

**INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE
MONTERREY**

CAMPUS MONTERREY

**DIVISIÓN DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
PROGRAMA DE GRADUADOS EN INGENIERÍA**



**TECNOLÓGICO
DE MONTERREY®**

**DESALACIÓN DE AGUA SALOBRE MEDIANTE ÓSMOSIS INVERSA
EMPLEANDO ENERGÍA EÓLICA**

TESIS

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO
ACADÉMICO DE:**

**MAESTRO EN CIENCIAS
ESPECIALIDAD EN INGENIERÍA ENERGÉTICA**

POR:

RODRIGO CUÉ SAMPEDRO SOBERANIS

MONTERREY, N. L.

AGOSTO DE 2005

INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE
MONTERREY

CAMPUS MONTERREY

DIVISIÓN DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
PROGRAMA DE GRADUADOS EN INGENIERÍA

Los miembros del comité de tesis recomendamos que la presenta tesis del Ing. Rodrigo Cué Sampedro Soberanis sea aceptada como requisito parcial para obtener el grado académico de Maestro en Ciencias con Especialidad en:

INGENIERÍA ENERGÉTICA

Comité de tesis

Belzahet Treviño Arjona, Ph. D
Asesor

Armando Llamas
Terrés, Ph. D
SINODAL

Oliver Matthias Probst
Oleszewski, Ph. D
SINODAL

APROBADO

Federico Viramontes Brown, Ph. D
Director del Programa de Graduados en Ingeniería
Agosto 2005

Indice

1. INTRODUCCIÓN.....	5
1.1 Necesidad de Agua en el Mundo.....	5
1.2 Necesidad de Agua en México.....	5
1.3 Necesidad de Agua en zonas rurales áridas-semiáridas de México.....	6
1.4 Necesidad de Desalación en zonas rurales.....	7
1.5 Necesidad de sistemas de bajo costo de operación.....	8
2. OBJETIVO.....	10
3. ANTECEDENTES.....	10
3.1 Análisis de Alternativas para Desalar.....	10
3.1.1 Destilación Súbita por efecto flash (Multi-Stage Flash).....	11
3.1.2 Destilación por efecto múltiple (Multi-Effect Distillation).....	12
3.1.3 Compresión térmica de vapor (Termal Vapor Compretion).....	13
3.1.4 Destilación Solar.....	14
3.1.5 Congelación.....	15
3.1.6 Formación de Hidratos.....	15
3.1.7 Destilación por Membranas.....	16
3.1.8 Compresión Mecánica de Vapor (Vapor Compression).....	16
3.1.9 Electrodiálisis (ED).....	17
3.1.10 Intercambio Iónico.....	18
3.1.11 Ósmosis Inversa (OI).....	18
3.1.12 Resumen de las alternativas técnicas utilizadas en desalación.....	21
3.2 Ósmosis Inversa Aprovechando Fuentes Alternas de Energía.....	24
3.2.1 Energías Alternas.....	25
3.2.2 Energía Solar.....	25
3.2.3 Energía Eólica.....	27
3.2.4 Energía Eólica vs Solar.....	30
3.2.5 Sistema de Ósmosis Inversa Eólica.....	31
3.3 Funcionamiento de un molino de viento idealizado.....	33
3.4 Sistema de almacenamiento.....	35
4. METODOLOGÍA.....	36
4.1 Determinación y Caracterización del Recurso Eólico.....	36
4.1.1 Obtención de los parámetros de Rayleigh.....	37
4.1.2 Obtención de los parámetros de Weibull.....	38
4.1.3 Velocidad Promedio.....	39
4.1.4 Ajuste de la velocidad por efecto de la Altura.....	39
4.1.5 Efecto de la densidad del aire.....	40
4.2 Requerimiento de agua.....	41
4.3 Diseño del Sistema de Ósmosis Inversa.....	42
4.3.1 Flujos y Concentraciones.....	42
4.3.2 Cálculo de la Presión Osmótica.....	43
4.3.3 Cálculo de la Presión requerida para el Sistema de Ósmosis Inversa (POI).....	44
4.4 Diseño del Tanque Hidroneumático.....	44
4.5 Cálculo de la Presión Hidráulica que entregará el Molino de Viento.....	46
4.6 Cálculo de la Potencia de bombeo del Molino de Viento.....	46
4.7 Cálculo de la Eficiencia Experimental del Molino de Viento.....	47

4.8	Cálculo de la Potencia Eólica idealizada del Molino de Viento.....	47
4.9	Diseño del Molino de Viento.....	49
4.9.1	Cálculo del Diámetro de la Rueda de Aspas del Molino de Viento.....	49
5.	RESULTADOS.....	49
5.1	Determinación y Caracterización del Recurso Eólico.....	49
5.1.1	Obtención de los parámetros de Rayleigh.....	51
5.1.2	Obtención de los parámetros de Weibull.....	52
5.1.3	Velocidad Promedio.....	53
5.1.4	Ajuste de la velocidad por efecto de la Altura.....	53
5.1.5	Efecto de la densidad del aire.....	53
5.2	Requerimiento de agua.....	54
5.3	Diseño del Sistema de Ósmosis Inversa.....	55
5.3.1	Flujos y Concentraciones.....	55
5.3.2	Cálculo de la Presión Osmótica.....	60
5.3.3	Cálculo de la Presión requerida para el Sistema de Ósmosis Inversa (POI).....	61
5.4	Diseño del Tanque Hidroneumático.....	62
5.5	Cálculo de la Presión Hidráulica que entregará el Molino de Viento.....	63
5.6	Cálculo de la Potencia de bombeo del Molino de Viento.....	66
5.7	Cálculo de la Eficiencia Experimental del Molino de Viento.....	66
5.8	Cálculo de la Potencia Eólica del Molino de Viento.....	68
5.9	Diseño del Molino de Viento.....	68
5.9.1	Cálculo del Diámetro de la Rueda de Aspas del Molino de Viento.....	68
6.	CONCLUSION.....	69
7.	ANEXOS.....	70
7.1	Fotos.....	70
7.2	Aforo.....	72
7.3	Análisis de Agua.....	73
8.	BIBLIOGRAFÍA.....	78

2. OBJETIVO

Diseñar un sistema para desalar aguas salobres con bajo costo de operación.

3. ANTECEDENTES

3.1 Análisis de Alternativas para Desalar:

La desalación consiste en la remoción de sales y elementos indeseables presentes en aguas salobres o de mar, para generar agua potable para consumo humano y se puede llevar a cabo mediante diferentes procesos comercialmente disponibles:

- Procesos Térmicos.
- Energía Solar.
- Congelación.
- Membranas.
 - Electrodialisis.
 - Osmosis Inversa.

Cada uno de los diferentes métodos para desalinizar presenta sus ventajas y desventajas. Sin embargo, todos ellos convergen en tratar de eliminar las sales del agua al menor costo posible. Por lo tanto, el problema de abasto de agua potable finalmente recae en un problema energético, ya que existe una disponibilidad muy alta de agua salada. Si el costo de la energía fuese bajo el abasto de agua potable se solucionaría automáticamente.

Aún y cuando el costo de la desalinización varía en función del costo de la energía utilizada, es posible comparar las diferentes alternativas con base en su consumo energético.

DESALINIZACIÓN MEDIANTE ÓSMOSIS INVERSA EMPLEANDO ENERGÍA EÓLICA

1. INTRODUCCION

1.1 Necesidad de Agua en el Mundo

El Mundo está experimentando una crisis de agua [1-5]. Según la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. (FAO), 20 países sufrieron de problemas de la escasez del agua en 1990, mientras que en 1996 esta cifra se había elevado a 26 países (230 millones de personas). El Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP) calcula que en el año 2027 aproximadamente un tercio de la población del mundo sufrirán problemas serios de la escasez del agua. Las razones principales son el incremento en la demanda para el agua dulce causada por crecimiento mundial de la población y el deterioro de la calidad de los recursos acuíferos existentes como resultado de la contaminación y el aumento en las demandas industriales y agrícolas. Las consecuencias de la escasez del agua se harán presentes principalmente en las zonas áridas y semiáridas del planeta [6] [7], pero también serán sensibles las regiones costeras que experimentan crecimiento rápido de población, así como en las ciudades más grandes de los países en vías de desarrollo [7].

1.2 Necesidad de Agua en México

De acuerdo con los resultados del XII Censo General de Población y Vivienda del 2000, México tiene una población de 97.4 millones de habitantes. Con una tasa de crecimiento de 1.4 %, se estima que en el año 2025 México tendrá 123.4 millones de habitantes presentando un punto máximo de crecimiento en el año 2040 con 133 millones de habitantes. Actualmente la demanda de agua en México para los principales usos consuntivos se estima en 72 km³ al año, dicha cifra representa el 15 % de la disponibilidad natural media nacional clasificándonos de acuerdo a la ONU como un Recurso con Presión Moderada [8].

El principal uso del agua en México es agrícola con un 78 %, seguido por el uso urbano con un 12 %, el industrial con un 8 % y finalmente el pecuario con un 2 %. Aún y cuando las diferencias entre el uso agrícola y el resto de los usos son considerables, la

presión por la disponibilidad del agua entre los tres principales usuarios es ya evidente en ciertas zonas del país [8].

Actualmente la cobertura de agua potable en el territorio nacional presenta un 83.7 % como promedio, siendo de un 94.6 % en las zonas urbanas y de un 68.0 % en las zonas rurales. Dentro de pocos años México enfrentará cambios drásticos en la disponibilidad y calidad del agua, zonas como el Norte de México y el Sur de los Estados Unidos presentan ya fuertes competencias por el agua entre los diferentes usos. Mientras que en el sur del país la disponibilidad de agua es de 14,291 m³/hab/año en el norte del país es solo de 2,044 m³/hab/año [8].

1.3 Necesidad de Agua en zonas rurales áridas-semiáridas de México.

En México, más de la mitad del territorio (56%) [9] son regiones desérticas catalogadas como zonas áridas y semiáridas. En estas regiones la precipitación pluvial va desde 50 hasta 500 milímetros, pero debido a la variabilidad en la ocurrencia de esta, las sequías se pueden prolongar hasta años completos. Las causas de las sequías no se conocen con precisión, pero se admite que en general se deben a alteraciones de los patrones de circulación atmosférica, que a su vez están ocasionadas por el desigual calentamiento de la corteza terrestre y de las masas de aguas manifestados en fenómenos como “El Niño”[9].

Los habitantes del medio rural de estas zonas usan en promedio 12 litros de agua por día por habitante, cantidad que apenas les permite abastecer sus necesidades primarias. Esto se debe a que prácticamente se cuenta con muy pocos recursos hidráulicos, conformados por esporádicos pozos con tolerables contenidos de sales y a dispositivos de almacenamiento de escurrimientos pluviales (presas, estanques trampas de agua y aljibes). Pero estos dispositivos son en su mayoría de muy baja calidad, permitiendo una gran pérdida de agua por evaporación y por infiltración, y en ciertos periodos llegan a estar completamente secos. Además de que se contaminan fácilmente, dando una deficiente calidad del agua con altos contenidos de bacterias, trayendo como consecuencia una incidencia muy alta en enfermedades gastrointestinales y un índice considerable de mortalidad por enfermedades diarreicas en menores de 5 años.



Figura 1: Estanque donde la comunidad colecta el agua para consumo humano. Refugio de los Zedillo, Doctor Arroyo, Nuevo León.

Por esta razón, el agua subterránea se ha convertido en un elemento indispensable para elevar el suministro de agua, sin embargo la salinidad de las aguas subterráneas es mayor en las zonas áridas, debido a que en ellas la precipitación pluvial es escasa y la evaporación potencial muy alta, lo cual propicia la concentración de sales. De esta forma, la mayor parte de los cuerpos de agua que se encuentran en las zonas áridas son salobres, es decir tienen un contenido en sales que va de 1,000 a 20,000 miligramos por litro, lo que indica que no son aceptables para su consumo.

1.4 Necesidad de Desalación en zonas rurales

Debido a los escasos cuerpos de agua con concentraciones de sales aceptables, son pocas las poblaciones que en estas zonas cuentan con agua entubada y las pocas que si cuentan con el servicio, sólo disponen de 5 horas promedio al día. Ejemplo, en el municipio de Doctor Arroyo, Nuevo León, en la localidad de Los Medina (567 habitantes), se extrae agua subterránea con contenidos en sales alrededor de 900 mg/lit, esta fuente de agua

abastece esta localidad y las localidades de El Mirador (24 hab.) a 4 kilómetros, Santa Ana (407 hab.) a 10 kilómetros y el Tecolote (269 hab.) a 20 kilómetros. Pero la salinidad de esta agua aunque es tolerable para su consumo, trae problemas como corrosión en las tuberías y sistemas de bombeo además de que a la gente no le gusta ni bañarse ni lavar su ropa debido a que deja sedimentos. Por otro lado, el bombear el agua a estas distancias, eleva mucho los costos operativos.

Pero muchos pozos en distintas comunidades no se han aprovechado debido no solo al alto contenido de sales, también se ha detectado en el agua subterránea, concentraciones de fluoruros y arsénico, superiores a los establecidos en la Norma Oficial NOM-127-SSA1-1994, de tal modo que para su aprovechamiento es necesario el empleo de un tratamiento de potabilización del agua en forma previa a su consumo.

1.5 Necesidades de sistemas de bajo costo de operación

En algunas poblaciones ejidales donde los pozos perforados tenían agua con salinidades de hasta 10,000 ppm (partes por millón) , una dependencia del Gobierno Federal instaló plantas desaladoras. Cada planta fue dotada con excelentes equipos desaladores de ósmosis inversa, bombas de agua sumergibles para extraer el agua del pozo y tres recipientes de agua, dos recipientes de aproximadamente 50 mil litros y uno de 30 mil litros. El primer recipiente recibía el agua bombeada directamente del pozo, en el segundo se depositaba el agua ya libre de electrolitos y en el último se depositaba el concentrado de agua salada. Los equipos instalados y las bombas, operaban con energía eléctrica. Los altos costos en los recibos eléctricos, hicieron que ni los campesinos ni la dependencia pudieron absorber los costos operativos por lo que las plantas operaron por un lapso máximo de 4 a 6 meses [10].



Figura 2: Vista parcial de una planta desalinizadora construida en el ejido Mahoma durante 1978 y abandonada aproximadamente un año después de haber sido establecida. Municipio de Mazapil, Zacatecas.



Figura 3: Se puede observar lo que queda de la planta construida en el ejido Tanque de Aceros, puede apreciarse un pequeño cuarto de adobe donde tenían alojada la unidad de ósmosis inversa. Municipio de Mazapil, Zacatecas.

2. OBJETIVO

Diseñar un sistema para desalar aguas salobres con bajo costo de operación.

3. ANTECEDENTES

3.1 Análisis de Alternativas para Desalar:

La desalación consiste en la remoción de sales y elementos indeseables presentes en aguas salobres o de mar, para generar agua potable para consumo humano y se puede llevar a cabo mediante diferentes procesos comercialmente disponibles:

- Procesos Térmicos.
- Energía Solar.
- Congelación.
- Membranas.
 - Electrodialisis.
 - Osmosis Inversa.

Cada uno de los diferentes métodos para desalinizar presenta sus ventajas y desventajas. Sin embargo, todos ellos convergen en tratar de eliminar las sales del agua al menor costo posible. Por lo tanto, el problema de abasto de agua potable finalmente recae en un problema energético, ya que existe una disponibilidad muy alta de agua salada. Si el costo de la energía fuese bajo el abasto de agua potable se solucionaría automáticamente.

Aún y cuando el costo de la desalinización varía en función del costo de la energía utilizada, es posible comparar las diferentes alternativas con base en su consumo energético.

3.1.1 Destilación Súbita por efecto flash (Multi-Stage Flash)

La desalación obtenida por destilación consiste en evaporar agua para conseguir vapor que no contiene sales (éstas son volátiles a partir de 300° C), el vapor se condensa posteriormente en el interior o exterior de los tubos de la instalación. Los sistemas desaladores suelen funcionar por debajo de la presión atmosférica, por lo que necesitan un sistema de vacío (bombas o eyectores), además de extracción del aire y gases no condensables. La utilización de una cámara flash permite una evaporación súbita (y por lo tanto de carácter irreversible) previa a su posterior condensación. Generalmente, la cámara flash se sitúa en la parte baja de un condensador de dicho vapor generado en la cámara inferior. Por lo tanto, la recuperación de calor necesario para la evaporación se obtiene gracias a la unión sucesiva de etapas en cascada a diferente presión, y es necesario el aporte mínimo de la condensación eléctrica. Este es el proceso evaporativo más ampliamente utilizado en el mundo, de implantación masiva sobre todo en Oriente Medio. Ello se debe a varias razones:

- Es especialmente válido cuando la calidad del agua bruta no es buena (alta salinidad, temperatura y contaminación del agua aportada).
- Su acoplamiento con plantas de potencia para formar sistemas de cogeneración es muy fácil y permite una gran variabilidad de rangos de operación en ambas plantas.
- Su robustez en la operación diaria frente a otros procesos de destilación es notoria.
- La capacidad de las plantas MSF es mucho mayor que otras plantas destiladoras en virtud a la cantidad de etapas conectadas en cascada sin problemas de operación.

Sin embargo las plantas MSF tienen un grave inconveniente. Su consumo específico, definido como la cantidad de energía consumida para producir 1 m³ de agua desalada, es de los más altos de los procesos estudiados. A este consumo contribuyen el consumo térmico proveniente de la planta productora de electricidad, más alto que otros procesos de destilación debido al efecto flash; y el consumo eléctrico debido al gran número de bombas necesarias para la circulación de los flujos de planta. Además de su alto costo de operación, su costo de instalación no es más bajo que otros procesos de desalación [11].

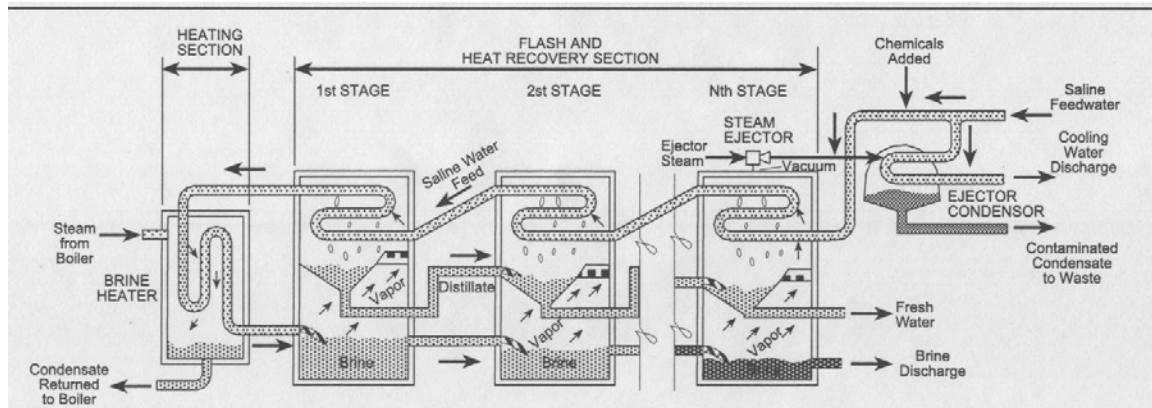


Figura 4: Diagrama de una unidad de destilación súbita por efecto flash .

3.1.2 Destilación por efecto múltiple (Multi-Effect Distillation)

Al contrario que en el proceso MSF por efecto flash, en la destilación por múltiple efecto (MED) la evaporación se produce de forma natural en una cara de los tubos de un intercambiador aprovechando el calor latente desprendido por la condensación del vapor en la otra cara del mismo. Una planta MED tiene varias etapas conectadas en serie a diferentes presiones de operación, dichos efectos sucesivos tiene cada vez un punto de ebullición más bajo por el efectos de dicha presión. Esto permite que el agua de alimentación experimente múltiples ebulliciones, en los sucesivos efectos, sin necesidad de recurrir a calor adicional a partir del primer efecto. El agua salada se transfiere luego al efecto siguiente para sufrir una evaporación y el ciclo se repite utilizando el vapor generado en cada efecto. Normalmente también existen cámaras flash para evaporar una porción del agua salada que pasa el siguiente efecto, gracias a su menor presión de operación. La primera etapa se nutre de vapor externo de un sistema recuperativo, una turbina de contrapresión (o extracción de una de condensación). Un condensador final recoge el agua dulce en la última etapa precalentando el agua de aportación al sistema. Por lo tanto las plantas MED también conforman sistemas de cogeneración al igual que las MSF consumiendo una porción de energía destinada a la producción eléctrica. La destilación por múltiple efecto no es un proceso solamente utilizado para la desalación. La capacidad de este tipo de plantas suele ser más reducida que las MSF (nunca suele superar los 15,000 m² por día) aunque ello se debe más a razones de índole política que operativa: las MSF más grandes se instalan en Oriente Medio y las mayores MED están instaladas en las islas del Caribe para abastecer de

agua estas zonas de gran presión turística. También es verdad que el número máximo de efectos conectados en serie raramente es mayor de 15, a excepción de las MED con múltiples efectos integrados en cada uno de ellos, llegando en este caso a un número total de más de 50. Sin embargo, tienen un mejor rendimiento global con respecto a una MSF: el ratio de ganancia en los destiladores de este tipo de plantas puede llegar a 15 sin ningún problema, reduciendo por lo tanto el consumo específico de este proceso respecto de una planta MSF con idénticas capacidades. Ello se debe principalmente a la irreversibilidad asociada al proceso de separación flash que aparece en los procesos MSF. Además el consumo eléctrico es menor que la MSF ya que necesita menos bombas de circulación al no existir recirculación de salmuera [11].

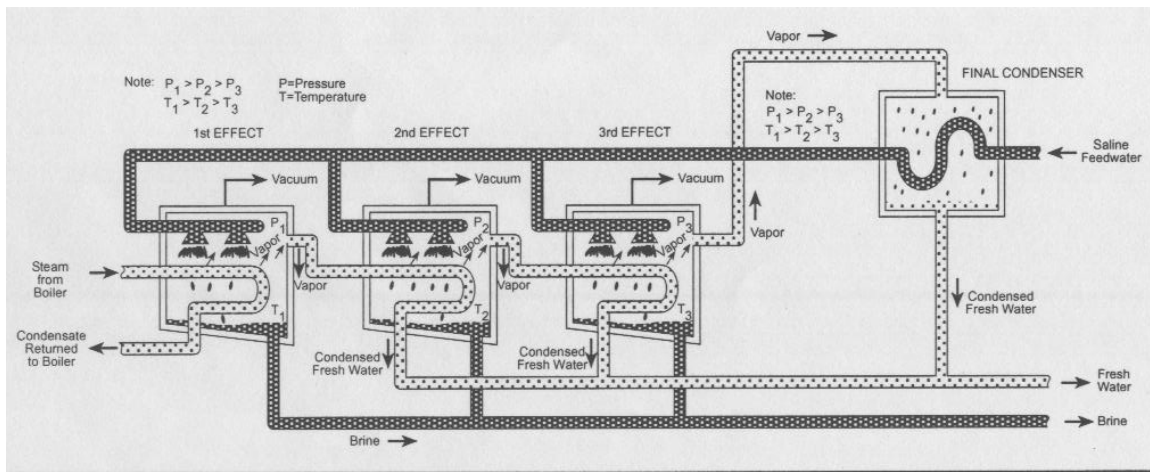


Figura 5: Diagrama de una unidad de destilación por múltiple efecto.

