



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Cálculo y selección del equipo de bombeo  
para el pozo productor de la Planta  
Desaladora Modular Geotérmica (DMG)**

**TESIS**

Que para obtener el título de  
**Ingeniero Petrolero**

**P R E S E N T A**

Aldo Daniel Ladrón de Guevara Fernández

**DIRECTOR(A) DE TESIS**

M.I. Alejandro Sánchez Huerta



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2022

*A mi madre,  
familia,  
amigos y mentores.*

# Reconocimientos

---

A mi **familia**, que han sido el pilar principal en mi vida y me han motivado a seguir adelante, en especial a mi **madre**, que sin su apoyo y amor no hubieran sido posible mis estudios universitarios.

A mis **amigos**, que siempre me han acompañado y apoyado en este trayecto.

A mis **profesores** que se convirtieron en **mentores**, que compartieron sus conocimientos con paciencia y dedicación para formar profesionales preparados. En especial al M.I. Inti, al M.I. Alejandro, al Dr. Héctor y a mis sinodales.

A **CONACYT-SENER** proyecto 207032 **CeMIE-Geo** Ampliación, PA-01 por su apoyo en la elaboración de la tesis.

# Declaración de autenticidad

---

Por la presente declaro que, salvo cuando se haga referencia específica al trabajo de otras personas, el contenido de esta tesis es original y no se ha presentado total o parcialmente para su consideración para cualquier otro título o grado en esta o cualquier otra Universidad. Esta tesis es resultado de mi propio trabajo y no incluye nada que sea el resultado de algún trabajo realizado en colaboración, salvo que se indique específicamente en el texto.

ALDO DANIEL LADRÓN DE GUEVARA FERNÁNDEZ. Ciudad Universitaria,  
CDMX, 2022

# Resumen

---

Dentro de los planes de innovación del proyecto de grupo iiDEA “Desarrollo tecnológico para el aprovechamiento de la geotermia de baja entalpía” se incluye la construcción de una planta Desaladora Modular Geotérmica, DMG por sus siglas, en el municipio de Los Cabos, Baja California Sur, la cual tiene como objetivo la producción de agua potable con tecnología de destilación multiefecto de agua de mar, MED por sus siglas en inglés.

El proceso de desalación consiste fundamentalmente en evaporar una cierta porción de agua de mar a presiones inferiores a la atmosférica. La fuente de energía para la evaporación del agua de mar será la energía geotérmica de baja entalpía que existe en la zona.

Esta tesis tiene como objetivo analizar y determinar el sistema de bombeo para el transporte del fluido geotérmico desde el pozo productor hasta a la planta DMG y su retorno a reinyección. Para lograrlo esta tesis se divide en 5 capítulos.

El Capítulo 1 introduce de manera general la problemática mundial de la escasez de agua, los procesos de desalación, una de las potenciales soluciones en determinadas regiones y del aprovechamiento de la energía geotérmica en dichos procesos.

El capítulo 2 describe a profundidad el funcionamiento de la planta DMG, explica la importancia de un sistema de bombeo para el transporte del fluido geotérmico y desarrolla las ecuaciones fundamentales requeridas para la selección de dicho sistema de transporte.

El capítulo 3 describe las condiciones operativas de la locación de la planta DMG, las características del pozo y las características del fluido.

En el capítulo 4 se realizan las suposiciones y propuestas necesarias para el cálculo del sistema de Transporte del fluido geotérmico.

El capítulo 5 finaliza la tesis con las conclusiones obtenidas en este trabajo.

---

## **0.1. Objetivos generales:**

- Analizar y calcular el sistema de bombeo para el transporte del fluido geotérmico desde el pozo productor hasta la planta DMG.

## **0.2. Objetivos particulares:**

- Realizar los cálculos hidráulicos necesarios para cada posible nivel dinámico del pozo productor.
- Cotizar equipos de bombeo que funcionen en el rango de nivel dinámico esperado en el pozo productor.
- Aportar información útil para el diseño de la planta DMG.

# Índice general

---

0.1. Objetivos generales: . . . . .	VIII
0.2. Objetivos particulares: . . . . .	VIII
<b>Índice de figuras</b>	<b>x</b>
<b>Índice de tablas</b>	<b>xi</b>
<b>1. Antecedentes</b>	<b>1</b>
1.1. Escasez de agua . . . . .	1
1.1.1. Recursos hídricos en México . . . . .	2
1.2. Desalación . . . . .	5
1.2.1. Desalación en el mundo . . . . .	5
1.2.2. Desalación en México . . . . .	6
1.2.3. Tecnologías de desalación . . . . .	7
1.2.3.1. Ósmosis Inversa RO . . . . .	8
1.2.3.2. Destilación flash Multi-Etapas MSF . . . . .	9
1.2.3.3. Destilación Multiefecto MED . . . . .	10
1.2.4. Sistemas de desalación con energía renovable RED . . . . .	11
1.3. Geotermia . . . . .	13
1.3.1. Recursos geotérmicos . . . . .	15
1.3.2. Usos de la energía geotérmica . . . . .	16
1.3.3. Situación actual de la energía geotérmica . . . . .	17
<b>2. Marco teórico</b>	<b>20</b>
2.1. Desaladora Modular Geotérmica (DMG) . . . . .	20
2.1.1. Descripción del sistema DMG . . . . .	20
2.2. Sistemas de bombeo . . . . .	23
2.2.1. Tipos de bombas . . . . .	24
2.2.1.1. Bombas de desplazamiento positivo . . . . .	25
2.2.1.2. Bombas Rotodinámicas . . . . .	25
2.2.2. Consideraciones para el diseño y/o selección de una bomba para un pozo geotérmico . . . . .	26
2.2.2.1. Bomba de eje vertical . . . . .	28
2.2.2.2. Bomba sumergible . . . . .	29

## ÍNDICE GENERAL

---

2.3. Ecuaciones fundamentales de hidráulica y sistemas de bombeo . . . . .	29
2.3.1. Ecuación de continuidad . . . . .	30
2.3.2. Ecuación de la energía . . . . .	32
2.3.3. Pérdidas de carga . . . . .	35
2.3.4. Potencia hidráulica, potencia mecánica y eficiencia . . . . .	40
2.3.5. Cavitación . . . . .	41
2.3.5.1. Carga de succión positiva neta (CSPN) . . . . .	42
2.3.6. Curva característica de la bomba . . . . .	44
<b>3. Planta DMG en el municipio de Los Cabos, BC Sur.</b>	<b>47</b>
3.1. Ubicación . . . . .	47
3.2. Características de los pozos exploratorios . . . . .	49
3.2.1. Pozo PES01A . . . . .	49
3.2.2. Pozo PES01B . . . . .	50
3.3. Características del fluido . . . . .	52
3.4. Requerimientos de la planta DMG . . . . .	54
3.5. Accesorios y aditamentos . . . . .	55
<b>4. Cálculo y selección del sistema de bombeo</b>	<b>56</b>
4.1. Prueba de aforo . . . . .	56
4.2. Ubicación de la planta DMG . . . . .	58
4.3. Cálculo del sistema de bombeo . . . . .	58
4.3.1. Pérdidas de carga en la succión y carga de succión positiva neta disponible . . . . .	61
4.3.2. Pérdidas de carga en la descarga . . . . .	68
4.3.3. Carga dinámica total de la bomba y potencia . . . . .	69
4.4. Cotización del equipo de bombeo . . . . .	74
4.4.1. Bomba sumergible 10 [hp] . . . . .	76
4.4.2. Bomba sumergible 7.5 [hp] . . . . .	77
<b>5. Conclusiones</b>	<b>79</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>82</b>

# Índice de figuras

---

1.1. Distribución mundial del agua dulce, adaptada de [Agudelo C. (2)] . . .	1
1.2. Regiones hidrológicas-administrativas [CONAGUA (8)] . . . . .	2
1.3. Precipitación pluvial normal 1981-2010 vs 2017[CONAGUA (8)] . . . . .	4
1.4. Capacidad de desalación mundial 1980-2015 [Abdelkareem et al. (1)] . .	5
1.5. Clasificación procesos de desalación [Alkaiasi et al. (3)] . . . . .	7
1.6. Aporte por cada tecnología de desalación a la producción de agua mundial, adaptada de [Alkaiasi et al. (3)] . . . . .	8
1.7. Diagrama de flujo MSF [Rodríguez Zárate (19)] . . . . .	9
1.8. Diagrama de flujo MED [Rodríguez Zárate (19)] . . . . .	10
1.9. Métodos de desalación integrados con energías renovables [Alkaiasi et al. (3)] . . . . .	11
1.10. Porcentaje de recursos de energías renovables implementados en los sistemas RED mundial. Adaptado de [Alkaiasi et al. (3)] . . . . .	12
1.11. Estructura interna de la Tierra. [Rodríguez Zárate (19)] . . . . .	14
1.12. Sistema geotérmico hidrotermal. [Dickson and Fanelli (11)] . . . . .	16
1.13. Diagrama de Lindal. [Llopis Trillo and Rodrigo Angulo (17)] . . . . .	17
1.14. Capacidad geotérmica global instalada. Adaptada de [IRENA (16)] . . .	18
2.1. Esquema del sistema DMG. [Rodríguez Zárate (19)] . . . . .	20
2.2. Esquema del condensador del sistema DMG. [Rodríguez Zárate (19)] . .	21
2.3. Esquema de la cámara 1 del sistema DMG. [Rodríguez Zárate (19)] . . .	22
2.4. Esquema de la cámara 2 y 3 del sistema DMG. [Rodríguez Zárate (19)]	23
2.5. Clasificación general de bombas . . . . .	24
2.6. Tipos de bombas de desplazamiento positivo . . . . .	25
2.7. Componentes principales de una bomba centrífuga . . . . .	26
2.8. Sistema de bombeo en un pozo. [Escalada (12)] . . . . .	27
2.9. Bomba de eje vertical. [Escalada (12)] . . . . .	28
2.10. Bomba sumergible [Escalada (12)] . . . . .	29
2.11. Volumen de control 1 . . . . .	30
2.12. Volumen de control 2 . . . . .	32
2.13. Diagrama de Moody. [González (14)] . . . . .	38
2.14. Daños causados por la cavitación [Google] . . . . .	42
2.15. Instalación de una bomba en carga. [Cafaggi Félix et al. (6)] . . . . .	42

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

2.16. Instalación de una bomba en aspiración. [Cafaggi Félix et al. (6)] . . . . .	43
2.17. Curva característica de una bomba a diferentes velocidades $N_i$ [Cafaggi Félix et al. (6)] . . . . .	45
2.18. Curva característica de una bomba con distintos diámetros de impulsor. [Cafaggi Félix et al. (6)] . . . . .	45
2.19. Curva característica de una bomba de una velocidad con distintos diámetros de impulsor. [Cafaggi Félix et al. (6)] . . . . .	46
3.1. Localización de los pozos exploratorios someros PES01A Y PES01B [Torres Rodríguez (22)] . . . . .	48
3.2. Mapa geológico de la península de Baja California con áreas geotérmicas. [iiDEA UNAM (15)] . . . . .	48
3.3. Croquis del pozo exploratoria PES01A. [Torres Rodríguez (22)] . . . . .	49
3.4. Perfiles de presión-temperatura del pozo exploratoria PES01A. [Torres Rodríguez (22)] . . . . .	50
3.5. Croquis del pozo exploratoria PES01B. [Torres Rodríguez (22)] . . . . .	51
3.6. Perfiles presión-temperatura del pozo exploratoria PES01B. [Torres Rodríguez (22)] . . . . .	52
3.7. Diagrama de flujo planta DMG . . . . .	54
4.1. Bombeo escalonado en una prueba de aforo [Subdirección General de Agua Potable Drenaje y Saneamiento (21)] . . . . .	57
4.2. Distancia del pozo PES01B hasta la planta DMG. (Editado de Google Earth) . . . . .	58
4.3. Diagrama del sistema de bombeo [ $m$ ] . . . . .	60
4.4. Curva característica de la bomba de 10 [ $hp$ ] . . . . .	75
4.5. Curva característica de la bomba de 7.5 [ $hp$ ] . . . . .	75

