones a la población por el ruido que producen los aerogeneradores y el impacto visual que pudiesen dar al paisaje de la región.

11. Descubrimientos arqueológicos en los sitios, son también de tomarse en cuenta ya que al descubrir vestigios podrían las autoridades expropiar el terreno y echar abajo los proyectos.

En varias zonas dentro de reserva del Vizcaíno, se encuentran vestigios arqueológicos de gran importancia como lo son: pinturas rupestres, petroglifos, etc. La Sierra de San Francisco localizada en la parte este de la reserva, destaca por tener las manifestaciones más importantes de arte rupestre monumental, que se calcula datan de hace 10,000 años.

Además se tienen obras arquitectónicas de la época colonial, como la misión de San Ignacio de Loyola fundada en 1728, y otros 20 monumentos que el INAH<sup>6</sup> tiene catalogados. El Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH), sería la entidad que autorizaría la construcción dentro del lugar seleccionado, si no hubiese problema respecto a este punto.

### 3.3.2 FASE II. ESTUDIO DE PRE-FACTIBILIDAD

El siguiente paso lo constituye obtener información más concreta acerca del viento de la zona, con el fin de poder dimensionar el parque y predecir de manera precisa el costo-beneficio del proyecto.

Para tal efecto se deben obtener datos de las variables climatológicas que caracterizan el potencial eólico, con datos como velocidades y direcciones del viento, temperatura ambiente, presión atmosférica, humedad, entre otras.

Lo ideal es recopilar información de una estación anemométrica dispuesta en el sitio, que para fines de esta tesis y debido a que no se cuenta con una propia, se hará uso de información provista por otras instituciones cercanas a la región.

---

<sup>6</sup> Instituto Nacional de Antropología e Historia

## 3.3.2.1 MEDICIÓN Y ANÁLISIS DEL VIENTO

La medición y análisis del viento es primordial, para ello torres tubulares o de celosía son elevadas a grandes alturas equipadas con veletas, anemómetros y demás equipo climatológico, en donde toda la información recopilada es almacenada en un datalogger, el cual se encarga del procesamiento de las variables ingresadas.

El mapa eólico para Guerrero Negro marca que es un buen sitio para explotar con vientos medios entre 6 y 7[m/s], en donde proyectos piloto han sido ya instalados como el caso de un aerogenerador Mitsubishi de 250[kW] por parte de Exportadora de Sal, que actualmente se encuentra fuera de servicio, y la central eólica de CFE teniendo instalado y en operación un aerogenerador Gamesa de 600[kW].

MEDICIÓN

El montaje de una torre anemométrica debe considerar las condiciones del sitio, la orografía y los obstáculos que físicamente puedan interferir en la medición del recurso.

Para este proyecto se cuenta con información procedente de la central de CFE por parte de la Subgerencia de Energías Renovables, únicamente fue provista una tabla con velocidades medias mensuales a través de un año de medición, estos datos a 48[m] de altura fueron obtenidas del aerogenerador ahí instalado y servirán para hacer el análisis de pre-factibilidad en este estudio.

VELOCIDAD PROMEDIO DEL VIENTO A 48m EN LA CENTRAL EÓLICA, GUERRERO NEGRO, BCS.																										
Mes/Hora	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	Promedio	
Enero	4.6	4.4	3.9	3.8	3.6	3.4	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	3.6	4.1	4.7	5.5	6.0	6.5	6.7	6.6	6.3	6.1	5.7	5.4	4.9	4.6
Febrero	5.1	5.2	5.2	5.0	4.9	4.8	4.7	4.5	4.1	3.8	4.5	5.0	5.7	6.2	6.6	7.1	7.4	7.4	7.0	6.8	6.3	5.9	5.8	5.4	5.6	5.6
Marzo	6.0	5.8	5.4	5.0	4.6	4.3	3.9	3.9	4.3	4.3	4.6	5.1	5.8	6.1	6.8	7.4	7.6	7.8	7.7	7.6	7.7	7.4	6.8	6.3	5.9	5.9
Abril	6.6	6.3	6.2	5.9	5.5	5.6	5.4	5.5	5.5	5.6	5.9	6.4	7.3	8.0	8.7	9.3	9.5	9.6	9.2	8.5	8.3	7.9	7.6	7.0	7.1	7.1
Mayo	6.4	6.1	5.8	5.6	5.4	5.2	5.0	4.8	4.6	4.9	5.4	6.1	7.0	7.6	8.2	8.7	9.0	9.3	9.2	8.8	8.3	7.9	7.3	6.8	6.8	6.8
Junio	6.0	5.6	5.4	5.2	5.1	5.0	4.8	4.8	4.8	4.8	5.1	5.8	6.5	7.3	8.0	8.5	9.0	9.1	9.0	8.7	8.3	7.6	7.0	6.5	6.6	6.6
Julio	5.8	5.7	5.6	5.4	5.3	5.2	5.0	5.1	5.1	5.2	5.6	6.2	6.8	7.5	8.0	8.5	9.0	9.1	8.9	8.6	7.9	7.3	6.7	6.2	6.7	6.7
Agosto	5.1	4.8	4.9	5.0	5.0	4.9	4.7	4.5	4.3	4.4	4.9	5.7	6.2	6.9	7.7	8.0	8.2	8.4	8.3	7.9	7.4	6.7	5.9	5.5	6.1	6.1
Septiembre	5.4	5.4	5.3	5.5	5.3	5.1	4.9	4.9	5.0	5.1	5.4	5.9	6.5	7.2	7.6	8.0	8.3	8.5	8.4	7.9	7.3	6.6	5.8	5.6	6.3	6.3
Octubre	3.5	3.4	3.6	3.5	3.6	3.3	3.1	3.0	2.8	2.8	3.1	3.9	4.9	5.7	6.1	6.5	6.7	7.0	6.9	6.3	5.7	5.4	4.9	4.0	4.6	4.6
Noviembre	4.5	4.0	3.6	3.3	3.1	2.8	2.8	2.7	2.3	2.3	2.9	3.4	4.3	4.9	5.5	6.0	6.2	6.3	6.2	6.3	6.0	5.7	5.2	4.9	4.4	4.4
Diciembre	3.9	3.6	3.2	2.9	3.0	2.9	2.8	2.8	2.8	2.5	2.1	2.8	3.6	4.1	4.7	5.6	6.1	6.2	6.0	5.6	5.2	4.6	4.4	4.3	4.0	4.0
Promedio	4.6	4.4	3.9	3.8	3.6	3.4	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	3.6	4.1	4.7	5.5	6.0	6.5	6.7	6.6	6.3	6.1	5.7	5.4	4.9	5.7	5.7

Tabla 3. 3 Velocidades de viento Central Eólica Guerrero Negro (CFE)

Los datos anteriores limitan el análisis de viento debido a su carácter de promedios mensuales, un estudio completo requiere la adquisición de datos cada 10 minutos, tanto de velocidad y dirección de viento como otras variables meteorológicas, utilizadas en el diseño del parque.

Por otra parte se obtuvieron datos de la estación meteorológica del SMN<sup>7</sup>, ubicada en el poblado de Díaz Ordáz. Esta arroja información cada 10 minutos a lo largo de un año, la desventaja es que se encuentra a una distancia de 70[km] del sitio propuesto, pero debido a una orografía poco accidentada entre ambos puntos es, será tomada en cuenta, aunque con sus consideraciones del caso.



Figura 3. 6 Localización estación meteorológica Díaz Ordaz

Los datos de la estación en Díaz Ordaz, permiten extraer algunas variables que pueden extrapolarse al sitio en cuestión, tal es el caso de la dirección del viento que no sufre perturbación alguna entre el punto de medición y el sitio en Guerrero Negro [ANEXO 3.2].

Para ello se hace uso del programa WAsP, uno de los más importantes software en la industria eólica, del cual se utiliza una versión gratuita que permite la obtención de la rosa de los vientos, indicando la dirección predominante y la frecuencia con la que ocurre.

Los datos ingresados corresponden a los de un mes de mediciones, por lo que se obtiene el resultado para cada mes a lo largo de un año. A manera de ejemplo se presenta los resultados para el mes de agosto, que de igual forma para los otros meses [ANEXO 3.2], los vientos provienen en mayor intensidad del Noroeste en el sector con ángulo 330°, dato fundamental en el diseño de la alineación de aerogeneradores.

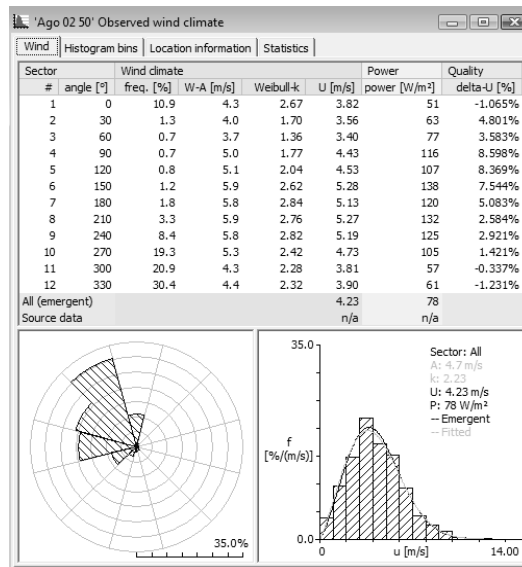


Figura 3. 7 Análisis estadístico del viento, Agosto 2002 (WASP)

<sup>7</sup> Sistema Meteorológico Nacional

ANÁLISIS

Muchas veces los datos obtenidos se encuentran a una altura que no corresponde a la que estará recibiendo el aerogenerador en el rotor, por lo que la información a la altura de medición tendrá que ser extrapolada a la altura deseada.

Para ello se tiene que conocer la longitud de rugosidad que representa la distancia en la que el viento es ralentizado, por efecto del terreno circundante que varía respecto al tipo de suelo. El sitio propuesto es un área costera compuesta por dunas de escasa vegetación, que no se interponen en el curso y potencial del viento, por lo tanto la longitud de rugosidad para la región es de  $z_0=0.03[m]$ .

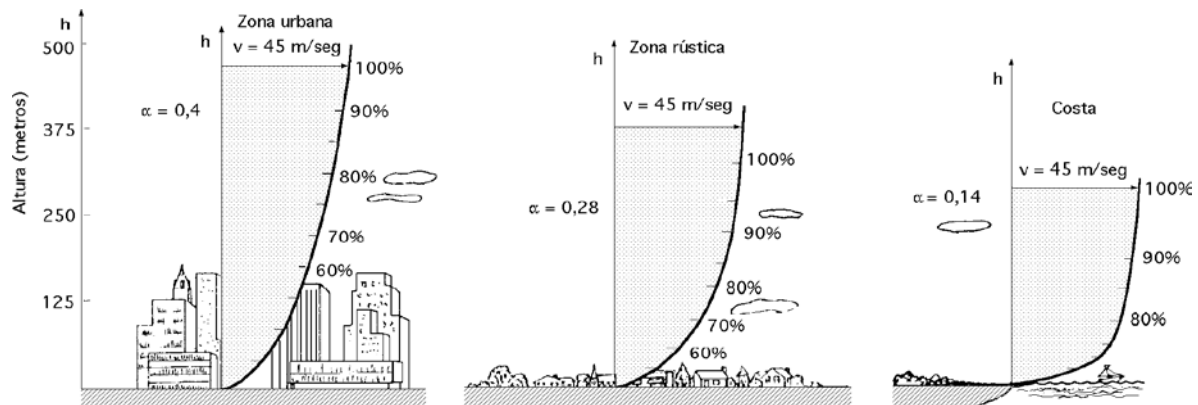


Figura 3. 8 Perfil vertical del viento

Para el cálculo de la velocidad a una altura mayor, en este caso 80[m], se utilizará la Ley Exponencial de Hellman [15], representada por la siguiente fórmula:

$$\frac{v}{v_{ref}} = \left( \frac{h}{h_{ref}} \right)^\alpha$$

Los términos  $v_{ref}$  y  $h_{ref}$  representan la velocidad y altura de referencia respectivamente, siendo  $v$  nuestra incógnita de velocidad a la altura  $h$  determinada. El exponente  $\alpha$  se aproxima mediante:

$$\alpha = 0.24 + 0.04 * \ln(z_0) + 0.003 * \ln^2(z_0)$$

Por lo tanto  $\alpha=0.137$  y en base a la velocidad de referencia promedio de 5.7[m/s] a 48[m] de altura, se obtiene la velocidad promedio a 80[m]:

$$v = 5.7 \left( \frac{80}{48} \right)^{0.137} \quad v = 6.1[m/s]$$

Llevadas las velocidades de viento a la altura definida se procede a evaluar el potencial eólico del lugar, para ello se hace uso de distribuciones probabilísticas con el fin de conocer la frecuencia con que la velocidad del viento incide en el sitio.

La distribución de probabilidad de Weibull [12] es la más utilizada por desarrolladores de parques eólicos, ya que define de forma precisa el comportamiento de la variabilidad del viento. Su importancia recae en la necesidad de predecir la intensidad del viento a lo largo del tiempo y de esta forma la energía que puede ser producida.

La potencia extraída es directamente proporcional al cubo de la velocidad del viento, por lo que una pequeña variación representa un gran incremento en la potencia generada, por lo que no es válido decir que la potencia promedio corresponde a la velocidad promedio, pues aunque los vientos fuertes generan mayor energía tienen poca probabilidad de ocurrencia.