3.1.3 Compresión térmica de vapor (Termal Vapor Compretion)

La compresión térmica de vapor (TVC) obtiene el agua destilada con el mismo proceso que una destilación por múltiple efecto (MED), pero utiliza una fuente de energía térmica diferente: son los llamados compresores térmicos (o termocompresores), que consumen vapor de media presión proveniente de la planta de producción eléctrica (si tenemos una planta dual, sino sería de un vapor de proceso obtenido expresamente para ello) y que succiona parte del vapor generado en la última etapa a muy baja presión, comprimiéndose y dando lugar a un vapor de presión intermedia a las anteriores adecuado para aportarse a la

1ª etapa, que es la única que consume energía en el proceso. El rendimiento de este tipo de plantas es similar a las de las plantas MED, sin embargo su capacidad desaladora puede ser mucho mayor al permitirse una mayor adaptabilidad de toma de vapor de las plantas productoras del mismo. Muchas veces se las considera el mismo proceso, pero aquí se tratarán individualmente ya que el consumo de energía de la planta se realiza por un equipo diferente [11].

3.1.4 Destilación Solar

La energía solar es el método ideal para producir agua en zonas áridas y muy aisladas del resto de poblaciones. A pesar de tener un costo energético nulo y escasa inversión necesaria, su baja rentabilidad reside en su escasa producción por metro cuadrado de colector al destilarse tan sólo unos litros al día en el caso de condiciones climatológicas favorables. Por lo tanto no se han desarrollado a gran escala en lugares con un consumo elevado de agua dulce. El principio básico es el del efecto invernadero: el sol calienta una cámara de aire a través de un cristal transparente, en cuyo fondo tenemos agua salada en reposo. Dependiendo de la radiación solar y otros factores como la velocidad del viento (que enfría el vidrio exterior), una fracción de esta agua salada se evapora y se condensa en la cara interior del vidrio. Como dicho vidrio está colocado inclinado, las gotas caen en un canal que va recogiendo dicho condensado evitando que vuelvan a caer en el proceso de condensación a la lámina interior de salmuera. Aunque pueden utilizarse técnicas de concentración de los rayos solares apoyándose en lentes o espejos (parabólicos o lisos), no suelen compensar las mayores pérdidas de calor que ello acarrea y su mayor costo económico.

Pero la energía solar también puede ser la fuente de energía de un proceso de destilación, incluso de producción eléctrica para pequeñas instalaciones de ósmosis inversa. Por ejemplo, el uso de colectores de concentración parabólicos puede usarse en procesos MSF o MED dependiendo del costo de los colectores, que son los que determinan la producción de agua por metro cuadrado (de media producen 10 m^3 de agua dulce por m^2 de colector) y factores climáticos tales como el porcentaje del día en que la planta consume energía solar [11].

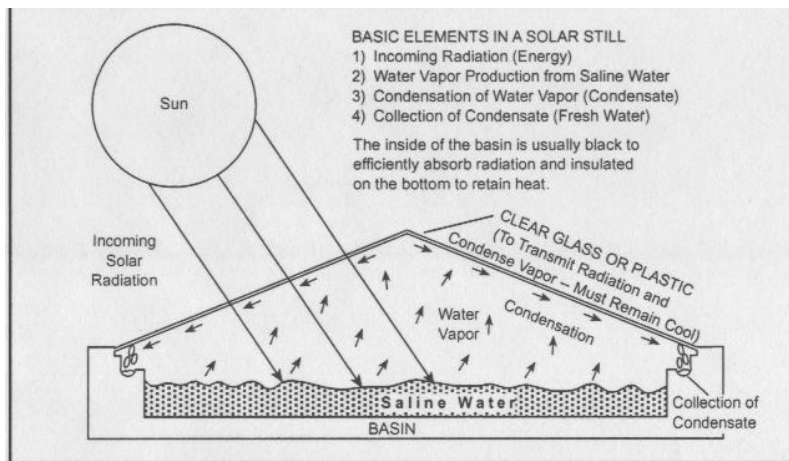


Figura 6: Diagrama de una unidad de destilación solar.

3.1.5 Congelación

Este proceso consiste en congelar el agua y recoger los cristales de agua pura formados para fundirlos y obtener un agua dulce independientemente de la concentración del agua inicial. Aunque pueda parecer un proceso muy sencillo tiene problemas de adaptación para su implantación a escala industrial, ya que el aislamiento térmico para mantener el frío y los mecanismos para la separación de los cristales de hielo deben mejorarse, así como adaptar la tecnología a intercambiadores de frío. El proceso de congelación es un fenómeno natural que se contempla con mucha facilidad en nuestro Planeta, alrededor del 70% del agua dulce está contenida en los polos terrestres. La utilización de hielo de los polos para el consumo humano es muy poco conveniente para la conservación del equilibrio térmico del planeta [11].

3.1.6 Formación de Hidratos

Es otro método basado en el principio de la cristalización, que consiste en obtener, mediante la adición de hidrocarburos a la solución salina, unos hidratos complejos en forma cristalina, con una relación molécula de hidrocarburo / molécula de agua del orden de 1/18. Al igual que el anterior proceso, su rendimiento energético es mayor que los de destilación, pero conlleva una gran dificultad tecnológica a resolver en cuanto a la separación y el lavado de los cristales que impiden su aplicación industrial.

3.1.7 Destilación por Membranas

Es un proceso combinado de evaporación y filtración. El agua salada bruta se calienta para mejorar la producción de vapor, que se expone a una membrana que permite el paso de vapor pero no del agua (membrana hidrófoba). Después de atravesar la membrana el vapor se condensa, sobre una superficie mas fría, para producir agua desalada. En estado líquido, esta agua no puede retroceder atravesando la membrana por lo que es recogida y conducida hacia la salida [11].

3.1.8 Compresión Mecánica de Vapor (Vapor Compression)

En la compresión mecánica de vapor (VC) se evapora el agua salada, en un lado de la superficie de intercambio, y se comprime lo suficiente para que condense en el otro lado y pueda mantenerse el ciclo de destilación de agua salvando las pérdidas del proceso y la elevación de la temperatura de ebullición del agua salada respecto a la pura. Simplificando todos los elementos auxiliares podemos ver que el vapor interior de los tubos es comprimido a presión atmosférica en torno a 0.2 bares en un compresor volumétrico especial para trasegar vapor. El vapor ligeramente sobrecalentado se condensa en el exterior de los tubos del intercambiador, siendo recogido por una bomba en su parte inferior. Como puede observarse, si el proceso fuera ideal sólo deberíamos vencer la elevación del punto de ebullición del agua salada para mantener el proceso, aunque no es posible realmente; en todo caso el consumo específico de estas instalaciones es el más bajo de los procesos de destilación: normalmente el consumo eléctrico equivalente está sobre los 10 kWh/m³ (la mitad que una planta MSF).

Aunque su consumo específico es como mucho el menor de las instalaciones de destilación, tiene un gran inconveniente: la inexistencia de compresores volumétrico de vapor de baja presión de tamaño suficiente para una producción considerable. Así no se conocen unidades CV mayores de 5,000 m³/día, y estos compresores sólo permiten un máximo de 3 etapas a diferentes presiones conectadas en cascada. Normalmente existen intercambiadores de precalentamiento del agua de aporte con el destilado y la salmuera tirada el mar (como el número de etapas es reducido hay que recuperar la energía de salida de la salmuera), ayudados por una resistencia eléctrica en los arranques, así como todos los dispositivos de tratamiento de agua anteriores y posteriores el proceso de destilación [11].

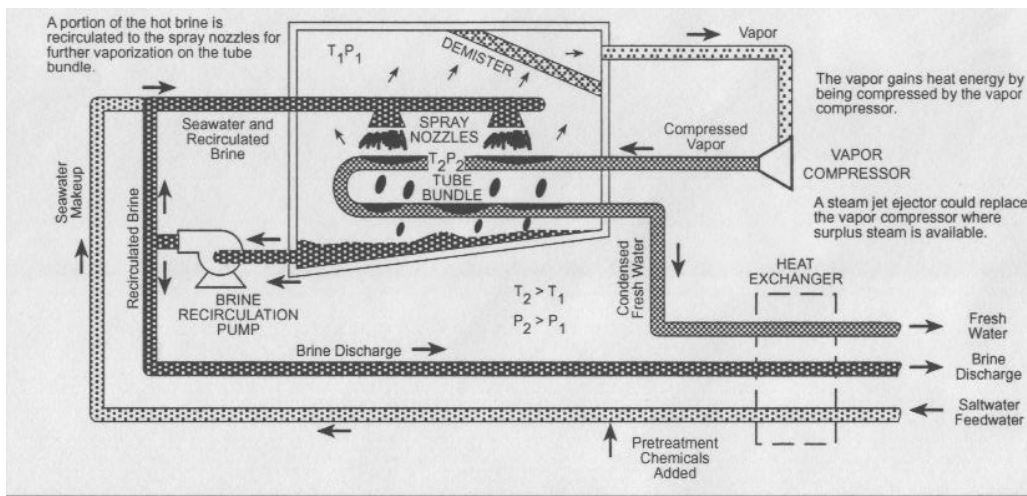


Figura 7: Diagrama de una unidad de compresión mecánica de vapor.

3.1.9 Electrodialisis (ED)

Este proceso permite la desmineralización de aguas salobres haciendo que los iones de diferente signo se muevan hacia zonas diferentes aplicando campos eléctricos con diferentes signo se muevan hacia zonas diferentes aplicando campos eléctricos con diferencias de potencial aplicados sobre electrodos, y utilizando membranas selectivas que permitan sólo el paso de los iones en una solución electrolítica como es el agua salada. Los iones van a los compartimentos atraídos por los electrodos del signo contrario, dejando en cubas paralelas el agua pura y en el resto el agua salada más concentrada. Es un proceso que sólo puede separar sustancias que están ionizadas y por lo tanto su utilidad y rentabilidad está sólo especialmente indicada en el tratamiento de aguas salobres o reutilización de aguas residuales, con un consumo específico y de mantenimiento comparable en muchos casos a la ósmosis inversa. En algunas ocasiones, la polaridad de los ánodos y cátodos se invierte alternativamente para evitar el ensuciamiento de las membranas selectivas al paso de dichos iones. En este caso se habla de electrodialisis reversible (EDR) [11].

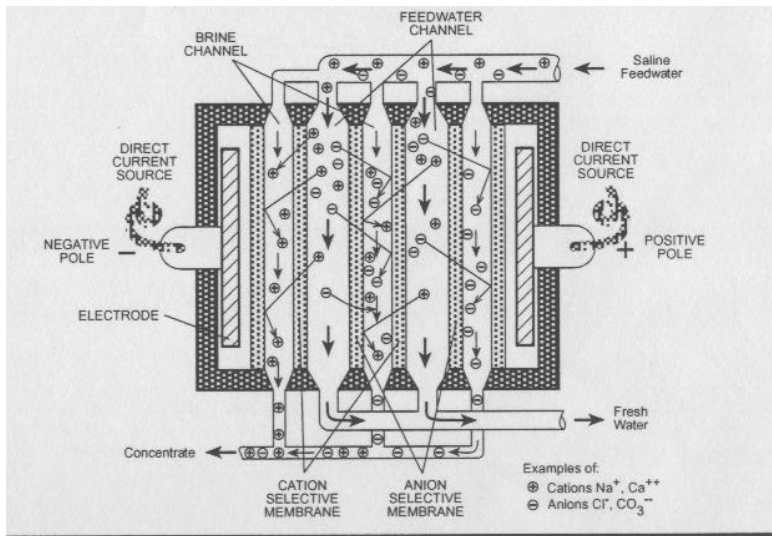


Figura 8: Diagrama de una unidad de Electrodialisis.

3.1.10 Intercambio Iónico

Las resinas de intercambio iónico son sustancias insolubles, que cuentan con la propiedad de que intercambian iones con la sal disuelta si se ponen en contacto. Hay dos tipos de resinas: aniónicas que sustituyen aniones del agua por iones OH⁻ (permutación básica), y resinas catiónicas que sustituyen cationes por iones H⁺ (permutación ácida). La desmineralización por intercambio iónico proporciona agua de gran calidad si la concentración de sal es menor de 1 gr./l. Por lo tanto se utiliza para acondicionar agua para calderas a partir de vapores recogidos o acuíferos, o en procesos industriales con tratamientote afino. Las resinas normalmente necesitan regeneración con agentes químicos para sustituir los iones originales y los fijados en la resina, y terminan por agotarse. Su cambio implica un costo difícilmente absorbible por el proceso de desalinización para aguas de mar y aguas salobres [11].

3.1.11 Ósmosis Inversa (OI)

La ósmosis es un proceso natural que ocurre en plantas y animales. De forma esquemática se puede decir que cuando dos soluciones con diferentes concentraciones se separan por medio de una membrana semipermeable, existe una circulación natural de la solución menos concentrada para igualar las concentraciones finales, con lo que la diferencia de altura obtenida se traduce en una diferencia de presión, llamada osmótica.

Sin embargo aplicando una presión externa que sea mayor a la presión osmótica de una disolución respecto de otra, el proceso se puede invertir, haciendo circular agua de la disolución más concentrada y purificando la zona con menor concentración, obteniendo finalmente un agua de pureza admisible, aunque no comparable a la de procesos de destilación. Por eso es altamente recomendable para la filtración de aguas salobres, en las que la sal a rechazar es mucho menor que en aguas marinas. La cantidad de perneado depende de la diferencia de presiones aplicada a la membrana, sus propiedades y la concentración del agua bruta y la calidad del agua perneada suele estar en trono a los 300 – 5000 ppm de total de sólidos disueltos, cifra un orden de magnitud mayor al agua obtenida en un proceso de evaporación.

Una membrana para realizar ósmosis inversa debe resistir presiones mucho mayores a la diferencia de presiones osmóticas de ambas soluciones. Por ejemplo, un agua bruta de 35,000 ppm de total de sólidos disueltos a 25° C tiene una presión osmótica de alrededor de 25 bar, pero son necesarios 70 bar para obtener perneado. Además debe ser permeable al agua para permitir el flujo y rechazar un porcentaje elevado de sales. Sin embargo no se puede considerar la OI como un proceso de filtración normal, ya que la dirección de flujo del agua bruta es paralela y no perpendicular como un caso cualquiera de filtración. Ello implica que tan sólo una parte del agua bruta de alimentación pasa realmente a través de la membrana (un proceso de filtración lo haría en su totalidad), y que no se acumulen sales en la membrana al arrastrarse por el agua bruta que no pasa por la membrana. El proceso de ósmosis inversa es tan simple que a priori solo son necesarias las membranas que filtren el contenido salino y el equipo presurizador.

Pretratamiento del agua en la ósmosis inversa:

- Clorado para reducir la carga orgánica y bacteriológica del agua bruta.
- Filtración con arena para reducir la turbidez.
- Acidificación para reducir el pH y limitar la formación de depósitos calcáreos.
- Inhibición con polifosfatos de la formación de sulfatos de calcio y bario.
- Declorado para eliminar el cloro residual.
- Cartuchos de filtrado de partículas requeridos por los fabricantes de membranas.

- Microfiltración (MF) y ultrafiltración (UF) en el caso de aplicaciones industriales muy específicas o en reutilización de aguas residuales.

Las etapas del pretratamiento son las siguientes:

Bombeo de agua de aporte, Dosificación de ácido clorhídrico, Dosificación de hipoclorito sódico, Dosificación de reactivo anti-incrustante, Filtración sobre lecho de sílex, Filtración de seguridad sobre cartuchos, Dosificación de reactivo reductor, Tratamiento por ósmosis inversa, Bombeo de alta presión, Módulos de ósmosis inversa, Equipo de limpieza de membranas y “flushing”.

Post-tratamiento del agua desalada:

Dosificación de hipoclorito sódico, Re-endurecimiento, Acumulación y bombeo de agua producto.

El proceso es el siguiente:

El agua del mar o salobre pasa a través de los muros tras lo cual las bombas de transferencia incrementan la presión en el con lo que puede pasar al pretratamiento. En el pretratamiento los sólidos son removidos y un desinfectante es inyectado para prevenir la actividad microbiológica en las tuberías y en el sistema. Acidificarlo también es necesario corriente arriba de la unidad filtradora. El proceso de coagulación es ayudado por coagulaciones sucesivas en el agua acidificada, posteriormente los microfoculos que se han formado se retiran por un filtro multitamaño. Los filtros se hallan divididos en compartimentos independientes, los cuales consisten en múltiples capas con diferentes tamaños de poro. Siendo cada filtro purgado o cambiado periódicamente según la carrera que tenga. Dicha limpieza se hace pasando aire desde el fondo hacia la parte superior del efluente que será descargado en el mar. También un agente decolorante es inyectado en el agua para eliminar el desinfectante. Cerca de un 50 % del agua tratada es convertida en permeable la cual es bombeada a través de la membrana a una presión suficiente para que pase a través de ella. El concentrado que posteriormente queda es descargado al mar o utilizado para aplicaciones de riego en plantas resistentes a salinidad, acuicultura de organismos salinos o simplemente evaporación en lagunas.

Ventajas de la ósmosis inversa sobre las demás tecnologías:

- El consumo eléctrico específico de una instalación de ósmosis inversa es el menor de los estudiados hasta ahora (6-8 kWh/m³), pero se puede aprovechar la energía contenida en la salmuera rechazada a alta presión para rebajar esa cifra hasta por debajo de 3 kWh/m³
- Al ser un proceso de filtración, el costo energético depende de la concentración del agua bruta, cosa que no ocurre en las tecnologías de evaporación. Aguas salobres utilizan menor cantidad de energía.
- Permite una adaptabilidad mayor que otras plantas a una ampliación de su capacidad si la demanda es creciente en la zona.
- Los costos de inversión de una instalación de OI están por debajo de otras tecnologías de destilación.

Sin embargo, las limitaciones tecnológicas asociadas al ensuciamiento de las membranas con algunos tipos de aguas impiden su implantación total en el resto del mundo. El ensuciamiento mineral y orgánico de las membranas representa el mayor problema operacional de los sistemas de ósmosis inversa. Las técnicas comunes de pretratamiento del agua de alimentación, consistentes en filtración, suavización y adición de reactivos químicos son costosas y de efectos limitados [11].

3.1.12 Resumen de las alternativas técnicas utilizadas en desalación

Tras la comparación de las técnicas de desalación actualmente existentes, encontramos sólo algunos procesos tecnológicamente viables actualmente a escala industrial: Evaporación súbita por efecto flash (MSF), destilación múltiple efecto (MED), termocompresión de vapor (TCV), compresión de vapor mecánica (VC), ósmosis inversa (OI) y electrodiálisis (ED).

Características	MSF	MED-TVC	VC	OI	ED
Tipo de energía	Térmica	Térmica	Eléctrica	Eléctrica	Eléctrica
Consumo energético primario (KJ/KG)	Alto (>200)	Alto/medio (150-200)	Medio (100-150)	Bajo (<80)	Bajo (<30)
Costo instalaciones	Alto	Alto/medio	Alto	Medio	Medio
Capacidad producción (m3/día)	Alta (>50000)	Media (<20000)	Baja (<5000)	Alta (>50000)	Media (<30000)
Posibilidad ampliación	Difícil	Difícil	Difícil	Fácil	Fácil
Fiabilidad de operación	Alta	Media	Baja	Alta	Alta
Desalación de Agua Salobre	Sí	Sí	Sí	Sí	No
Calidad de agua desalada (ppm)	Alta (<50)	Alta (<50)	Alta (<50)	Media (300-500)	Media (<300)
Superficie de terreno requerida para instalación	Mucha	Media	Poca	Poca	Poca

Tabla 1: Comparación de los equipos de desalación.

	Consumo típico de energía [kW/m ³]
Destilación por efecto múltiple	73-121
Destilación flash multimedia	66-98
Compresión de vapor	12-16
Congelamiento	16
Electrodialisis	30
Ósmosis Inversa	8-12

Tabla 2: Consumos típicos de energía para diferentes procesos de desalación [12].

La ósmosis inversa es muy utilizada actualmente para la purificación de agua, debido a sus bajos requerimientos energéticos. Sin embargo esta energía representa gran parte de los costos del proceso de desalinización por ósmosis inversa.

La Figura 9 muestra el desglose de costos para la desalinización por ósmosis inversa, dentro del cual destaca que el 44 % del costo de desalinización esta dirigido a el costo energético [12].

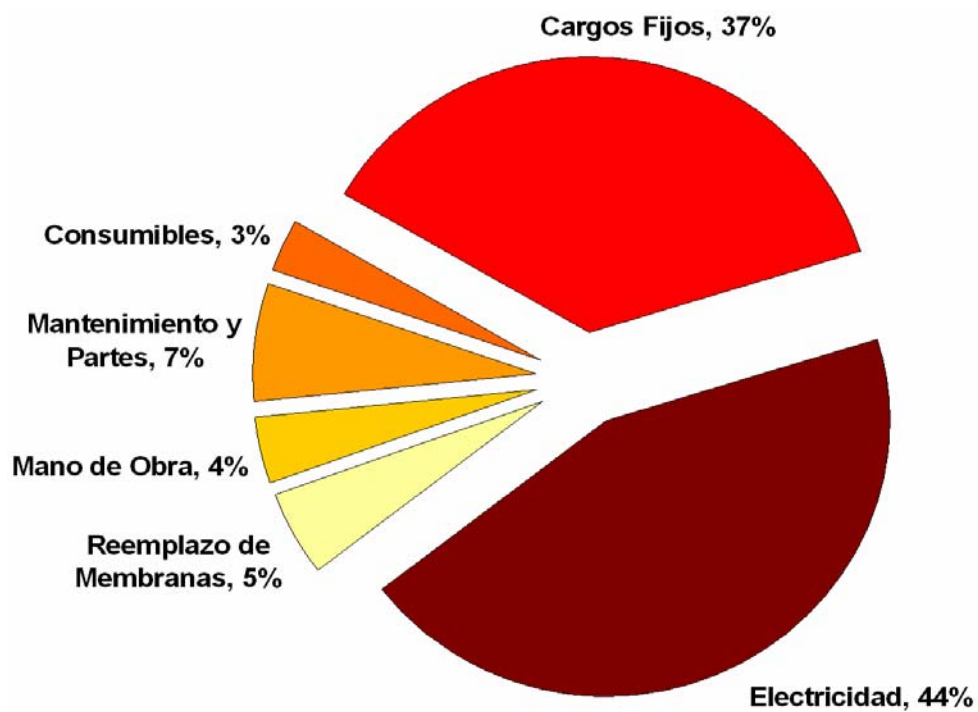


Figura 9: Desglose de Costos de Desalinización por Ósmosis Inversa

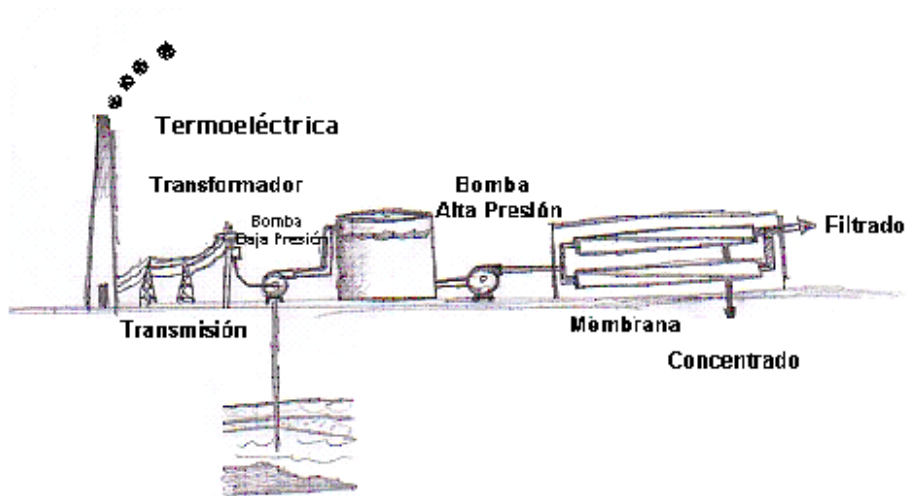


Figura 10: Esquema Energético Tradicional para Ósmosis Inversa.