# Índice de tablas

---

1.1. Estadística Acuíferos en México [CONAGUA (8)] . . . . .	3
1.2. Plantas desaladoras de agua instaladas en México 2006 [Association (5)]	6
1.3. Costos típicos de la desalación con métodos convencionales [Alkaisi et al. (3)] . . . . .	12
1.4. Costos típicos de sistemas RED [Alkaisi et al. (3)] . . . . .	13
1.5. Clasificación de yacimientos geotérmicos. [Dickson and Fanelli (11)] . . .	15
1.6. Capacidad geotérmica neta instalada por país, 2016 [IRENA (16)] . . .	18
1.7. Capacidad geotérmica para usos directos por país, 2005 [Gomez Arellano et al. (13)] . . . . .	19
2.1. Rugosidad absoluta de los materiales [Sotelo (20)] . . . . .	37
2.2. Coeficiente k de accesorios [Morris (18)] . . . . .	39
3.1. Coordenadas UTM de los pozos exploratorios someros PES01A Y PES01B [Torres Rodríguez (22)] . . . . .	47
3.2. Datos generales del pozo PES01A. [Torres Rodríguez (22)] . . . . .	50
3.3. Datos generales del pozo PES01B [Torres Rodríguez (22)] . . . . .	51
3.4. Propiedades del fluido geotérmico . . . . .	53
3.5. Análisis composicional del agua . . . . .	53
3.6. Condiciones operativas de la planta DMG . . . . .	55
3.7. Coeficientes k de accesorios en las líneas 112 y 113 . . . . .	55
4.1. Intervalo de tiempo para las mediciones en la prueba de aforo [Subdirección General de Agua Potable Drenaje y Saneamiento (21)] . . . . .	57
4.2. Datos para la selección del diámetro de la TP . . . . .	60
4.3. Datos para $h_R$ en la succión . . . . .	63
4.4. Pérdidas de carga y Carga de Succión Positiva Neta disponible para cada posible nivel dinámico (Parte 1-3) . . . . .	65
4.5. Pérdidas de carga y Carga de Succión Positiva Neta disponible para cada posible nivel dinámico (Parte 2-3) . . . . .	66
4.6. Pérdidas de carga y Carga de Succión Positiva Neta disponible para cada posible nivel dinámico (Parte 3-3) . . . . .	67
4.7. Datos para $h_R$ en la descarga . . . . .	68

## ÍNDICE DE TABLAS

---

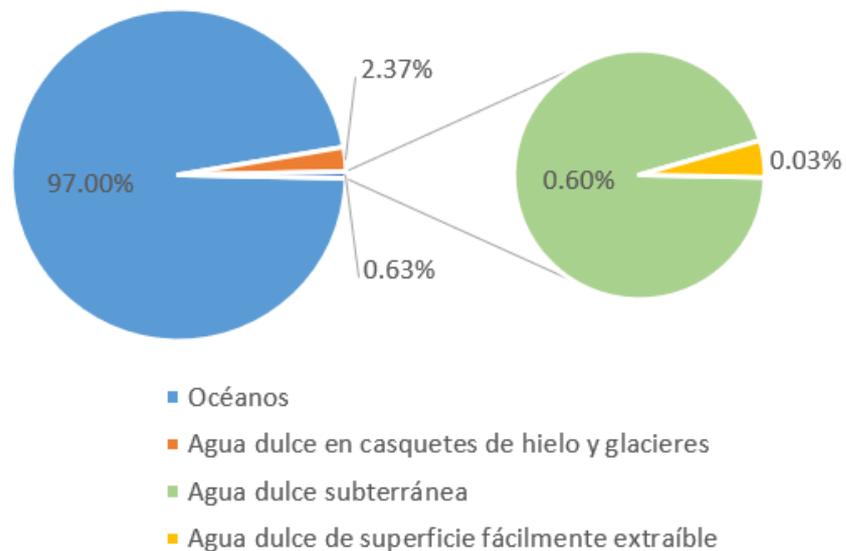
4.8. Datos para $h_B$ y $P$ . . . . .	70
4.9. Carga Dinámica Total de la Bomba y potencia requerida (Parte 1-3) . .	71
4.10. Carga Dinámica Total de la Bomba y potencia requerida (Parte 2-3) . .	72
4.11. Carga Dinámica Total de la Bomba y potencia requerida (Parte 3-3) . .	73
4.12. Datos proporcionados al proveedor para la cotización . . . . .	74
4.13. Características de las bombas propuestas por el proveedor . . . . .	74

# Antecedentes

---

## 1.1. Escasez de agua

La disponibilidad de agua dulce en todo el mundo es crítica y cada día es más compleja, debido a factores como la contaminación del recurso hídrico, la manipulación económica y la fuente de poder que representa para quien la posee. [Agudelo C. (2)]



**Figura 1.1:** Distribución mundial del agua dulce, adaptada de [Agudelo C. (2)]

El agua es un recurso vital para la vida en este planeta, y aunque dos terceras partes de la superficie del planeta es agua, menos del 1 % es considerada agua dulce subterránea o superficial de fácil acceso, cómo se puede observar en la figura 1.1. Esta pequeña cantidad de agua dulce se encuentra distribuida por todo el mundo, pero no

## 1. ANTECEDENTES

de una forma equitativa, lo que, sumado a otros problemas como la sobre población, el cambio climático, la mala administración en su distribución, entre otros, ha influenciado en el aumento de regiones donde se presenta escasez de agua y México es una de las regiones más afectada por este problema. Para conocer la problemática de la escasez de agua en México es necesario describir la distribución de los recursos hídricos en nuestro país y su contexto socioeconómico.

### 1.1.1. Recursos hídricos en México

Con el fin de facilitar la administración del agua en México, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) delimitó 13 regiones hidrológicas administrativas (RHA), las cuales tienen un contraste de desarrollo económico, distribución poblacional y cantidad de agua renovable considerable entre las regiones del sureste con el resto del país, como se muestra en la figura 1.2.

Las regiones del sureste presentan dos terceras partes del agua renovable en el país, con una quinta parte de la población que aporta la quinta parte del PIB nacional. las regiones del norte, centro y noroeste cuentan con una tercera parte del agua renovable en el país, cuatro quintas partes de la población y de la aportación regional al PIB nacional. [CONAGUA (8)]

#### Agua renovable per cápita, 2017

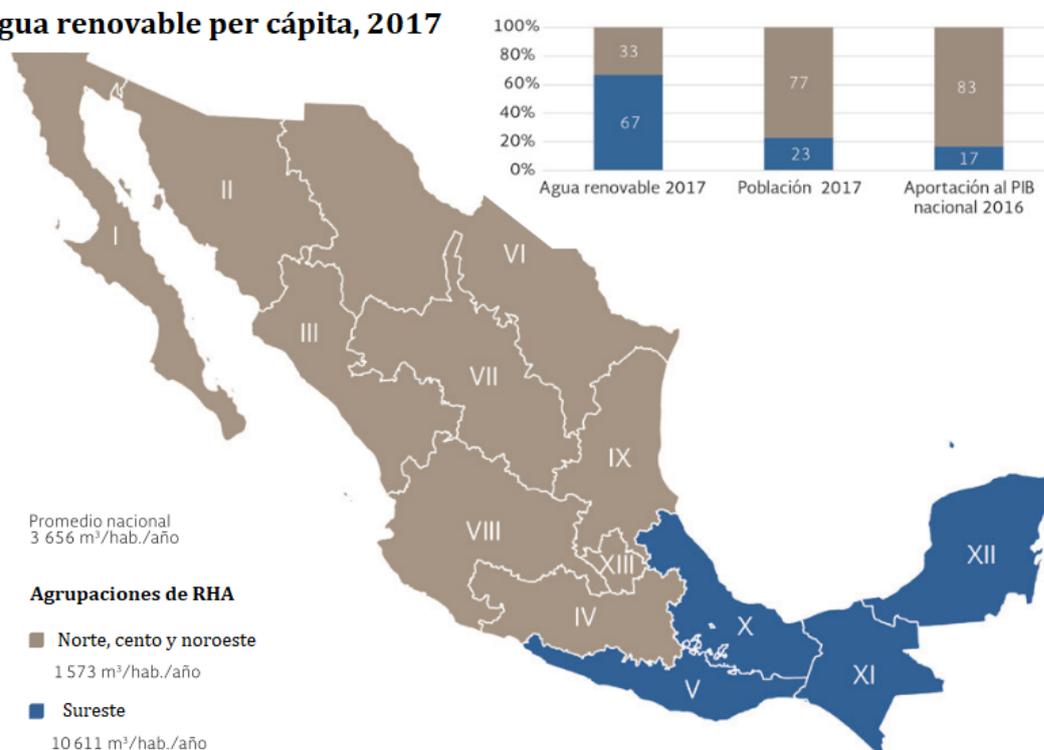


Figura 1.2: Regiones hidrológicas-administrativas [CONAGUA (8)]

La delimitación administrativa definió 653 acuíferos en México, y de acuerdo a su relación extracción/recarga se pueden considerar acuíferos sobreexplotados o no sobreexplotados. Al 31 de diciembre de 2017 se reportan 105 acuíferos sobreexplotados.

La salinización de suelos y la presencia de aguas subterráneas salobres se producen como resultado de altos índices de evaporación en zonas de niveles someros de agua subterránea, disolución de minerales evaporíticos y presencia de agua congénita de elevada salinidad. las aguas salobres se presentan específicamente en aquellos acuíferos localizados en provincias geológicas caracterizadas por formaciones sedimentarias antiguas, someras, de origen marino y evaporítico, en las que la interacción del agua subterránea con el material geológico produce su enriquecimiento en sales. [CONAGUA (8)]

Según las estadísticas de CONAGUA, a finales del 2017 se han identificado 32 acuíferos con suelos salinos y agua salobre, así como 18 acuíferos costeros con intrusión salina. Las estadísticas por RHA se pueden observar en la tabla 1.1.

**Tabla 1.1:** Estadística Acuíferos en México [CONAGUA (8)]

RHA	Acuíferos tot.	Sobre-explotados	Intrusión marina	Salobres	Recarga media [ $hm^3$ ]
I	88	14	11	5	1,658
II	62	10	5	0	3,207
III	24	2	0	0	3,076
IV	45	1	0	0	4,873
V	36	0	0	0	1,936
VI	102	18	0	8	5,935
VII	65	23	0	18	2,376
VIII	128	32	0	0	9,656
IX	40	1	0	0	4,108
X	22	0	0	0	4,599
XI	23	0	0	0	22,718
XII	4	0	2	1	25,316
XIII	14	4	0	0	2,330
<b>Total</b>	<b>653</b>	<b>105</b>	<b>18</b>	<b>32</b>	<b>91,788</b>