La función de distribución de Weibull se establece de la siguiente forma:

$$p(v) = \frac{k}{A} \left(\frac{v}{A}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{A}\right)^k}$$

La distribución está en función de la velocidad del viento, se compone de dos parámetros, “A” denominado factor de escala es un valor cercano a la velocidad media con unidades similares, mientras que “k” conocido como factor de forma, indica que tan puntiaguda es la gráfica y su significado es que tan cercanas son las velocidades a un solo valor, su valor oscila entre  $1.3 < k < 4.3$ .

Para este caso en que no se dispone de suficiente información, se suele utilizar la distribución de Rayleigh [15] que aplica un valor de  $k=2$ , suele utilizarse en sitios donde la velocidad media es superior a los 4[m/s].

Para obtener el parámetro “A”, se utiliza un trazador de distribución el cual proporciona la forma de la distribución [25], únicamente ingresando la velocidad media  $v_m=6.1$ [m/s] y el parámetro  $k=2$  de la función Rayleigh.

Con dicha herramienta se obtiene un valor del parámetro  $A=6.88$ [m/s]. Por lo tanto se puede ya calcular los valores de la función de probabilidad para cada marca de velocidad.

v [m/s]	p(v)
0	0.00000
1	0.04137
2	0.07766
3	0.10481
4	0.12053
5	0.12458
6	0.11850
7	0.10504
8	0.08745
9	0.06869
10	0.05109
11	0.03606
12	0.02420
13	0.01546
14	0.00941
15	0.00546
16	0.00303
17	0.00160
18	0.00081
19	0.00039
20	0.00018
21	0.00008
22	0.00003
23	0.00001
24	0.00001

Tabla 3. 4 Frecuencia del viento

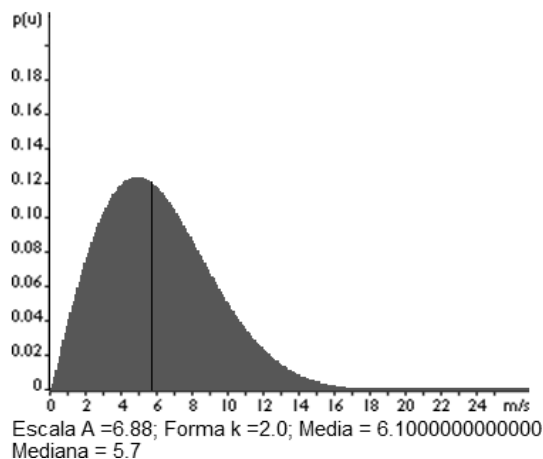


Figura 3. 9 Distribución Rayleigh, Guerrero Negro (www.windpower.org)



Teniendo la probabilidad con la que ocurre cada marca de velocidad, esta es multiplicada por el número de horas durante el año y de esta manera se obtienen las horas en las que estará soplando el viento con dicha velocidad. Así mismo, se calcula la potencia de cada velocidad que multiplicada por las horas ya obtenidas, se conoce la energía que disponemos en Guerrero Negro:

v [m/s]	p(v)	hrs	P [kW/m <sup>2</sup> ]	E [kWh/m <sup>2</sup> ]
0	0.00000	0	0.00	0.00
1	0.04137	362.395	0.00	0.22
2	0.07766	680.279	0.00	3.29
3	0.10481	918.128	0.02	14.99
4	0.12053	1055.885	0.04	40.85
5	0.12458	1091.318	0.08	82.46
6	0.11850	1038.024	0.13	135.54
7	0.10504	920.193	0.21	190.80
8	0.08745	766.029	0.31	237.09
9	0.06869	601.759	0.44	265.18
10	0.05109	447.563	0.60	270.55
11	0.03606	315.916	0.80	254.18
12	0.02420	211.999	1.04	221.45
13	0.01546	135.432	1.33	179.87
14	0.00941	82.448	1.66	136.76
15	0.00546	47.870	2.04	97.66
16	0.00303	26.526	2.48	65.68
17	0.00160	14.035	2.97	41.68
18	0.00081	7.094	3.53	25.01
19	0.00039	3.427	4.15	14.21
20	0.00018	1.583	4.84	7.65
21	0.00008	0.699	5.60	3.91
22	0.00003	0.295	6.44	1.90
23	0.00001	0.119	7.35	0.88
24	0.00001	0.046	8.36	0.39

Son 8,760 horas durante el año, por lo tanto se dispone de una energía total de **2,292.20[kWh/m<sup>2</sup>]**.

El valor se expresa por unidad de área, pues representa la energía que se puede aprovechar en el sitio, con respecto al área de captación de un aerogenerador de eje horizontal cualquiera.

Lo siguiente es seleccionar un aerogenerador que aproveche dicha energía de la mejor manera y que concuerde con las características del sitio y requerimientos del proyecto.

Tabla 3. 5 Potencial estadístico del viento Guerrero Negro

### 3.3.2.2 SELECCIÓN DEL AEROGENERADOR

Una vez conocida la intensidad del viento y por ende la energía eólica disponible en Guerrero Negro, se procede a seleccionar un aerogenerador capaz de aprovechar esa energía de forma eficientemente y que se ajuste a las condiciones del sitio.

En el mercado eólico existen diversas clasificaciones para definir un tipo de máquina acorde al potencial del lugar, mucho tiene que ver con el diámetro del área de barrido ó longitud de las palas y altura de la torre.

La normatividad actualmente utilizada a nivel internacional, referente a la certificación de turbinas eólicas, se basa en dos sistemas:

- La norma WK01, expresada en la serie de normas IEC 61400
- La norma Germanischer Lloyd, expresada en los Guidelines for the Certification of Wind Turbines

La norma IEC 61400-1 en su 3<sup>era</sup> edición, especifica tres clases que en base al régimen de viento e intensidades de turbulencia del sitio, sienta las bases para el diseño y selección del aerogenerador a ser instalado.

CLASE IEC	I	II	III
$v_{ref}$ [m/s]	50	42.5	37.5
$v_{ave}$ [m/s]	10	8.5	7.5
<b>A I15</b>	0.15	0.15	0.15
<b>B I15</b>	0.13	0.13	0.13
<b>C I15</b>	0.10	0.10	0.10

Tabla 3. 6 Clasificación norma IEC 61400-1 (IEC)

La velocidad de referencia  $v_{ref}$  representa el valor más alto de la velocidad promedio en 10 minutos, con un periodo de recurrencia de 50 años, la velocidad promedio  $v_{ave}$  es el 20% de  $v_{ref}$  y los parámetros A, B y C son los índices de turbulencia medidos a una velocidad promedio de 15[m/s].

Por lo cual en un sitio con cierta clasificación debe de instalarse un aerogenerador acorde a las especificaciones de cada clase.

En base a la poca información recopilada de Guerrero Negro, se toma a consideración la asignación de clase IEC III al sitio, debido a su bajo potencial respecto a otras localidades. Se procede entonces a la búsqueda de turbinas eólicas que se encuentren dentro de esta clasificación, para ello se consulta en el sitio de internet WIND ENERGY MARKET de la GERMAN WIND ENERGY ASSOCIATION (BWE), aquí se encuentran los aerogeneradores actualmente en el mercado de la industria eólica.

En primer lugar se elegirá únicamente una unidad en base a las condiciones de viento en Guerrero Negro, posteriormente se definirá el número de aerogeneradores que formaran parte del parque eólico, en base a los requerimientos energéticos por parte de la planta desaladora.

Dos son las propuestas en base a su experiencia en los parques eólicos del estado de Oaxaca. La región del Istmo de Tehuantepec tiene máquinas instaladas clase IEC I, por lo que para el caso de Guerrero Negro serán analizadas en su versión de clase IEC III.

- GAMESA G58-850

GAMESA	G58-850[kW]
Potencia <sub>nominal</sub>	850[kW]
Tensión	690[V <sub>ac</sub> ]
Diámetro	58[m]
Área de barrido	2,642[m <sup>2</sup> ]
Altura <sub>buje</sub>	71[m]

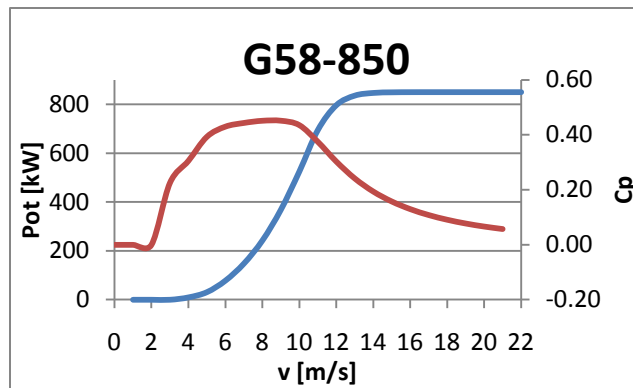


Figura 3. 10 Curva de potencia G58-850

- ACCIONA AW-1500

ACCIONA	AW-1500[kW]
Potencia <sub>nominal</sub>	1,500 [kW]
Tensión	12,000[V <sub>ac</sub> ]
Diámetro	82[m]
Área de barrido	5,289[m <sup>2</sup> ]
Altura <sub>buje</sub>	80[m]

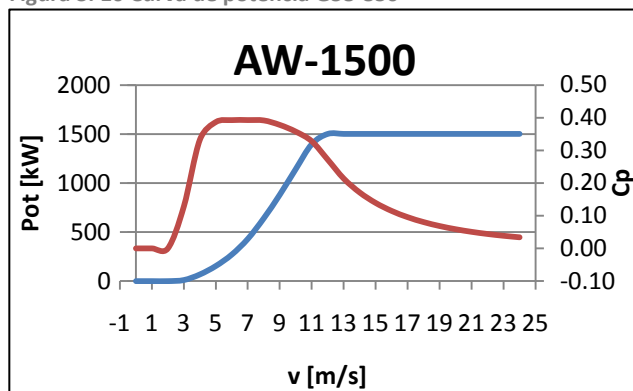


Figura 3. 11 Curva de potencia AW-1500

Estos datos fueron recopilados de la página web del fabricante [32] [33], de estos datos la Curva de Potencia (gráfico azul) es lo más importante ya que es característica de cada aerogenerador donde se relaciona velocidad de viento con la energía que puede generar.

A su vez se puede conocer el Coeficiente de Potencia  $C_p$  (gráfico rojo), que representa el porcentaje de energía que realmente puede ser extraída por la máquina, respecto a la energía disponible en el lugar, con base a la Ley de Betz.

Al compararse ambos Coeficientes de Potencia, la máquina G58-850 es la que mejor rendimiento alcanza llegando al 45% entre las velocidades de 8 y 9[m/s], contra el 39% que alcanza la AW-1500 en un rango mayor de entre 5 y 8[m/s], esto no quiere decir que el aerogenerador Gamesa sea una mejor opción, ya que hay otros aspectos técnicos y de logística a considerar.

A continuación se tiene la energía que generará cada aerogenerador en particular a lo largo de un año, respecto a la frecuencia de vientos establecida por la función de probabilidad aplicada:

G58-850			
v [m/s]	P [kW]	$C_p$	E [kWh]
0	0.00	0.00	0.00
1	0.00	0.00	0.00
2	0.00	0.00	0.00
3	9.70	0.22	8905.84
4	31.20	0.31	32943.62
5	78.40	0.39	85559.37
6	148.20	0.43	153835.17
7	242.70	0.44	223330.81
8	368.80	0.45	282511.60
9	525.30	0.45	316103.86
10	695.00	0.44	311056.41
11	796.60	0.37	251658.57
12	835.90	0.30	177210.17
13	846.80	0.24	114683.67
14	849.30	0.19	70023.01
15	849.90	0.16	40685.05
16	850.00	0.13	22547.00
17	850.00	0.11	11930.04
18	850.00	0.09	6030.31
19	850.00	0.08	2913.03
20	850.00	0.07	1345.22
21	850.00	0.06	594.03

Tabla 3. 7 Producción estadística G58-850

AW-1500			
v[m/s]	P[kW]	$C_p$	E[kWh]
0	0	0.00	0.00
1	0	0.00	0.00
2	0	0.00	0.00
3	11.1	0.13	10191.22
4	68	0.33	71800.20
5	154.5	0.39	168608.71
6	271	0.39	281304.53
7	430.5	0.39	396143.02
8	640.8	0.39	490871.56
9	880.5	0.38	529848.57
10	1142	0.36	511117.15
11	1395	0.33	440702.62
12	1500	0.27	317998.88
13	1500	0.21	203147.73
14	1500	0.17	123671.86
15	1500	0.14	71805.59
16	1500	0.11	39788.82
17	1500	0.10	21053.00
18	1500	0.08	10641.72
19	1500	0.07	5140.63
20	1500	0.06	2373.92
21	1500	0.05	1048.29
22	1500	0.04	442.75
23	1500	0.04	178.89
24	1500	0.03	69.16

Tabla 3. 8 Producción estadística AW-1500

El aerogenerador G58-850 genera un total anual de 2,113.87[MWh], mientras que el AW-1500 produce 3,697.95[MWh], de tal manera que el Factor de Potencia de ambas máquinas en Guerrero Negro es de 28.39% y 28.14% respectivamente.

Este factor de potencia, no es más que la proporción de energía que realmente se genera, respecto a la que puede generar cada aerogenerador en condiciones óptimas. Este parámetro es característico del sitio y del aerogenerador seleccionado, que para este caso, al ser aproximadamente el mismo en ambas máquinas, se tomarán en cuenta otros factores de carácter técnico en la elección final del aerogenerador.