3.2 Ósmosis Inversa Aprovechando Fuentes Alternas de Energía

La mayoría de los países en el medio oriente presentan déficit de agua. En ellos se consume cada gota de agua disponible en los ríos y acuíferos subterráneos y rápidamente están agotando el agua subterránea que únicamente se puede usar una sola vez. El desarrollo no convencional de los recursos hidráulicos y de la energía, incluyendo la desalinización de agua de mar y salobre por métodos de co-generación, será punto clave en la planeación de los recursos hidráulicos en países áridos y semi áridos para el siglo XXI. El uso de la potencia hidráulica, eólica y solar para desalinización por ósmosis inversa, que es un nuevo tipo de cogeneración que puede ser ampliamente utilizada en el futuro, pero será seguramente el desarrollo tecnológico clave en esas regiones para alcanzar los objetivos, los cuales están enfocados a valorar los energéticos fósiles y el medio ambiente.

3.2.1 Energías Alternas

3.2.2 Energía Solar

La energía solar se puede captar por medio de Celdas, las cuales se dividen en dos tipos: Foto-eléctricas y Foto-térmicas.

FOTO-ELÉCTRICAS: Consisten en placas de silicio que al ser un material semiconductor, cuando una fotón de luz solar choca con los electrones libres de los átomos del silicio, estos brincan hacia la dirección conductora del silicio dejando al átomo cargado positivamente, generando un diferencial de potencial que atrae a los electrones libres de otro átomo, ya que su electrón original no puede regresar a su antigua posición por ser en dirección no conductora, este es reemplazado por un electrón anterior y así sucesivamente hasta que se genera una corriente eléctrica directa [13].

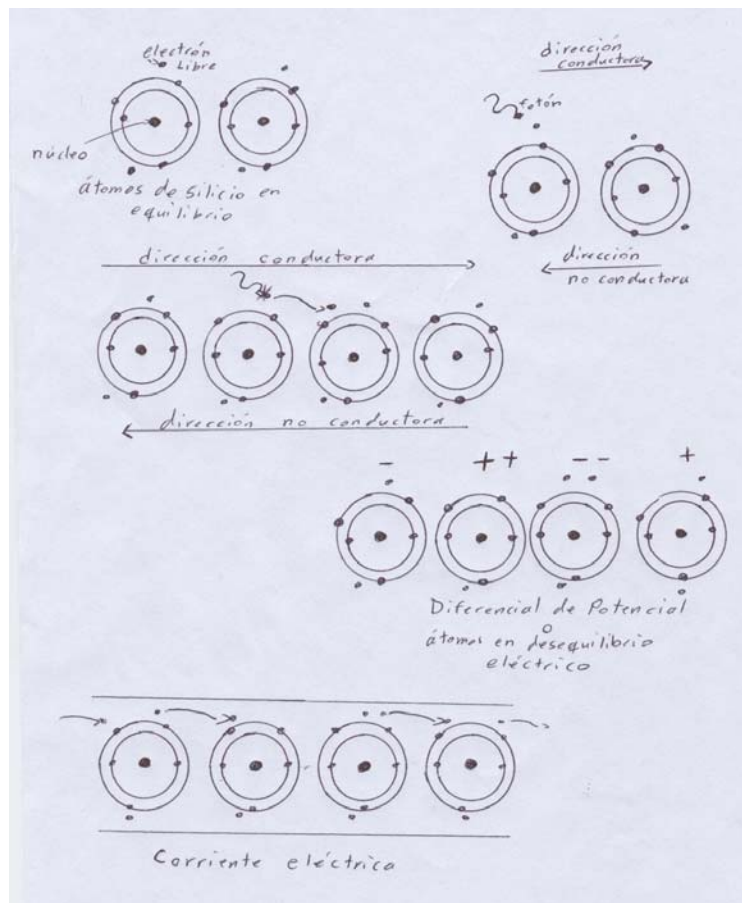


Figura 11: Esquema de generación eléctrica en átomos de silicio con luz Solar

Estos paneles de silicio se fabrican en tres tipos [14]:

- Mono cristalino, que tiene una eficiencia de 16.5%
- Poli cristalino 15%
- Amorfo de 8 a 12%

Al instalarse los paneles solares, se debe de tener en cuenta la latitud del sitio, para darle una inclinación al panel de tal forma que reciba la mayor radiación posible.

Ventajas de los paneles solares fotoeléctricos:

- Son fáciles de instalar.
- No requieren mantenimiento.
- Son muy útiles en comunidades aisladas.
- La energía que producen es eléctrica, por lo que se puede aprovechar en cualquier cosa.
- Son resistentes a la corrosión
- Su vida útil es muy larga.

Sin embargo, las celdas fotoeléctricas sólo funcionarían durante el día. Si se desean agregar baterías para que funcionen durante la noche, se debe de poner el doble de paneles solares. Las baterías tienen la desventaja de que su vida útil es de alrededor de 18 meses.

Por otro lado, si las celdas fotovoltaicas son rentables en potencias bajas, por ejemplo para un caballo de fuerza (745.7 W) se requieren de 5 m², en el caso de los sistemas de ósmosis inversa que utilizan potencias del orden de los 2 caballos de fuerza, estas celdas son una buena opción.

FOTO-TÉRMICAS: Consiste en pequeños tubos que en su interior circula agua. Estos tubos están soldados a láminas planas de cromo negro, las cuales absorberán todo el calor irradiado por el Sol, estos están encerrados en cajones cubiertos en su interior por aislantes térmicos y en su superior por vidrio, para crear dentro del colector un efecto invernadero,

para que el calor absorbido por radiación, no se pierda ni por conducción ni por convección. Los colectores solares calientan agua a temperaturas de operación del orden de 80 grados centígrados, que al entrar en un intercambiador de temperaturas con un refrigerante 134a se extrae la energía útil y es suministrada a la caldera de un ciclo Ranking, el cuál mueve un generador eléctrico. El colector solar consta de un marco o bastidor de forma rectangular de aproximadamente 0.80 m. de ancho por 2.40 m de longitud, el cual descansa sobre soportes que le permiten un ángulo de inclinación que debe hacerse de acuerdo con la latitud del lugar [15].

Este sistema en potencias altas es más económico que el foto-eléctrico, pero requiere de muchos cuidados y grandes áreas para las celdas (80 metros cuadrados por caballo de fuerza aprox.). Para un sistema de OI se necesitarían aproximadamente 160 m².

3.2.3 Energía Eólica

La energía eólica es una manifestación de la energía solar indirecta, el Sol calienta distintamente la superficie de la Tierra, produciendo diferencias de presión en el aire y estableciendo, consecuentemente, movimientos de éste. Debido a esto, se presenta en casi todas las áreas de la Tierra, pero su intensidad y regularidad es diversa [16].

La energía eólica o de viento se puede captar por medio de “molinos de viento” (en realidad no son molinos, esta palabra permanece porque durante muchos años, los primeros dispositivos que aprovechaban la energía del viento se usaban para moler granos). La misión de estos dispositivos es transformar la energía cinética del aire en energía mecánica (giro de un eje, con una cierta potencia).

En las primeras décadas del siglo XX, la fabricación de los molinos de viento sufrió un impulso decisivo, desde el punto de vista tecnológico, al aplicárseles a su diseño los nuevos conocimientos sobre aerodinámica desarrollados en aviación, que permitían aumentar extraordinariamente el rendimiento de estas máquinas.

Se pueden caracterizar por la orientación de su eje de rotación, vertical u horizontal:

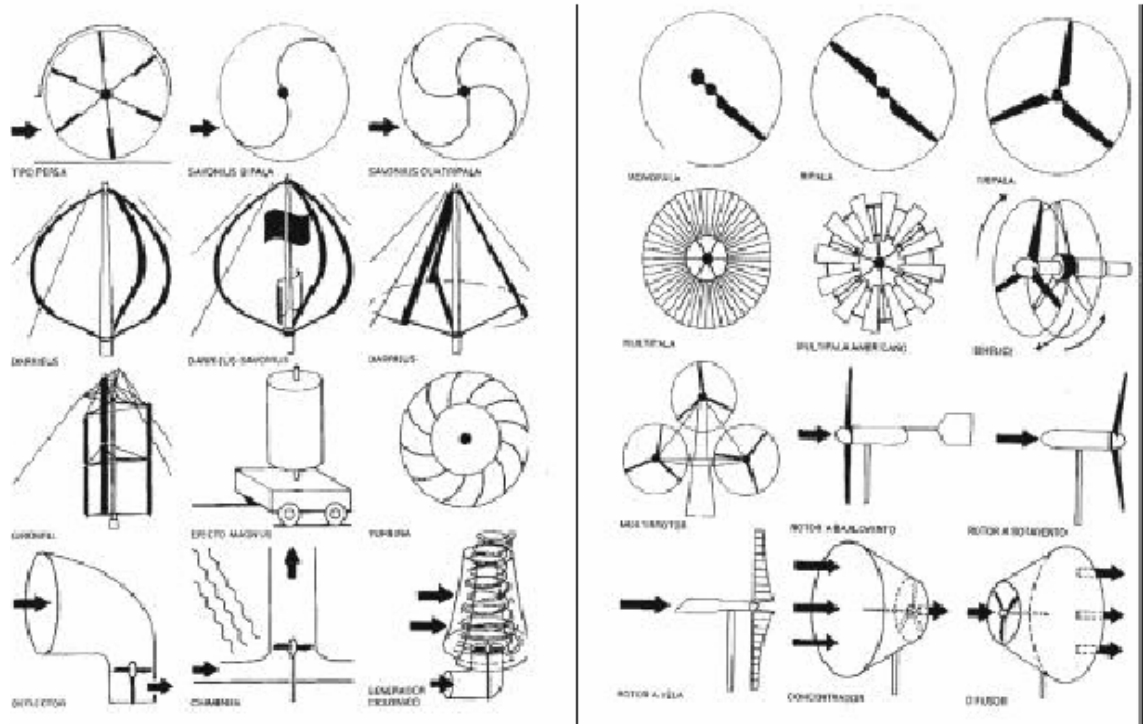


Figura 12: a) Máquinas eólicas de eje Vertical b) Máquinas eólicas de eje Horizontal

Debido a que generalmente los equipos de eje vertical no son capaces de arrancar desde el reposo y sólo pueden producir potencia útil arriba de cierta velocidad, actualmente sólo se comercializan los equipos de eje horizontal [17].

Existen dos tipos principales de turbinas de viento horizontal:

TURBINAS ELÉCTRICAS: Estos dispositivos transforman la energía cinética del viento en energía eléctrica, (generalmente en corriente alterna de 60 hz), como el viento no mantiene una velocidad fija, con el propósito de generar una frecuencia eléctrica constante, se emplea un generador asíncrono, es decir que el movimiento mecánico de las aspas siempre va a mantener una diferencia en velocidad con la frecuencia eléctrica (deslizamiento).

En este nuevo marco se desarrollaron prototipos de máquinas de elevada potencia, por encima de los 2.000 kW, (ejemplo en Figura 13) especialmente en U.S.A., a la par que renacía una importante industria productora de máquinas perfectamente operativas y rentables, en la gama de potencias de 100 a 500 kW. Estas máquinas se han ido instalando en gran número, agrupadas en zonas favorecidas por el viento, constituyendo lo que se ha dado en llamar "parques eólicos".

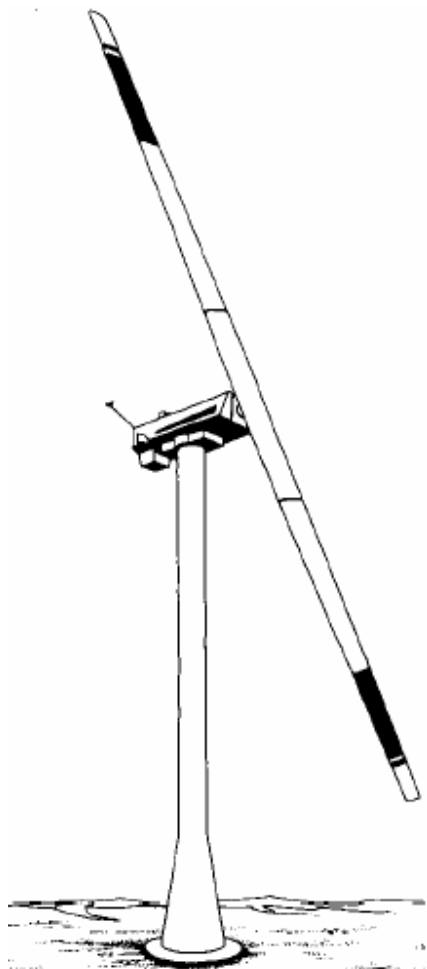


Figura 13: Aerogenerador de eje horizontal MOD-5B DE 7,5 MW, diseño de BOEING

Debido a que genera energía eléctrica, es muy factible su aplicación en un sistemas de ósmosis inversa en especial en equipos múltiples.

TURBINAS MECÁNICAS: Estos dispositivos transforman la energía cinética del viento en energía mecánica, por medio de un reductor de velocidad (engranes) mueven una varilla en movimiento armónico simple de arriba hacia abajo para mover un pistón (bomba recíprocante), su uso es exclusivo para bombear agua.

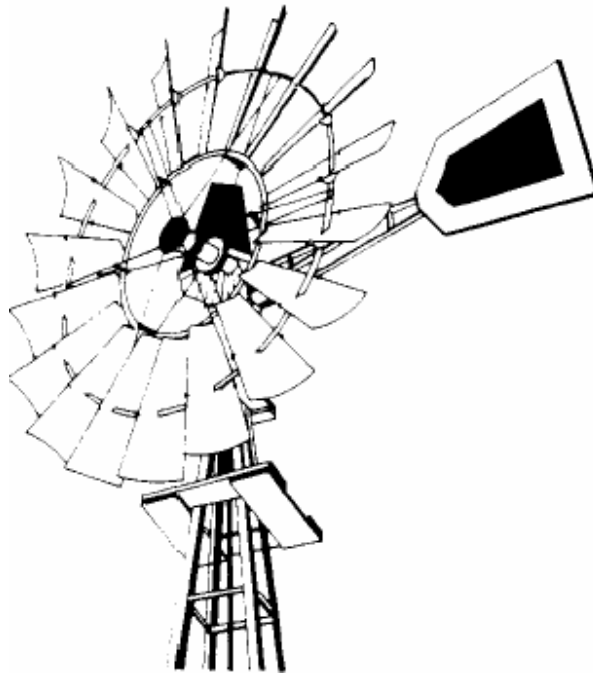


Figura 14: Molino de viento de granja estadounidense (multipala).

Estos dispositivos son muy ampliamente utilizados en México desde ya varias décadas, lo que representa una garantía en la adquisición de refacciones. Como su uso es para la extracción del agua, su aplicación es perfecta para un sistema de ósmosis inversa.

3.2.4 Energía Eólica vs Solar

La energía solar es una fuente muy abundante en el altiplano mexicano, ya que la latitud, la altura sobre el nivel del mar y la escasa existencia de nubes permiten una fuente constante de luz durante prácticamente 12 hrs. Hablando del sistema fototérmico, es un sistema que requiere de mucho mantenimiento, y el campo mexicano está lleno de proyectos exitosos, pero por la complicación en su operación, han fracasado. Existe el antecedente del proyecto “TONATÍU” en el sexenio de Luis Echeverría donde se colocaron sistemas solares fototérmicos franceses en Sonora y Chihuahua y por la complejidad de la operación y lo delicado del sistema, no funcionaron [18]. En el caso de las celdas fotoeléctricas, son sistemas muy simples y fáciles de instalar, su problema radica en los costos, debido a que casi no existen proveedores en México, los costos de importación elevan mucho sus precios

y no hay garantía de que en caso de falla, se pueda contar con la refacción y no hay que olvidar que este equipo se va a utilizar en comunidades muy humildes.

La energía eólica, tiene la ventaja que no se requiere de grandes predios para su captación, y en esta zona, debido a que el viento no encuentra una fuerte resistencia sobre la superficie, se pueden captar vientos que van de 8 a 20 m/s (Datos tomados en el ejido San Felipe, Doctor Arroyo, N. L., lugar donde se instalará el sistema). Otra ventaja es que debido a la gran diferencia de temperaturas entre el día y la noche, esto genera una fuerte producción de viento máxima tanto en el crepúsculo como en el ocaso.

De esta forma se puede concluir que ambas fuentes son ricas en producción de energía en la zona, pero con el propósito de hacer simple el sistema, es por el camino de la energía eólica donde vamos a seguir. Esto no quiere decir que lo solar no sea atractivo, pero en este momento y en este proyecto en particular lo eólico es lo más atractivo para hacer un sistema sencillo que no requiera de grandes áreas de terreno ni capacitación técnica elevada.

3.2.5 Sistema de Ósmosis Inversa Eólica

Debido a que el sistema de ósmosis inversa requiere de mucha energía para generar la presión (la cual representa el 44 % de los costos de operación) es necesario emplear energía renovable, en este caso el viento, para que haga rentable el sistema en las comunidades rurales. Pero, ¿Qué dispositivo escoger? ¿Eléctrico (aerogenerador) o mecánico (Papalote)? La eficiencia de los equipos, es decir, la fracción de energía cinética del viento que se transforma en energía mecánica es la siguiente: En los aerogeneradores se encuentra en el orden del 20% y en los papalotes en el orden del 1%.

Si estuviéramos hablando de equipos que emplearan combustibles, inmediatamente nos iríamos por el camino de los aerogeneradores, porque como el combustible tiene un costo, la eficiencia en el aprovechamiento del combustible es directamente proporcional con el costo beneficio. Sin embargo en este caso, como la energía eólica no es un insumo que tenga un precio, el costo beneficio no va en proporción con la eficiencia. En este caso se debe de considerar los costos de los equipos y de esta forma sacar el costo por kilowatt producido.

Para la operación de aerogeneradores eléctricos, es importante saber que no sólo se debe de considerar el punto de operación en estado estable (punto donde se iguala la curva de potencia de la bomba eléctrica y la potencia eléctrica del aerogenerador), también hay que predecir el comportamiento de arranque, es decir el estado transitorio, considerando que en el momento en que se conecte, la bomba tenderá a frenar el aerogenerador y si éste no lleva suficiente inercia, se detendrá en su totalidad [19].

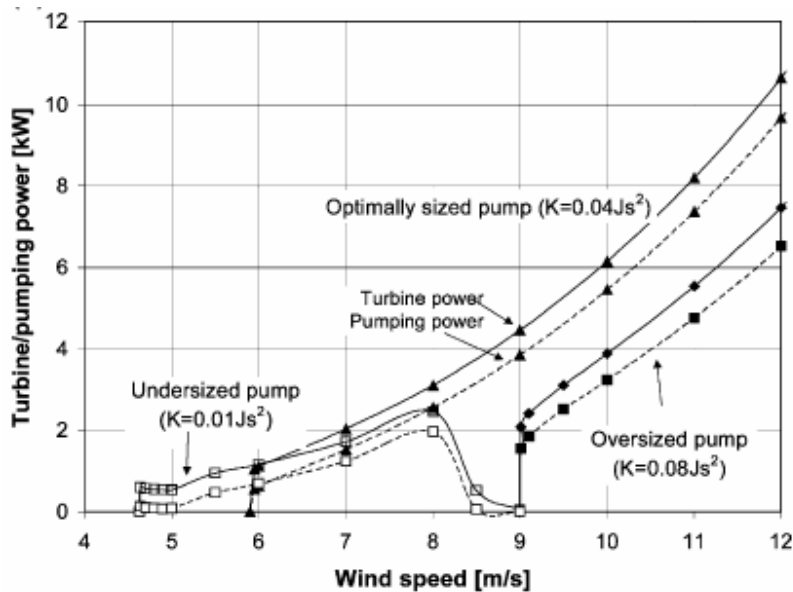


Figura 15: En la gráfica se muestra la caída de potencia que sufre el sistema al arrancar.

Como se requiere que el sistema sea sencillo de operar, en el sistema eléctrico se debería de instalar un dispositivo que conectara la bomba eléctrica una vez que las aspas han obtenido determinada velocidad. Otro dato importante es que en el país no se fabrican equipos eléctricos de aerogeneradores, por lo que se tendrían que importar.

Los papalotes son la mejor opción por las siguientes razones:

1. Existen fabricantes en la zona
2. Las refacciones son relativamente más baratas y fáciles de conseguir.
3. El sistema siempre está conectado directamente (mecánicamente), por lo que no se requiere de sistemas automatizados de interruptores.
4. Su puesta en marcha y su operación es simple.
5. Es un equipo ya muy conocido por los ejidatarios.

Considerando lo anterior, la clave de que nuestro sistema tenga éxito es el uso directo de la energía mecánica del viento para la obtención de la presión requerida por el sistema de ósmosis inversa, de esta forma se evita el paso de generación de energía eléctrica y controladores, reduciendo los costos de inversión.

3.3 Funcionamiento de un molino de viento idealizado

El propósito del entendimiento del funcionamiento de un molino de viento idealizado es obtener expresiones generales del empuje, la salida de potencia y la eficiencia.