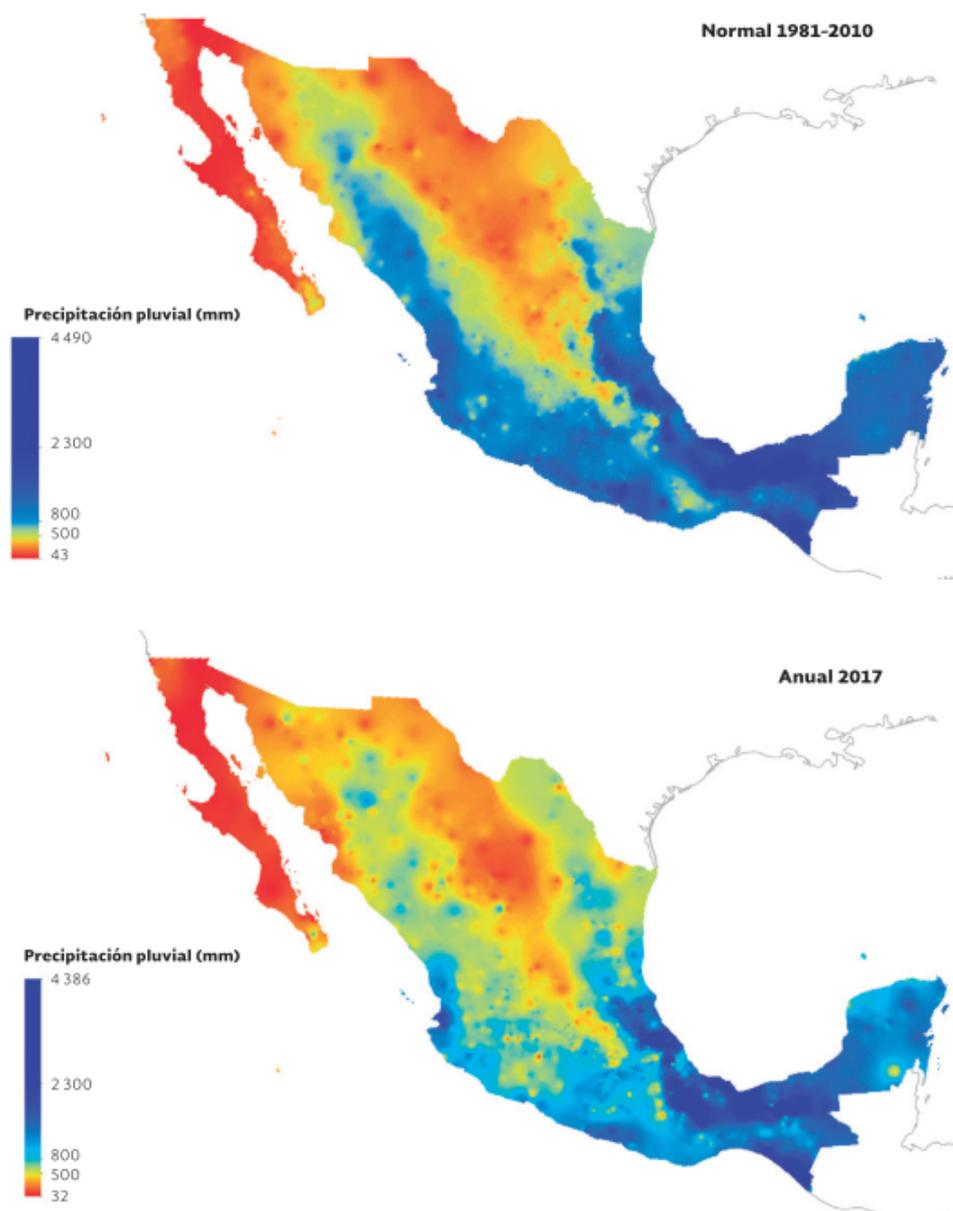
Las precipitaciones pluviales son otro fenómeno importante a considerar, ya que son el medio de recarga natural de los acuíferos. Para confirmar un valor normal de precipitación pluvial, la Organización Meteorológica Mundial (OMM) indica que se debe considerar un periodo uniforme y de por lo menos 30 años mínimo para ser un

## 1. ANTECEDENTES

---

periodo climatológico representativo.

En la figura 1.3 se puede observar el mapa de la precipitación pluvial normal entre los años 1981-2010 y el mapa de la precipitación pluvial en el año 2017, mostrando una alarmante tendencia a la baja en la mayor parte del país.



**Figura 1.3:** Precipitación pluvial normal 1981-2010 vs 2017[CONAGUA (8)]

## 1.2. Desalación

Como consecuencia a los problemas de abastecimiento de agua que México enfrenta en varias regiones se ha buscado posibles alternativas para obtener agua apta para uso humano.

La desalinización de agua salobre o de mar es una opción que se utiliza en muchos países para producir agua para consumo humano, procesos industriales y para cultivos de alto valor comercial en invernaderos. [Cortés A (10)]

Se define a la desalación como un proceso de separación de sales de una solución acuosa, es decir, disgregar total o parcialmente una sustancia de su soluto.

### 1.2.1. Desalación en el mundo

Las tecnologías de desalación de agua de mar son relativamente nuevas. Fue en el siglo pasado cuando se empezaron a utilizar destiladores pequeños en barcos, pero fue hasta Reid que concibe el principio de desalación por ósmosis inversa en 1950. diez años después, en 1960, ya existían 5 plantas desaladoras que producían 58  $[\frac{l}{s}]$  y en 1962 la capacidad instalada llegaba a los 876  $[\frac{l}{s}]$ . En las últimas décadas hubo un aumento exponencial en la capacidad de producción instalada, llegando a los 86.5 millones  $[\frac{m^3}{d}]$  en el 2015 como se muestra en la figura 1.4.

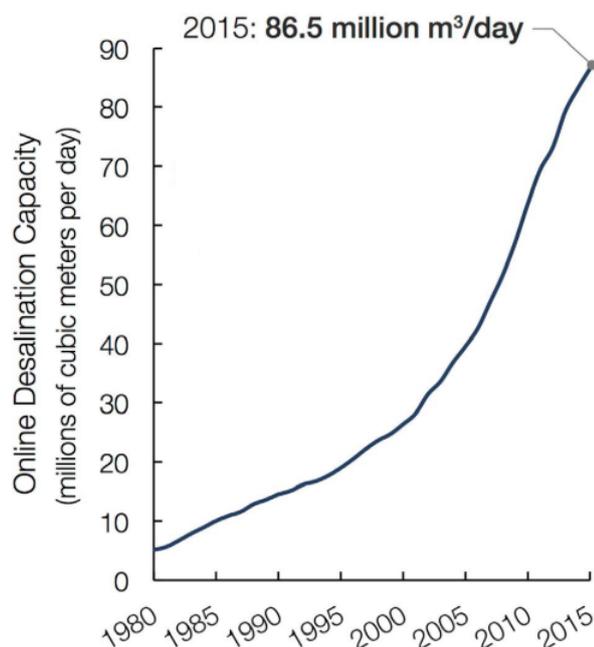


Figura 1.4: Capacidad de desalación mundial 1980-2015 [Abdelkareem et al. (1)]

### 1.2.2. Desalación en México

La desalación de agua en México empezó en 1970, con la operación de la primer planta desaladora en el país, ubicada en Baja California dentro de la planta termoeléctrica Benito Juárez de Rosario. Esta planta fue una de las más grandes de su época con una capacidad de producción de  $28,350 \left[\frac{m^3}{d}\right]$ .

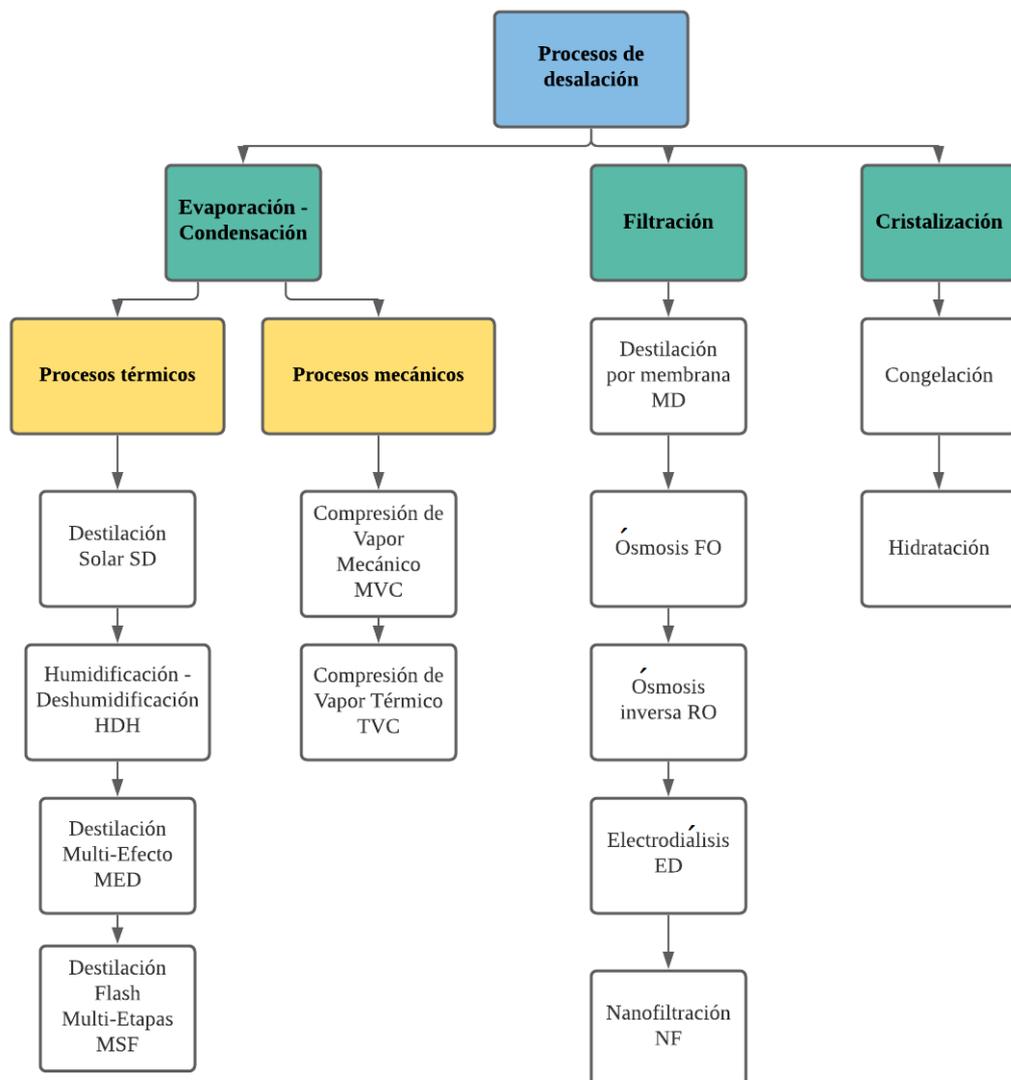
En el periodo que va de 1970 a 2000 se instalaron pequeñas plantas desaladoras en complejos turísticos y para producción de agua embotellada (purificación de agua de red municipal). En 2000 el Proyecto desaladora para Hermosillo, Sonora, de  $2.5 \left[\frac{m^3}{s}\right]$  se detiene después de su evaluación-aprobación técnica y financiera y quedó en “estado latente”. En 2003 la desaladora de  $11.76 \left[\frac{l}{s}\right]$  ( $1000 \left[\frac{m^3}{d}\right]$ ) Maquilas Tetakawi en Guaymas-Empalme, con una producción para uso industrial a un costo entre 0.6 y  $0.8 \left[\frac{USD}{m^3}\right]$ ; en este mismo año se inició el Proyecto de Desaladora de  $200 \left[\frac{l}{s}\right]$  en Cabo San Lucas, Baja California. En 2004 inició la evaluación de alternativas desaladoras en Ensenada y en Tijuana Baja California. Mientras que en 2005 se dio la evaluación de alternativas desaladoras en Guaymas-Empalme y en Puerto Peñasco. [Correa (9)] En la tabla 1.2 podemos apreciar las plantas desaladoras de agua en México al 2006.