Con los valores de factor de potencia estimados de cada máquina, se puede conocer la potencia que se puede extraer a cada unidad, esto es:

Aerogenerador	Pot <sub>nominal</sub>	%FP	Pot <sub>disponible</sub>
<b>G58-850</b>	850[kW]	28.39	241.32[kW]
<b>AW-1500</b>	1,500[kW]	28.14	422.10[kW]

Un punto importante en la decisión de considerar dos aerogeneradores de diferentes capacidades, radica en la idea de que para una máquina con menor capacidad, es necesario instalar más máquinas que puedan sostener la demanda de energía solicitada, esto a su vez representa una mayor superficie de terreno para su instalación que para el caso de Guerrero Negro, lo menos que se quiere es impactar en el territorio, además del costo significativo en obra civil.

Caso contrario ocurre con aerogeneradores de mayor capacidad como el AW-1500, que pueden suplir tal energía con menos unidades.

En base a información recopilada y a la experiencia operativa de tales aerogeneradores en el estado de Oaxaca, el modelo AW-1500, se ha desempeñado con mejores rendimientos en lo que a disponibilidad concierne, con factores que alcanzan el 98% por unidad, en base a las mejoras tecnológicas por encima del aerogenerador G58-850.

Por tal motivo se ha llegado a la conclusión que el aerogenerador **AW-1500**, representa la mejor opción dentro del proyecto, justificándose por sus dimensiones, capacidad de generación, disponibilidad y mejoras técnicas, sobre la otra opción.

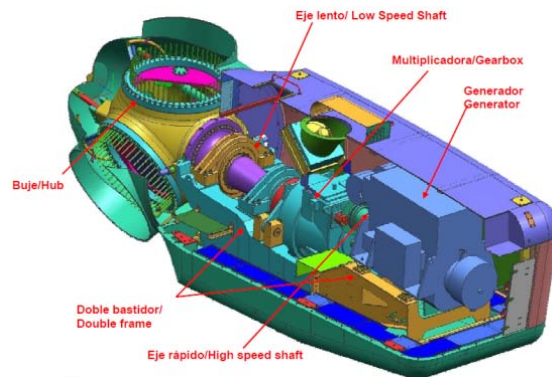


Figura 3. 12 Aerogenerador AW-1500

**NOTA:** Cabe aclarar que la información con la que se ha obtenido la generación esperada en cada máquina, proviene de una estimación probabilística, en donde algunos parámetros fueron deducidos y otros tomados de mediciones reales en sitio (factores K y A, fdp de Weibull), por lo que todo este análisis representa una estimación de lo que probablemente podrá generar cada aerogenerador.

## 3.3.2.3 CONFIGURACIÓN DEL PARQUE

Seleccionado el aerogenerador, el siguiente paso es el dimensionamiento del parque y la configuración y orientación de la alineación de máquinas dentro del sitio.

Lo primero es conocer los requerimientos energéticos por parte de la planta desaladora y el sistema de conducción de agua producida, que son las principales cargas conectadas a la planta de energía eólica.

Ya obtenidas las cargas en el capítulo anterior, las cuales son:

CARGA	DEMANDA
Planta Desaladora	1,802.47[kW]
Sistema de conducción	211.12[kW]
<b>TOTAL</b>	<b>2,013.59[kW]</b>

Se procede entonces a dimensionar el número de aerogeneradores que cubrirá tal demanda, en base al factor de planta anteriormente deducido:

Aerogenerador	Pot <sub>nominal</sub>	%FP	Pot <sub>disponible</sub>
<b>AW-1500</b>	1,500[kW]	28.14	422.10[kW]

Por lo tanto, la cantidad de aerogeneradores tendrá que ser:

$$\#_{\text{aerogeneradores}} = \frac{\text{Demanda}_{\text{total}}}{\text{Potencia}_{\text{disponible}}} = \frac{2,013.59}{422.10} = 4.77 \approx 5 \text{ Aerogeneradores}$$

Cinco serán los aerogeneradores con los que el parque eólico proveerá de energía eléctrica a la planta desaladora y sistema de conducción Guerrero Negro–Valle del Vizcaíno.

Se procede entonces a calcular el área que ocupará el parque, el cual por razones técnicas y de logística, se compondrá por una sola alineación con los cinco aerogeneradores, tal alineación deberá orientarse perpendicular a la dirección predominante del viento, que para este caso representa los 330° Noroeste, evitando así un bloqueo entre máquinas en la captación del viento.

Así mismo es importante tomar en cuenta este punto del apantallamiento entre aerogeneradores, pues hay que pensar que en algunas ocasiones el viento tenderá a soplar en dirección misma a la alineación, provocando un efecto de estela a la máquina que aparece detrás de cada unidad, creando turbulencia que se refleja en vibraciones y por ende daños estructurales a las torres.

Por tal motivo el espaciamiento entre torres deber ser el ideal en dirección al viento y perpendicular al mismo, logrando un equilibrio entre un mayor espaciamiento que significa un menor riesgo de efecto de estela, pero también la ocupación de una mayor superficie, contra un menor espaciamiento con efectos contrarios.

La teoría dice que debe existir una separación de 10 diámetros de rotor en dirección del viento y de 5 diámetros en la dirección perpendicular [13]. Generalmente esta regla es adoptada, pero como en este caso donde el viento predominante proviene del noroeste y no tiende a variar a lo largo del año, las distancias en dirección perpendicular pueden ser reducidas considerablemente.

El parque eólico propuesto, consta de cinco aerogeneradores apostados en fila alineada en dirección perpendicular al viento, con una separación entre torres de 2.5 diámetros de rotor:

- Diámetro de rotor 82[m]
  - 5 aerogeneradores
  - Separación entre torres de 2.5 diámetros de rotor
- $$S = 82 * 2.5 = 205[m]$$
- $$L = 205 * 5 = 1,025$$

La longitud total de la alineación será de 1,025[m], esto nos permite dimensionar el polígono que comprenderá el parque eólico, tomando en cuenta caminos, cuarto de control, subestación y punto de interconexión con la red.

Tomando como apoyo las imágenes en Google Earth, es posible dar una aproximación de la localización idónea del parque eólico, de cada una de las máquinas con dimensiones reales, las cuales se muestran orientadas en dirección predominante a 330° Noroeste.



Figura 3. 13 Propuesta localización, Parque eólico Guerrero Negro

Se plantea el punto de interconexión a la red, sea cercano al que se tiene con el aerogenerador de CFE, pudiéndose aprovechar las líneas de trasmisión del mismo, aunque es necesario un redimensionamiento para evacuar la energía generada.

En Guerrero Negro se tiene una red eléctrica con un nivel de tensión de 34.5[kV] a 60[Hz], por lo que es necesario de una subestación capaz de elevar la tensión de las máquinas AW-1500 de 12[kV] a la de la red local.

## CAPÍTULO 4

### 4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 4.1 ACOPLAMIENTO PLANTA DESALADORA – PARQUE EÓLICO

Determinada la demanda de energía eléctrica requerida en la planta desaladora y el bombeo del sistema de conducción de agua producto Guerrero Negro - El Vizcaíno, los resultados arrojan un requerimiento energético de 2,014[kW].

CARGA	DEMANDA
Planta Desaladora	1,802.47[kW]
Sistema de conducción	211.12[kW]
<b>TOTAL</b>	<b>2,013.59[kW]</b>

Como ha sido analizado, tal energía eléctrica es suministrada por un parque eólico con un potencial instalado de 7,500[kW], una capacidad por demás sobrada pero que para las condiciones prevalecientes en sitio, la generación bastará para cubrir tales requerimientos.

El acoplamiento entre una planta desaladora y un parque eólico, toma en consideración alternativas con el fin de evitar fluctuaciones en la operación de la desaladora, como consecuencia de variaciones en la velocidad del viento.

El sistema puede tener energía de reserva en bancos de baterías u otros dispositivos, sistemas híbridos con alguna otra fuente o el consumo de la red eléctrica local. Una manera de evitar el uso de estos dispositivos, los cuales suponen una fuerte inversión, es el diseñar una configuración que permita una producción de agua eficaz, algunas de estas alternativas son:

- Control sobre el sistema pitch<sup>1</sup> del aerogenerador, logrando establecer una generación constante. Funciona en lugares donde se tienen altas y constantes velocidades de viento.
- Instalar entre 2 y 3 módulos de diferentes capacidades, permitiendo su interrupción conforme el potencial eólico lo dicte. Este caso es óptimo para aerogeneradores de menos de 50[kW][19].
- Instalar un mayor número de módulos de desalación (8 módulos), logrando con esto una versatilidad en la operación de la desaladora en conjunto, amortiguando la intermitencia del viento, mediante la habilitación de módulos según el potencial instantáneo existente.

Este último método ha sido ya implementado en algunas regiones del mundo, tal es el caso en Islas Canarias [19][20], razón por la cual se ha adoptado dentro de esta tesis.

La característica del aerogenerador requiere que este se conecte a la red, ya que se trata de un generador asíncrono el cual necesita de una excitación durante la puesta en marcha y en la operación por debajo de su velocidad de sincronismo.

De la misma forma y debido a la capacidad dimensionada, el parque eólico tiene la capacidad de entregar energía a la red, mientras despache de manera efectiva el consumo de la planta desaladora.

<sup>1</sup> Sistema que permite controlar el ángulo de incidencias entre las palas y el viento

## 4.1.1 CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA

En esta tesis se proponen dos esquemas de operación del sistema, ya que una de las limitantes es la intermitencia de generación eléctrica y la restricción de operar constantemente los módulos de desalación. De esta forma es necesario tener un respaldo de energía eléctrica de la red, que a su vez, en temporadas de alto viento, cabe la posibilidad de negociar la venta de energía con CFE, mediante un contrato de interconexión.

Las dos alternativas estudiadas, se basan en lo siguiente:

- Producción de agua al 100% de capacidad de la desaladora, con abastecimiento del parque eólico y respaldo de la red.
- Producción de agua dependiente del potencial eólico instantáneo, sin respaldo de la red.

La característica del aerogenerador requiere que este se conecte a la red, ya que se trata de un generador asíncrono el cual necesita de una excitación durante la puesta en marcha y en la operación por debajo de su velocidad de sincronismo.

La instalación de la desaladora consta de 8 módulos independientes entre sí y que entrarán en operación uno a uno, en base a la disponibilidad de energía.

Para ello, un sistema de control vigila la generación de energía eléctrica procedente del viento, manteniendo la operación de cierto número de unidades de desalación. Este se encarga de enviar órdenes al sistema de distribución de agua de la desaladora, a la vez de energizar las bombas de alta presión de los módulos que puedan operar.

El sistema de distribución de aguas, se compone de tres corrientes:

- Agua de mar (alimentación)
- Agua desalada (producto)
- Salmuera (concentrado)

La alimentación se distribuye a los ocho módulos mediante una tubería principal en forma paralela, la cual proviene de la obra de toma y es impulsada por el sistema de bombeo, entregando a una presión de 4.7[bar].

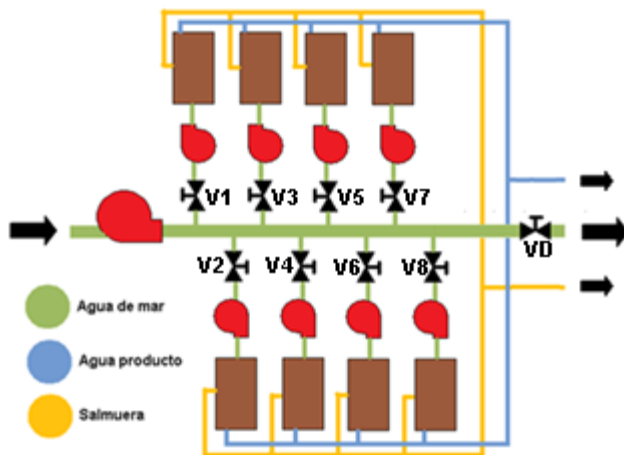


Figura 4.1 Diagrama planta desaladora

Electroválvulas de control en cada uno de los módulos, dejan pasar agua al módulo en funcionamiento.

Una válvula de descarga VD, abrirá parcialmente conforme vayan quedando desenergizados algunos de los módulos, evitando problemas mecánicos en tuberías, como golpes de ariete, etc., además de mantener el óptimo funcionamiento de la bomba principal.



4.2 ANÁLISIS ECONÓMICO<sup>2</sup> NOTA

La desalación de agua de mar mediante ósmosis inversa, representa uno de los métodos más económicos hasta el momento, debido al bajo consumo energético el cual representa un porcentaje importante en los costos de producción de agua.

Así mismo la generación eléctrica proveniente del viento, es uno de los sistemas de aprovechamiento con mayor factibilidad técnica y económica, reduciendo sus costos operativos y de inversión inicial.

Ambos proyectos, pueden ser apoyados por algún tipo de financiamiento gubernamental como privado, además de ser candidatos para la designación como proyecto MDL<sup>3</sup> [17], recibiendo por este medio, ingresos económicos dentro del mercado de las emisiones de carbono.

## 4.2.1 CASO BASE

Para realizar una comparación entre las alternativas de operación de la desaladora, es necesario contar con un caso base en el que la desaladora operará a un 100% de su capacidad de producción únicamente con energía eléctrica tomada de la red.

Para el análisis económico se contemplan los valores, de inversión total, costos anuales de producción y de energía eléctrica. La Tasa de descuento se establece del 10% con una vida útil de 20 años y 2 años de construcción.