Para lograrlo, tenemos que aplicar las ecuaciones de continuidad, de la componente x del momento y de energía, empleando el Volumen de Control y las coordenadas mostradas.

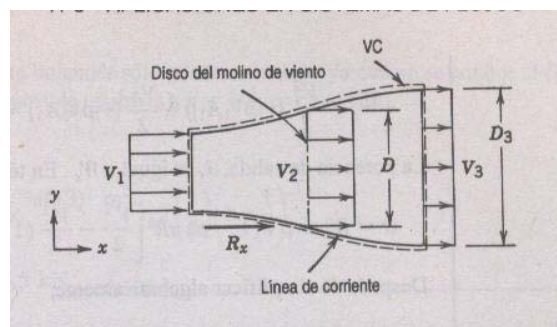


Figura 16: Volumen de Control

Ecuaciones básicas:

$$0 = \frac{\delta}{\delta t} \int_{VC} \rho dV_{vol} + \int_{SC} \rho \mathbf{V} \cdot d\bar{A}$$

$$F_{Sx} + F_{Bx} = \frac{\delta}{\delta t} \int_{SC} u \rho dV_{vol} + \int_{SC} u \rho \mathbf{V} \cdot d\bar{A}$$

$$Q - W_s = \frac{\delta}{\delta t} \int_{VC} e \rho dV_{vol} + \int_{SC} (e + p/\rho) \rho \mathbf{V} \cdot d\bar{A}$$

Suposiciones:

1. La presión atmosférica actúa en el VC; $F_{Sx} = R_x$
2. $F_{Bx} = 0$
3. Flujo estable

4. Flujo uniforme en cada sección
5. Flujo incompresible del aire estándar
6. $V_1 - V_2 = V_2 - V_3 = \frac{1}{2} (V_1 - V_3)$, según demostró Rankine
7. $Q = 0$
8. $u_1 = u_2 = u_3$, para flujo incompresible sin fricción

En término del factor de interferencia, a , $V_1 = V$, $V_2 = (1 - a)V$ y $V_3 = (1 - 2a)V$.

De la continuidad, para flujo uniforme en cada sección transversal, $V_1 A_1 = V_2 A_2 = V_3 A_3$.

Del momento,

$$\mathbf{R}_x = u_1 \{-\rho V_1 A_1\} + u_3 \{+\rho V_3 A_3\} = (V_3 - V_1) \rho V_2 A_2 \quad \{u_1 = V_1, u_3 = V_3\}$$

R_x es la fuerza externa que actúa sobre el volumen de control. La fuerza de empuje ejercida por el VC sobre los alrededores es

$$\mathbf{K}_x = -\mathbf{R}_x = (V_1 - V_3) \rho V_2 \bar{A}_2$$

En términos del factor de interferencia, la ecuación para el empuje puede escribirse en la forma general,

$$\mathbf{K}_x = \rho V^2 \pi R^2 a(1-a)$$

La ecuación de energía se convierte en

$$-\dot{W}_s = V_1^2 / 2 \{-\rho V_1 A_1\} + V_3^2 / 2 \{+\rho V_3 A_3\} = \rho V_2 \pi R^2 \frac{1}{2} (V_3^2 - V_1^2)$$

La potencia de salida, P , es igual a W_s . En términos del factor de interferencia,

$$P = W_s = \rho V(1-a) \pi R^2 [V^2 / 2 - V^2 / 2 (1-2a)^2] = \rho V^3 (1-a) \pi R^2 \frac{1}{2} [1 - (1-2a)^2]$$

Después de simplificar algebraicamente,

$$P_{ideal} = 2\rho V^3 \pi R^2 a(1-a)^2$$

El flujo de energía cinética a través de un tubo de corriente de flujo no perturbado, de área igual a la del disco actuador, es

$$KEF = \rho V \pi R^2 V^2 / 2 = \frac{1}{2} \rho V^3 \pi R^2$$

De este modo, la eficiencia ideal puede escribirse

$$\eta_{ideal} = P_{ideal} / KEF = 2\rho V^3 \pi R^2 a(1-a)^2 / \rho V \pi R^2 V^2 / 2 = \frac{1}{2} \rho V^3 \pi R^2 = 4a(1-a)^2$$

3.4 Sistema de almacenamiento

Uno de los problemas más importantes en la explotación de la energía eólica lo constituye su variabilidad, de manera que es prácticamente imposible garantizar un suministro energético constante. Para eliminar este defecto se recurre a sistemas que permitan acumular la energía captada del viento en períodos de abundancia y emplear posteriormente la energía almacenada en períodos de vientos flojos o de calma. En nuestro caso, el dispositivo de almacenamiento de energía será un tanque hidroneumático.

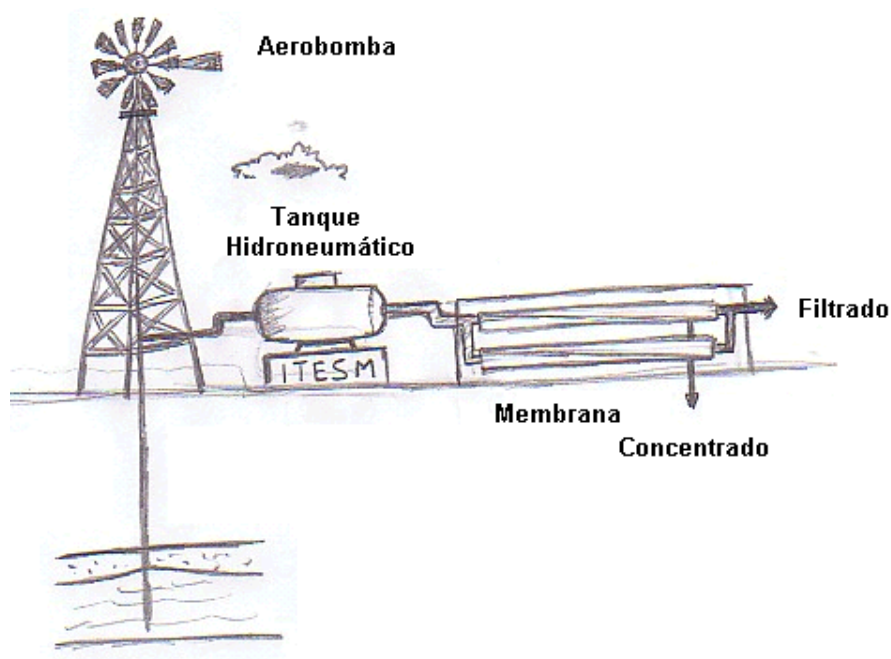


Figura 17: Esquema Energético para la Osmosis Inversa Eólica

Como la bomba es recíproca y su flujo es intermitente, el Tanque hidroneumático, además de almacenar energía, también servirá como amortiguador del golpeo del pistón del molino de viento, al homogenizar el flujo y a su vez la presión que podría causar daños en la membrana.

4. METODOLOGÍA

4.1 Determinación y Caracterización del Recurso Eólico

Para un aprovechamiento energético del viento es de vital importancia realizar correctamente tanto una valoración energética del viento existente, como una caracterización del comportamiento del viento en la zona de implantación. La correcta realización de estas estimaciones es muy importante en temas tan diversos como la rentabilidad de la instalación, el régimen de cargas estructurales que soportan las máquinas, la programación de los trabajos de mantenimiento, la estrategia de operación técnica de los aerogeneradores, la disposición de las máquinas en el terreno, etc.

La correcta evaluación del viento captado es de tal importancia que diferencias del orden del 10% en su valoración significan diferencias del 30% en la producción energética obtenida, debido a que la energía que se obtiene es en función del cubo de la velocidad.

En la evaluación y caracterización se busca la determinación del viento útil en un emplazamiento determinado, o lo que es lo mismo aquel viento que reúna las características necesarias para su aprovechamiento con un determinado sistema de captación. Esta evaluación es una disciplina compleja, y sujeta a un gran número de factores interrelacionados.

Para la realización de una correcta evaluación del viento se hace necesario en primer lugar una recopilación de todos los datos de carácter histórico existentes en la zona y que puedan orientarnos sobre el viento existente. Otros datos significativos, e interrelacionados entre sí, son la vegetación existente, la topografía del terreno, el tipo de erosión presente, las orientaciones y características de la arquitectura popular, etc. Los datos cuantitativos históricos provenientes de estaciones meteorológicas de la zona son igualmente muy valiosos.

Las mediciones puntuales se tomarán con un anemómetro manual durante dos meses, donde el ejidatario tomara la medición a una misma hora todos los días, además de registrar los vientos fuertes.

Pero estos datos por sí sólo no dan mucha información, para poder tener un buen entendimiento del comportamiento del viento es necesario transformar estos datos en parámetros estadísticos (Rayleigh y Weibull).

4.1.1 Obtención de los parámetros de Rayleigh

Para hacer manejable la cantidad de datos, se utilizan herramientas estadísticas que permitan resumir la información. En cuanto a las magnitudes de velocidad, el primer paso es construir un histograma que indique la frecuencia con la cual ocurre un rango de velocidades. El rango de velocidades o magnitudes de velocidad se llama clase o bin. Cada clase se especifica con centros cada medio metro sobre segundo. Entonces, si en un mes la frecuencia es 15 para una clase de 5 m/s, significa que en 15 días de ese mes el viento sopló entre 4.75 y 5.25 m/s.

Las mediciones se deben de estandarizar en intensidades de metros por segundo en clases de 0.5 m/s, ejemplo, si tenemos una velocidad de 3.69 m/s, se convierte en 4 m/s. Debido a las características del anemómetro, no se tomaron datos de dirección.

Una vez que se agruparon los datos en clases, se elabora una tabla de frecuencias para cada valor de velocidad. La función de distribución de Raleigh es la siguiente:

$$f(v_i) = \frac{h(v_i)}{H} \quad (\text{Ec. 1.1})$$

Donde :

- $f(v_i)$ es la probabilidad de ocurrencia del viento v_i
- $h(v_i)$ es el número de días de ocurrencia del viento v_i
- H es el número de días totales

Estos datos se grafican, y el área bajo la curva debe de dar uno, puesto que es la suma de probabilidades totales.

4.1.2 Obtención de los parámetros de Weibull

La distribución clásica de Weibull permite separar las magnitudes de velocidad cercanas a cero de las magnitudes que si contribuyen a generarnos potencia útil. De esta forma a la gráfica original se le hace una modificación, para darnos sólo la probabilidad de las velocidades útiles.

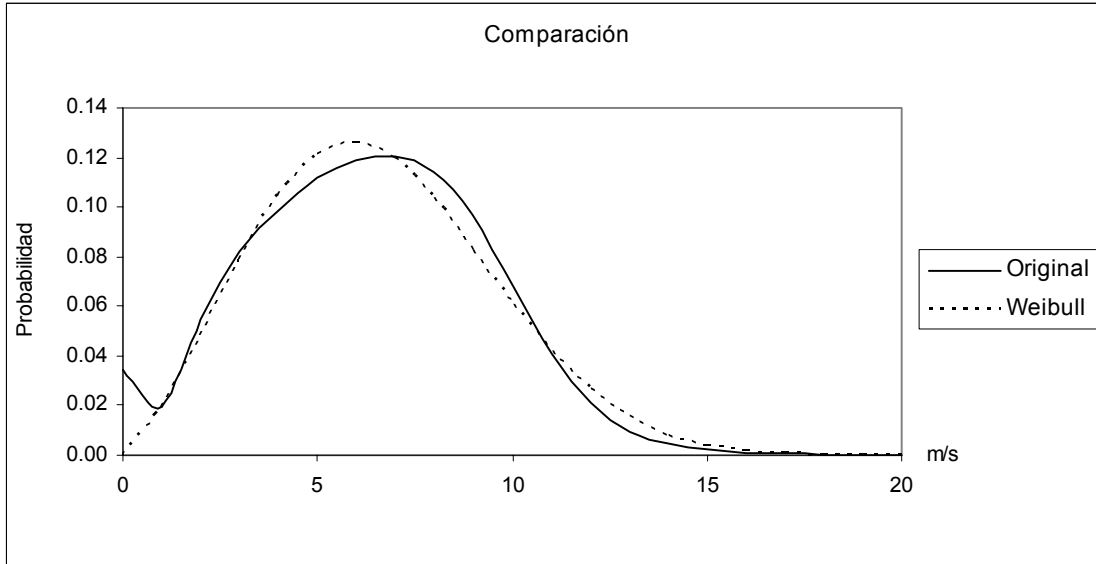


Figura 18: Ajuste a la curva de probabilidad de Weibull

La distribución de Weibull es:

$$f(v) = \frac{dF}{dv} = \beta \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (\text{Ec. 1.2})$$

k : parámetro de forma (1.0 – 3.0)

c : parámetro de escala (2 – 12)

β : parámetro adicional que indica la fracción del tiempo que sopla el viento; para un período.

La función de Weibull resultante es:

$$f(v) = f1(v)\alpha + f2(v)\beta$$

Donde α es la fracción que no contribuye a la generación y β se obtiene de la siguiente manera:

$$\beta = 1 - \frac{h(v \approx 0)}{h_{total}} \quad (\text{Ec. 1.3})$$

El parámetro de forma K se obtiene de la siguiente forma:

$$K = (\sigma/V_{promedio})^{-1.086} \quad (\text{Ec. 1.4})$$

El parámetro de escala C es la velocidad promedio.

4.1.3 Velocidad Promedio

La magnitud promedio de la velocidad en el período, se obtiene directamente de los datos originales.

4.1.4 Ajuste de la velocidad por efecto de la Altura

Cerca de la superficie, el viento es modificado en su trayectoria y frenado por efecto de la interacción con el terreno. Este hecho provoca la existencia de una variación de la velocidad del viento en función de la altura. Para una determinada área la presencia de distintas rugosidades en el terreno, provoca turbulencias variables que dificultan el aprovechamiento del viento a poca distancia de la superficie del terreno en que se asienta la instalación.

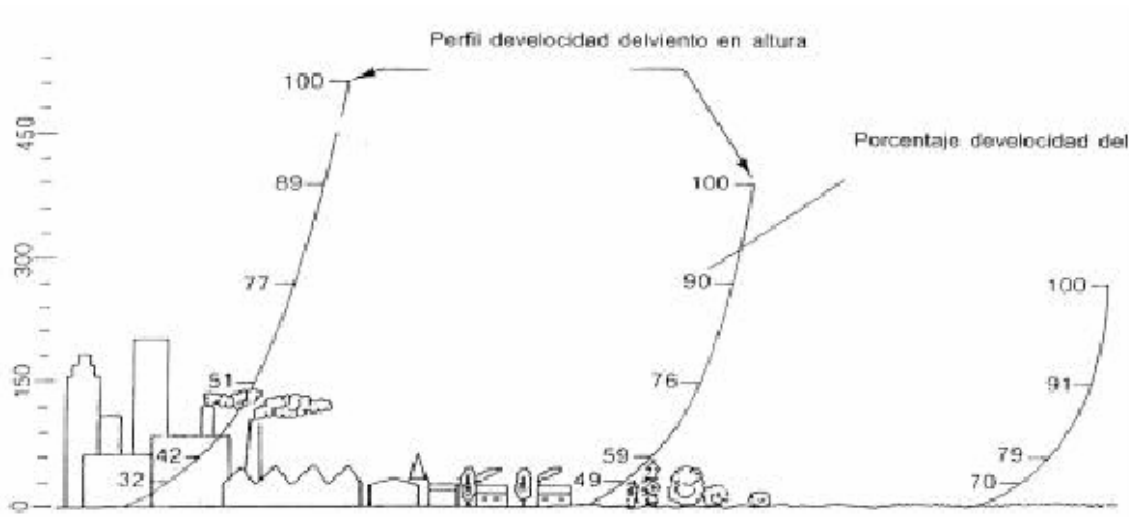


Figura 19: Perfil de velocidad del viento con respecto a la altura.

La variación de la velocidad del viento respecto a la altura puede evaluarse en primera aproximación mediante la siguiente expresión:

$$V = V_0 \cdot \left(\frac{h}{h_0} \right)^n \quad (\text{Ec. 1.5})$$

V = Velocidad del viento, a la altura h respecto al suelo.

V₀ = Velocidad del viento conocida a una altura h₀.

h = Altura a la que se desea estimar la velocidad del viento.

h₀ = Altura de referencia.

n = Valor que depende de la rugosidad existente en el emplazamiento.

Los valores estimados pueden encontrarse en el siguiente cuadro:

Estimación del valor de n para distintos terrenos	
Tipo de terreno	n
Liso (mar, arena, nieve)	0,10 – 0,13
Moderadamente rugoso (hierba, campos de cereales, regiones rurales)	0,13 – 0,20
Rugoso (bosques, barrios)	0,20 – 0,27
Muy rugoso (ciudades, altos edificios)	0,27 – 0,40

Tabla3: Rugosidad estimada para distintos terrenos

4.1.5 Efecto de la densidad del aire

Otro efecto que debe incluirse en la estimación de energía es el efecto de la densidad del aire, ya que la potencia cinética del viento es directamente proporcional a la densidad del aire. La densidad del aire disminuye al aumentar la altura sobre el nivel del mar y al aumentar la temperatura ambiente.

Para el efecto de la altura sobre el nivel del mar se usará una ecuación aceptada internacionalmente para modelar la presión en la troposfera (hasta 10km):

$$p(z) = p_0 \left(\frac{Tz}{T_0} \right)^{-5.25588} \quad (\text{Ec. 1.6})$$

$p(z)$: presión en la altura z sobre el nivel del mar

p_0 : presión atmosférica estándar = 101,350 Pa

T_0 : temperatura estándar = 15°C = 288 K

Tz : temperatura en el lugar donde se instalará el Molino de Viento

Luego, la densidad se calcula con la ley de los gases ideales, relación constitutiva en la cual se incluye el efecto de la temperatura ambiente sobre la densidad másica:

$$\rho(z) = \frac{p(z)}{R_u T} \quad (\text{Ec. 1.7})$$

4.2 Requerimiento de agua

Para sacar el flujo de agua desalada que se va a necesitar para elevar la disposición de agua de la comunidad, se usa la siguiente fórmula:

$$Q_t = (D_a - D_f)(N) \quad (\text{Ec. 2.1})$$

Donde:

- Q_t es el flujo de agua total que se va a extraer del pozo en litros por día
- D_a es la disposición de agua actual en la comunidad en litros por día por habitante
- D_f es la disposición de agua que se quiere alcanzar en Lt/día/hab
- N es el número de habitantes en la comunidad

Debido a que el molino de viento no va a estar funcionando las 24 horas, se debe de basar el flujo en las horas por día que sopla el viento. Este dato se obtiene por medio de Rayleigh, (T_{molino}).

De esta forma, para no abatir el pozo, el límite de extracción de agua será marcado por el aforo, de tal forma que el flujo por hora será:

$$Q_{\text{max}} = Q_f (3600\text{s/hr})(T_{\text{molino}}) \quad (\text{Ec. 2.2})$$

Donde:

- Q_{max} es el máximo volumen de agua extraíble del pozo por día
- Q_f es el aforo del pozo, lts/s

Se debe de tener en cuenta que los sistemas de ósmosis inversa no pueden desalar el 100% del agua de alimentación, para sacar la relación que debe de llevar la ósmosis Inversa, se divide Q_t entre Q_{max}

$$R = Q_t / Q_{\text{max}} \times 100 \quad (\text{Ec. 2.3})$$

4.3 Diseño del Sistema de Ósmosis Inversa

Para diseñar un sistema de ósmosis inversa, se deben de tener los siguientes datos:

- Gasto o Flujo de agua en la alimentación, filtrado y concentrado
- Salinidad en cada uno de los flujos.
- Propiedades desaladoras de la membrana.
- Porcentaje de Recuperación R

4.3.1 Flujos y Concentraciones

El sistema de ósmosis inversa tiene tres flujos.

1. Alimentación
2. Filtrado
3. Concentrado

Flujos:

$$\text{Alimentación} = Q_{\max} \quad (\text{Ec. 3.1})$$

$$\text{Filtrado} = Q_{\max} (R) = Q_t \quad (\text{Ec. 3.2})$$

$$\text{Concentrado} = Q_{\max} - Q_t = Q_{\max}(1-R) \quad (\text{Ec. 3.3})$$

Concentraciones:

El concentrado de la alimentación se obtiene del análisis de agua del pozo, para las concentraciones del filtrado, se sacan los valores máximos permitidos de sales para agua potable de la norma oficial mexicana NOM-002-CNA-1995. Para sacar la concentración del concentrado, se hace un balance de sólidos.

$$\text{Entradas} = \text{Salidas}$$

$$(Q_{\max})(\text{mg/l})_{\text{pozo}} = Q_{\max} (R)(\text{mg/l})_{\text{filtrado}} + Q_{\max} (1-R)(\text{mg/l})_{\text{concentrado}}$$

$$C_{\text{concentrado}} = [(Q_{\max})C_{\text{pozo}} - Q_{\max} (R)C_{\text{filtrado}}] / Q_{\max} (1-R)$$

$$C_{\text{concentrado}} = [C_{\text{pozo}} - (R)C_{\text{filtrado}}] / (1-R) \quad (\text{Ec. 3.4})$$

4.3.2 Cálculo de la Presión Osmótica

El comportamiento de las moléculas de los sólidos disueltos en un fluido líquido, es similar al de las moléculas de un gas en el vacío, de tal forma, que la ecuación de un gas ideal que se emplea para sacar la presión de un gas contenido en un volumen a determinada temperatura, nos sirve para determinar la presión osmótica en una solución [20].

$$\pi = (nRT/V) F \quad (\text{Ec. 3.5})$$

Donde:

- n = moles de soluto.
- R = constante de gases ideales.
- T = temperatura.
- V = volumen.
- F = factor de disociación del soluto.

Cada componente de la solución ejerce una presión parcial en la solución a una temperatura T y volumen total V , de tal forma que la suma de estas presiones parciales es igual a la presión osmótica total, conocida como la ley de Amagat o ley de Leduc [21].

$$\pi = (nRT/V) F = (naRT/Va)Fa + (nbRT/Vb)Fb + (ncRT/Vc)Fc + \dots$$

$$\pi = \sum (niRT/Vi) Fi \quad (\text{Ec. 3.6})$$

En esta ecuación, V_i es la fracción volumétrica del parámetro. Es decir, la fracción molar constituye el porcentaje del volumen total que cada componente ocuparía en la solución. El valor n_i/V_i se obtiene dividiendo las partes por millón del concentrado entre mil para tener unidades de gramos por litro y se divide nuevamente por el peso molecular para que el resultado sea moles por litro. Como todos los parámetros se encuentran disociados, el factor de disociación es uno para todos y como también vienen del mismo volumen, el producto ya está fraccionado.