**Tabla 1.2:** Plantas desaladoras de agua instaladas en México 2006 [Association (5)]

Entidad Federativa	Unidades	% nacional	Si operan	No operan	Capacidad instalada $\left[\frac{m^3}{d}\right]$
BC	38	8.74	24	14	51,938
BCS	73	16.78	53	20	36,971
Campeche	19	4.37	14	5	5,456
CDMX	17	3.91	12	5	95,475
Coahuila	33	7.59	23	10	7,668
Colima	18	4.14	2	16	2,856
Edo. Mex.	4	0.92	2	2	7,000
Durango	26	5.98	13	13	868
Guerrero	6	1.38	3	3	2,355
Jalisco	4	0.92	3	1	2,865
Morelos	21	4.83	21	0	110
Nuevo León	5	1.15	5	0	2,847
Oaxaca	4	0.92	4	0	14,256
Q. Roo	124	28.51	73	51	53,339
SLP	1	0.23	1	0	60
Sonora	22	5.06	15	7	9,349
Tamaulipas	4	0.92	2	2	5,100
Veracruz	15	3.45	11	4	12,167
Yucatán	1	0.23	1	0	700
Total Nacional	435	100 %	282	137	311,377

### 1.2.3. Tecnologías de desalación

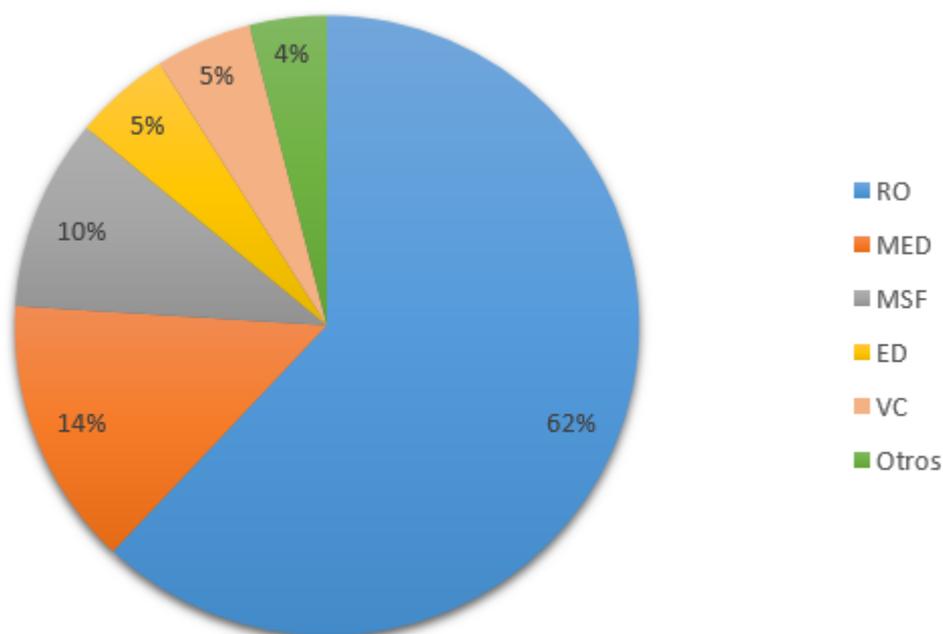
Aunque la desalación de agua de mar y salobre es considerada una tecnología nueva, existen una gran cantidad de procesos y sistemas de desalación, los cuales pueden ser clasificados de distintas maneras, dependiendo la fuente de energía suministrada o por el proceso de desalación que usan, como se muestra en la figura 1.5.



**Figura 1.5:** Clasificación procesos de desalación [Alkai et al. (3)]

Sin embargo, muchos de estos procesos son pocos ya que están en vías de maduración tecnológica, como la destilación solar, humidificación-deshumidificación, la

congelación, entre otras. Por otra parte, el 86 % de la aportación de agua desalada producida mundialmente proviene de solo 3 mecanismos de desalación: Ósmosis Inversa OR, destilación multiefecto MED y destilación flash multietapas MSF, cómo se puede apreciar en la figura 1.6.



**Figura 1.6:** Aporte por cada tecnología de desalación a la producción de agua mundial, adaptada de [Alkaiasi et al. (3)]

### 1.2.3.1. Ósmosis Inversa RO

La ósmosis inversa es el proceso que más agua desalada produce a nivel mundial. Esto es debido a que es considerado el método más sencillo para desalar, y con uno de los mejores rendimientos energéticos.

El sistema toma su nombre por realizarse el paso de las soluciones en forma contraria a los procesos osmóticos normales. Es decir, las soluciones menos concentradas se desplazan, por diferencia de energía potencial, hacia las más concentradas a través de una membrana semipermeable sin necesidad de aplicar ninguna fuerza externa. [Cortés A (10)]

Su funcionamiento se basa en las propiedades de las membranas semipermeables, que permiten el paso de agua dulce con mayor facilidad que el agua salada, creando una diferencia de presión entre estos dos líquidos cuando cada uno se encuentra a un lado de la membrana. Es decir, se aumenta convenientemente la presión del lado del agua salada para hacerla pasar a un compartimiento menos salino, dejando en los anteriores

compartimientos sales.

La principal problemática de este método de desalación es obtener membranas resistentes a la presión diferencial sin que aumenten considerablemente su costo. Ya que si el agua tiene un alto contenido de sílice, hierro o materia orgánica, las membranas van perdiendo permeabilidad. Típicamente, una membrana de ósmosis inversa procesa un agua de mar con 36,000 [ppm] de sólidos disueltos totales, SDT, y la convierte en agua dulce con una salinidad inferior a 50 [ppm] SDT. [Cortés A (10)]

### 1.2.3.2. Destilación flash Multi-Etapas MSF

La destilación flash Multietapas, también conocida como destilación instantánea de etapas múltiples es el proceso industrial de desalación de agua más antiguo. También es uno de los procesos con mayor consumo energético, sin embargo, las volúmenes de producción son considerablemente elevados.

Tomando como referencia la figura 1.7, el proceso comienza al hacer fluir agua de mar a cada una de las cámaras sin mezclarse, con el objetivo de pre-calentar el agua y condensar el vapor producido dentro de las cámaras. Enseguida pasa a una cámara de calentamiento donde aumenta la temperatura cerca del punto de ebullición, gracias a otro fluido que le cede energía térmica al agua de mar. El proceso continua, y se introduce el agua de mar calentada a la primera etapa, donde se reduce la presión y se alcanza la ebullición al vacío, generando vapor *flash*. El vapor se condensa en la parte superior de la cámara por contacto con el agua de mar fría, y la salmuera pasa a la siguiente etapa en donde vuelve a haber una disminución de presión produciendo otra vez vapor *flash* y salmuera más concentrada. Al final todos los condensados son recolectados como producto final del proceso.

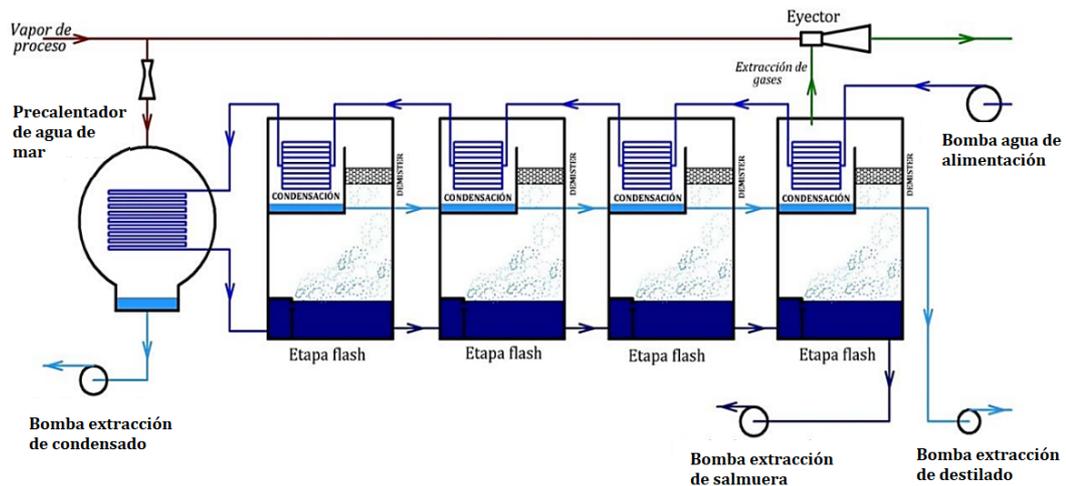


Figura 1.7: Diagrama de flujo MSF [Rodríguez Zárate (19)]

## 1. ANTECEDENTES

---

El método MSF es ideal para tratar agua de mar en cantidades medias y altas, pero su alto consumo energético es su mayor problemática.

### 1.2.3.3. Destilación Multiefecto MED

Al igual que el método de destilación *flash* multietapas, el principio de este proceso se basa en el hecho de que la cantidad de energía que puede ser almacenada en el agua a su temperatura de ebullición decrece cuando disminuye la presión. Por lo tanto, cuando el agua de mar o salobre alcanza el punto de ebullición fluye a un recipiente con menor presión, el exceso de energía contenido en el líquido produce evaporación. [Cortés A (10)]

Tomando como referencia la figura 1.8, el proceso inicia al hacer pasar el agua de mar por un condensador, el cual es alimentado con el vapor del último efecto de la planta desaladora, para pre-calentar el agua de mar y condensar el vapor. Una vez precalentada, el agua se inyecta de manera simultánea a cada uno de los efectos. Mientras tanto, en el primer efecto se introduce otro fluido caliente que cede energía térmica al agua de mar sin mezclarse, generando la evaporación de una cantidad del agua de mar inyectada. El vapor generado en el primer efecto se hace pasar al segundo efecto con el fin de cederle calor al agua de mar inyectada en el segundo efecto sin mezclarse y al mismo tiempo este se condensa. Simultáneamente la salmuera restante del primer efecto se induce al segundo, el cual tiene menor presión y genera vapor. Este proceso se repite en todos los efectos, y al final se recolecta el condensado de todas las cámaras.

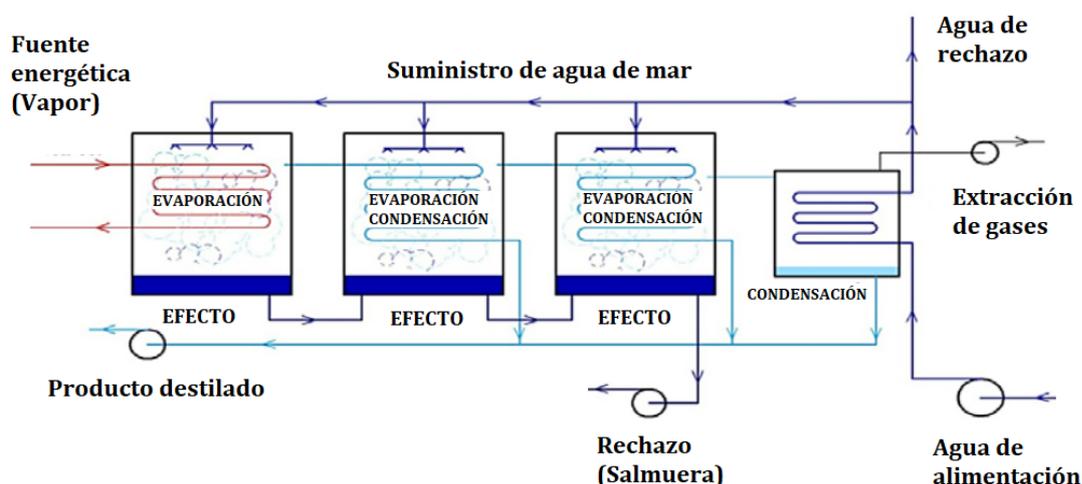


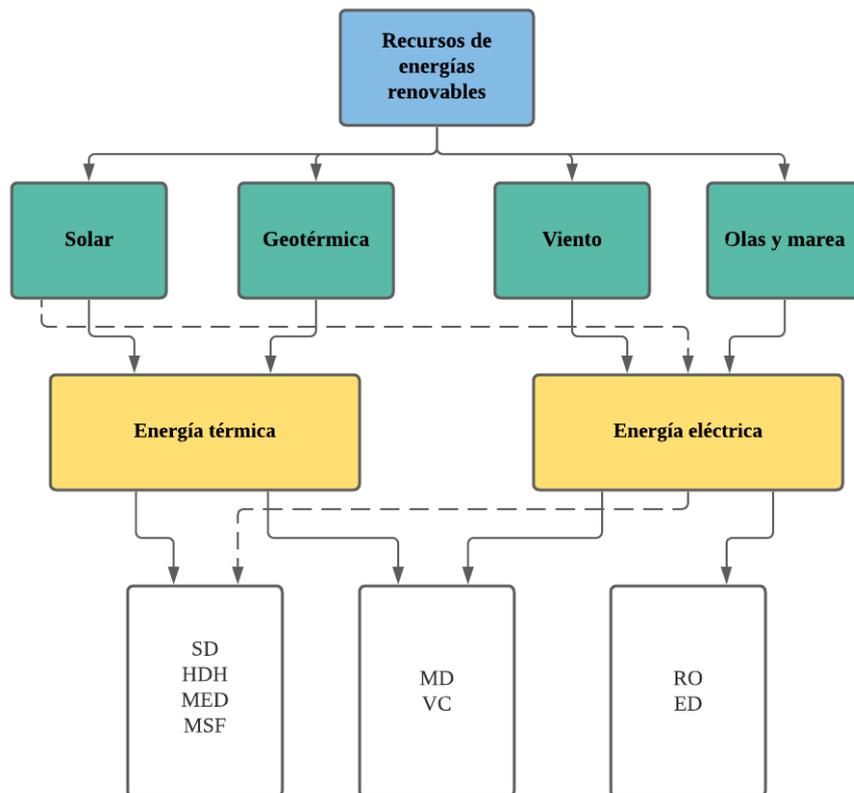
Figura 1.8: Diagrama de flujo MED [Rodríguez Zárate (19)]

El principal problema de este método es la complejidad de los sistemas de suministro y extracción de salmuera, es decir, la operación y mantenimiento de la desaladora.