ANÁLISIS ECONÓMICO	
Vida Útil	20 [años]
Tasa de descuento	10%
Producción de agua	720 [m <sup>3</sup> /hr]

La Inversión y Costos de producción anual [8] se reparten en los siguientes rubros:

INVERSIÓN		
Equipo Ósmosis Inversa	\$ 13,450,000	58.48%
Tubería de descarga salmuera	\$ 290,000	1.26%
Pre-tratamiento	\$ 3,800,000	16.52%
Sistema obra de toma	\$ 1,350,000	5.87%
Tubería de alimentación	\$ 900,000	3.91%
Preparación del sitio	\$ 80,000	0.35%
Post-tratamiento	\$ 930,000	4.04%
Tubería trasmisión producto	\$ 1,600,000	6.96%
Edificio	\$ 600,000	2.61%
<b>Inversión total</b>	<b>\$ 23,000,000</b>	<b>100%</b>

Tabla 4. 1 Costos de producción Desaladora

COSTOS DE PRODUCCIÓN ANUALES		
Electricidad	\$ 1,902,000	70%
Químicos	\$ 380,000	14%
Op. & Mant.	\$ 280,000	10%
Reemplazo de membranas	\$ 170,000	6%
<b>Costo Total Anual</b>	<b>\$ 2,732,000</b>	<b>100%</b>

Tabla 4. 2 Inversión Desaladora

Para el costo de la electricidad consideramos el precio de la tarifa en media tensión HM<sup>4</sup> en la región de Baja California Sur, correspondiente al año del 2009, el análisis se analizará para un año completo con operación de la planta a un 100% de producción [ANEXO 4.3].

Realizado el análisis a Valor Presente Neto [ANEXO 4.4], se llega a que el costo nivelado del m<sup>3</sup> desalado de **88.29[€US/m<sup>3</sup>]**.

<sup>2</sup> NOTA: Todos los valores utilizados en este apartado son en DOLARES AMERICANOS a tasa de cambio de \$13 MN / \$1 US

<sup>3</sup> Mecanismo de Desarrollo Limpio

<sup>4</sup> Tarifa Horaria en Media Tensión

## 4.2.2 ALTERNATIVA I (Energía Eólica + Consumo de la red, producción 100%)

La ALTERNATIVA I, representa el caso en el cual la planta desaladora está operando a un 100% de su capacidad, siendo aprovechado el potencial eólico en su totalidad, contando con respaldo de la red en temporadas de bajo viento.

El costo de la generación eléctrica mediante energía eólica ha visto un cambio sustancial, partiendo de los 30[¢USD/kWh] en los años 80's, hasta menos de los 5[¢USD/kWh] en la actualidad, un valor competitivo con otras formas convencionales de generación eléctrica. Lo anterior tiene que ver con el recurso eólico existente, por lo que un valor exacto del precio de la energía depende en gran medida del sitio seleccionado.

El valor de la inversión se parte de los \$US 1,000 el [kW] instalado, una cifra que representa todos los costos asociados a la realización del proyecto, desde estudios hasta la puesta en marcha de las máquinas. Esta cifra en la actualidad suele llegar hasta los 700[\$US/kW], pero a manera de análisis preliminar será concebido el primero.

Inversión	
[US\$/kW]	1000
[US\$]	\$7,500,000
Tasa desc.	10%
Vida Útil	20 años
Costo anual	\$500,000

Unidades	[kW/unidad]	Total [kW]
5	1500	7500

FP	28.14%
Pot [kW]	2110.5
E año [kWh]	18,487,980

La parte económica de un proyecto eólico, se basa en costos de inversión y costos de explotación:

INVERSIÓN		
Evaluación Recurso Eólico	0.85%	\$ 63,380
Ingeniería, Licencias y Permisos	4.23%	\$ 316,901
Aerogeneradores	74.65%	\$ 5,598,592
Obra Civil	6.10%	\$ 457,746
Infraestructura eléctrica	9.01%	\$ 676,056
Línea de evacuación	5.16%	\$ 387,324
<b>TOTAL</b>	<b>100%</b>	<b>\$ 7,500,000</b>

Tabla 4. 3 Inversión Parque Eólico

COSTOS ANUALES DE EXPLOTACIÓN		
Alquiler de Terrenos	15.94%	\$ 79,710
O & M	56.52%	\$ 282,609
Gestión y Administración	13.04%	\$ 65,217
Seguros e Impuestos	14.49%	\$ 72,464
<b>TOTAL</b>	<b>100%</b>	<b>\$ 500,000</b>

Tabla 4. 4 Costos de explotación Parque Eólico

Aunado a esto se propone la implementación del parque eólico como proyecto MDL, medida descrita en el protocolo de Kyoto, para la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> por parte de los países industrializados. Esto conlleva a la introducción al mercado de los bonos de carbono, los cuales dentro de la región de latinoamerica y en base a proyectos similares, se establece dentro este estudio un precio de 10[\$US/tonCO<sub>2</sub>], a su vez se propone un cantidad desplazada de CO<sub>2</sub> por MWh generado de 0.63[tonCO<sub>2</sub>/MWh].

Otro ingreso a tomarse en cuenta, es el aporte que algunos gobiernos ofrecen a proyectos de explotación de energías renovables, incluso en latinoamerica países como Brasil y Argentina ya aplican este tipo de subsidio a manera de impulsar tal explotación. De tal manera que se estima un valor de 10[\$US/MWh] con la generación del parque eólico.

De esta manera se llega a calcular mediante análisis a VPN<sup>5</sup> [ANEXO 4.5], que el costo nivelado de la producción eléctrica con energía eólica es de **5.94[¢US/kWh]**.

<sup>5</sup> Valor Presente Neto

Para este caso se analiza la intermitencia del viento durante el día, en base al promedio horario durante cada mes [ANEXO 4.1], con lo cual al sobre-poner la curva de potencia del aerogenerador y multiplicar por las cinco unidades [ANEXO 4.2], se obtiene el siguiente perfil de potencia obtenible del viento, diaria para cada mes del año:

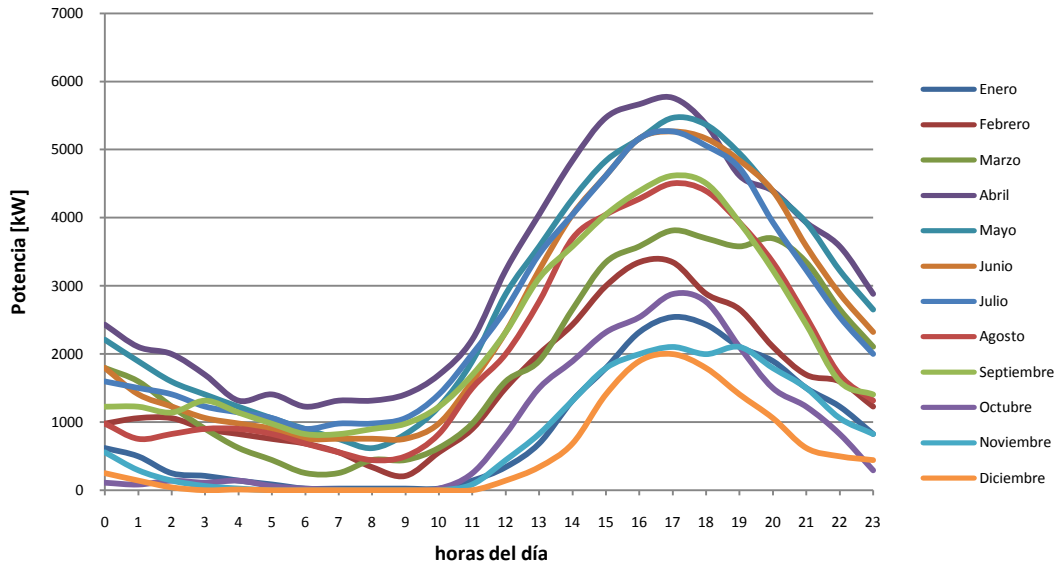


Figura 4. 2 Potencial diario mensual

El perfil demuestra que durante las primeras horas, el potencial no alcanza a cubrir la demanda de 2,014[kW] siendo en este momento donde se toma energía de la red. Contrariamente durante la tarde se tiene una generación muy por encima de la demanda, siendo más notorio en algunos meses, este excedente de energía es suministrado a la red, el cual por contrato de interconexión puede ser consumido en algún otro momento, resultando esto en un ahorro sustancial.

<b>Demanda Desaladora</b>
17,642,640 [kWh]

<b>Generación Eólica</b>
13,650,851 [kWh]
5.94 [cUS/kWh]
<b>\$ 810,861</b>

<b>Consumo de la red</b>
3,991,789 [kWh]
9.38 [cUS/kWh]
<b>\$ 374,425</b>

<b>Excedente generado</b>
2,685,579 [kWh]
9.28 [cUS/kWh]
<b>\$ 249,284</b>

Por lo tanto, al obtener el costo de electricidad por parte de la planta eólica y por el consumo de la red, se descuenta el costo del excedente obteniendo un Costo Total de Energía:

Eólico-Red	\$ 1,185,286
Excedente	\$ 249,284
<b>Costo Energía</b>	<b>\$ 936,002</b>

De tal manera que al realizar el análisis económico de producción de agua con el costo energético obtenido de \$US 936,002 [ANEXO 4.6], el costo nivelado de agua será de **72.97[cUS/m<sup>3</sup>]**.

# ANÁLISIS DE RESULTADOS

## Capítulo 4

### 4.2.3 ALTERNATIVA II (Energía Eólica, producción variable)

Esta alternativa tiene que ver con el potencial eólico instantáneo ya que se propone una producción de agua en base a este. Para ello se verifica el potencial en la Figura 4.2, pudiendo arrancar los módulos de desalación conforme a la energía generada por el parque eólico.

La curva de potencias horarias producidas por el parque eólico, varía en cada mes con menor intensidad en los meses de invierno, por lo que la mayor generación de energía se realizará en los meses más calurosos, donde se podrá tener a su vez, la mayor producción de agua desalada.

La tabla muestra el número de unidades en operación durante un día promedio de cada mes:

Módulos de desalación en operación																								
Mes/Hora	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Enero	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	5	7	8	8	8	8	8	6	4	2
Febrero	3	4	4	3	2	2	2	1	0	0	1	3	6	8	8	8	8	8	8	8	8	7	6	4
Marzo	7	6	4	3	1	0	0	0	0	0	1	3	6	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
Abril	8	8	8	7	5	5	4	5	5	5	7	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
Mayo	8	8	6	5	4	4	3	2	1	2	4	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
Junio	7	5	4	4	3	3	2	2	2	2	3	6	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
Julio	6	6	5	4	4	4	3	3	3	4	5	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
Agosto	3	2	2	3	3	2	2	1	0	1	2	6	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	7	5
Septiembre	4	4	4	5	4	3	2	2	3	3	4	7	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	6	5
Octubre	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	6	8	8	8	8	8	8	6	4	2	0
Noviembre	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	5	7	8	8	8	8	7	6	4	2
Diciembre	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	5	8	8	7	5	4	1	1	0	0

Tabla 4. 5 Módulos en operación

Por lo tanto se tiene una producción de agua conforme a lo anterior, lo cual refleja una producción mayor en algunos meses, que contrasta con los meses que por condiciones climáticas se tiene una mayor demanda de agua:

Producción de agua [m <sup>3</sup> ]																								
Mes/Hora	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Enero	90	90	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	180	450	630	720	720	720	720	720	540	360	180
Febrero	270	360	360	270	180	180	180	90	0	0	90	270	540	720	720	720	720	720	720	720	720	630	540	360
Marzo	630	540	360	270	90	0	0	0	0	0	90	270	540	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720
Abril	720	720	720	630	450	450	360	450	450	450	630	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720
Mayo	720	720	540	450	360	360	270	180	90	180	360	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720
Junio	630	450	360	360	270	270	180	180	180	180	270	540	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720
Julio	540	540	450	360	360	360	270	270	270	360	450	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720
Agosto	270	180	180	270	270	180	180	90	0	90	180	540	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	630	450
Septiembre	360	360	360	450	360	270	180	180	270	270	360	630	720	720	720	720	720	720	720	720	720	720	540	450
Octubre	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	180	540	720	720	720	720	720	720	540	360	180
Noviembre	90	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	180	450	630	720	720	720	720	720	630	540	360
Diciembre	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	180	450	720	720	630	450	360	90	90	0

Tabla 4. 6 Producción de agua [m<sup>3</sup>]

Bajo este régimen de operación se tiene una producción anual de agua potable de 3,665,070[m<sup>3</sup>].

De tal forma que para operar la cantidad de módulos descritos en la Tabla 4.3, el parque eólico habrá despachado 9,689,510[kWh], que basado en el costo nivelado de la energía eólica (5.94[¢US/kWh]) corresponde a un costo de \$US 575,557, pero a su vez como ya ha sido descrito en la Alternativa I, existe un excedente generado el cual se le da un precio en base a la tarifa por lo que será descontado quedando finalmente el costo por energía eléctrica de **\$US 326,273**.

Al realizar el análisis económico a esta alternativa con los valores tanto de producción de agua como del costo de la energía eléctrica obtenida del viento [ANEXO 4.7], se tiene un costo nivelado de **108.95[¢US/m<sup>3</sup>]**.