4.3.3 Cálculo de la Presión requerida para el Sistema de Ósmosis Inversa (POI)

Tenemos que el flujo de agua a través de una membrana, está dado por la ecuación

$$J_a = W_a(\Delta P - \Delta \pi).$$

Donde:

- W_a = Permeabilidad del agua (mol/seg-m²-psi).
- ΔP = Gradiente de presión mecánica más hidrostática (psi).
- $\Delta \pi = \pi_R - \pi_P$ = Gradiente de presión osmótica (psi).

Si despejamos ΔP que es la presión manométrica que se le debe aplicar a la membrana

$$\Delta P = POI = J_a / W_a + (\pi_R - \pi_P) \quad (\text{Ec. 3.7})$$

4.4 Diseño del Tanque Hidroneumático

Debido a que el flujo de agua es intermitente y que la energía del viento es muy variable, es necesario disponer de un dispositivo acumulador de energía para homogenizar el flujo y acumular energía para que en los momentos en que no haya viento, se cuenten con dos horas adicionales de producción de agua. Este dispositivo es un tanque hidroneumático, que funciona bajo el principio de que si bien el aire es compresible, el agua no. El agua entra a presión al tanque y desplaza al aire, el cual se comprime y de esta forma acumula energía mecánica.

Cuando se comprime el aire, surge el fenómeno de recalentamiento, dicho de otra forma, la temperatura del gas aumenta, pero en este caso debido a que el proceso es gradual, es decir que se lleva dos horas como mínimo pasar de V_1 a V_2 y como el tanque es metálico, necesariamente debe de existir un flujo al exterior. Por otro lado, el aire va a estar contenido en una bolsa de hule, que es un mal conductor del calor. Para fines de análisis, se va a analizar como proceso isotérmico, y proceso adiabático

Proceso Isotérmico:

La ecuación que se emplea para hacer los cálculos de las dimensiones del tanque es la ecuación de: $P_1V_1/T_1 = P_2V_2/T_2$, como se asume que la temperatura permanece constante. $T_1 = T_2$, de esta forma la fórmula nos queda: $P_1V_1 = P_2V_2$

Donde en el estado 1, la cámara de aire comprimido V_1 está a la presión máxima del molino de viento P_{max} y el estado 2, V_2 es el volumen de la cámara de aire V_1 más el

volumen del agua acumulada en dos horas, esto es $V_2 = V_1 + (2)(Q_{\max})$ y P_2 es la presión requerida para el sistema de ósmosis inversa. Q está en litros por día.

De esta forma tenemos:

$$\begin{aligned} (P_{\max})(V_1) &= (POI)[V_1 + (2)(Q_{\max})] \\ V_1 &= (POI)(2)(Q_{\max}) / (P_{\max} - POI) \\ V_{\text{total}} = V_2 &= (POI)(2)(Q_{\max}) / (P_{\max} - POI) + (2)(Q_{\max}) \end{aligned} \quad (\text{Ec. 4.1})$$

Con esta ecuación podemos ver que mientras mayor sea la diferencia entre P_{\max} y POI , menor será el volumen del tanque y por lo tanto su costo será menor.

Proceso Adiabático

$$\begin{aligned} P_1 V_1 / T_1 &= P_2 V_2 / T_2 \\ V_1 &= V_2 (P_2 / P_1) (T_1 / T_2) \end{aligned} \quad (\text{Ec. 4.2})$$

En el caso adiabático, tenemos que el valor de T_2 está definido por

$$T_2 = T_1 (P_2 / P_1)^{[(k-1)/k]} \quad (\text{Ec. 4.3})$$

Donde K es la relación del calor específico del aire a presión constante dividido entre el calor específico del aire a presión constante. $K = C_p / C_v$. Para fines prácticos, $k = 1.4$

Sustituyendo 4.3 en 4.2

$$\begin{aligned} V_1 &= V_2 (P_2 / P_1) T_1 / (T_1 (P_2 / P_1)^{[(k-1)/k]}) \\ V_1 &= V_2 (P_2 / P_1) (P_2 / P_1)^{[(1-k)/k]} \\ V_1 &= V_2 (P_2 / P_1)^{(1/k)} \end{aligned} \quad (\text{Ec. 4.4})$$

Tenemos que:

- $V_2 = V_1 + (2)(Q_{\max})$
- $P_1 = P_{\max}$
- $P_2 = POI$

Sustituyendo estos valores en la ecuación 4.4

$$V_1 = [V_1 + (2)(Q_{\max})] (POI / P_{\max})^{(1/k)}$$

Despejando V_1

$$V_1 = [(2)(Q_{\max}) (POI / P_{\max})^{(1/k)}] / [1 - (POI / P_{\max})^{(1/k)}]$$

Por lo tanto

$$V_{\text{total}} = [(2)(Q_{\max}) (POI / P_{\max})^{(1/k)}] / [1 - (POI / P_{\max})^{(1/k)}] + (2)(Q_{\max}) \quad (\text{Ec. 4.5})$$

4.5 Cálculo de la Presión Hidráulica que entregará el Molino de Viento

El requerimiento de presión del sistema a una relación de flujo Q_{\max} , se compone de la presión máxima del tanque hidroneumático (P_{\max}) mas los cambios de presión debido a la gravedad (pozo) y la caída de presión por fricción (las pérdidas mayores debidas a la fricción en las secciones rectas de área constante y pérdidas menores debidas a entradas, cambios de dirección, válvulas, filtros y salidas).

De esta forma, la presión total que esperamos que el molino de viento genere, es la suma de la presión máxima del tanque hidroneumático, la presión hidrostática de la columna de agua en la tubería del pozo y las pérdidas por fricción. De esta forma tenemos la siguiente ecuación:

$$P = P_{\max} + \rho_{\text{agua}}gh + \rho_{\text{agua}} (f L/D + K_{\text{total}}) V^2/2 \quad (\text{Ec. 5.1})$$

Donde:

- ρ_{agua} es la densidad del agua 998 Kg/m^3
- g es la aceleración de la gravedad 9.81 m/s^2
- h es la profundidad del pozo
- P_{\max} es la presión máxima del tanque hidroneumático.
- f es el factor de fricción determinado experimentalmente
- L la longitud de la tubería
- D es el diámetro de la tubería
- K la suma de pérdidas en los accesorios
- V velocidad del agua en la tubería

La ventaja de las bombas de desplazamiento positivo es que la presión que ejercen es independiente de la diferencia de presiones que hay en la entrada y a la salida. Por eso se usan en sistemas de alta presión (hasta 5000 psi).

4.6 Cálculo de la Potencia de bombeo del Molino de Viento

La potencia de bombeo se obtiene con el producto del flujo en metros cúbicos por segundo, multiplicado por la presión hidráulica del molino de viento en Pascales, de tal forma que el resultado nos queda en Watts. A la formula se le agregan los factores de conversión y nos queda de la siguiente forma:

$$P_{\text{bombeo}} = P(6,894.75 \text{ Pa/psi})Q_{\max}/[(1000)(3600)] \quad (\text{Ec. 6.1})$$

4.7 Cálculo de la Eficiencia Experimental del Molino de Viento

La eficiencia mecánica, se va a obtener de datos experimentales de molinos de diferentes tamaños a una misma velocidad de viento. La potencia de bombeo que entregan, se divide entre la potencia eólica que captan.

$$\eta_{\text{real}} = P_{\text{bombeo}}/P_{\text{ideal}} = PQ / 2\rho V^3 \pi R^2 a(1-a)^2 \quad (\text{Ec. 7.1})$$

4.8 Cálculo de la Potencia Eólica del Molino de Viento

El molino de viento se puede analizar como una hélice operada a la inversa. Se emplea el modelo de Rankine de disco actuador idealizado de flujo unidimensional (figura 20). La notación simplificada de la figura se usa con frecuencia para analizar aerogeneradores.

La velocidad del viento lejos aguas arriba es V . La corriente se desacelera a $V(1 - a)$ en el disco del aerogenerador y a $V(1 - 2a)$ en la estela de la turbina (a se denomina el factor de interferencia o factor de inducción axial). De esta manera, el tubo de corriente de aire capturado por el aerogenerador es pequeño aguas arriba y su diámetro aumenta cuando se mueva aguas abajo.

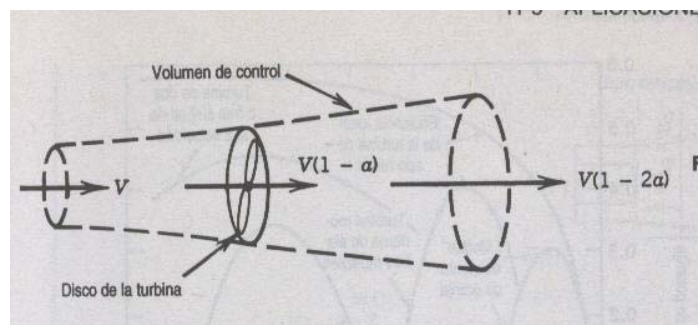


Figura 20: Volumen de control y notación simplificada utilizados para analizar el funcionamiento de un aerogenerador

La aplicación de la ecuación de energía, suponiendo que no hay pérdidas (ningún cambio en la energía interna o transferencia de calor), proporciona la potencia que se toma de la corriente de fluido como:

$$P = 2\pi R^2 \rho V^3 a(1-a)^2 \quad (\text{Ec. 7.1})$$

La eficiencia de un molino de viento define de manera más conveniente con referencia al flujo de energía cinética contenido dentro de un tubo de corriente del tamaño del disco actuador. Este flujo de energía cinética es

$$KEF = \frac{1}{2} \rho V^3 \pi R^2 \quad (\text{Ec. 7.2})$$

La combinación de las ecuaciones anteriores produce la eficiencia de la siguiente manera

$$\eta = P/KEF = 4a(1-a)^2 \quad (\text{Ec. 7.3})$$

Betz fue el primero en obtener este resultado y en demostrar que la eficiencia teórica se maximiza cuando $a = 1/3$. La eficiencia teórica máxima es $\eta = 0.593$.

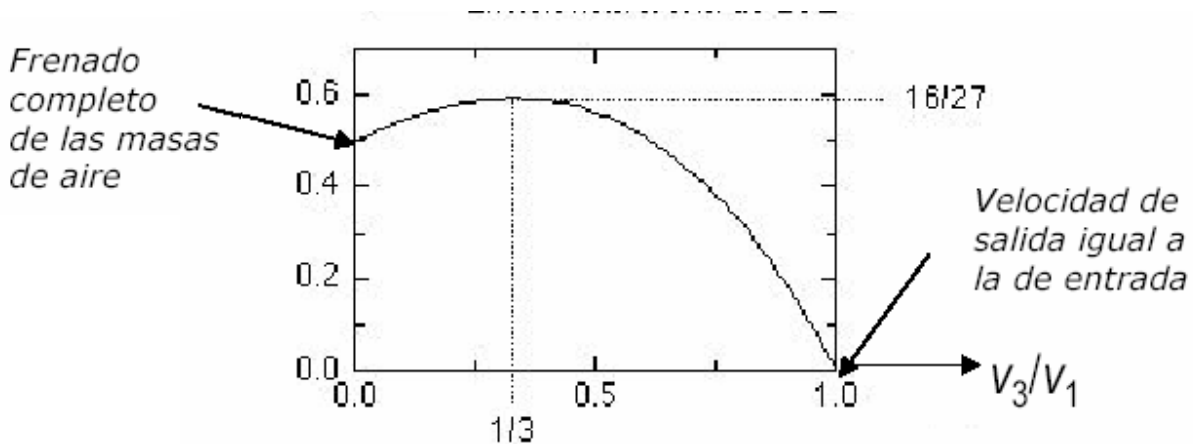


Figura 21: Ley de Betz

Si el molino de viento se carga ligeramente (a es pequeña), alterará una relación de flujo másico de aire grande, pero la energía extraída por unidad de masa será pequeña y la eficiencia baja. La mayor parte de la energía cinética en la corriente de aire se dejará en la estela y se desperdiciará. Si el molino se carga en grado extremo ($a \approx 1/2$), alterará una relación de flujo másico mucho menor. La energía removida por masa unitaria será grande, pero la potencia producida será pequeña comparada con el flujo de energía cinética a través del área imperturbada del disco actuador. De esa manera se presenta una eficiencia pico a cargas del disco intermedias [22].

Suposiciones en el modelo de Ranking:

- El aerogenerador altera sólo el aire contenido dentro del tubo de corriente definido en la figura 18.
- La energía cinética producida como una turbulencia detrás de la turbina no se toma en cuenta.
- Se ignora cualquier gradiente de presión radial.

Cada tipo de aerogenerador tiene su rango de aplicación más favorable. El tradicional molino de viento estadounidense de álabes múltiples tiene un gran número de álabes y opera a velocidad relativamente baja. Su solidez, σ (la razón entre el área del álabe y el área de barrido del disco de la turbina, πR^2), es alta. Debido a su relativamente baja velocidad de

operación, son bajos su relación de velocidad de punta y su límite de desempeño teórico. Su relativamente pobre funcionamiento, comparado con su límite teórico, se debe en gran parte al empleo de álabes poco complejos, los cuales son simples superficies dobladas de hojas metálicas en vez de formas con perfil aerodinámico.

4.9 Diseño del Molino de Viento

Todos los molinos de viento tradicionales, tienen 18 aspas. Nuestro diseño consiste solamente en calcular el diámetro de la rueda de las aspas y el diámetro del pistón.

4.9.1 Cálculo del Diámetro de la Rueda de Aspas del Molino de Viento

Introduciendo $D = 2R$ en la ecuación 7.1 y espejando D tenemos:

$$D = 2\sqrt{P_{Eólica} / (2\rho V^3 \pi a(1-a)^2)} \quad (\text{Ec. 9.1})$$

5. RESULTADOS

5.1 Determinación y Caracterización del Recurso Eólico

Justo en el punto donde se localiza el pozo, hay muestras de vientos fuertes en una estructura anti granizo de una huerta de ciruelos, donde los vientos han llegado a doblar algunos postes. Lamentablemente no existe ninguna estación meteorológica que nos dé información sobre la velocidad del viento, por lo que sólo contaremos con las mediciones realizadas en el ejido.

Para tomar estas mediciones, se acordó con el ejidatario que se tomaran todos los días a las 6:00 p.m., debido más que nada a la disposición de él, puesto que a esa hora se desocupaba de sus labores. También se le encargó tomar los vientos fuertes que se presenten a cualquier hora. Pero se puede ver por los resultados, que la hora no fue una buena selección, puesto que los resultados marcan velocidades muy bajas, sin embargo, en los valores con asterisco se muestran los vientos fuerte, por lo que se puede ver que aunque a las 6:00 p.m. el viento es muy bajo, el mismo día hay vientos de velocidades muy superiores.

operación, son bajos su relación de velocidad de punta y su límite de desempeño teórico. Su relativamente pobre funcionamiento, comparado con su límite teórico, se debe en gran parte al empleo de álabes poco complejos, los cuales son simples superficies dobladas de hojas metálicas en vez de formas con perfil aerodinámico.

4.9 Diseño del Molino de Viento

Todos los molinos de viento tradicionales, tienen 18 aspas. Nuestro diseño consiste solamente en calcular el diámetro de la rueda de las aspas y el diámetro del pistón.

4.9.1 Cálculo del Diámetro de la Rueda de Aspas del Molino de Viento

Introduciendo $D = 2R$ en la ecuación 7.1 y espejando D tenemos:

$$D = 2\sqrt{P_{Eólica} / (2\rho V^3 \pi a(1-a)^2)} \quad (\text{Ec. 9.1})$$

5. RESULTADOS

5.1 Determinación y Caracterización del Recurso Eólico

Justo en el punto donde se localiza el pozo, hay muestras de vientos fuertes en una estructura anti granizo de una huerta de ciruelos, donde los vientos han llegado a doblar algunos postes. Lamentablemente no existe ninguna estación meteorológica que nos dé información sobre la velocidad del viento, por lo que sólo contaremos con las mediciones realizadas en el ejido.

Para tomar estas mediciones, se acordó con el ejidatario que se tomaran todos los días a las 6:00 p.m., debido más que nada a la disposición de él, puesto que a esa hora se desocupaba de sus labores. También se le encargó tomar los vientos fuertes que se presenten a cualquier hora. Pero se puede ver por los resultados, que la hora no fue una buena selección, puesto que los resultados marcan velocidades muy bajas, sin embargo, en los valores con asterisco se muestran los vientos fuerte, por lo que se puede ver que aunque a las 6:00 p.m. el viento es muy bajo, el mismo día hay vientos de velocidades muy superiores.

Fecha	Hora	Velocidad	Fecha	Hora	Velocidad	Fecha	Hora	Velocidad
29/11/04	18:00	0.77	17/12/04	19:00	0.80	9/01/05	18:00	3.62
30/11/04	20:00	0.21	18/12/04	18:50	2.42	10/01/05	14:00	1.10
1/12/04	18:10	0.26	19/12/04	16:40	1.93	11/01/05	18:00	3.16
2/12/04	18:30	1.63	20/12/04	19:00	2.65	12/01/05*	14:00	4.63
3/12/04	18:00	0.86	21/12/04	18:00	1.74	12/01/05*	15:05	8.32
4/12/04	18:00	0.78	22/12/04	11:00	5.53	12/01/05	18:20	3.88
5/12/04	18:15	2.16	23/12/04	19:00	2.43	13/01/05*	12:40	5.55
6/12/04*	11:30	4.18	24/12/04*	15:00	4.93	13/01/05	19:00	0.73
6/12/04*	11:35	3.96	24/12/04	17:00	6.03	13/01/05*	19:20	2.60
6/12/04	18:20	0.46	25/12/04	19:00	0.35	14/01/05	18:20	3.20
7/12/04*	6:50	4.24	26/12/04	20:00	1.08	15/01/05	18:05	3.48
7/12/04	18:00	0.73	27/12/04	19:00	1.10	16/01/05	18:40	0.93
8/12/04*	1:48	5.06	28/12/04	20:00	0.40	17/01/05	18:15	5.25
8/12/04	19:00	0.39	29/12/04	18:00	0.30	18/01/05	18:25	2.25
9/12/04	18:35	0.26	30/12/04	18:40	0.28	19/01/05	18:20	0.94
10/12/04*	11:37	4.79	31/12/04	18:00	1.00	20/01/05	19:00	1.97
10/12/04*	17:00	5.32	1/01/05	18:40	1.09	21/01/05	22:00	0.45
10/12/04	18:00	7.15	2/01/05	18:00	0.30	22/01/05	23:00	4.96
11/12/04	18:32	0.37	3/01/05	18:40	1.52	23/01/05	22:30	2.44
12/12/04*	14:20	3.77	4/01/05	18:30	0.66	24/01/05	21:00	1.88
12/12/04	18:30	0.69	5/01/05	18:30	1.03	25/01/05	18:00	5.04
13/12/04	7:00	2.87	6/01/05	17:40	3.53	26/01/05	18:00	3.48
14/12/04	19:00	2.77	7/01/05	18:10	0.96	27/01/05	18:57	0.46
15/12/04	20:00	0.54	7/01/05*	19:00	7.23	28/01/05	15:47	4.87
16/12/04	17:55	4.63	8/01/05	18:20	1.73			

Tabla 4: Mediciones tomadas del 29 de noviembre de 2004 al 28 de enero de 2005.
Los valores con asterisco son los valores registrados de los vientos fuertes.

Se hacen las siguientes suposiciones:

1. Cada dato es la velocidad promedio de todo el día.
2. Las velocidades adicionales, se toman como velocidades promedio de otro día.
3. Los dos meses son representantes del comportamiento eólico de todo el año.

La siguiente figura es la gráfica de velocidades

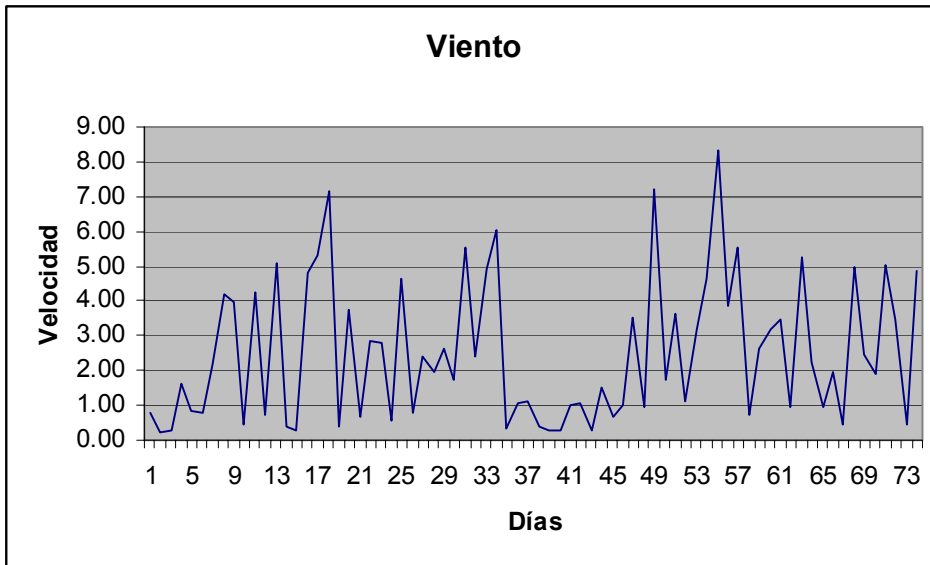


Figura 22: Gráfica del viento

5.1.1 Obtención de los parámetros de Rayleigh

Los datos de la tabla se normalizan en clases de .5 m/s y se colocan en la siguiente tabla en la columna de V_i , la frecuencia es el numero de veces que se repite el valor y $f(v_i)$ es la función de distribución de Rayleigh (Ec. 1.1).