#### 1.2.4. Sistemas de desalación con energía renovable RED

El agua y la energía son recursos indispensables para cualquier civilización. La escasez de agua y energía ha surgido debido al dramático crecimiento de la población, los estándares de vida, el rápido desarrollo de los sectores agrícola e industrial, y la inadecuada distribución de los recursos. La desalación parece ser una de las soluciones más prometedoras al problema del agua, sin embargo, es un proceso energético intensivo. La integración de energías renovables en los sistemas de desalación de agua RED (*renewable energy desalination*) se han vuelto cada vez más atractivos debido a la creciente demanda de agua y energía, y la reducción de las contribuciones a la huella de carbono. [Alkaisi et al. (3)]

La figura 1.9 nos muestra los recursos de energías renovables que sirven para cada uno de los métodos de desalación.



**Figura 1.9:** Métodos de desalación integrados con energías renovables [Alkaisi et al. (3)]

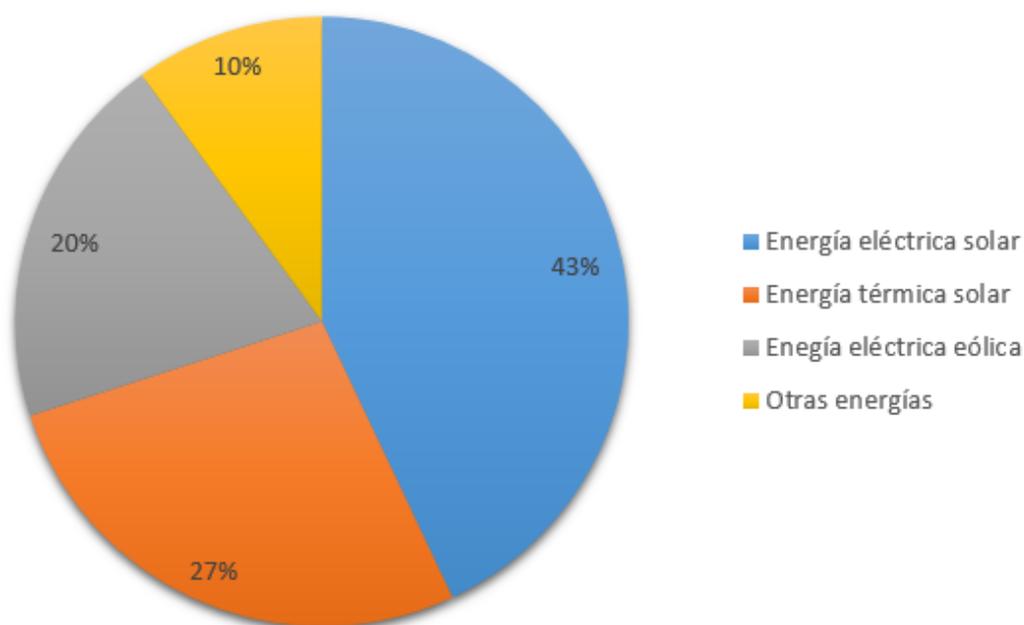
Existen otros tipos de recursos de energías renovables, como la biomasa y los recursos hidroeléctricos, pero no son considerados factibles para los procesos de desalación porque requieren de fuentes de alimentación hídricas, las cuales no están disponibles

## 1. ANTECEDENTES

---

en las zonas con escasez de agua.

Al igual que las tecnologías de desalación, en los sistemas RED predomina la energía solar, ya puede producir la energía eléctrica y térmica necesaria en todos los procesos de desalación. Sin embargo los recursos eólicos tienen un gran potencial en los procesos que requieran energía eléctrica, y la geotermia para la energía térmica. En la figura 1.10 se puede apreciar el porcentaje de recursos aplicados a sistemas RED.



**Figura 1.10:** Porcentaje de recursos de energías renovables implementados en los sistemas RED mundial. Adaptado de [Alkaiasi et al. (3)]

Los costos son un factor importante en cualquier tipo de proyecto, y en los últimos años se han desarrollado varias investigaciones con el objetivo de disminuir los costos en los sistemas de desalación, disminuyendo el consumo energético y mejorando los diseños.

**Tabla 1.3:** Costos típicos de la desalación con métodos convencionales [Alkaiasi et al. (3)]

Método de desalación	Inversión USD	Costos operativos [ $\frac{USD}{m^3}$ ]	Costo total [ $\frac{USD}{m^3}$ ]
MSF	1,700–2,900	0.65–1.25	0.84–1.6
MED	1,700–2,700	0.67–0.96	1.21–1.59
RO	1,300–2,500	0.58–0.88	1.06–1.36

**Tabla 1.4:** Costos típicos de sistemas RED [Alkaisi et al. (3)]

Tipo de energía	Método de desalación	Capacidad [ $\frac{m^3}{d}$ ]	Costo total [ $\frac{USD}{m^3}$ ]
Solar térmica	MED	5000	2.5-3
Solar térmica	HDH	100	2.8-7
Solar térmica	SD	1	1.4-12
Solar eléctrica	ED	100	11.2-12.6
Solar eléctrica	RO	100	12.5-16.8
Eólica	MVC	100	5.6-8.4
Eólica	RO	50	7-9.8
Eólica	RO	1000	2.1-5.6

Para conocer si la implementación de sistemas RED son viables económicamente es necesario comparar los costos de la desalación con métodos convencionales de la tabla 1.3 y los costos con sistemas RED de la tabla 1.4. Analizando las tablas se aprecia que en la actualidad los costos de los sistemas RED son considerablemente más altos que los métodos convencionales, aunque se espera que en los próximos 20 años el costo sea equivalente al de los métodos convencionales.

Los sistemas RED aportan una solución sustentable al problema de escasez de agua y energía reduciendo la huella de carbono, pero actualmente los costos de producción son más elevados que el de los sistemas convencionales de desalación. Es por eso que los sistemas RED requieren de investigación y desarrollo de tecnología que los hagan competitivos contra los métodos convencionales en un futuro.

### 1.3. Geotermia

El calor es una forma de energía, y la energía geotérmica es literalmente el calor contenido dentro de la Tierra que puede generar fenómenos geológicos en nuestro planeta, como volcanes, fumarolas, geisers, entre otros. [Dickson and Fanelli (11)] La geotermia es una fuente de energía renovable y sustentable que puede jugar un papel muy importante en la transición energética y descarbonización que se está viviendo a nivel mundial. Además, la energía geotérmica presenta varias ventajas como ser manejable, flexible y continua, a diferencia de otras energías renovables que son intermitentes a lo largo del día o del año.

También se puede ver a la geotermia como la ciencia que estudia las condiciones térmicas del interior de la Tierra, con el fin aprovechar dicha energía térmica de forma económica y con desarrollos tecnológicos adecuados. Por lo tanto es necesario estudiar

## 1. ANTECEDENTES

la estructura interna de la Tierra, de la cual existen 2 modelos, estático y dinámico, ambos representados en la figura 1.11.

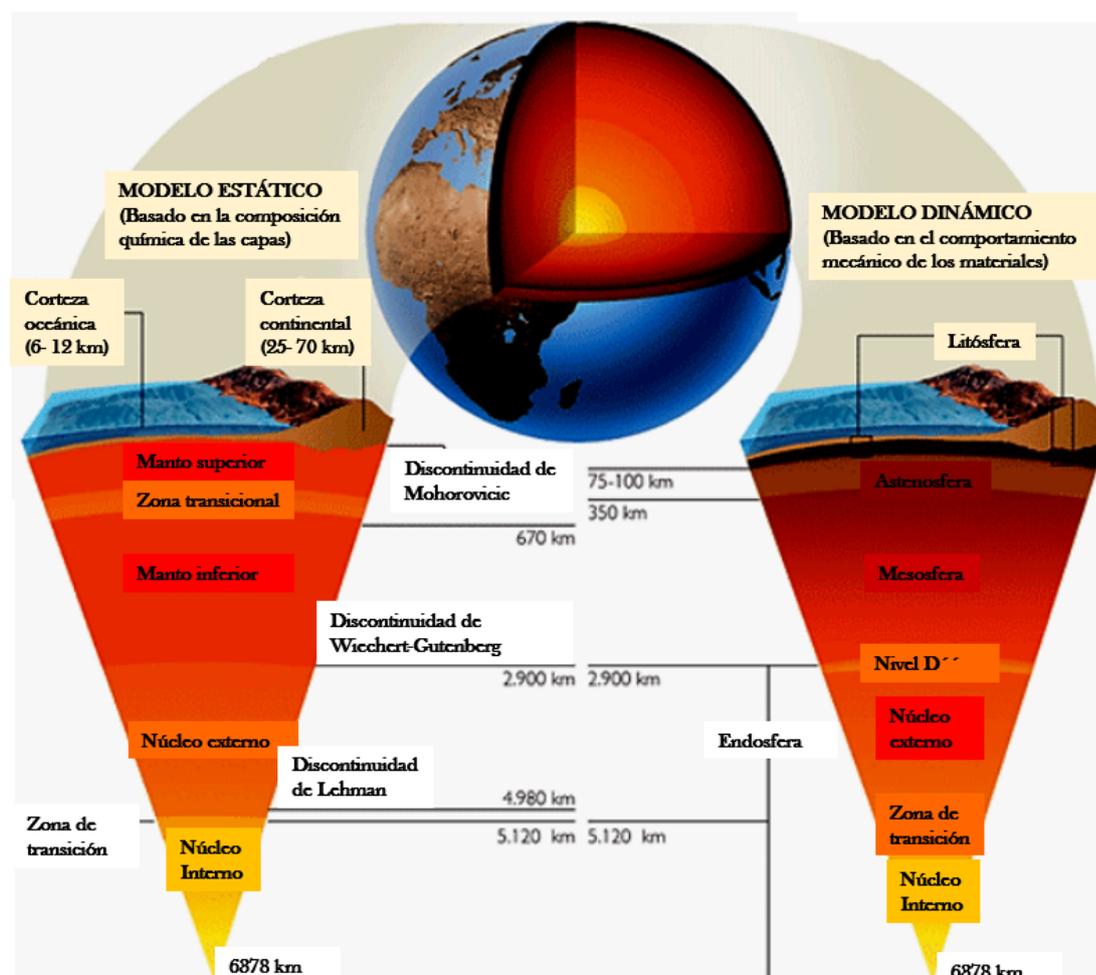


Figura 1.11: Estructura interna de la Tierra. [Rodríguez Zárate (19)]

En el modelo estático la estructura interna de la Tierra se divide en 3 secciones principales: La corteza, el manto y el núcleo. La corteza es la parte más externa y delgada, su profundidad es de aproximadamente 70 [km], está compuesta principalmente de roca sólida y su temperatura en la parte inferior es en promedio de 400 [°C]. La siguiente capa es el manto, la cual se divide en manto superior e inferior. El manto superior llega a una profundidad de 700 [km] y una temperatura de 1500 [°C], mientras que el inferior tiene una profundidad aproximada de 2900 [km] y 3000 [°C]. Por último se encuentra el núcleo, que igualmente se divide en dos. El núcleo externo se encuentra a una profundidad de 4980 [km] y una temperatura de 4000 [°C] y el núcleo interno a 6370 [km] de profundidad y una temperatura de 6000 [°C]. [Rodríguez Zárate (19)]

El modelo dinámico expone 4 capas según su comportamiento mecánico. La primera capa es la Litósfera y se comporta como un sólido rígido. La segunda capa es la Astenósfera y se comporta como un sólido plástico. La tercera capa es la Mesósfera y se compone por el manto superior y todo el manto interior. Por último tenemos a la Endósfera que se compone por el núcleo externo e interno, y se comporta como un sólido.

### 1.3.1. Recursos geotérmicos

Un recurso geotérmico es una concentración de calor que existe en la corteza terrestre en forma y cantidad tales que su extracción es viable o potencialmente posible en términos económicos. [Llopis Trillo and Rodrigo Angulo (17)]

Cuando un área geográfica cuenta con las condiciones geológicas, térmicas y reológicas para almacenar este tipo de recursos, se le considera un yacimiento geotérmico. La clasificación más común de los yacimientos geotérmicos se basa en función de su entalpía, y en general se puede dividir en baja, media y alta entalpía, aunque es posible encontrar fuentes que consideran 2 divisiones adicionales, muy baja y muy alta entalpía. En la tabla 1.5 podemos observar el rango de temperaturas según distintos autores.