4.3 COSTO DE TUBERÍA DEL ACUEDUCTO DE AGUA DESALADA

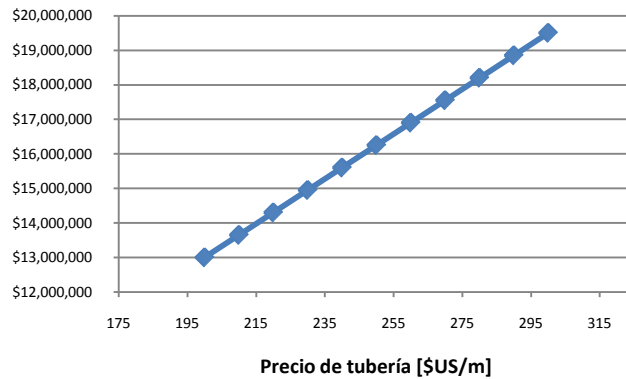
El transporte de agua producto se realizará, como ya se ha analizado en capítulos anteriores, con tubería de hierro dúctil con revestimiento interno de 1[m] de diámetro, del cual no se tiene un precio exacto debido a la variación de precios.

La distancia del acueducto es de 65[km], desde la planta desaladora en Guerrero Negro, a los campos de cultivo en el Valle del Vizcaíno.

Por lo tanto se realiza un estudio de sensibilidad, con la finalidad de darse una idea del costo que tendrá la construcción del acueducto.

[\$US/m]	[\$US]
200	\$ 13,000,000
210	\$ 13,650,000
220	\$ 14,300,000
230	\$ 14,950,000
240	\$ 15,600,000
250	\$ 16,250,000
260	\$ 16,900,000
270	\$ 17,550,000
280	\$ 18,200,000
290	\$ 18,850,000
300	\$ 19,500,000

Tabla 4. 7 Precio de tubería



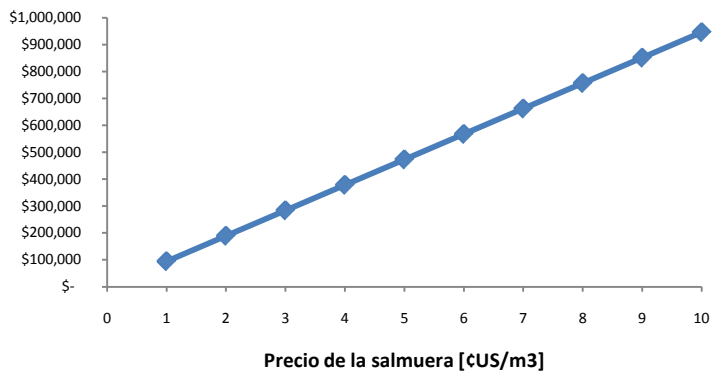
4.4 VENTA DE SALMUERA

El caudal de salmuera, 1,080[m<sup>3</sup>/hr] a 60,500[ppm], es una cantidad considerable que puede tener un buen precio, debido a que la elevada concentración aminora los tiempos de cosecha de sal, incrementando la producción de la misma.

La generación anual de salmuera en la desalación es de 9,460,800[m<sup>3</sup>] y aunque no se tiene un precio actual conocido, como ejercicio se hará un estudio de sensibilidad del valor de la misma.

[cUS/m <sup>3</sup> ]	[\$US/año]
1	\$ 94,608
2	\$ 189,216
3	\$ 283,824
4	\$ 378,432
5	\$ 473,040
6	\$ 567,648
7	\$ 662,256
8	\$ 756,864
9	\$ 851,472
10	\$ 946,080

Tabla 4. 8 Precio de la Salmuera



La ganancia mediante la venta de salmuera, representa un valor atractivo el cual puede ser provechoso para el financiamiento del proyecto en general. Una alternativa sería financiar el costo del acueducto estimado en el punto anterior.

## CONCLUSIONES

El acuífero el Vizcaíno representa la principal fuente de abastecimiento de agua a la región, la sobreexplotación más la creciente intrusión marina, han llevado que el acuífero se encuentre en estado de veda, imposibilitando extraer un volumen mayor al ya concesionado.

Este trabajo propone la instalación de una planta desaladora acoplada a un parque eólico, siendo ambos proyectos, desde el aspecto técnico, factibles, de los cuales se proponen obtener volúmenes de agua, capaz de cubrir el 18% de las necesidades de riego.

El potencial eólico de Guerrero Negro logra alcanzar un costo de la energía generada de **5.94[¢US/kWh]**, muy inferior al precio de la tarifa eléctrica establecida en Baja California Sur, además se aprovechan los beneficios de la explotación de energías alternas, ya que el proyecto se propone en una de las zonas del país más sensibles, en lo cultural como en lo ambiental.

Se ha demostrado que la ósmosis inversa es el método ideal por su bajo consumo energético, ya que se tiene una demanda energética de 2,014[kW] y una producción de agua de 720[m<sup>3</sup>/hr]:

$$\text{Consumo energético: } \frac{2,013.59}{720} = 2.8 \left[ \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3} \right]$$

Para calcular el costo del agua, se establece un caso base donde se opera la desaladora a un 100% durante todo el año, operando con energía de la red, teniendo un costo nivelado de producción de **88.29[¢US/m<sup>3</sup>]**. Con lo anterior, se analizan dos alternativas en la operación del sistema:

**Alternativa I.-** Operación a un 100% de la capacidad de producción de agua, energizada con la generación del parque eólico y respaldo de la red. Costo nivelado de **72.97[¢US/m<sup>3</sup>]**.

**Alternativa II.-** Producción de agua conforme al potencial eólico instantáneo, se energizará únicamente con la generación del parque eólico, produciéndose 3.67[Mm<sup>3</sup>] al año, siendo el costo nivelado de **108.95[¢US/m<sup>3</sup>]**.

Es notorio que la Alternativa I representa la medida más económica, aún por encima del caso base, pero hay que considerar que esta alternativa propone una disponibilidad del 100% de la planta desaladora y del parque eólico, lo cual no sucede en la realidad.

La Alternativa II presenta el costo más elevado, debido primordialmente a una menor producción de agua, aproximadamente de la mitad de la que se tiene en la Alternativa I. A pesar de ello representa la forma más sustentable de producir agua, al no tener consumo eléctrico de la red, evitando la quema de diesel utilizado en la generación dentro de la región

Finalmente se considera la venta de salmuera a productores de sal en Guerrero Negro, esta puede beneficiar en el financiamiento de alguno de los puntos clave del proyecto, como puede ser el costo de la construcción del acueducto GN-Vizcaíno, así como el costo de bombeo del mismo.

Es necesario tener actualizados los datos ocupados en esta tesis, un análisis del potencial eólico con mediciones en sitio así como un censo de los agricultores con sus consumos energéticos e hídricos, además de establecer los valores de los beneficios de registrar los proyectos como MDL's y otros apoyos gubernamentales en el país, todo esto sería ideal para reafirmar los resultados obtenidos, aunque prevalece el objetivo inicial de demostrar exitosamente la viabilidad técnico-económica del proyecto.

## ANEXOS

## ANEXOS

## 2.1 Reporte desaladora ROSA

Reverse Osmosis System Analysis for FILMTEC™ Membranes

ROSA v6.1.5 ConfigDB U238786\_55

Project: Guerrero Negro BCS

Case: 1

Angel Sánchez García,

6/4/2009

Project Information: Análisis de la planta desaladora en Guerrero Negro, Baja California Sur, 1[unidad] de 8

## System Details

Feed Flow to Stage 1	225.00 m <sup>3</sup> /h	Pass 1 Permeate Flow	90.00 m <sup>3</sup> /h	Osmotic Pressure:	
Raw Water Flow to System	225.00 m <sup>3</sup> /h	Pass 1 Recovery	40.00 %	Feed	25.68 bar
Feed Pressure	51.26 bar	Feed Temperature	25.0 C	Concentrate	43.71 bar
Fouling Factor	0.85	Feed TDS	36386.11 mg/l	Average	34.70 bar
Chem. Dose	None	Number of Elements	192	Average NDP	15.54 bar
Total Active Area	7134.72 M <sup>2</sup>	Average Pass 1 Flux	12.61 l/mh	Power	376.96 kW
Water Classification: Seawater (Open Intake) SDI < 5				Specific Energy	4.19 kWh/m <sup>3</sup>

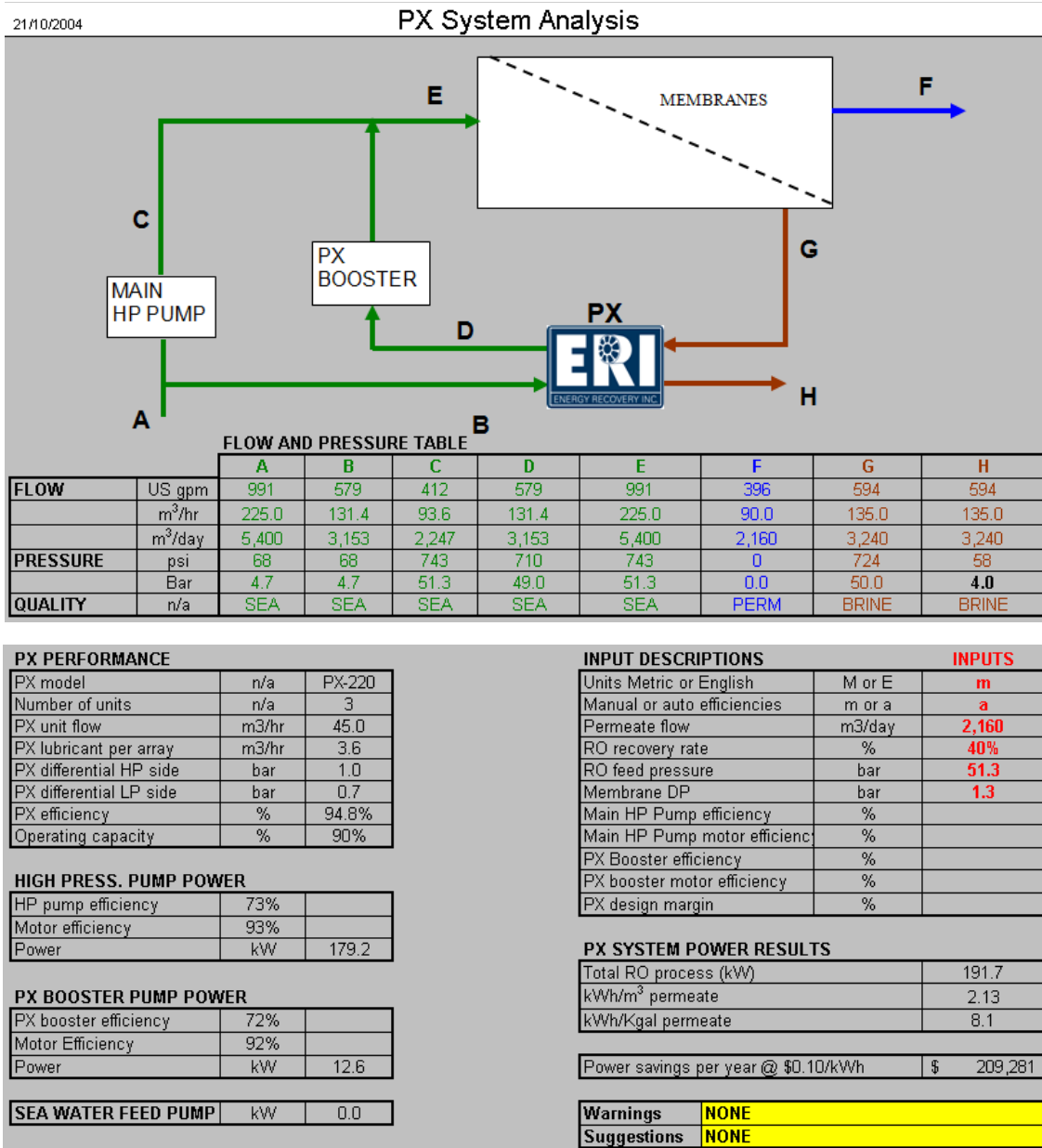
Stage	Element	#PV	#Ele	Feed Flow (m <sup>3</sup> /h)	Feed Press (bar)	Recirc Flow (m <sup>3</sup> /h)	Conc Flow (m <sup>3</sup> /h)	Conc Press (bar)	Perm Flow (m <sup>3</sup> /h)	Avg Flux (l/mh)	Perm Press (bar)	Boost Press (bar)	Perm TDS (mg/l)
1	SW30HRLE-400	24	8	225.00	50.91	0.00	135.00	49.15	90.00	12.61	0.00	0.00	246.16

Pass Streams (mg/l as Ion)						
Name	Feed	Adjusted Feed	Concentrate		Permeate	
			Stage 1	Stage 1	Stage 1	Total
NH4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
K	286.00	286.00	474.96	2.53	2.53	2.53
Na	12220.00	12220.00	20303.76	93.32	93.32	93.32
Mg	730.00	730.00	1216.30	0.50	0.50	0.50
Ca	300.00	300.00	499.85	0.21	0.21	0.21
Sr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ba	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CO3	8.66	8.66	17.02	0.00	0.00	0.00
HCO3	170.00	170.00	276.91	1.81	1.81	1.81
NO3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cl	18760.00	18781.44	31204.73	144.91	144.91	144.91
F	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SO4	3890.00	3890.00	6481.19	2.88	2.88	2.88
SiO2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Boron	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CO2	2.15	2.15	3.72	2.58	2.58	2.58
TDS	36364.67	36386.11	60474.73	246.16	246.16	246.16
pH	7.60	7.60	7.59	5.99	5.99	5.99

Permeate Flux reported by ROSA is calculated based on ACTIVE membrane area. DISCLAIMER: NO WARRANTY, EXPRESSED OR IMPLIED, AND NO WARRANTY OF MERCHANTABILITY OR FITNESS, IS GIVEN. Neither FilmTec Corporation nor The Dow Chemical Company assume liability for results obtained or damages incurred from the application of this information. FilmTec Corporation and The Dow Chemical Company assume no liability, if, as a result of customer's use of the ROSA Membrane design software, the customer should be sued for alleged infringement of any patent not owned or controlled by the FilmTec Corporation nor The Dow Chemical Company.