V_i	Frecuencia	$f(v_i)$	V_i	Frecuencia	$f(v_i)$
0.0	1	1.33%	4.5	2	2.67%
0.5	17	22.67%	5.0	6	8.00%
1.0	13	17.33%	5.5	4	5.33%
1.5	4	5.33%	6.0	1	1.33%
2.0	4	5.33%	6.5	0	0.00%
2.5	6	8.00%	7.0	2	2.67%
3.0	4	5.33%	7.5	0	0.00%
3.5	4	5.33%	8.0	0	0.00%
4.0	5	6.67%	8.5	1	1.33%

Tabla 5: Frecuencia y Probabilidades de las velocidades

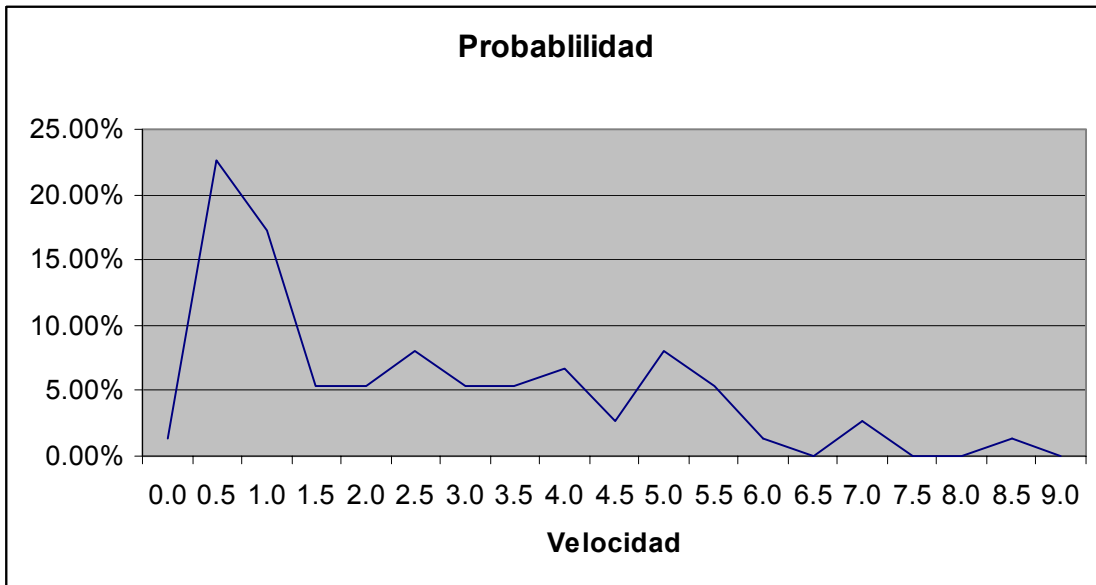


Figura 23: Distribución de probabilidad de Rayleigh

5.1.2 Obtención de los parámetros de Weibull

El valor de β lo obtenemos de la ecuación 1.3;
$$\beta = 1 - \frac{h(v \approx 0)}{h_{total}}$$

En este caso $v \approx 0$ son todos los valores inferiores a 1.5 m/s donde el molino de viento no arranca.
$$\beta = 1 - 35/74 = 0.58$$

Generalmente el valor de β se encuentra alrededor de 0.85, en nuestro caso no es así debido a la poca resolución de los datos, es decir, tenemos un valor por día, y generalmente se debe de tener un valor por hora o hasta 12 valores por hora.

Usando la ecuación 1.4 y promediando los valores de la tabla obtenemos los valores de $K = 1.26$ y $C = 2.5$ m/s. Sustituyendo estos valores en la ecuación 1.2 tenemos la gráfica de la distribución de Weibull.

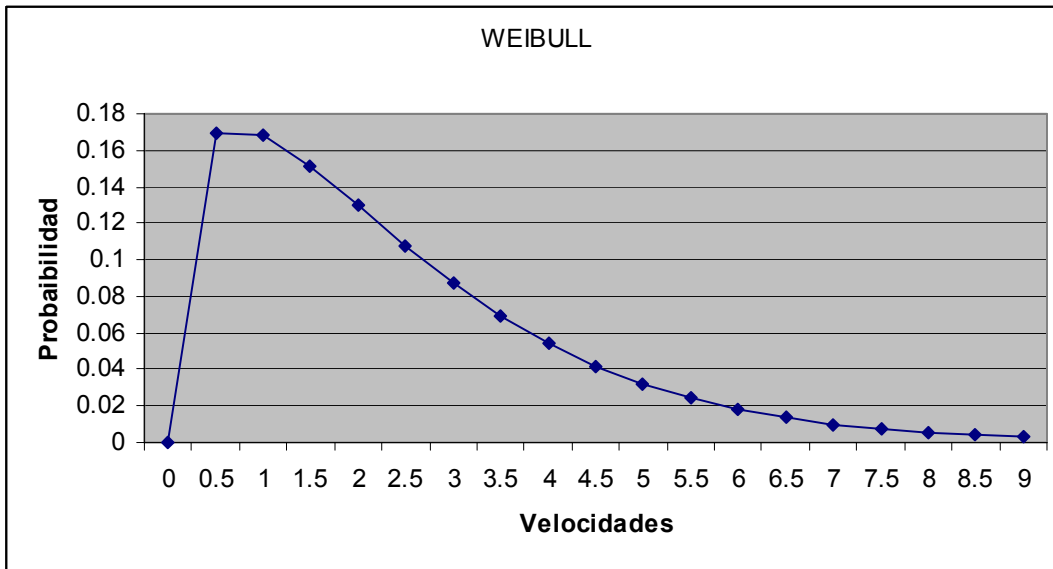


Figura 24: Probabilidad de Weibull. Escala $A = 2.69$; Forma $k = 1.26$; Media = 2.5; Mediana = 2

5.1.3 Velocidad promedio

La velocidad promedio es de 2.5 m/s con una probabilidad de ocurrencia del 11%

5.1.4 Ajuste de la velocidad por efecto de la altura

Las mediciones se hicieron a una altura aproximada de 2 metros. La altura a la que se encontrará el molino de viento es de 12 metros, usando la ecuación 1.5 con un valor de rugosidad de 0.2, tenemos una velocidad efectiva de **3.58 m/s**.

5.1.5 Efecto de la densidad del aire

El ejido San Felipe se encuentra a una altura sobre el nivel del mar de 1,700 metros, por lo que es muy importante sacar la densidad del aire en este lugar, porque si consideramos la densidad estándar los datos estarían erróneos.

Utilizando la ecuación 1.6

$$p(z) = p_0 \left(\frac{Tz}{T_0} \right)^{-5.25588}$$

$$p(z) = 101350 (298/288)^{-5.25588}$$

$$p(z) = 84,705.53 \text{ Pa}$$

Utilizando la ecuación 1.7

$$\rho(z) = \frac{p(z)}{RT}$$

$$\rho(z) = (84,705.53 \text{ Pa}) / [(0.287 \text{ J/kg K})(10^3)(288)]$$

$$\rho(z) = 1.025 \text{ kg/m}^3$$

5.2 Requerimiento de agua

La comunidad ideal para este tipo de proyecto, es el ejido San Felipe, ubicado en Doctor Arroyo, Nuevo León. Esta población representa el grave problema que sufre un gran número de comunidades en el altiplano mexicano, donde la única fuente de agua es la captación pluvial. En este ejido, el gobierno federal perforó un pozo en los años sesentas, la idea era que el agua de pozo abasteciera tanto a la comunidad como al ganado. Se equipó con una bomba conocida como “pumping Jack” accionada con un motor de combustión interna, un tanque de 50,000 litros y un abrevadero. La obra jamás se aprovechó debido a la alta salinidad del agua que impedía su uso tanto para la ganadería como para el consumo humano. (Ver fotos en anexos).

La comunidad está constituida por 70 personas, actualmente la disposición de agua es de 20 litros por persona al día (captación de agua de lluvia). Se quiere elevar esta disposición a 100 litros por persona por día. De la ecuación 2.1 tenemos entonces que $D_a = 100$, $D_f = 20$ y $N = 70$

Por lo tanto **$Q_t = (100-20)(70) = 5,600$ litros por día**

El valor de T_{molino} se debería de obtener por medio de Rayleigh, si las mediciones se hubieran hecho por lo menos cada hora, pero como en nuestro caso sólo se tomó una medida por día, este valor lo tenemos que suponer. Los proveedores de molinos, prometen que el molino funcionará 12 horas diarias, debido a que funcionan a partir de una leve brisa (1.5 m/s aprox.), este tiempo se me hace muy optimista, para fines de diseño, vamos a tomar un valor para T_{molino} de 8 hrs. diarias.

Para hacer un aprovechamiento sustentable del pozo, se debe de verificar que la extracción del agua no sobrepase el flujo máximo extraíble descrito en la ecuación 2.2. Por esta razón se realizó un aforo de 24 horas el día 5 de mayo de 2003 y los resultados indican que el pozo en el ejido San Felipe puede dar 0.51 litros por segundo de manera sustentable,

también se determinó que el nivel estático y dinámico se encuentra a 50 y 80 metros respectivamente. Por lo tanto la tubería del pozo debe de ir a 90 metros de profundidad. (El resultado escrito del proveedor se encuentra en la hoja de anexos.)

Sustituyendo los valores en la ecuación 2.2 tenemos que:

$$Q_{\max} = Q_f (3600\text{s/hr})(T_{\text{molino}}) = (0.51 \text{ lt/s})(3600\text{s/hr})(8\text{hr/dia}) = 14,688 \text{ lts/dia}$$

De la ecuación 2.3 tenemos que:

$$R = Q_t / Q_{\max} \times 100 = 5,600 / 14,688 \times 100 = 38.12\% \approx 38\%$$

Dividiendo entre ocho cada valor, tenemos los litros por hora de cada valor

$$Q_{\max} = 1,836 \text{ lt/hr y } Q_t = 700 \text{ lt/hr}$$

5.3 Diseño del Sistema de Ósmosis Inversa

5.3.1 Flujos y Concentraciones

Utilizando las ecuaciones 3.1, 3.2 y 3.3 obtenemos los flujos en la alimenticio, filtrado y concentrado respectivamente

$$\text{Alimentación} = Q_{\max} = 1,836 \text{ lts/hr}$$

$$\text{Filtrado} = Q_{\max}R = Q_t = 700 \text{ lts/hr}$$

$$\text{Concentrado} = Q_{\max} - Q_t = Q_{\max} (1-R) = 1,136 \text{ lts/hr}$$

Concentración en la alimentación:

Los datos de la concentración en la alimentación, se obtienen de cuatro muestras de agua que se le hicieron al pozo, una antes del aforo (4 de abril de 2003) donde el agua del pozo llevaba cerca de 30 años sin ser extraída, otra inmediatamente después del aforo (12 de mayo de 2003) donde se espera que la concentración se acerque más a un estado estable, una tercera 16 meses después (1 de septiembre de 2004) y una última (6 de octubre de 2004).

Los resultados de los análisis son los siguientes:

Resultados del primer análisis

Parámetro	Unidad	Resultado
Conductividad eléctrica	micro Mohs/cm.	15310
Color	unidades Pt-Co	5
Turbidez	NTU	300
Dureza Total (como CaCO ₃)	mg/l	1500
Sólidos Disueltos Totales	mg/l	15196
pH	unidades pH	7.57
Cloruros	mg/l	2190
Fluoruros	mg/l	1.34
Nitratos como N	mg/l	34
Nitritos como N	mg/l	0.034
Nitrógeno Amoniacal	mg/l	0.6
Sulfatos	mg/l	10788
S.A.A.M. (Detergentes)	mg/l	0.04
Alcalinidad bicarbonatos (CaCO ₃)	mg/l	184
Calcio	mg/l	516
Magnesio	mg/l	63
Silicio como SiO ₂	mg/l	19.4
Estroncio	mg/l	7.65
Sodio	mg/l	4148

Tabla 6: Primer análisis de agua de pozo, realizado el 4 de abril de 2003.

Resultados del segundo análisis

Parámetro	Unidad	Resultado
Conductividad eléctrica	micro Mohs/cm.	15,600
Dureza Total (como CaCO ₃)	mg/l	1564
Sólidos Disueltos Totales	mg/l	14,955
Sulfatos	mg/l	7201
Calcio	mg/l	496
Sodio	mg/l	4176

Tabla 7: Segundo análisis de agua de pozo, realizado el 12 de mayo de 2003

Resultados del tercer análisis

Parámetro	Unidad	Resultado
Conductividad eléctrica	micro Mohs/cm.	20,560
Sólidos Disueltos Totales	mg/l	15,300
pH	unidades pH	8.1
Cloruros	mg/l	2,038.54
Potasio	mg/l	100.3
Sulfatos	mg/l	7,166.40
Calcio	mg/l	501
Magnesio	mg/l	65.62
Sodio	mg/l	4,278.87

Tabla 8: Tercer análisis de agua de pozo realizado el 1 de septiembre de 2004.

Resultados del cuarto análisis

Parámetro	Unidad	Resultado
Turbidez	NTU	180
Sólidos Disueltos Totales	mg/l	15,247
Bario	mg/l	0.30
Cloruros	mg/l	1,840
Fluoruros	mg/l	0.97
Nitratos como N	mg/l	7.9
Nitrógeno Amoniacal	mg/l	0.5
Sulfatos	mg/l	7,788
Calcio	mg/l	398.2
Magnesio	mg/l	60.80
Silicio como SiO ₂	mg/l	42.15
Estroncio	mg/l	2.86
Sodio	mg/l	4,000

Tabla 9: Cuarto análisis de agua de pozo realizado el 6 de octubre de 2004.

La razón de que se tomaran cuatro muestras, es debido a que generalmente los sólidos disueltos disminuyen conforme se va extrayendo agua del pozo, por lo que la concentración en el agua puede variar, pero como se puede ver en las tablas, aunque la mayoría de los parámetros si cumplen con esta regla, hay algunos parámetros que por el contrario aumentaron. Con estos resultados es claro que se necesitan unas membranas de ósmosis inversa para agua de mar. Para obtener la presión a la que trabajará el sistema se toma el caso más crítico, es decir, se toman los parámetros con mayor contenido de sales, pero la suma de los sólidos disueltos, no puede sobrepasar las 15,300 partes por millón. Como estos contenidos no se obtuvieron de una misma muestra de agua, es muy probable que no exista un balance iónico. Para verificarlo, se deben de pasar las concentraciones a mili equivalentes por litro (meq/l) con la fórmula “ $\text{meq/l} = (\text{ppm}) (\text{valencia}) / (\text{masa atómica})$ ”, se suman los meq/l de los aniones y de los cationes y las sumas deben de ser mas o menos iguales, no debe de haber una diferencia mayor del 10 %.

Cationes:

$$\text{Calcio} = (516 \text{ ppm}) (2) / (40.08 \text{ g/mol}) = 25.75 \text{ meq/Lt}$$

$$\text{Magnesio} = (65.62 \text{ ppm}) (2) / (24.305 \text{ g/mol}) = 5.4 \text{ meq/Lt}$$

$$\text{Sodio} = (4,278.87 \text{ ppm}) (1) / (22.98 \text{ g/mol}) = 186.2 \text{ meq/Lt}$$

$$\text{Potasio} = (100.3 \text{ ppm}) (1) / (39.102 \text{ g/mol}) = 2.57 \text{ meq/Lt}$$

$$\text{Nitrógeno Amoniacal} = (0.6 \text{ ppm}) (1) / (18.04 \text{ g/mol}) = 0.03 \text{ meq/Lt}$$

$$\text{Bario} = (0.3 \text{ ppm}) (2) / (137.34 \text{ g/mol}) = 0.004 \text{ meq/Lt}$$

$$\text{Estroncio} = (7.65 \text{ ppm}) (2) / (87.62 \text{ g/mol}) = 0.17 \text{ meq/Lt}$$

$$\text{Total} = \mathbf{220.13 \text{ meq/Lt}}$$

Aniones:

$$\text{Carbonatos} = (42 \text{ ppm}) (2) / (60 \text{ g/mol}) = 1.4 \text{ meq/Lt}$$

$$\text{Bicarbonatos} = (164.7 \text{ ppm}) (1) / (61 \text{ g/mol}) = 2.7 \text{ meq/Lt}$$

$$\text{Sulfatos} = (10,788 \text{ ppm}) (2) / (96.06 \text{ g/mol}) = 224.61 \text{ meq/Lt}$$

$$\text{Cloruros} = (2,190 \text{ ppm}) (1) / (35.45 \text{ g/mol}) = 61.78 \text{ meq/Lt}$$

$$\text{Fluoruros} = (1.34 \text{ ppm}) (1) / (19 \text{ g/mol}) = 0.07 \text{ meq/Lt}$$

$$\text{Nitratos} = (34 \text{ ppm}) (1) / (62 \text{ g/mol}) = 0.55 \text{ meq/Lt}$$

$$\text{Silicio} = (42.15 \text{ ppm}) (2) / (60.08 \text{ g/mol}) = 1.4 \text{ meq/Lt}$$

$$\text{Total} = \mathbf{292.5088 \text{ meq/Lt}}$$

Como la diferencia es mayor del 10 %, la solución está en desequilibrio iónico, además de que los sólidos totales son 18,231.53 ppm, y el máximo es 15,300 ppm. Esta diferencia de 2,931.53 ppm de los sólidos totales, se la restamos al parámetro de mayor concentración de los aniones, que es el sulfato (10,788 ppm.), quedando un resultado de 7,856.47 ppm = 163.57 meq/Lt, dándonos un resultado total de los aniones de **231.473 meq/Lt** lo cual es una diferencia menor al 10% de los cationes y nos da una solución aceptable.

Resultados de la alimentación para el diseño

Parámetro	Unidad	Resultado
Conductividad eléctrica	micro Mohs/cm.	20,560
Color	unidades Pt-Co	5
Turbidez	NTU	300
Dureza Total (como CaCO ₃)	mg/l	1564
pH	unidades pH	8.1
Cloruros	mg/l	2,190
Carbonatos	mg/l	42
Bicarbonatos	mg/l	164.7
Potasio	mg/l	100.3
Bario	mg/l	0.3
Fluoruros	mg/l	1.34
Nitratos	mg/l	34
Nitrógeno Amoniacal	mg/l	0.6
Sulfatos	mg/l	7,856.5
Calcio	mg/l	516
Magnesio	mg/l	65.62
Silicio como SiO ₂	mg/l	42.15
Estroncio	mg/l	7.65
Sodio	mg/l	5,918.50
Sólidos Disueltos Totales	mg/l	15,300

Tabla 10: Parámetros del agua de pozo para el diseño de la ósmosis inversa.

La siguiente tabla muestra la calidad requerida para consumo humano de la norma NOM-002-CNA-1995 que representa la concentración en el filtrado.

Parámetro	Unidad	Resultado
pH	unidades pH	7.0
Cloruros	mg/l	30
Carbonatos	mg/l	0.00
Bicarbonatos	mg/l	4
Potasio	mg/l	1
Bario	mg/l	0.00
Fluoruros	mg/l	0.05
Nitratos	mg/l	5
Nitrógeno Amoniacal	mg/l	0.01
Sulfatos	mg/l	20
Calcio	mg/l	1
Magnesio	mg/l	0.15
Silicio como SiO ₂	mg/l	0.31
Estroncio	mg/l	0.02
Sodio	mg/l	35
Sólidos Disueltos Totales	mg/l	96.54

Tabla 11: Calidad requerida para su consumo.

La concentración en el concentrado, se obtiene con la ecuación 3.4 y los resultados se dan en la siguiente tabla.

Parámetro	Unidad	Resultado
Cloruros	mg/l	3513.87
Carbonatos	mg/l	67.74
Bicarbonatos	mg/l	263.19
Potasio	mg/l	161.16
Bario	mg/l	0.48
Fluoruros	mg/l	2.13
Nitratos	mg/l	51.77
Nitrógeno Amoniacal	mg/l	0.96
Sulfatos	mg/l	12659.47
Calcio	mg/l	831.65
Magnesio	mg/l	105.75
Silicio como SiO ₂	mg/l	67.79
Estroncio	mg/l	12.33
Sodio	mg/l	9524.52
Sólidos Disueltos Totales	mg/l	27,262.81

Tabla 12: Calidad del agua del concentrado

5.3.2 Cálculo de la Presión Osmótica

Para obtener la presión osmótica que existe en cada lado de la membrana (π_P y π_R), se debe de tener las concentraciones en cada uno de sus lados. En el lado de la filtración, la concentración es homogénea, sin embargo del otro lado, la concentración pasa de la alimentación al concentrado, por lo que se debe de hacer un promedio de la concentración de la alimentación y del concentrado, para tener una concentración efectiva.

Empleando la ecuación 3.5 $\pi = (nRT/V) F$ se obtiene la presión osmótica parcial de cada parámetro donde el factor de disociación F es 1 para todos los parámetros, porque ya están disociados, $n/V =$ el la concentración convertida a gramos por litro entre el peso molecular (mol/l), $R = 1.2051$ psi l/mol K, y $T = 298$ K.

Con la ecuación 3.6 se obtiene la presión osmótica total. Que es la sumatoria de todas las presiones parciales.

La siguiente tabla muestra los resultados.

Parámetro	P. M.	Unidad	Alimentación	Filtrado	Concentrado	Promedio	Filt. Mol/lt	Prom. Mol/lt	π_p	π_r
Cloruros	35.50	mg/l	2,190	30	3513.87	2851.94	0.0008	0.0803	0.3035	28.8503
Carbonatos	60.00	mg/l	42	0.00	67.74	54.87	0.0000	0.0009	0.0000	0.3284
Bicarbonatos	61.00	mg/l	164.7	4	263.19	213.95	0.0001	0.0035	0.0235	1.2595
Potasio	39.10	mg/l	100.3	1	161.16	130.73	0.0000	0.0033	0.0092	1.2007
Bario	137.34	mg/l	0.3	0.00	0.48	0.39	0.0000	0.0000	0.0000	0.0010
Fluoruros	19.00	mg/l	1.34	0.05	2.13	1.74	0.0000	0.0001	0.0009	0.0328
Nitratos	62.00	mg/l	34	5	51.77	42.89	0.0001	0.0007	0.0290	0.2484
N. A.	18.00	mg/l	0.6	0.01	0.96	0.78	0.0000	0.0000	0.0002	0.0156
Sulfatos	96.00	mg/l	7,856	20	12659.47	10257.97	0.0002	0.1069	0.0748	38.3733
Calcio	40.00	mg/l	516	1	831.65	673.82	0.0000	0.0168	0.0090	6.0496
Magnesio	24.30	mg/l	65.62	0.15	105.75	85.68	0.0000	0.0035	0.0022	1.2663
SiO ₂	60.00	mg/l	42.15	0.31	67.79	54.97	0.0000	0.0009	0.0019	0.3290
Estroncio	87.62	mg/l	7.65	0.02	12.33	9.99	0.0000	0.0001	0.0001	0.0409
Sodio	23.00	mg/l	4,278.87	35	6879.95	5579.41	0.0015	0.2426	0.5465	87.1164
S. D. T.		mg/l	15,300.00	96.54	24,618.25	19,959.12	0.0028	0.4598	1.00	165.11

Tabla 13: Concentraciones y presiones osmóticas de los flujos

De esta forma tenemos que la presión osmótica total del lado del filtrado es: $\pi_p = 1.00$ psi.

Y del otro lado de la membrana es: $\pi_r = 165.11$ psi.

5.3.3 Cálculo de la Presión requerida para el Sistema de Ósmosis Inversa (POI)

Además de las presiones osmóticas, necesitamos la propiedad de la membrana como la permeabilidad del agua (W_a) y el área.

Las membranas se dividen en membranas para agua salobres (1,000-10,000 ppm) y membranas para agua de mar (10,000– 30,000 ppm), en este caso como tenemos 15,300 ppm, la membrana a utilizar es para agua de mar. Estas membranas comúnmente tiene un área de **8 por 80 pulgadas** y una permeabilidad promedio de **0.061773 mol/[s m² psi]**.