**Tabla 1.5:** Clasificación de yacimientos geotérmicos. [Dickson and Fanelli (11)]

	Baja entalpía [°C]	Media entalpía [°C]	Alta entalpía [°C]
Muffler and Cataldi (1978)	< 90	90–150	> 150
Hochstein (1990)	< 125	125–225	> 225
Benderitter and Cormy (1990)	< 100	100–200	> 200
Nicholson (1993)	< 150	-	> 150
Axelsson and Gunnlaugsson (2000)	< 190	-	> 190

No todos los yacimientos son aprovechables económica y técnicamente. Para que un yacimiento geotérmico se considere aprovechable es necesario que cuente con las siguientes características geológicas y reológicas:

- Fuente de calor
- Roca almacén permeable o fracturada (acuífero)
- Fluido
- Roca sello impermeable

Cuando un yacimiento cuenta con las características antes mencionadas, se considera un sistema geotérmico, el cual se puede definir como .agua o fluido convectivo del

## 1. ANTECEDENTES

---

interior de la Tierra, en un espacio confinado, que transfiere calor desde una fuente de calor hasta una abertura, usualmente la superficie libre”. [Rodríguez Zárate (19)]

Existen varios tipos de sistemas geotérmicos: hidrotermales, de roca seca caliente, marítimos, magmáticos y geopresurizados. Sin embargo los únicos aprovechables económicamente son los hidrotermales debido a la tecnología disponible y los costos implicados. En la figura 1.12 se aprecia un sistema de este tipo.

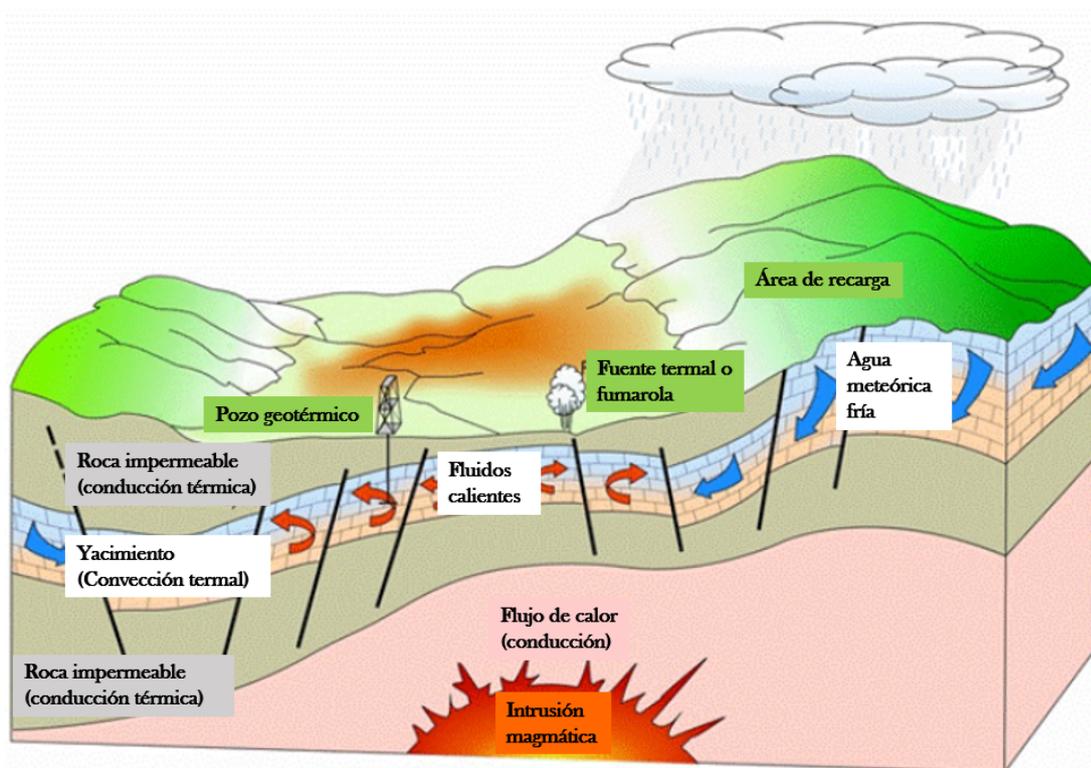


Figura 1.12: Sistema geotérmico hidrotermal. [Dickson and Fanelli (11)]

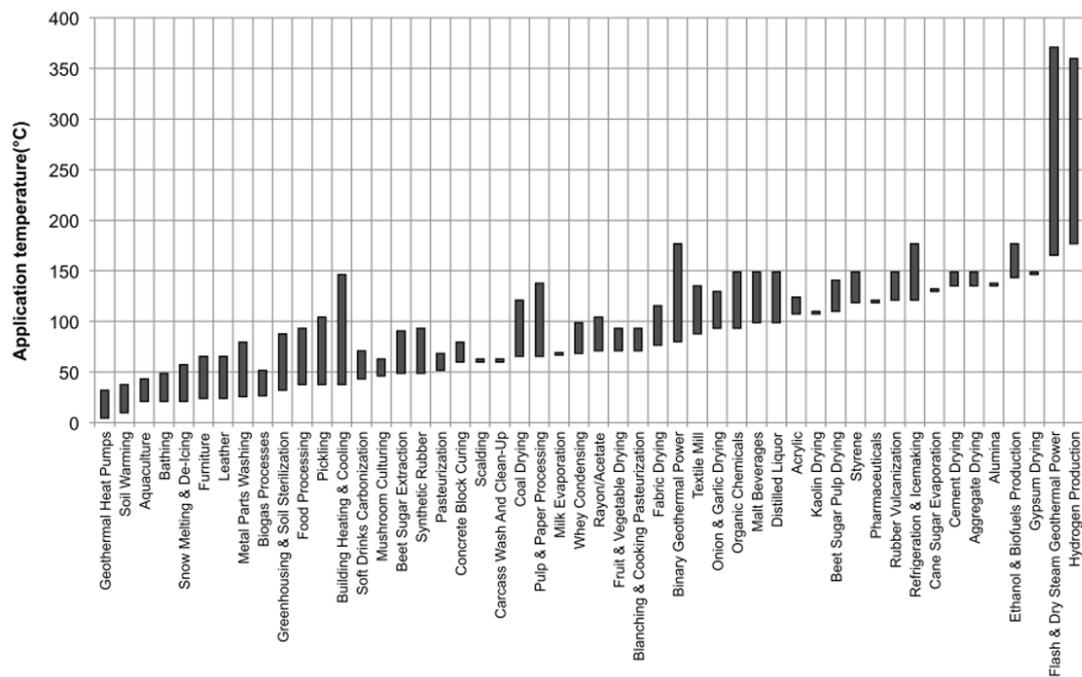
### 1.3.2. Usos de la energía geotérmica

Durante los últimos años se ha normalizado la idea que el aprovechamiento de recursos geotérmicos es exclusivo para la generación de energía eléctrica, lo que se le conoce como uso indirecto debido a que calor proveniente del sistema geotérmico es utilizado para obtener otro tipo de energía en lugar de un proceso en específico.

Bajo esta premisa, las tecnologías de generación de energía eléctrica con geotermia han sido ampliamente desarrolladas, siendo las 4 plantas principales de: vapor seco directo, flash, ciclo binario, y de ciclo combinado o híbrida. El uso de cada tipo de planta dependerá del calor que contenga el yacimiento geotérmico, pero todas funcionan bajo el principio de llevar un fluido a su punto de ebullición; ya sea el fluido geotérmico o un

fluido de trabajo, con las condiciones de presión de necesarias para mover la turbina de un generador.

Sin embargo los usos indirectos requieren de recursos geotérmicos de media y alta entalpía, dejando fuera un gran porcentaje de las zonas geológicas que no alcanzan dichos niveles de energía. Estas zonas con recursos geotérmicos de baja y media entalpía pueden ser aprovechados en los usos directos, los cuáles, como su nombre lo dice, utilizan la energía geotérmica directamente en el proceso a realizar.



**Figura 1.13:** Diagrama de Lindal. [Llopis Trillo and Rodrigo Angulo (17)]

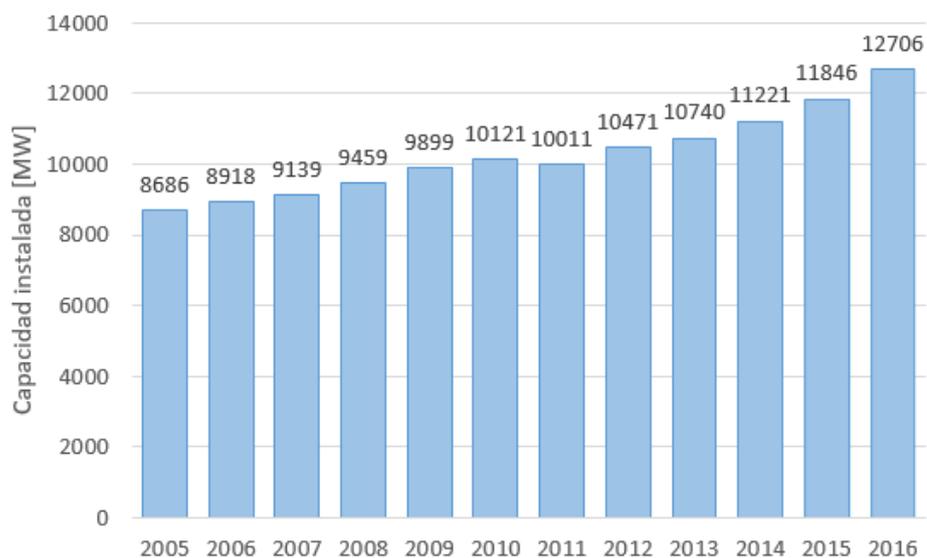
La figura 1.13 es el diagrama de Lindal, que muestra el rango de temperatura necesarios para la utilización del recurso geotérmico en diversos usos directos.

### 1.3.3. Situación actual de la energía geotérmica

En los últimos años se ha incrementada el uso de plantas geotermoelectricas, como se aprecia en la figura 1.14, llegando a una capacidad geotérmica global instalada de 12,706 [MW] en el año 2016.

## 1. ANTECEDENTES

---



**Figura 1.14:** Capacidad geotérmica global instalada. Adaptada de [IRENA (16)]

**Tabla 1.6:** Capacidad geotérmica neta instalada por país, 2016 [IRENA (16)]

País	Capacidad [MW]
USA	2,511
Filipinas	1,916
Indonesia	1,534
Kenia	1,116
Nueva Zelanda	986
México	951
Italia	824
Turquía	821
Islandia	665
Japón	533
Costa Rica	207
El Salvador	204
Nicaragua	155
Rusia	78
Papua Nueva Guinea	53

Para ese mismo año, México era el sexto país con mayor capacidad geotérmica instalada, detrás de Nueva Zelanda, Kenia, Indonesia, Filipinas y los Estados Unidos, como lo muestra la tabla 1.6.

Sin embargo, México se queda rezagado en el aprovechamiento geotérmico para usos directos.

**Tabla 1.7:** Capacidad geotérmica para usos directos por país, 2005 [Gomez Arellano et al. (13)]

País	Capacidad instalada[MW]	Consumo[GWh/año]	Factor de capacidad
USA	7,817.4	8,678.2	0.1
Japón	822.4	2,861.6	0.4
Alemania	504.6	808.3	0.2
Canadá	461	707.3	0.2
Rusia	308.2	1,706.7	0.6
Nueva Zelanda	308.1	1,968.5	0.7
India	203	446.2	0.3
México	164.7	536.7	0.4
Otros	17,678.6	58,229.3	-
Total	28,268	75,942.8	0.31

# Marco teórico

## 2.1. Desaladora Modular Geotérmica (DMG)

El grupo iiDEA (Desalación con energías alternas) del Instituto de Ingeniería de la UNAM ha desarrollado proyectos de investigación orientados al aprovechamiento de energías renovables, remediación de mantos acuíferos, tomas y descargas de agua de mar para unidades desaladoras. De acuerdo con la orientación del grupo iiDEA y la problemática de escasez de agua descrita en el capítulo 1, se ha desarrollado un sistema de desalación que utiliza la energía geotérmica de baja entalpía.