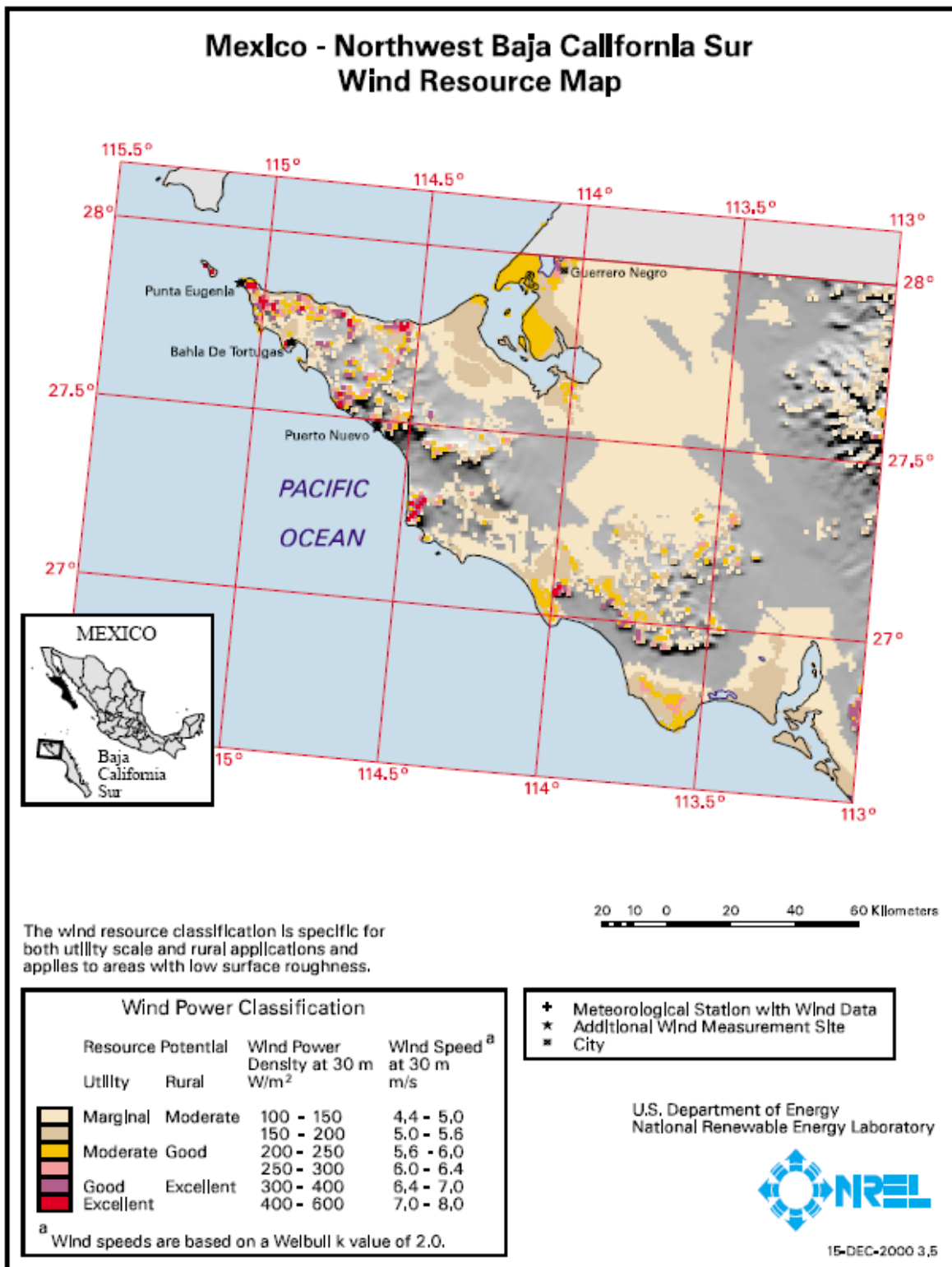
ANEXOS

2.2 Análisis recuperador de energía ERI



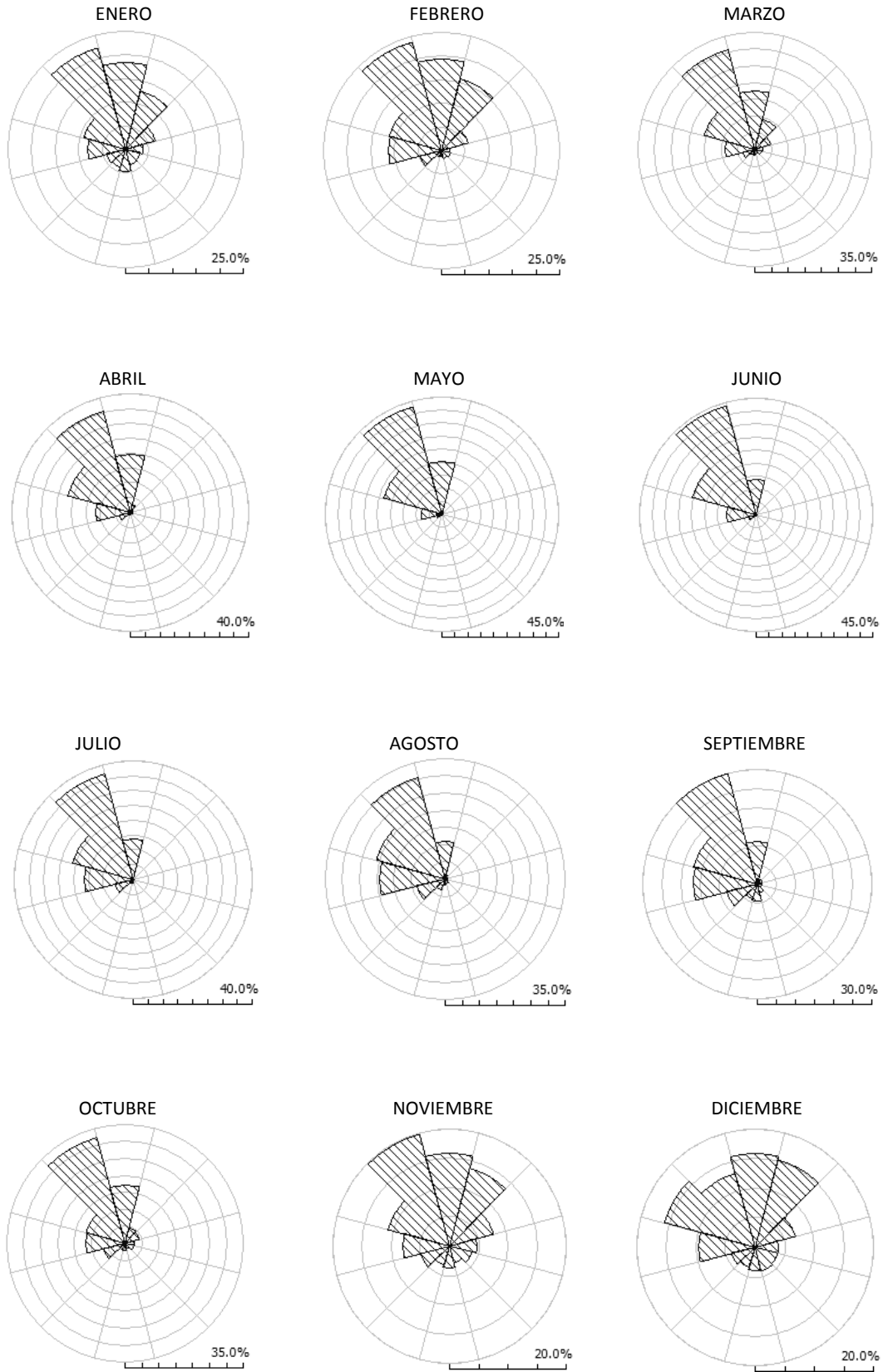


3.1 Mapa eólico Mulegé, Baja California Sur



## ANEXOS

## 3.2 Dirección del viento, estación Díaz Ordaz



## ANEXOS

## 4.1 Velocidad promedio a 80[m], Guerrero Negro, BCS

VELOCIDAD PROMEDIO DEL VIENTO EN LA CENTRAL EÓLICA, GUERRERO NEGRO, BCS.																									
Mes/Hora	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	Promedio
Enero	4.92	4.70	4.17	4.06	3.85	3.64	3.31	3.31	3.31	3.31	3.31	3.85	4.38	5.03	5.88	6.42	6.95	7.16	7.06	6.74	6.52	6.09	5.77	5.24	4.96
Febrero	5.45	5.56	5.56	5.35	5.24	5.13	5.03	4.81	4.38	4.06	4.81	5.35	6.09	6.63	7.06	7.59	7.91	7.91	7.48	7.27	6.74	6.31	6.20	5.77	5.99
Marzo	6.42	6.20	5.77	5.35	4.92	4.60	4.17	4.17	4.60	4.60	4.92	5.45	6.20	6.52	7.27	7.91	8.13	8.34	8.23	8.13	8.23	7.91	7.27	6.74	6.34
Abril	7.06	6.74	6.63	6.31	5.88	5.99	5.77	5.88	5.88	5.99	6.31	6.84	7.81	8.55	9.30	9.94	10.16	10.26	9.84	9.09	8.87	8.45	8.13	7.48	7.63
Mayo	6.84	6.52	6.20	5.99	5.77	5.56	5.35	5.13	4.92	5.24	5.77	6.52	7.48	8.13	8.77	9.30	9.62	9.94	9.84	9.41	8.87	8.45	7.81	7.27	7.28
Junio	6.42	5.99	5.77	5.56	5.45	5.35	5.13	5.13	5.13	5.13	5.45	6.20	6.95	7.81	8.55	9.09	9.62	9.73	9.62	9.30	8.87	8.13	7.48	6.95	7.03
Julio	6.20	6.09	5.99	5.77	5.67	5.56	5.35	5.45	5.45	5.56	5.99	6.63	7.27	8.02	8.55	9.09	9.62	9.73	9.52	9.20	8.45	7.81	7.16	6.63	7.11
Agosto	5.45	5.13	5.24	5.35	5.35	5.24	5.03	4.81	4.60	4.70	5.24	6.09	6.63	7.38	8.23	8.55	8.77	8.98	8.87	8.45	7.91	7.16	6.31	5.88	6.47
Septiembre	5.77	5.77	5.67	5.88	5.67	5.45	5.24	5.24	5.35	5.45	5.77	6.31	6.95	7.70	8.13	8.55	8.87	9.09	8.98	8.45	7.81	7.06	6.20	5.99	6.72
Octubre	3.74	3.64	3.85	3.74	3.85	3.53	3.31	3.21	2.99	2.99	3.31	4.17	5.24	6.09	6.52	6.95	7.16	7.48	7.38	6.74	6.09	5.77	5.24	4.28	4.89
Noviembre	4.81	4.28	3.85	3.53	3.31	2.99	2.99	2.89	2.46	2.46	3.10	3.64	4.60	5.24	5.88	6.42	6.63	6.74	6.63	6.74	6.42	6.09	5.56	5.24	4.69
Diciembre	4.17	3.85	3.42	3.10	3.21	3.10	2.99	2.99	2.99	2.67	2.25	2.99	3.85	4.38	5.03	5.99	6.52	6.63	6.42	5.99	5.56	4.92	4.70	4.60	4.26
Promedio	5.60	5.37	5.18	5.00	4.85	4.68	4.47	4.42	4.34	4.35	4.69	5.34	6.12	6.79	7.43	7.98	8.33	8.50	8.32	7.96	7.53	7.01	6.49	6.01	6.11

## ANEXOS

## 4.2 Potencial horario [kW], Guerrero Negro, BCS, aerogenerador AW-1500

Potencial eólico horario, Aerogenerador AW-1500 [kW]																									
Mes/Hora	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	Promedio
Enero	620	498	251	211	142	86	25	25	25	25	25	142	340	685	1316	1794	2320	2541	2430	2105	1895	1500	1228	826	877
Febrero	978	1059	1059	901	826	754	685	557	340	211	557	901	1500	1999	2430	2996	3345	3345	2881	2684	2105	1694	1596	1228	1525
Marzo	1794	1596	1228	901	620	442	251	251	442	442	620	978	1596	1895	2684	3345	3578	3812	3695	3578	3695	3345	2684	2105	1896
Abril	2430	2105	1999	1694	1316	1407	1228	1316	1316	1407	1694	2212	3228	4045	4837	5468	5664	5758	5367	4616	4390	3929	3578	2881	3079
Mayo	2212	1895	1596	1407	1228	1059	901	754	620	826	1228	1895	2881	3578	4276	4837	5160	5468	5367	4946	4390	3929	3228	2654	2764
Junio	1794	1407	1228	1059	978	901	754	754	754	754	978	1596	2320	3228	4045	4616	5160	5264	5160	4837	4390	3578	2881	2320	2532
Julio	1596	1500	1407	1228	1142	1059	901	978	978	1059	1407	1999	2654	3461	4045	4616	5160	5264	5054	4727	3929	3228	2541	1999	2580
Agosto	978	754	826	901	901	826	685	557	442	498	826	1500	1999	2767	3695	4045	4276	4503	4390	3929	3345	2541	1694	1316	2008
Septiembre	1228	1228	1142	1316	1142	978	826	826	901	978	1228	1694	2320	3112	3578	4045	4390	4616	4503	3929	3228	2430	1596	1407	2193
Octubre	112	86	142	112	142	62	25	11	0	0	25	251	826	1500	1895	2320	2541	2881	2767	2105	1500	1228	826	294	902
Noviembre	557	294	142	62	25	0	0	0	0	0	0	86	442	826	1316	1794	1999	2105	1999	2105	1794	1500	1059	826	789
Diciembre	251	142	42	0	11	0	0	0	0	0	0	0	142	340	685	1407	1895	1999	1794	1407	1059	620	498	442	531
Promedio	1212	1047	922	816	706	631	523	502	485	517	716	1104	1687	2287	2898	3440	3791	3963	3784	3411	2977	2460	1948	1525	1806