El Flujo de solvente se obtiene de la siguiente manera:

$$J_a = Q_t / (\text{peso molecular})(\text{area de la membrana}) \text{ (mol/ m}^2 \text{ seg.)}$$

$$J_a = (700\text{lbs/hr})(1\text{hr}/3600\text{s})(.988\text{kg}/1\text{lt})(1000\text{g}/\text{kg})(1\text{mol}/18\text{g}) / [(8 \times 80\text{in}^2)(1/15500 \text{ m}^2/\text{in}^2)]$$

$$J_a = 25.85 \text{ mol/ m}^2 \text{ seg.}$$

Empleando la fórmula 3.7

$$\text{POI} = J_a / W_a + (\pi_r - \pi_p) = (25.85)/(0.061773) + (165.11 - 1.0)$$

$$\text{POI} = 582.58 \text{ psi}$$

Debido a que es una presión bastante alta, la podemos disminuir al colocar una membrana en paralelo, es decir duplicar el área para que disminuya J_a .

$$\text{POI} = J_a / W_a + (\pi_r - \pi_p) = (25.85)/(2)(0.061773) + (165.11 - 1.0) = 373.34 \approx 375 \text{ psi}$$

5.4 Diseño del Tanque Hidroneumático

Caso Isotérmico:

De la ecuación 4.1 podemos sacar el volumen del tanque hidroneumático. Para esto necesitamos definir el valor de la Presión máxima. Esta presión mientras sea mayor, las dimensiones del tanque serán menores, pero también el molino de viento tendrá que ser mayor, por eso la presión máxima la definimos para el diseño en 525 psi.

$$V_{total} = V_2 = (POI)(2)(Q_{max})/(P_{max} - POI) + (2)(Q_{max})$$

$$V_{total} = (375\text{psi})(2\text{hr})(1,836 \text{ lt/hr})/(525-375)\text{psi}+(2\text{hr})(1,836 \text{ lt/hr}) = 12,852 \text{ litros}$$

$$V_{total} = 12,852 \text{ litros}$$

Caso Adiabático :

Usando la ecuación 4.4 y $P_{max} = 550$ psi.

$$V_{total} = [(2)(Q_{max})(POI/P_{max})^{(1/k)}]/[1-(POI/P_{max})^{(1/k)}] + (2)(Q_{max})$$

$$V_{total} = [(2\text{hr})(1,836 \text{ lt/hr})(375/525)^{(1/1.4)}]/[1-(375/525)^{(1/1.4)}] + (2\text{hr})(1,836 \text{ lt/hr})$$

$$V_{total} = 17,187.99 \text{ litros} \approx 17,188 \text{ litros}$$

Si diseñáramos el tanque basándonos en que el proceso es isotérmico y resultara ser adiabático, el volumen que se almacenaría sería menor del que esperamos.

Para demostrar esto, obtenemos la temperatura que alcanzaría el aire a la presión máxima con la ecuación 4.3.

$$T_1 = T_2(P_1/P_2)^{[(k-1)/k]} = (25)(525/375)^{[(1.4-1)/1.4]} = 27.52^\circ\text{C}$$

El V_2 del cálculo isotérmico es 5200 litros. Empleando la ecuación de estado para sacar V_1

$$V_1 = P_2 V_2 T_1 / P_1 T_2 = (375)(12,852)(27.52+273) / (525)(25+273)$$

$$V_1 = 9,257.71 \text{ litros de aire}$$

$$\text{Litros de agua almacenada} = V_{total} - V_1 = 12,852 - 9,257.71 = 3,594.29 \text{ lts de agua}$$

Esto equivale a $3,594.29 \text{ lt} / 1,836 \text{ lt/hr} = 1.95$ horas de almacenamiento en lugar de las 2 hrs. que queremos se queden almacenadas.

Si por el contrario fuera isotérmico en lugar de adiabático

$$V_1 = P_2 V_2 / P_1 = (375)(17,188) / (525) = 12,277.14 \text{ litros de aire}$$

$$\text{Litros de agua almacenada} = V_{total} - V_1 = 17,188 - 12,277.14 = 4,910.86 \text{ de agua}$$

Esto equivale a $4,910.86 \text{ lt} / 1,836 \text{ lt/hr} = 2.68$ horas de almacenamiento. Como la diferencia de volumen representa un costo considerable el volumen que vamos a considerar es el de **12,852 lts.** ya que como quiera dio casi dos horas

5.5 Cálculo de la Presión Hidráulica que entregará el Molino de Viento

Como se muestra en la figura, el diámetro de la tubería es de 2.5 pulgadas.

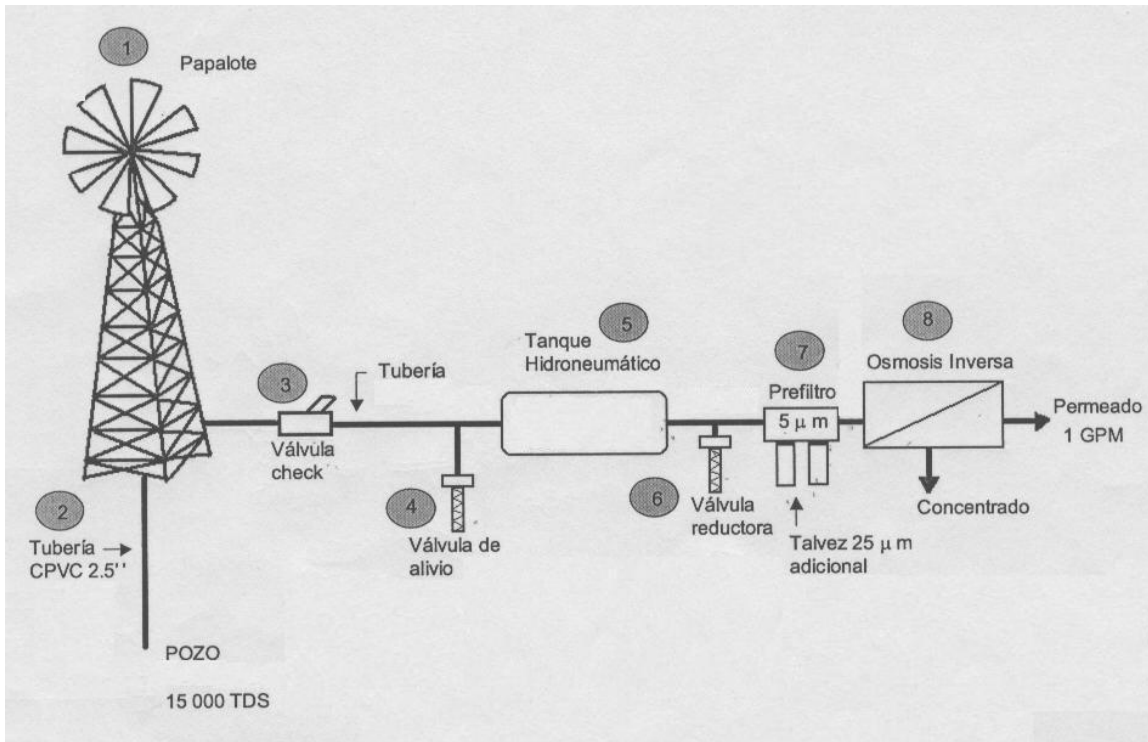


Figura 25: Sistema de Ósmosis Inversa Eólica

Usando el número de Reynolds para verificar si el flujo es turbulento o laminar

$$Re = \rho V D / \mu = 4 \rho Q_{max} / \pi \mu D = (4)(998 \text{ kg/m}^3)(0.51 \text{ l/s}) / [(\pi)(1 \times 10^{-3} \text{ kg/m}\cdot\text{s})(2.5 \cdot 0.0254 \text{ m/in})] \quad Re = 10,203$$

Como el Reynolds es mayor que 2,300, el flujo es turbulento.

Pérdidas Mayores:

La longitud total de la tubería es de 110 metros, por lo que:

$$L/D = 110 / (2.5 \cdot 0.0254 \text{ m/in}) = 1,732.28$$

Para sacar el factor de fricción f , primero tenemos que sacar la rugosidad relativa de la siguiente figura con el diámetro y el material, que es acero galvanizado.

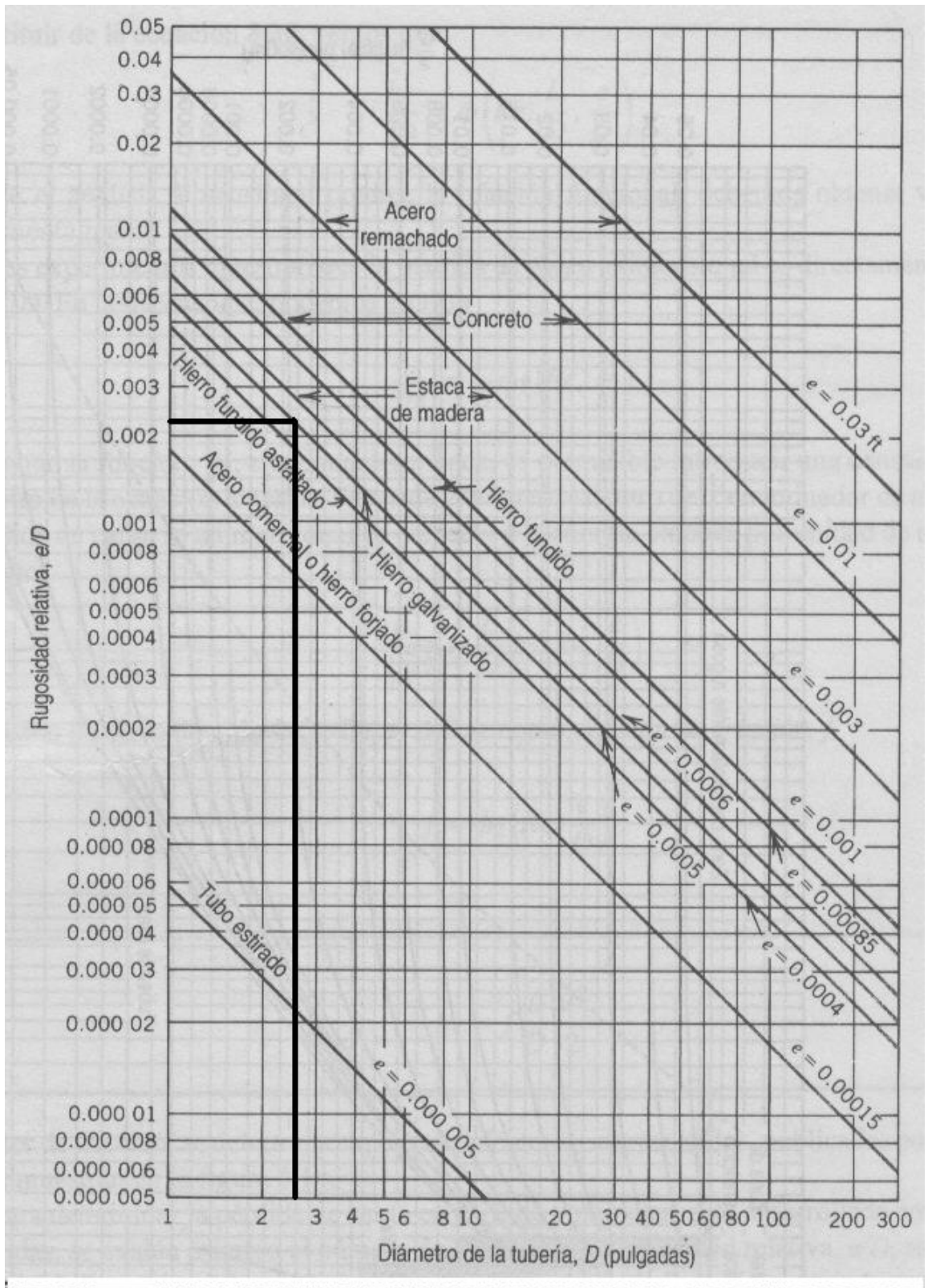


Figura 26: Rugosidad Relativa

$e/D \approx 0.0023$ aproximadamente, teniendo en cuenta que es un escala logarítmica.

Con la rugosidad relativa y el número de Reynolds, se saca de la siguiente figura el factor de fricción f

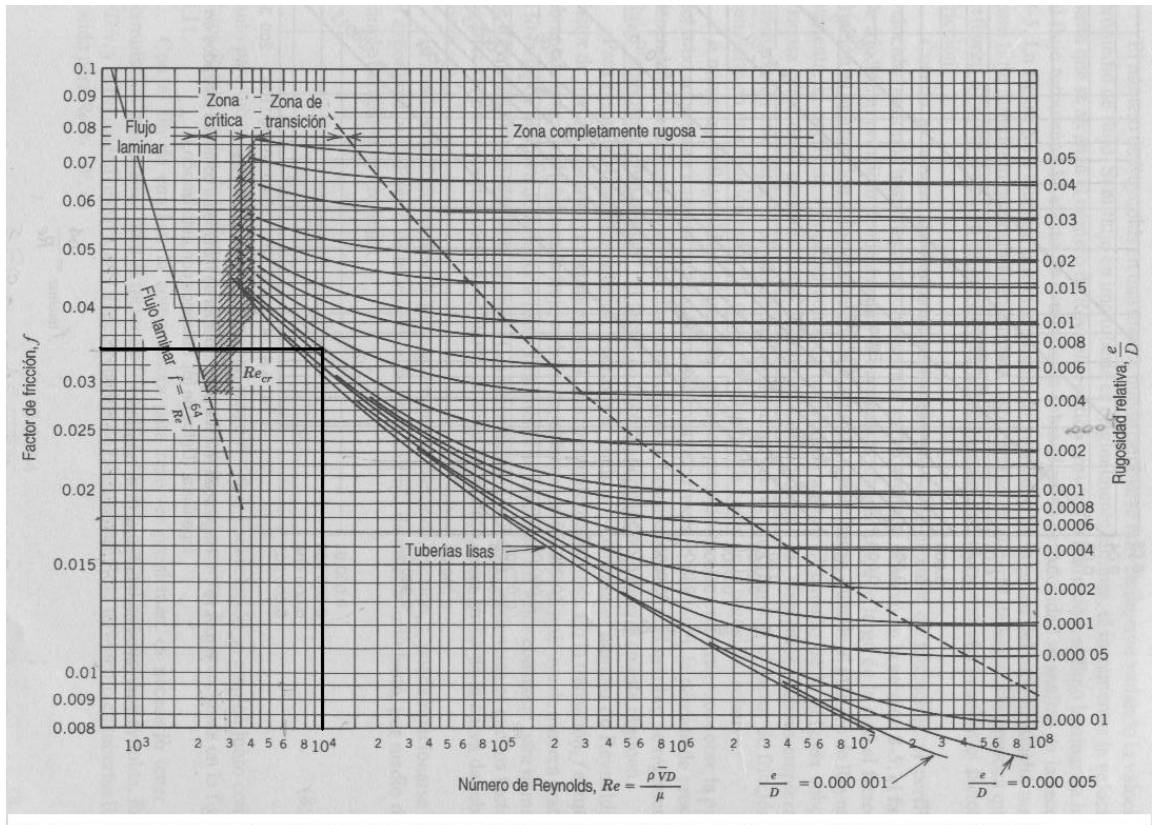


Figura 27: Factor de Fricción

$$f = 0.034$$

Pérdidas Menores:

Estas pérdidas son causadas por :

1. Entrada a la tubería
2. Codo de 90°
3. Válvula check
4. Entrada al tanque Hidroneumático
5. Salida del Tanque Hidroneumático
6. Válvula de bola
7. Filtro de 5 micras

Estas pérdidas se pueden escribir como el coeficiente de pérdida menor “K” o como la pérdida en la longitud equivalente por el factor de fricción “ $f L_e/D$ ”[23].

Valores de K:

- K Entrada a la Tubería = 0.78
- K Entrada al Tanque = 1
- K Salida del Tanque = 0.5

$$K_{total} = 2.28$$

Valores de Le/D:

- Le/D Codo de 90° = 30
- Le/D Válvula check = 55
- Le/D Válvula de bola = 3
- Le/D Filtro = 420

$$Le/D_{total} = 508$$

Acomodando la ecuación 5.1 tenemos:

$$\begin{aligned} P &= P_{max} + \rho_{agua}gh + \rho_{agua} [f (L/D + Le/D_{total})+K_{total}](4Q_{max}/\pi D^2)^2/2 \\ P &= 525 \text{ psi} + (998 \text{ kg/m}^3)(9.81 \text{ m/s}^2)(90\text{m})(1.45 \times 10^{-4} \text{ psi/Pa}) \\ &+ (998 \text{ kg/m}^3) [0.034(1,732.28+508)+ 2.28](4Q_{max}/3600\pi D^2)^2/2(1.45 \times 10^{-4} \text{ psi/Pa}) \\ P &= 550 + 127.79 + 0.1472 = 652.94 \text{ psi} \\ P &\approx 655 \text{ psi} \end{aligned}$$

5.6 Cálculo de la Potencia de bombeo del Molino de Viento

Utilizando la ecuación 6.1 tenemos:

$$\begin{aligned} P_{bombeo} &= P(6,894.75 \text{ Pa/psi})Q_{max}/[(1000)(3600)] \\ P_{bombeo} &= (655 \text{ psi})(6,894.75 \text{ Pa/psi})(1,836 \text{ lt/hr})(1\text{m}^3/1000\text{lt})(1\text{hr}/3600\text{s}) \\ P_{bombeo} &= 2,303.2 \text{ W} = 3.08 \text{ hp} \end{aligned}$$

5.7 Cálculo de la Eficiencia Experimental del Molino de Viento

Para pasar de la potencia real que es la potencia neta que entrega el molino de viento, a la potencia bruta, que es la potencia que el viento le va a entregar al molino de viento, debemos de sacar la eficiencia experimental que tienen los molinos de viento. En la siguiente tabla, se encuentran diferentes tamaños de molinos de viento y sus capacidades. Estos resultados se obtuvieron con un viento de 24 km/hr = 6.67 m/s. Los números en rojo son las profundidades de bombeo en metros.

Diámetro del Pistón Pulgadas	Volumen Lts / Hr.	Tamaño del Molino					
		Pies					
		8	10	12	14	16	20
1 7/8	682	53	77	115	160	300	500
2	720	42	65	97	140	225	
2 ¼	1000	34	52	77	110	180	370
2 ½	1230	29	43	65	92	150	
2 ¾	1460	25	37	55	80	130	245
3 ½	2420	15	23	35	49	82	
3 ¾	2750	15	20	30	44	70	135
4	3150	12	18	26	38	61	
4 ½	4000	9	14	21	30	49	
5	4900	8	11	17	24	40	65
6	7100	5	8	11	17	26	42
8	12546					15	28
10	19626						20
12	28313						14
14	38607						10

Tabla 14: Tabla de capacidad de bombeo del papalote.

De esta tabla sacamos la potencia de bombeo de cada molino de viento, utilizando la ecuación 7.1, donde se toman los datos del diámetro de las aspas, el flujo del agua y la profundidad. Cada molino debe de tener la misma potencia, es decir a mayor profundidad, menor flujo y viceversa, de tal modo que el producto de estos, debe de ser el mismo. Por esta razón, al final de la tabla 13 se promedian las potencias de cada molino.

Diámetros	Potencias de Bombeo (W)					
	8 ft	10 ft	12 ft	14 ft	16 ft	20 ft
	98.30	142.81	213.29	296.76	556.42	927.37
	82.24	127.27	189.93	274.13	440.57	0.00
	92.46	141.42	209.41	299.15	489.52	1006.23
	97.01	143.84	217.43	307.74	501.76	0.00
	99.26	146.91	218.38	317.64	516.17	972.78
	98.72	151.37	230.35	322.48	539.67	0.00
	112.18	149.58	224.36	329.07	523.51	1009.63
	102.80	154.20	222.73	325.53	522.56	0.00
	97.90	152.29	228.44	326.35	533.03	0.00
	106.61	146.58	226.54	319.82	533.03	866.18
	96.54	154.47	212.40	328.25	502.03	810.97
	0.00	0.00	0.00	0.00	511.79	955.35
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1067.48
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1077.98
	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1049.94
Pot. Prom	98.55	146.43	217.57	313.36	514.17	974.39

Tabla 15: Potencias de bombeo de los Molino de Viento.

Esta es la potencia neta que entregan los molinos al sistema de bombeo

Potencias Eólicas (W) y Eficiencias (%)						
	8	10	12	14	16	20
Pot. Eólica	505.02	789.09	1136.30	1546.62	2020.08	3156.38
Eficiencias	19.51	18.56	19.15	20.26	25.45	30.87

Tabla 14: Tabla de capacidad de bombeo del papalote

Para nuestro diseño, en lugar de tomar una eficiencia promedio, se va a tomar el caso mas crítico, que es la eficiencia menor, $\eta = 19.15$

5.8 Cálculo de la Potencia Eólica del Molino de Viento

De esta forma tenemos que necesitamos extraer del viento la siguiente potencia

$$P_{Eólica} = 2,303.2 / 0.1915 = 12,027.12 \text{ W} = 16.13 \text{ Hp}$$

5.9 Diseño del Molino de Viento

5.9.1 Cálculo del Diámetro de la Rueda de Aspas del Molino de Viento

Sustituyendo en la ecuación 9.1 $a = 1/5$ ya que el molino no va a tener la máxima eficiencia ($a=1/3$ cuando ocurre la eficiencia máxima [24]), $V = 3.58 \text{ m/s}$ y $\rho = 1.025 \text{ kg / m}^3$ tenemos:

$$D = 2\sqrt{[P_{Eólica} / (2\rho V^3 \pi a(1-a)^2)]} = 2\sqrt{[(12,027.12) / (2(1.025)(3.58)^3 \pi 1/5(1-1/5)^2)]}$$

$$D = 35.66 \text{ m} = 117 \text{ ft}$$

Este tamaño de rueda de aspas, es muy grande, la razón es debida a la baja velocidad de viento.

CONCLUSIONES

1. El estudio realizado acerca del potencial eólico es muy pobre. Es necesario realizar un análisis más detallado donde las mediciones sean cada 5 minutos y se registre magnitud y dirección. De esta forma, en nos podrá dar una idea más real del recurso eólico de la zona.
2. Un sistema de ósmosis inversa empleando la energía eólica, no sólo es viable, sino que debido a el aumento en la escasez del vital líquido y a los escasos recursos que tienen los campesinos en el medio rural, es necesario la aplicación de un sistema de bajo costo que les permita en caso de requerir algún arreglo, conseguir refacciones pronto y a bajo costo e instalarlas ellos mismos.
3. Este primer estudio permite estimar la ubicación de anemómetros especializados para medir con exactitud las condiciones de viento en la altura y lugar específicos. Se sugiere utilizar el WindFarm para hacer un mapa de viento que lleve a identificar los puntos de mayor potencial eólico. Para este efecto es inminente la digitalización de mapas topográficos actualizados.
4. Es un requisito conocer la legislación local en torno al uso de tierra, generación eléctrica, interconexión, impacto ambiental y beneficios por producción con recursos renovables.
5. El molino de viento tradicional, tiene un gran número de álabes (18) y opera a velocidades relativamente bajas. Su solidez (relación entre el área del álabe y el área de barrido del disco del molino de viento) es alta y su relación de velocidad de punta y un límite de desempeño teórico es bajo. Su deficiente relativamente pobre funcionamiento, comparado con su límite teórico, se debe en gran parte al empleo de álabes poco complejos, los cuales son simples superficies dobladas de hojas metálicas.