### 2.1.1. Descripción del sistema DMG

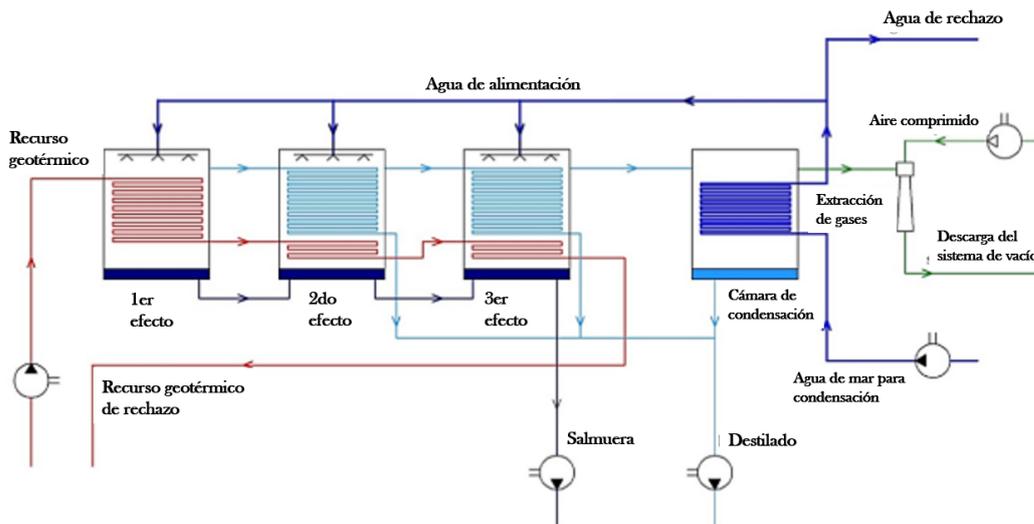
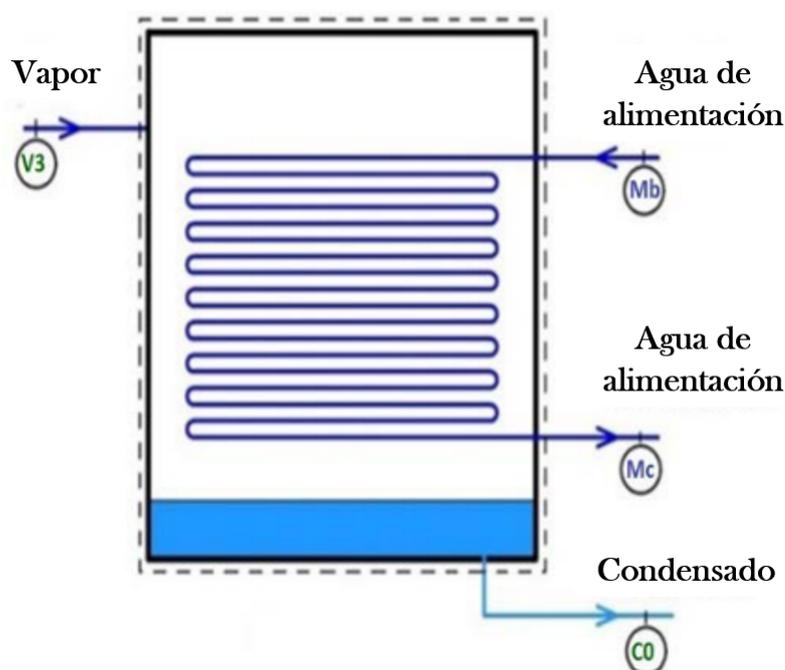


Figura 2.1: Esquema del sistema DMG. [Rodríguez Zárate (19)]

El sistema DMG, por sus siglas Desaladora Modular Geotérmica, es una tecnología que busca destilar agua de mar utilizando la energía térmica de un pozo geotérmico de baja entalpía.

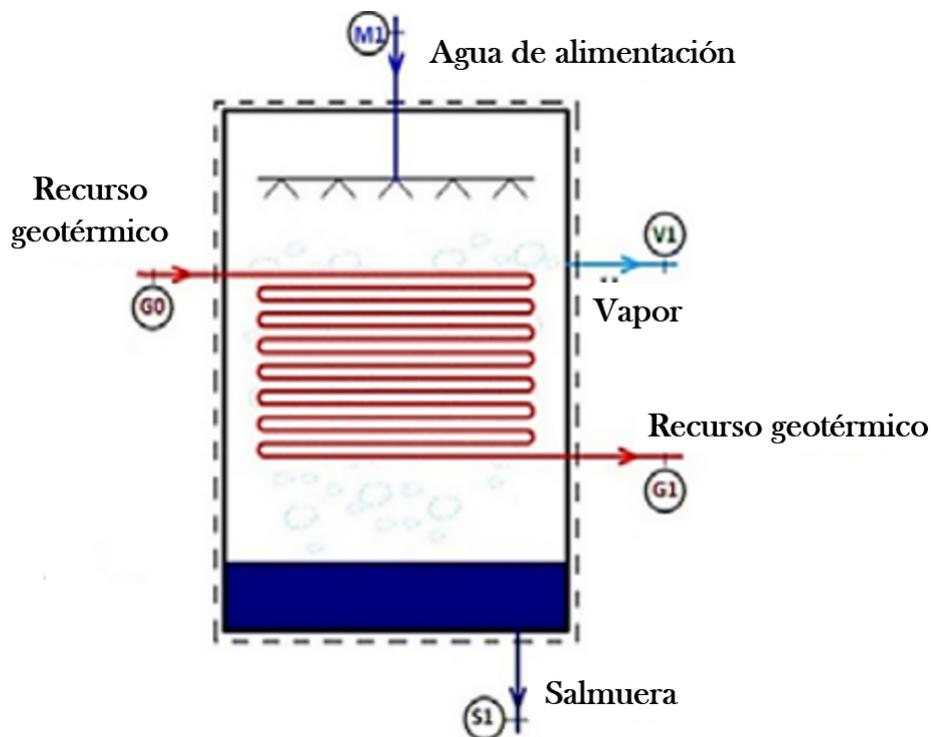
Se basa en la tecnología de desalación MED, descrita en el capítulo anterior. Cuenta con tres efectos de evaporación a presión inferior a la atmosférica, la cual va decreciendo en cada efecto (paso). Su principal diferencia con respecto a la tecnología MED es que el fluido de aporte energético, en este caso el fluido geotérmico, atraviesa todas las cámaras para un mejor aprovechamiento de la energía térmica suministrada a la planta DMG [Rodríguez Zárate (19)].

En la figura 2.1 se puede observar un esquema del sistema DMG propuesto por el grupo iiDEA. Al igual que un sistema MED, el agua de mar se introduce a un condensador donde tendrá contacto indirecto con el vapor producido del último efecto (paso) del sistema. Esto tiene como objetivo precalentar el agua de mar, y al mismo tiempo condensar el vapor. Se puede apreciar un esquema del condensador en la figura 2.2.



**Figura 2.2:** Esquema del condensador del sistema DMG. [Rodríguez Zárate (19)]

Por otra parte, en la primera cámara es suministrado fluido geotérmico de baja entalpía, a una temperatura de 90 [°C]. El propósito es que dicho fluido transfiera parte de su energía térmica al fluido que circula por la parte externa al banco de tubos de la cámara, el fluido geotérmico abandona este primer efecto a una temperatura razonablemente alta, como se puede apreciar en la figura 2.3. [Rodríguez Zárate (19)]



**Figura 2.3:** Esquema de la cámara 1 del sistema DMG. [Rodríguez Zárate (19)]

La alimentación de agua de mar precalentada se hace de forma simultánea a las 3 cámaras. En la primera cámara se tienen condiciones de presión inferiores a la atmosférica, y el fluido geotérmico cede calor al agua de mar para que esta llegue a su punto de evaporación. El vapor obtenido es inducido a la siguiente cámara. Se hace lo mismo para la salmuera que no logró evaporarse pero sí adquirió energía térmica del fluido geotérmico.

Dentro de la segunda cámara se introduce por un lado la salmuera del efecto anterior y el agua de mar precalentada, y por el otro lado se introduce el vapor generado en la primera cámara y el fluido geotérmico, tanto el calor latente y el sensible de ambas sustancias, provocan un incremento en la energía térmica del agua de mar en el segundo efecto y del agua rechazada, el propósito es lograr la evaporación de cierta cantidad de agua de mar y de la salmuera. La extracción de condensados se realiza entre una cámara y otra. [Rodríguez Zárate (19)].

Este proceso se puede repetir  $n$  cantidad de veces y se presenta en la figura 2.4. Para el caso específico de la propuesta de grupo iiDEA se determinó a través de un análisis térmico que 3 efectos dan una relación óptima entre consumo energético y el agua destilada obtenida.

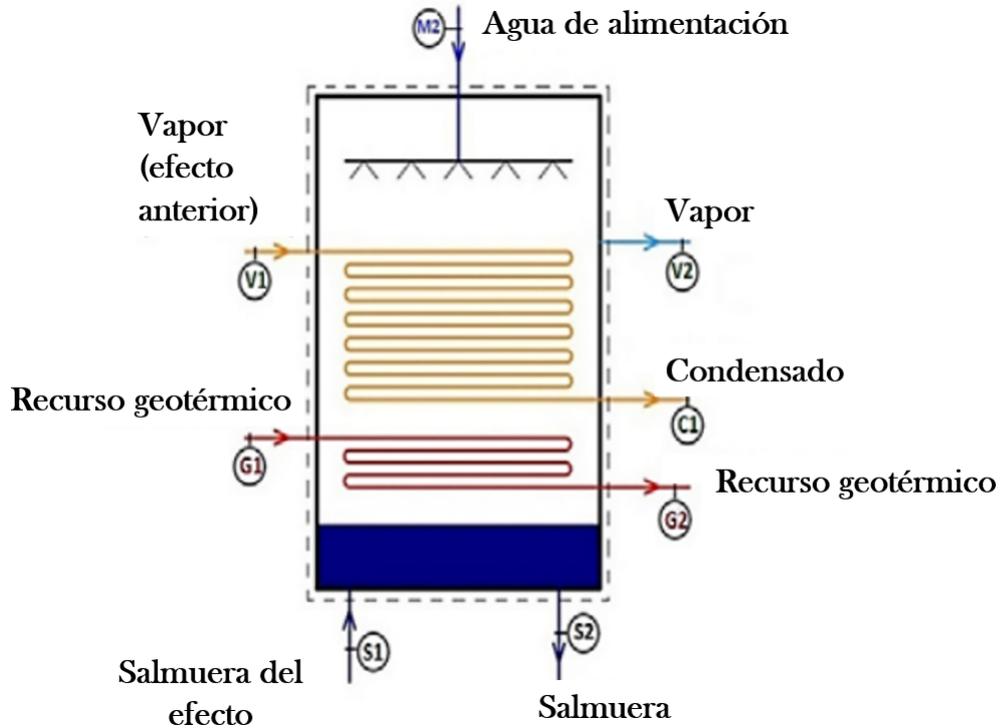


Figura 2.4: Esquema de la cámara 2 y 3 del sistema DMG. [Rodríguez Zárate (19)]

## 2.2. Sistemas de bombeo

El fluido de circulación o el fluido geotérmico es el que otorga la transferencia de calor a cualquier proceso que use energía geotérmica. Para mover este fluido desde la fuente geotérmica hasta el lugar de uso es de suma importancia realizar sus respectivos análisis y consideraciones hidráulicas. [Chiasson (7)]

Sin embargo, la ingeniería del sistema de transporte del fluido suele tratarse como secundario o sin importancia. Un diseño poco eficiente del sistema de bombeo y tuberías puede ocasionar un consumo energético de la bomba excesivo, así como una transferencia de calor inadecuada al sistema, lo que provocará que el proceso, en este caso la desalación de agua de mar, de un rendimiento inferior a lo esperado.