## ANEXOS

## 4.3 Análisis Tarifario 2009, Caso Base

H-M	Energía [kWh]		Costo Energía		D. F. [kW]	Costo D. F.	Subtotal	IVA 16%	Total
ENE	B	1,272,848	\$81,266.45	\$101,567.57	393	\$6,599.98	\$108,167.55	\$17,306.81	\$125,474.36
	I	225,568	\$20,301.12						
	P	0	\$0.00						
FEB	B	1,152,008	\$66,825.33	\$83,333.93	393	\$6,529.29	\$89,863.22	\$14,378.11	\$104,241.33
	I	201,400	\$16,508.60						
	P	0	\$0.00						
MAR	B	1,274,862	\$69,793.79	\$87,088.27	393	\$6,508.44	\$93,596.71	\$14,975.47	\$108,572.19
	I	223,554	\$17,294.48						
	P	0	\$0.00						
ABR	B	0	\$0.00	\$126,434.71	2,014	\$33,590.42	\$160,025.13	\$25,604.02	\$185,629.15
	I	1,002,972	\$80,685.24						
	P	447,108	\$45,749.47						
MAY	B	0	\$0.00	\$125,782.05	2,014	\$33,728.30	\$159,510.35	\$25,521.66	\$185,032.01
	I	1,011,028	\$77,017.00						
	P	487,388	\$48,765.04						
JUN	B	0	\$0.00	\$117,237.57	2,014	\$33,303.81	\$150,541.39	\$24,086.62	\$174,628.01
	I	996,930	\$73,013.62						
	P	453,150	\$44,223.95						
JUL	B	0	\$0.00	\$123,357.69	2,014	\$32,930.45	\$156,288.14	\$25,006.10	\$181,294.24
	I	1,031,168	\$77,488.31						
	P	467,248	\$45,869.38						
AGO	B	0	\$0.00	\$136,825.15	2,014	\$32,924.25	\$169,749.40	\$27,159.90	\$196,909.31
	I	1,011,028	\$86,061.81						
	P	487,388	\$50,763.33						
SEP	B	0	\$0.00	\$126,678.04	2,014	\$33,026.50	\$159,704.55	\$25,552.73	\$185,257.27
	I	1,017,070	\$82,484.38						
	P	433,010	\$44,193.67						
OCT	B	165,148	\$9,817.41	\$130,374.68	2,014	\$33,204.66	\$163,579.34	\$26,172.69	\$189,752.04
	I	906,300	\$76,136.17						
	P	426,968	\$44,421.09						
NOV	B	1,232,568	\$81,349.49	\$101,638.34	393	\$6,569.47	\$108,207.80	\$17,313.25	\$125,521.05
	I	217,512	\$20,288.85						
	P	0	\$0.00						
DIC	B	1,278,890	\$91,637.39	\$113,868.62	393	\$6,564.33	\$120,432.95	\$19,269.27	\$139,702.22
	I	219,526	\$22,231.23						
	P	0	\$0.00						
Período	B	6,376,324	\$400,689.85	\$1,374,186.61		\$265,479.91	\$1,639,666.52	\$262,346.64	\$1,902,013.16
	I	8,064,056	\$649,510.82						
	P	3,202,260	\$323,985.94						

## Costo nivelado mensual por rubro

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
<b>Energía [MWh]</b>	1,498	1,353	1,498	1,450	1,498	1,450	1,498	1,498	1,450	1,498	1,450	1,498
<b>Dem Facturable</b>	0.44	0.48	0.43	2.32	2.25	2.30	2.20	2.20	2.28	2.22	0.45	0.44
<b>Base</b>	5.42	4.94	4.66	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.66	5.61	6.12
<b>Intermedia</b>	1.35	1.22	1.15	5.56	5.14	5.04	5.17	5.74	5.69	5.08	1.40	1.48
<b>Punta</b>	0.00	0.00	0.00	3.15	3.25	3.05	3.06	3.39	3.05	2.96	0.00	0.00
<b>IVA %10</b>	1.155	1.062	0.999	1.766	1.703	1.661	1.669	1.813	1.762	1.747	1.194	1.286
<b>Total [¢/kWh]</b>	8.374	7.702	7.246	12.801	12.349	12.043	12.099	13.141	12.776	12.664	8.656	9.323

## Costo nivelado anual de Energía [¢US/kWh]

Energía	Demanda	IVA	Total
7.79	1.50	1.49	10.78

## ANEXOS

## 4.4 Análisis económico Planta Desaladora

Inversión	
[\$US]	\$ 23,000,000
Tasa desc.	10%

Capacidad Total	
lps	200
[m <sup>3</sup> /hr]	720
[m <sup>3</sup> /día]	17280

Costos	\$ 830,000
--------	------------

Electricidad	\$ 1,902,013
--------------	--------------

VALORES CORRIENTES				
año	Prod [m <sup>3</sup> ]	Costo Anual	Electricidad	Inversión
-1	0	0		\$11,500,000
0	0	0		\$11,500,000
1	6,307,200	\$ 830,000	\$ 1,902,013	0
2	6,307,200	\$ 830,000	\$ 1,902,013	0
3	6,307,200	\$ 830,000	\$ 1,902,013	0
4	6,307,200	\$ 830,000	\$ 1,902,013	0
5	6,307,200	\$ 830,000	\$ 1,902,013	0
6	6,307,200	\$ 830,000	\$ 1,902,013	0
7	6,307,200	\$ 830,000	\$ 1,902,013	0
8	6,307,200	\$ 830,000	\$ 1,902,013	0
9	6,307,200	\$ 830,000	\$ 1,902,013	0
10	6,307,200	\$ 830,000	\$ 1,902,013	0
11	6,307,200	\$ 830,000	\$ 1,902,013	0
12	6,307,200	\$ 830,000	\$ 1,902,013	0
13	6,307,200	\$ 830,000	\$ 1,902,013	0
14	6,307,200	\$ 830,000	\$ 1,902,013	0
15	6,307,200	\$ 830,000	\$ 1,902,013	0
16	6,307,200	\$ 830,000	\$ 1,902,013	0
17	6,307,200	\$ 830,000	\$ 1,902,013	0
18	6,307,200	\$ 830,000	\$ 1,902,013	0
19	6,307,200	\$ 830,000	\$ 1,902,013	0
20	6,307,200	\$ 830,000	\$ 1,902,013	0
<b>TOTAL</b>	126,144,000	\$ 16,600,000	\$ 38,040,260	\$ 23,000,000

VALOR PRESENTE NETO				
Deflactor	Prod [m <sup>3</sup> ]	Costo Anual	Electricidad	Inversión
1.100	0	0	0	\$12,650,000
1.000	0	0	0	\$11,500,000
0.909	5,733,818	\$ 754,545	\$ 1,729,103	\$0
0.826	5,212,562	\$ 685,950	\$ 1,571,912	\$0
0.751	4,738,693	\$ 623,591	\$ 1,429,011	\$0
0.683	4,307,902	\$ 566,901	\$ 1,299,100	\$0
0.621	3,916,275	\$ 515,365	\$ 1,181,000	\$0
0.564	3,560,250	\$ 468,513	\$ 1,073,637	\$0
0.513	3,236,591	\$ 425,921	\$ 976,033	\$0
0.467	2,942,355	\$ 387,201	\$ 887,303	\$0
0.424	2,674,868	\$ 352,001	\$ 806,639	\$0
0.386	2,431,699	\$ 320,001	\$ 733,308	\$0
0.350	2,210,635	\$ 290,910	\$ 666,644	\$0
0.319	2,009,668	\$ 264,464	\$ 606,040	\$0
0.290	1,826,971	\$ 240,421	\$ 550,945	\$0
0.263	1,660,883	\$ 218,565	\$ 500,859	\$0
0.239	1,509,894	\$ 198,695	\$ 455,327	\$0
0.218	1,372,630	\$ 180,632	\$ 413,933	\$0
0.198	1,247,846	\$ 164,211	\$ 376,303	\$0
0.180	1,134,405	\$ 149,283	\$ 342,094	\$0
0.164	1,031,278	\$ 135,712	\$ 310,994	\$0
0.149	937,525	\$ 123,374	\$ 282,722	\$0
<b>TOTAL</b>	53,696,749	\$ 7,066,258	\$ 16,192,909	\$ 24,150,000

<b>Costo Nivelado Agua</b>
<b>88.29 [¢US/m<sup>3</sup>]</b>

## ANEXOS

## 4.5 Análisis económico Parque Eólico

Inversión		FP	28.14%
[\$US/kW]	1000	Pot [kW]	2110.5
[\$US]	\$7,500,000	E año [kWh]	18,487,980
Tasa desc.	10%		

Unidades	[kW/unidad]	Total [kW]
5	1500	7500

Costo anual	\$	500,000
-------------	----	---------

VALORES CORRIENTES					
año	Gen [kWh]	CO <sub>2</sub>	Gobierno	Costos	Inversión
-1	0	0	0	0	\$1,500,000
0	0	0	0	0	\$6,000,000
1	18,487,980	\$ 116,474	\$ 184,880	\$ 500,000	0
2	18,487,980	\$ 116,474	\$ 184,880	\$ 500,000	0
3	18,487,980	\$ 116,474	\$ 184,880	\$ 500,000	0
4	18,487,980	\$ 116,474	\$ 184,880	\$ 500,000	0
5	18,487,980	\$ 116,474	\$ 184,880	\$ 500,000	0
6	18,487,980	\$ 116,474	\$ 184,880	\$ 500,000	0
7	18,487,980	\$ 116,474	\$ 184,880	\$ 500,000	0
8	18,487,980	\$ 116,474	\$ 184,880	\$ 500,000	0
9	18,487,980	\$ 116,474	\$ 184,880	\$ 500,000	0
10	18,487,980	\$ 116,474	\$ 184,880	\$ 500,000	0
11	18,487,980	\$ 116,474	\$ 184,880	\$ 500,000	0
12	18,487,980	\$ 116,474	\$ 184,880	\$ 500,000	0
13	18,487,980	\$ 116,474	\$ 184,880	\$ 500,000	0
14	18,487,980	\$ 116,474	\$ 184,880	\$ 500,000	0
15	18,487,980	\$ 116,474	\$ 184,880	\$ 500,000	0
16	18,487,980	\$ 116,474	\$ 184,880	\$ 500,000	0
17	18,487,980	\$ 116,474	\$ 184,880	\$ 500,000	0
18	18,487,980	\$ 116,474	\$ 184,880	\$ 500,000	0
19	18,487,980	\$ 116,474	\$ 184,880	\$ 500,000	0
20	18,487,980	\$ 116,474	\$ 184,880	\$ 500,000	0
<b>TOTAL</b>	<b>369,759,600</b>	<b>\$ 2,329,485</b>	<b>\$ 3,697,596</b>	<b>\$ 10,000,000</b>	<b>\$ 7,500,000</b>

VALOR PRESENTE NETO					
Deflactor	Gen [kWh]	CO <sub>2</sub>	Gobierno	Costo	Inversión
1.100	0	0	0	0	\$1,650,000
1.000	0	0	0	0	\$6,000,000
0.909	16,807,255	\$ 105,886	\$ 168,073	\$ 454,545.45	\$0
0.826	15,279,322	\$ 96,260	\$ 152,793	\$ 413,223.14	\$0
0.751	13,890,293	\$ 87,509	\$ 138,903	\$ 375,657.40	\$0
0.683	12,627,539	\$ 79,553	\$ 126,275	\$ 341,506.73	\$0
0.621	11,479,581	\$ 72,321	\$ 114,796	\$ 310,460.66	\$0
0.564	10,435,983	\$ 65,747	\$ 104,360	\$ 282,236.97	\$0
0.513	9,487,257	\$ 59,770	\$ 94,873	\$ 256,579.06	\$0
0.467	8,624,779	\$ 54,336	\$ 86,248	\$ 233,253.69	\$0
0.424	7,840,708	\$ 49,396	\$ 78,407	\$ 212,048.81	\$0
0.386	7,127,917	\$ 44,906	\$ 71,279	\$ 192,771.64	\$0
0.350	6,479,924	\$ 40,824	\$ 64,799	\$ 175,246.95	\$0
0.319	5,890,840	\$ 37,112	\$ 58,908	\$ 159,315.41	\$0
0.290	5,355,309	\$ 33,738	\$ 53,553	\$ 144,832.19	\$0
0.263	4,868,463	\$ 30,671	\$ 48,685	\$ 131,665.63	\$0
0.239	4,425,875	\$ 27,883	\$ 44,259	\$ 119,696.02	\$0
0.218	4,023,523	\$ 25,348	\$ 40,235	\$ 108,814.57	\$0
0.198	3,657,748	\$ 23,044	\$ 36,577	\$ 98,922.33	\$0
0.180	3,325,226	\$ 20,949	\$ 33,252	\$ 89,929.39	\$0
0.164	3,022,932	\$ 19,044	\$ 30,229	\$ 81,754.00	\$0
0.149	2,748,120	\$ 17,313	\$ 27,481	\$ 74,321.81	\$0
<b>TOTAL</b>	<b>157,398,596</b>	<b>\$ 991,611</b>	<b>\$ 1,573,986</b>	<b>\$ 4,256,782</b>	<b>\$ 7,650,000</b>