6. El siguiente paso es realizar un diseño más eficiente de aspas, en donde se empleen formas con perfil aerodinámico, que conserven la misma solidez y relación de velocidad punta originales, permitan el arranque a baja velocidad, pero que tengan un aprovechamiento mas eficiente del aire.

El proyecto completo será ejecutado por Agua y Drenaje de Monterrey, Municipios Foráneos y a grandes rasgos incluye la extracción del agua, la desalinización (sistema anteriormente mostrado), un tanque de 50,000 litros para almacenar agua a lado del pozo, una tubería de 673 metros para conducir el agua a otro tanque con capacidad de 10,000 litros que se encuentra a una diferencia de altura del pozo de 40 metros y una red de distribución para que cada una de las 35 casa que se encuentran en el ejido cuente con una llave y medidor para disponer del Agua.

La inversión presupuestada del proyecto es de \$900,000.00 pesos mexicanos.

ANEXOS

Fotos



Foto 1: Pozo con tanque de 50,000 litros

6. El siguiente paso es realizar un diseño más eficiente de aspas, en donde se empleen formas con perfil aerodinámico, que conserven la misma solidez y relación de velocidad punta originales, permitan el arranque a baja velocidad, pero que tengan un aprovechamiento mas eficiente del aire.

El proyecto completo será ejecutado por Agua y Drenaje de Monterrey, Municipios Foráneos y a grandes rasgos incluye la extracción del agua, la desalinización (sistema anteriormente mostrado), un tanque de 50,000 litros para almacenar agua a lado del pozo, una tubería de 673 metros para conducir el agua a otro tanque con capacidad de 10,000 litros que se encuentra a una diferencia de altura del pozo de 40 metros y una red de distribución para que cada una de las 35 casa que se encuentran en el ejido cuente con una llave y medidor para disponer del Agua.

La inversión presupuestada del proyecto es de \$900,000.00 pesos mexicanos.

ANEXOS

Fotos



Foto 1: Pozo con tanque de 50,000 litros



Foto 2: Extracción de la tubería oxidada del pozo



Foto 3: Aforo del Pozo

Aforo

Aforos de Matehuala

MANUEL QUIJANO GUERRERO
Int. Motel "El Dorado" Tel. 2-12-86 MATEHUALA, S.L.P.

Localización del Pozo SAN FELIPE FECHA 5 de MAYO 2003
MUNICIPIO DR. ARROYO HOJA NUM. 1

DATOS DEL EQUIPO DE BOMBEO

MOTOR	BOMBA
Marca <u>CUMMIS</u>	Marca _____ Long. Columna _____
Modelo <u>250</u>	Diam. Tubo Descarga _____ Diam. Orificio _____
Tipo <u>ESTACIONARIO</u>	Diam. Columna _____ Num. Impulsores _____
R.P.M. <u>2000</u>	Tipo Impulsores _____ Diam. Impulsores _____
H.P. <u>250</u>	Acoplamiento por _____ Relación _____
P O Z O <u>91 METROS</u>	DIA METRO ADEME <u>8"</u> NIVEL ESTÁTICO <u>50 METROS</u>



DIA	HORA	R.P.M.	PIEZOMETRO		GASTOS		NIVEL DE BOMBEO Mts.		Abati- miento	OBSERVACIONES
			CMS.	MTS.	G.P.M.	L.P.S.	S. Neumática	S. Eléctrica		
5	1 PM	1800	2.0			1.02		50		AGUA TURBIA
5	1.15	1800	2.0			1.02		70	20	" "
5	1.30	1800	2.0			1.02		75	25	" "
5	1.45	1900	1.5			0.88		80	30	" "
5	2. PM	1900	1.5			0.88		82	32	" "
5	3 PM	1800	1.5			0.72		83	33	" "
5	5 PM	1750	0.5			0.51		83	33	" "
5	7 PM	1800	0.5			0.51		83	33	" "
5	9 PM	1800	0.5			0.51		83	33	" "
5	11 PM	1800	0.5			0.51		83	33	" "
6	1 AM	1750	0.5			0.51		82	32	" "
6	3 AM	1750	0.5			0.51		82	32	" "
6	5 AM	1750	0.5			0.51		82	32	" "
6	7 AM	1750	0.5			0.51		82	32	" "
6	9 AM	1750	0.5			0.51		82	32	" "
6	12 AM	1750	0.5			0.51		82	32	" "
6	1 PM	1900	SE	AGUA						RECUPERACION HS. MIN. SEG.

OBSERVACIONES

SE RECOMIENDA INSTALAR UNA BOMBA CON TUBERIA DE 1" PULGADA A 1" 90 METROS DE LONGITUD

Análisis del agua

f rep (1m/20p) ema 0111

FASIQ INTERNACIONAL	FASIQ INTERNACIONAL S.A. de C.V. 2 de Abril Ote. 1111, Col. Independencia Monterrey, N.L. 64720 MEXICO Tel (81) 8190-6782 Fax (81) 8349-5774	REPORTE DE PRUEBAS ORDEN OT- 20304244			
CLIENTE CL- 5015* Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Mty. Ave. Eugenio Garza Sada No. 2501 Col. Tecnológico Monterrey, N.L. (Aulas VII Oficina 313) Atención: Ing. Keld Pedersen Correa		Fecha de Recepción de la Muestra: 4/4/2003 Fecha Reporte: 4/16/2003 Referencia Cotización: FL-20304136 Pedido: Ing. Keld Pedersen Correa. Muestreo: Itesm / Ing. Keld Pedersen Correa. Tel 8158-2261 / Fax 8358-2000 ext. 5563			
Identif. Muestra: Agua de Pozo de Dr. Arroyo.		Control: 030404-0581			
Part	Parámetro	Método	Lote	Unidad	Resultado
1	Conductividad Eléctrica	NMX-AA-093-SCFI-2000	3027	micro mohs/cm	1,310
2	Color	NMX-AA-045-SCFI-2001	3011	unidades Pt-Co	5*
3	Turbidez	EPA 180.1 (1983)	3011	NTU	300
4	Cianuro Total	EPA 335.2 (1983)	3010	mg/l	<0.003
5	Cloro Libre	NMX-AA-100-1987	3012	mg/l	<0.09
6	Cloruros	NMX-AA-073-SCFI-2001	3007	mg/l	2,190
7	Dureza Total (como CaCO3)	NMX-AA-072-SCFI-2001	3011	mg/l	1,500
8	Fenoles	NMX-AA-050-SCFI-2001	3005	mg/l	<0.003
9	Fluoruros	NMX-AA-077-SCFI-2001	3006	mg/l	1.34
10	Nitratos como N	NMX-AA-079-SCFI-2001	3008	mg/l	34
11	Nitritos como N	EPA 354.1 (1983)	3019	mg/l	0.034
12	Nitrógeno Amoniacal	NMX-AA-026-SCFI-2001	3006	mg/l	0.6
13	pH	NMX-AA-008-SCFI-2000	3045	unidades pH	7.57
14	Sólidos Disueltos Totales	NMX-AA-034-SCFI-2001	3012	mg/l	15,196
15	Sulfatos	NMX-AA-74-1981	3006	mg/l	10,788
16	S.A.A.M. (Detergentes)	NMX-AA-039-SCFI-2001	3022	mg/l	0.04
17	Alcalinidad Bicarbonatos (CaCO3)	NMX-AA-036-SCFI-2001	3010	mg/l	184
18	Bario	NMX-AA-051-SCFI-2001	3005	mg/l	<0.1
19	Calcio	NMX-AA-051-SCFI-2001	3008	mg/l	516
20	Magnesio	NMX-AA-051-SCFI-2001	3005	mg/l	63
< >					
ESTE LABORATORIO HA SIDO Acreditado POR LA ENTIDAD MEXICANA DE Acreditación, A.C. (ema)					
Información de la Muestra: - Muestra aprox. 8 lts. - 6 lts. en 12 lcos de plástico conserv. 4°C. - 1 lto. en lco. de plástico conserv. 4°C. - 1 lto. en lco. de vidrio conserv. 4°C. - Agua turbia con sedimento café rojizo - Recibida a 4°C, en hielera con hielo.					
Observaciones: - Los datos contenidos en este reporte representan únicamente a las muestras cuya identificación se menciona arriba * pH=7.57		Reportó  Lic. Blanca E. Armas Hidalgo Dirección de Operaciones			
Este informe no podrá reproducirse total ni parcialmente sin la autorización previa de FASIQ INTERNACIONAL, S.A. de C.V.					

FASIQ
INTERNACIONALFASIQ INTERNACIONAL S.A. de C.V.
2 de Abril Ote. 1111, Col. Independencia
Monterrey, N.L. 64720 MEXICO
Tel (81) 8190-6782 Fax (81) 8349-5774

REPORTE DE PRUEBAS

ORDEN OT- 20304244

2 / 2

CLIENTE		CL- 5015*		Fecha de Recepción de la Muestra:		4/4/2003	
Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Mty. Ave. Eugenio Garza Sada No. 2501 Col. Tecnológico Monterrey, N.L. (Aulas VII Oficina 313) Atención: Ing. Keld Pedersen Correa				Fecha Reporte:		4/16/2003	
				Referencia		Cotización: FL-20304136	
				Pedido: Ing. Keld Pedersen Correa.		Muestreo: Itesm / Ing. Keld Pedersen Correa. Tel 8158-2261 / Fax 8358-2000 ext. 5563	
Identif. Muestra: Agua de Pozo de Dr. Arroyo.				Control: 030404-0581			
Part	Parámetro	Método	Lote	Unidad	Resultado		
21	Silicio como SiO2	NMX-AA-051-SCFI-2001	3003	mg/l	19.4		
22	Estroncio	NMX-AA-051-SCFI-2001	3005	mg/l	7.65		
23	Sodio	NMX-AA-051-SCFI-2001	3009	mg/l	4,148		
< >							

ESTE LABORATORIO HA SIDO ACREDITADO POR LA ENTIDAD MEXICANA DE ACREDITACION, A.C. (ema)

Información de la Muestra: - Muestra aprox. 8 lts. - 6 lts. en 12 fcos de plástico conserv. 4°C. - 1 lto. en fco. de plástico conserv. 4°C. - 1 lto. en fco. de vidrio conserv. 4°C. - Agua turbia con sedimento café rojizo. - Recibida a 4°C. en hielera con hielo.	Observaciones: - Los datos contenidos en este reporte representan únicamente a las muestras cuya identificación se menciona arriba * pH=7.57	Reportó <div style="border: 1px solid black; width: 100px; height: 30px; margin: 0 auto;"></div> Lic. Blanca E. Armas Hidalgo Dirección de Operaciones
--	---	--

Este informe no podrá reproducirse total ni parcialmente sin la autorización previa de FASIQ INTERNACIONAL, S.A. de C.V.



FASIQ
INTERNACIONALFASIQ INTERNACIONAL S.A. de C.V.
2 de Abril Ote. 1111, Col. Independencia
Monterrey, N.L. 64720 MEXICO
Tel (81) 8190-6782 Fax (81) 8349-5774

REPORTE DE PRUEBAS

ORDEN OT- 20305359

1 / 1

CLIENTE CL- 5015c		Fecha de Recepción de la Muestra:		5/12/2003	
ITESM- Campus Monterrey Centro de Estudios del Agua Aula 7 3er. Piso Ave. Eugenio Garza Sada No. 2501 Sur Col. Tecnológico Monterrey, N.L. Atención: Ing. Keld Pedersen		Fecha Reporte:		5/21/2003	
		Referencia			
		Cotización:			
		Pedido:		Ing Keld Pedersen	
		Muestreo:		Itesm-Mty/Keld Pedersen Tel 8158-2261 / 8358-2000 ext. 5563	
Identif. Muestra: Agua de Pozo				Control: 030512-0895	
Part	Parámetro	Método	Lote	Unidad	Resultado
1	Conductividad Eléctrica	NMX-AA-093-SCFI-2000	3041	micro mohs/cm	15,600
2	Sólidos Disueltos Totales	NMX-AA-034-SCFI-2001	3016	mg/l	14,955
3	Dureza Total (como CaCO3)	NMX-AA-072-SCFI-2001	3015	mg/l	1,564
4	Sulfatos	NMX-AA-74-1981	3011	mg/l	7,201
5	Calcio	NMX-AA-051-SCFI-2001	3010	mg/l	496
6	Sodio	NMX-AA-051-SCFI-2001	3013	mg/l	4,176
< >					

ESTE LABORATORIO HA SIDO ACREDITADO POR LA ENTIDAD MEXICANA DE ACREDITACION, A.C. (ema)

Información de la Muestra: - Muestra aprox 2 lts en botella de plástico conservador 4°C - Agua turbia con sedimento café. - Recibida a 4°C en hielera con hielo.	
Observaciones: - Los datos contenidos en este reporte representan únicamente a las muestras cuya identificación se menciona arriba	Reportó Lic. Blanca E. Armas Hidalgo Dirección de Operaciones

Este informe no podrá reproducirse total ni parcialmente sin la autorización previa de FASIQ INTERNACIONAL, S.A. de C.V.

con NanoFiltración

Na₂SO₄ sulfato de Sodio → 99%

**DIVISION DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
AREA DE AGRICULTURA Y TECNOLOGIA DE ALIMENTOS
LABORATORIO DE ANALISIS DE SUELOS Y AGUAS**

RESULTADO DE ANALISIS DE AGUAS PARA RIEGO

FECHA: 1 de Septiembre del 2004

UBICACION DE LA PROPIEDAD	ENVIADO POR:
"PROYECTO AGUA Y VIDA"	Ing. Rogelio Cuesanpedro
EJIDO: "San Felipe" MUNICIPIO: Dr Arroyo	
ESTADO: Nuevo León	TEL: Ext: 4840

Número de Laboratorio	1173			
Descripcion de la Muestra	Unica			

PARAMETROS ANALIZADOS

Conductividad Eléctrica micromhos/cm	20,560			
Sólidos Disueltos Totales ppm	15,300			
pH	8.1			
Cationes Solubles: Calcio meq/lt	25.0	502.00		
Magnesio meq/lt	5.4	66.00		
Sodio meq/lt	186.2	4,278.00		
Suma de Cationes Solubles meq/lt	216.6	4845.5		
Aniões Solubles: Carbonatos meq/lt	1.4	42		
Bicarbonatos meq/lt	2.7	165		
Cloruros meq/lt	57.5	2,638.50		
Sulfatos meq/lt	149.3	7,166.9		
Suma de Aniões Solubles meq/lt	210.9	7,911.64		
Relación de Adsorción de Sodio (RAS)	47.8			
Clasificación	N.C.			
Sedimentos	Si			
Turbidez	Si			
Olor	No			
Color	No			
Potasio Soluble ppm	100.3			

Cuesanpedro

OBSERVACIONES:

El análisis indica que, es un agua con concentración de sales alta, y además extremadamente alta en sodio. De acuerdo con los criterios internacionales de calidad de aguas, no debería usarse para riego, por el daño directo que puede causar a las plantas, y por la sodificación del suelo que podría ocasionar alto riesgo de impermeabilización del mismo.

ATENTAMENTE

Ing. Antonio Elizondo Solana
Director Depto. Agronomía
e Ingeniería Agrícola

Lic. Ma. del Refugio Peña Garza
Encargada del Laboratorio
Química de Suelos

Ave. Eugenio Garza Sada 2501 Sur,
Col. Tecnológico C.P. 64849,
Monterrey, N.L., México
Tels. 8356-20-00 y 8356-14-00

FASIQ
INTERNACIONALFASIQ INTERNACIONAL S.A. de C.V.
2 de Abril Ote. 1111, Col. Independencia
Monterrey, N.L. 64720 MEXICO
Tel (81) 8190-6782 Fax (81) 8349-5774

REPORTE DE PRUEBAS

ORDEN OT- 204090653

1 / 1

CLIENTE	CL- 5015g	Fecha de Recepción de la Muestra:	9/23/2004
I.T.E.S.M Campus Monterrey Centro de Estudios del Agua - Aula 4 Oficina 125 Ave. Eugenio Garza Sada No. 2501 Sur Col. Tecnológico Monterrey, N.L. Atención: Ing. Rodrigo Cué Sampedro		Fecha Reporte:	10/5/2004
		Referencia	
		Cotización:	FL-20409386
		Pedido:	Ing. Rodrigo Cué Sampedro.
		Muestreo:	Ing. Rodrigo Cué Sampedro.
			Tel 8358-2000 / ext 4801 Fax 8328-4036

Identif. Muestra: Agua de Pozo.		Control: 040923-1391			
Part	Parámetro	Método	Lote	Unidad	Resultado
1	Bario	NOM-117-SSA1-1994	4014	mg/l	0.30
2	Calcio	NOM-117-SSA1-1994	4013	mg/l	398.2
3	Estroncio	NOM-117-SSA1-1994	4013	mg/l	2.86
4	Magnesio	NOM-117-SSA1-1994	4010	mg/l	60.8
5	Silicio como SiO2	NOM-117-SSA1-1994	4005	mg/l	42.15
6	Sodio	NOM-117-SSA1-1994	4019	mg/l	4,000
7	Cloruros	NMX-AA-073-SCFI-2001	4018	mg/l	1,840
8	Sulfatos	NMX-AA-74-1981	4017	mg/l	7,788
9	Sólidos Disueltos Totales	NMX-AA-034-SCFI-2001	4040	mg/l	15,247
10	Nitratos como N	NMX-AA-079-SCFI-2001	4021	mg/l	7.9
11	Nitrógeno Amoniacal	NMX-AA-026-SCFI-2001	4015	mg/l	<0.5
12	Fluoruros	NMX-AA-077-SCFI-2001	4014	mg/l	0.97
13	Turbidez	EPA 180.1 (1983)	4036	NTU	180
< >					

ESTE LABORATORIO HA SIDO ACREDITADO POR LA ENTIDAD MEXICANA DE ACREDITACION, A.C. (ema)

Información de la Muestra: Muestra aprox. 4 lts. en fco. de plástico conservador 4°C. Agua ligero turbia con sedimento. Recibida a temperatura ambiente.	
Observaciones: Los datos contenidos en este reporte representan únicamente a las muestras cuya identificación se menciona arriba	Reportó <div style="border: 1px solid black; width: 100px; height: 20px; margin: 0 auto;"></div> Lic. Blanca E. Armas Hidalgo Dirección de Operaciones

Este informe no podrá reproducirse total ni parcialmente sin la autorización previa de FASIQ INTERNACIONAL, S.A. de C.V.



BIBLIOGRAFÍA

- [1] Clarke, R., WATER: THE INTERNATIONAL CRISIS, 1993 MIT Press.
- [2] Gleick, P., WATER IN CRISIS, 1993 Oxford University Press, N. Y.
- [3] Gleick, P., WORLD'S WATER 2000-2001, 2000, Island Press.
- [4] Cosgrove, W. J. & Rijsberman, F. R., WORLD WATER VISION: MAKING WATER EVERYBODY'S BUSINESS, 2000, Erathscan.
- [5] Petrella, R., THE WATER MANIFESTO: ARGUMENTS FOR A WORLD WATER CONTRACT, 2001, Zed Books.
- [6] Falkenmark, M. POPULATION, ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT: A WATER PERSPECTIVE, 1994, United Nations, New York, pp. 99-116.
- [7] Seckler, D., Barker, R., Amarasinghe, U., WATER SCARCITY IN THE TWENTY FIRST CENTURY, 1999 Water Resources Development, pp. 15, 29-42.
- [8] Comisión Nacional del Agua, PROGRAMA NACIONAL HIDRÁULICO 2001-2006, SEMARNAT, México, 2001.
- [9] Comisión Nacional del Agua, EL AGUA: UN RECURSO ESTRATÉGICO Y DE SEGURIDAD NACIONAL, SEMARNAT, México, 2001.
- [10] Velasco, Molina, H. A. 2000, SOBREVIVENCIA EN LOS SEMIDESIERTOS MEXICANOS, AGT Editor, S. A. México. pp.: 11-13
- [11] O. K. Buros, THE ABC'S OF DESALTING, International Desalination Association, Massachusetts, USA
- [12] C. Araya, DESALINIZACIÓN DE AGUA POR ÓSMOSIS INVERSA CON ENERGIZACIÓN EÓLICA, Universidad de Los Andes, Facultad de Ingeniería, Departamento de Mecánica, Santa Fe de Bogota, 2001.
(<http://mecanica.uniandes.edu.co/~apinilla/documentos/tesis/PDF/IM2001I04.pdf>)
- [12] DESALINATION TECHNOLOGY ROAD MAP AND RESEARCH FACILITY DEVELOPMENT, Sandia National Labs and Bureau of Reclamation.
(<http://www.sandia.gov/water/USMBpres/HinkebeinDesal.pdf>)
- [13] <http://www.nationalsolarsupply.com>, nota visitada el 9 de julio de 2003.
- [14] <http://www.bpsolar.com>, nota visitada el 9 de julio de 2003.
- [15] Centro de Energía Solar, ITESM Campus Monterrey, reunión con el Director del Centro, el Dr. José A. Manrique, el día 31 de junio de 2003.

- [16] Departamento de Física del ITESM, reunión con el Dr. Oliver Matthias Probst Oleszewski el 16 de febrero de 2005
- [17] Robert W. Fox & Alan T. Mc Donald, INTRODUCCIÓN A LA MECÁNICA DE FLUIDOS, Mc Graw Hill, segunda edición 1995, Pág. 676.
- [18] Velasco, Molina, H. A. 2000, SOBREVIVENCIA EN LOS SEMIDESIERTOS MEXICANOS, AGT Editor, S. A. México. Pág. 14
- [19] M. Velasco et al., THEORY OF WIND-ELECTRIC WATER PUMPING, Renewable Energy 29 (2004), página 886 – 887
- [20] Centro de Estudios del Agua, ITESM Campus Monterrey, cita con el Director del Centro, el Dr. Belzahet Treviño Arjona, el día 15 de febrero de 2005.
- [21] José A. Manrique & Rafael S. Cárdenas, TERMODINÁMICA, segunda edición, Harla, 1995, pp. 369 – 372, 438.
- [22] Robert W. Fox & Alan T. Mc Donald, INTRODUCCIÓN A LA MECÁNICA DE FLUIDOS, Mc Graw Hill, segunda edición 1995, Pág. 677.
- [23] *Ibíd.* Pág. 384.
- [24] *Ibíd.* Pág. 680.