Bonos de CO <sub>2</sub>	
[\$US/ton]	10
[ton/MWh]	0.63

Subsidio Gubernamental	
[\$US/MWh]	10

Costo nivelado Energía	
5.935	[cUS/kWh]

## ANEXOS

## 4.6 Análisis económico ALTERNATIVA I (Energía Eólica + Consumo de la red, producción 100%)

Inversión		Capacidad Total	
[\$US]	\$ 23,000,000	lps	200
Tasa desc.	10%	[m <sup>3</sup> /hr]	720
		[m <sup>3</sup> /día]	17280
Costos	\$ 830,000	Electricidad	\$ 936,002

VALORES CORRIENTES				
año	Prod [m <sup>3</sup> ]	Costo Anual	Electricidad	Inversión
-1	0	0		\$11,500,000
0	0	0		\$11,500,000
1	6,307,200	\$ 830,000	\$ 936,002	0
2	6,307,200	\$ 830,000	\$ 936,002	0
3	6,307,200	\$ 830,000	\$ 936,002	0
4	6,307,200	\$ 830,000	\$ 936,002	0
5	6,307,200	\$ 830,000	\$ 936,002	0
6	6,307,200	\$ 830,000	\$ 936,002	0
7	6,307,200	\$ 830,000	\$ 936,002	0
8	6,307,200	\$ 830,000	\$ 936,002	0
9	6,307,200	\$ 830,000	\$ 936,002	0
10	6,307,200	\$ 830,000	\$ 936,002	0
11	6,307,200	\$ 830,000	\$ 936,002	0
12	6,307,200	\$ 830,000	\$ 936,002	0
13	6,307,200	\$ 830,000	\$ 936,002	0
14	6,307,200	\$ 830,000	\$ 936,002	0
15	6,307,200	\$ 830,000	\$ 936,002	0
16	6,307,200	\$ 830,000	\$ 936,002	0
17	6,307,200	\$ 830,000	\$ 936,002	0
18	6,307,200	\$ 830,000	\$ 936,002	0
19	6,307,200	\$ 830,000	\$ 936,002	0
20	6,307,200	\$ 830,000	\$ 936,002	0
<b>TOTAL</b>	<b>126,144,000</b>	<b>\$ 16,600,000</b>	<b>\$ 18,720,040</b>	<b>\$ 23,000,000</b>

VALOR PRESENTE NETO				
Deflactor	Prod [m <sup>3</sup> ]	Costo Anual	Electricidad	Inversión
1.100	0	0	0	\$12,650,000
1.000	0	0	0	\$11,500,000
0.909	5,733,818	\$ 754,545	\$ 850,911	\$0
0.826	5,212,562	\$ 685,950	\$ 773,555	\$0
0.751	4,738,693	\$ 623,591	\$ 703,232	\$0
0.683	4,307,902	\$ 566,901	\$ 639,302	\$0
0.621	3,916,275	\$ 515,365	\$ 581,184	\$0
0.564	3,560,250	\$ 468,513	\$ 528,349	\$0
0.513	3,236,591	\$ 425,921	\$ 480,317	\$0
0.467	2,942,355	\$ 387,201	\$ 436,652	\$0
0.424	2,674,868	\$ 352,001	\$ 396,956	\$0
0.386	2,431,699	\$ 320,001	\$ 360,869	\$0
0.350	2,210,635	\$ 290,910	\$ 328,063	\$0
0.319	2,009,668	\$ 264,464	\$ 298,239	\$0
0.290	1,826,971	\$ 240,421	\$ 271,126	\$0
0.263	1,660,883	\$ 218,565	\$ 246,479	\$0
0.239	1,509,894	\$ 198,695	\$ 224,071	\$0
0.218	1,372,630	\$ 180,632	\$ 203,701	\$0
0.198	1,247,846	\$ 164,211	\$ 185,183	\$0
0.180	1,134,405	\$ 149,283	\$ 168,348	\$0
0.164	1,031,278	\$ 135,712	\$ 153,044	\$0
0.149	937,525	\$ 123,374	\$ 139,131	\$0
<b>TOTAL</b>	<b>53,696,749</b>	<b>\$ 7,066,258</b>	<b>\$ 7,968,713</b>	<b>\$ 24,150,000</b>

Costo Nivelado Agua	
72.97	[cUS/m <sup>3</sup> ]



## ANEXOS

## 4.7 Análisis económico ALTERNATIVA II (Energía Eólica, producción variable)

Inversión		Capacidad Total	
[\$US]	\$ 23,000,000	lps	200
Tasa desc.	10%	[m <sup>3</sup> /hr]	720
		[m <sup>3</sup> /día]	17280

Costos	\$ 830,000	Electricidad	\$ 326,273
--------	------------	--------------	------------

VALORES CORRIENTES				
año	Prod [m <sup>3</sup> ]	Costo Anual	Electricidad	Inversión
-1	0	0		\$11,500,000
0	0	0		\$11,500,000
1	3,665,070	\$ 830,000	\$ 326,273	0
2	3,665,070	\$ 830,000	\$ 326,273	0
3	3,665,070	\$ 830,000	\$ 326,273	0
4	3,665,070	\$ 830,000	\$ 326,273	0
5	3,665,070	\$ 830,000	\$ 326,273	0
6	3,665,070	\$ 830,000	\$ 326,273	0
7	3,665,070	\$ 830,000	\$ 326,273	0
8	3,665,070	\$ 830,000	\$ 326,273	0
9	3,665,070	\$ 830,000	\$ 326,273	0
10	3,665,070	\$ 830,000	\$ 326,273	0
11	3,665,070	\$ 830,000	\$ 326,273	0
12	3,665,070	\$ 830,000	\$ 326,273	0
13	3,665,070	\$ 830,000	\$ 326,273	0
14	3,665,070	\$ 830,000	\$ 326,273	0
15	3,665,070	\$ 830,000	\$ 326,273	0
16	3,665,070	\$ 830,000	\$ 326,273	0
17	3,665,070	\$ 830,000	\$ 326,273	0
18	3,665,070	\$ 830,000	\$ 326,273	0
19	3,665,070	\$ 830,000	\$ 326,273	0
20	3,665,070	\$ 830,000	\$ 326,273	0
<b>TOTAL</b>	<b>73,301,400</b>	<b>\$ 16,600,000</b>	<b>\$ 6,525,460</b>	<b>\$ 23,000,000</b>

VALOR PRESENTE NETO				
Deflactor	Prod [m <sup>3</sup> ]	Costo Anual	Electricidad	Inversión
1.100	0	0	0	\$12,650,000
1.000	0	0	0	\$11,500,000
0.909	3,331,882	\$ 754,545	\$ 296,612	\$0
0.826	3,028,983	\$ 685,950	\$ 269,647	\$0
0.751	2,753,621	\$ 623,591	\$ 245,134	\$0
0.683	2,503,292	\$ 566,901	\$ 222,849	\$0
0.621	2,275,720	\$ 515,365	\$ 202,590	\$0
0.564	2,068,836	\$ 468,513	\$ 184,173	\$0
0.513	1,880,760	\$ 425,921	\$ 167,430	\$0
0.467	1,709,782	\$ 387,201	\$ 152,209	\$0
0.424	1,554,347	\$ 352,001	\$ 138,372	\$0
0.386	1,413,043	\$ 320,001	\$ 125,792	\$0
0.350	1,284,585	\$ 290,910	\$ 114,357	\$0
0.319	1,167,804	\$ 264,464	\$ 103,961	\$0
0.290	1,061,640	\$ 240,421	\$ 94,510	\$0
0.263	965,127	\$ 218,565	\$ 85,918	\$0
0.239	877,389	\$ 198,695	\$ 78,107	\$0
0.218	797,626	\$ 180,632	\$ 71,007	\$0
0.198	725,115	\$ 164,211	\$ 64,551	\$0
0.180	659,195	\$ 149,283	\$ 58,683	\$0
0.164	599,268	\$ 135,712	\$ 53,348	\$0
0.149	544,789	\$ 123,374	\$ 48,498	\$0
<b>TOTAL</b>	<b>31,202,807</b>	<b>\$ 7,066,258</b>	<b>\$ 2,777,746</b>	<b>\$ 24,150,000</b>

<b>Costo Nivelado Agua</b>	
<b>108.95</b>	<b>[¢US/m<sup>3</sup>]</b>

## REFERENCIAS

- [1] ***Estadísticas del Agua en México 2008***, Comisión Nacional del Agua, 1ra. Edición 2008.
- [2] ***Programa Hidráulico Regional 2002-2006, Región 1 Península de Baja California***, CONAGUA 2003.
- [3] ***Cuaderno de datos básicos 2006***, Centro Estatal de Información, Gobierno del estado de Baja California Sur, septiembre 2006.
- [4] ***Balance Nacional de Energía 2007***, SENER, 1era Edición 2008.
- [5] ***Estudio de los potenciales bioenergético, eólico, minihidráulico y solar en México***, Instituto de Investigaciones Eléctricas, Saldaña Flores Ricardo, marzo 2005.
- [6] ***Disponibilidad de agua subterránea en México***, CONAGUA, Chávez Guillén Rubén, marzo 2006.
- [7] ***Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Vizcaíno estado de Baja California***, CONAGUA Gerencia de Aguas Subterráneas, abril 2002.
- [8] ***Desalting Handbook for Planners***, 3era edición, RosTek Associates, Inc., Tampa, Florida, julio 2003.
- [9] ***FILMTEC™ Reverse Osmosis Membranes, Technical Manual***, DOW Water Solutions.
- [10] ***Integrated Wind Energy / Desalination System***, NREL, GE Global Research, julio 2005.
- [11] ***Desalación de Aguas Salobres y de Mar (Ósmosis Inversa)***, Medina San Juan Jose Antonio, ed. Mundi Prensa 2000.
- [12] ***Manual de Energía Eólica, Investigación, Diseño, Promoción, Construcción y Explotación de distinto tipo de instalaciones***, Escudero López José Ma., ed Mundi Prensa 2004.
- [13] ***Estado del arte y tendencias de la tecnología eoloeléctrica***, Borja Díaz Marco Antonio, IIE-UNAM, 1era edición 1998.
- [14] ***Plan de Acción para Eliminar Barreras para el Desarrollo de la Generación Eoloeléctrica en México***, Guía de Mejoras Prácticas, IIE, Snel Herman, 2008.
- [15] ***Energía Eólica***, Universidad de Cantabria, Departamento de energía eléctrica y energética, Fernández Díez Pedro.
- [16] ***Evaluación económica de un parque eólica de 20 MW***, Administración Nacional de Usinas y Trasmisiones Eléctricas, P. Mosto, M. Ibarburu, G. Triunfo, F.Fontana, Argentina julio 2001.
- [17] ***Wind Power & the CDM***, Risø National Laboratory, Denmark, junio 2005.

## REFERENCIAS

**ARTÍCULOS**

- [18] ***Desalination by using alternative energy: Review and state-of-the-art***, E. Mathioulakis, V. Belessiotis, E. Delyannis, DESALINATION, El Sevier, marzo 2006.
- [19] ***A wind-powered seawater reverse-osmosis system without batteries***, Marcos S. Miranda, David Infield, DESALINATION, El Sevier, abril 2002.
- [20] ***Operational analysis of an innovative wind powered reverse osmosis system installed in the Canary Islands***, J.A. Carta, J. González , V. Subiela, SOLAR ENERGY, El Sevier, Julio 2003.
- [21] ***Wind-driven seawater desalination plant for agricultural development on the islands of the County of Split and Dalmatia***, R. Vujčić, M. Krneta, RENEWABLE ENERGY, Pergamon, El Sevier, 1999.
- [22] ***Economic analysis of wind-powered desalination***, L. García-Rodríguez, V. Romero-Ternero, C. Gómez-Camacho, DESALINATION, agosto 2000.
- [23] ***Feasibility study on wind-powered desalination***, Markus Forstmeier, Fredrik Mannerheim, Fernando D'Amato, Minesh Shah, Yan Liub, Michael Baldea, Albert Stella, DESALINATION, El Sevier, mayo 2006.
- [24] ***Wind power potential of Baja California Sur, México***, O.A. Jaramillo, R. Saldaña, U. Miranda, RENEWABLE ENERGY, El Sevier, marzo 2004.

**INTERNET**

- [25] **[www.cfe.gob.mx](http://www.cfe.gob.mx)**
- [26] **[www.cna.gob.mx](http://www.cna.gob.mx)**
- [27] **[www.iie.org.mx](http://www.iie.org.mx)**
- [28] **[www.cre.gob.mx](http://www.cre.gob.mx)**
- [29] **[www.energyrecovery.com](http://www.energyrecovery.com)**
- [30] **[www.windpower.org](http://www.windpower.org)**
- [31] **[www.nrel.gov](http://www.nrel.gov)**
- [32] **[www.gamesacorp.com](http://www.gamesacorp.com)**
- [33] **[www.accion-energia.com](http://www.accion-energia.com)**