Las siguientes secciones del capítulo se enfocaran en la importancia del sistema de bombeo y las consideraciones hidráulicas que se deben tomar en cuenta para su diseño y selección en cualquier proyecto geotérmico.

### 2.2.1. Tipos de bombas

Las bombas son los elementos que aportan energía al fluido para vencer las pérdidas de carga y diferencias de altura entre el lugar de origen y el lugar al que se requiere transportar el fluido, forzando la circulación de un fluido en un determinado sentido a través del sistema de tuberías.

Existe una cantidad considerable de bombas que cubren los requerimientos para cada industria. Estas bombas se pueden clasificar según la dirección del flujo a través del impulsor o rotor, el modo en que se transfiere energía al fluido, número de etapas o impulsores, posición del eje, entre otros. La clasificación general de bombas se aprecia en la figura 2.5.

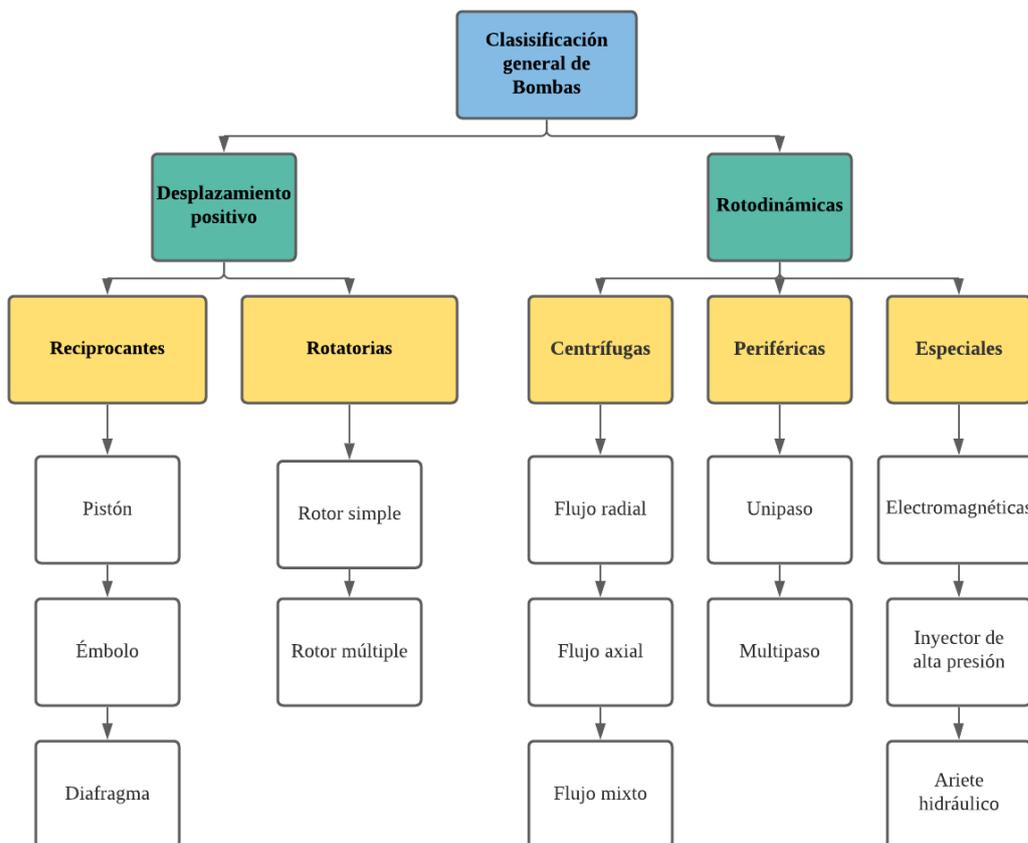


Figura 2.5: Clasificación general de bombas

### 2.2.1.1. Bombas de desplazamiento positivo

Las bombas de desplazamiento positivo se caracterizan por ceder energía al fluido mediante volúmenes confinados, produciendo un llenado y vaciado periódico de dichos volúmenes que impulsa al fluido en una dirección. Existen 2 tipos de bombas de desplazamiento positivo, las reciprocantes que como su nombre lo dice, desplazan el fluido por medio de un movimiento reciprocante de un pistón o émbolo, mientras que las rotatorias desplazan el fluido con un movimiento rotatorio a través de engranes, tornillos, etcétera. En la figura 4.2 se presentan algunos ejemplos de bombas de desplazamiento positivo.

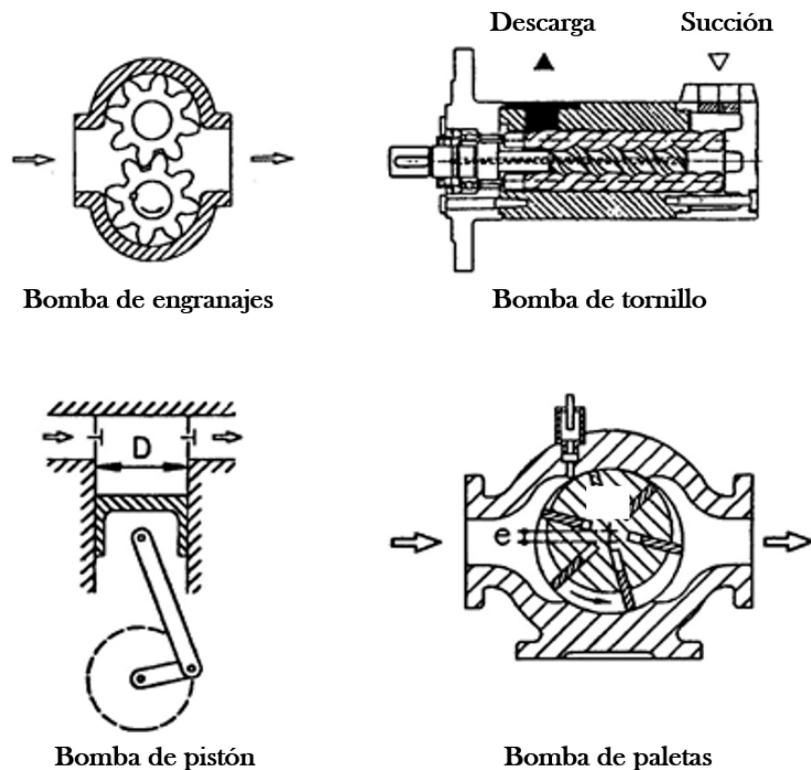
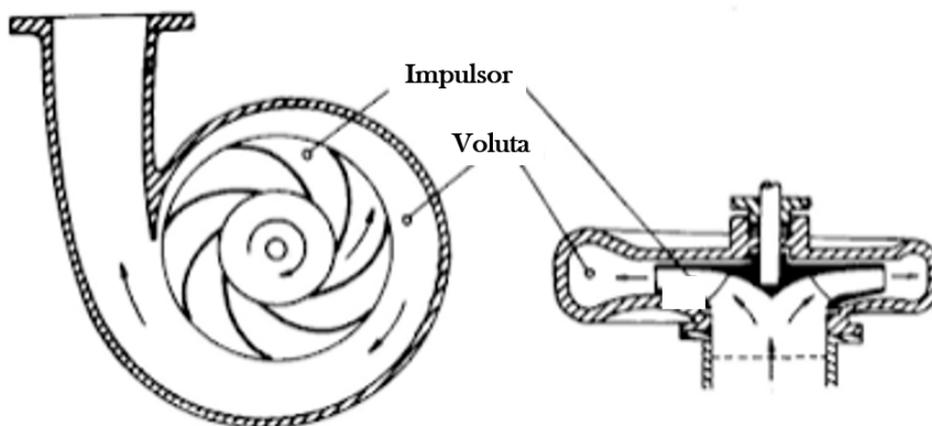


Figura 2.6: Tipos de bombas de desplazamiento positivo

### 2.2.1.2. Bombas Rotodinámicas

Las bombas rotodinámicas o centrífugas ceden energía al fluido variando el momento cinético a través de un impulsor. Existe una gran variedad de clasificación de bombas rotodinámicas, aunque las más comunes son según la dirección del flujo a la salida, en flujo radial, axial o mixto. En la figura 2.7 se observan los 2 componentes principales de una bomba centrífuga, el impulsor que produce el cambio de momento cinético del

fluido a través de álabes, y la voluta, que es un conducto que aumenta de sección gradualmente y es encargada de conducir el fluido hasta la descarga.



**Figura 2.7:** Componentes principales de una bomba centrífuga

### 2.2.2. Consideraciones para el diseño y/o selección de una bomba para un pozo geotérmico

Debido a las condiciones de presión y temperatura de los recursos geotérmicos y la forma de explotar dichos recursos es importante tomar en cuenta varias consideraciones para el diseño o selección del sistema de bombeo. La mayor parte de los recursos geotérmicos que son rentables para su aprovechamiento se encuentran en el subsuelo, por lo que es necesario un pozo para extraerlos.

Podemos definir un pozo como un hoyo que se perfora para alcanzar una fuente de agua caliente en un acuífero, en el caso de un yacimiento geotérmico. El pozo se reviste con una tubería de revestimiento o *casing*, y en el fondo del pozo se realizan disparos y se coloca una rejilla para comunicar el yacimiento con el pozo. Para la extracción del fluido geotérmico se instala una bomba especial que desplaza el fluido a la superficie a través de una tubería de producción o columna. El nivel estático NE es la distancia entre la superficie y el nivel del agua en el acuífero cuando la bomba no se encuentra funcionando. El nivel dinámico ND o nivel de bombeo NB es la distancia entre la superficie y el nivel del agua en el acuífero cuando la bomba se encuentra funcionando, y el abatimiento es la diferencia entre el ND Y NE. El caudal o gasto de aforo  $Q_{aforo}$  es el gasto que se extrae durante una prueba de aforo y que mantiene constante al ND por un determinado tiempo. El caudal o gasto de bombeo  $Q_b$  es el gasto máximo al que se debe tener funcionando la bomba y este debe ser siempre menor al gasto de aforo. En la figura 2.8 se observan los elementos y niveles mencionados. [Escalada (12)]

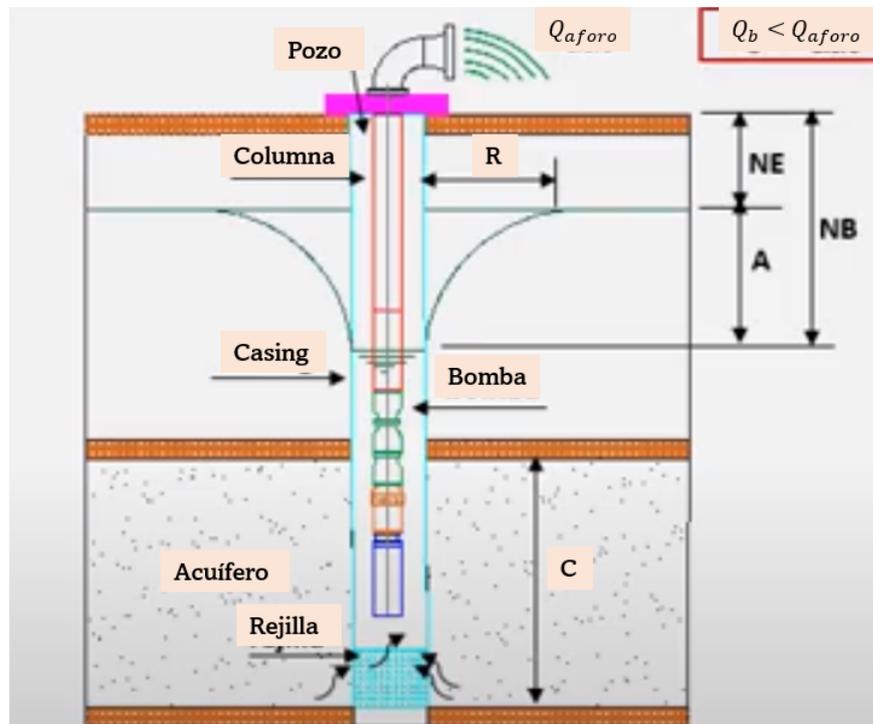


Figura 2.8: Sistema de bombeo en un pozo. [Escalada (12)]

Las bombas utilizadas en pozos profundos cuentan con características y requerimientos especiales como:

- Se instalan dentro de tuberías desde  $3\frac{1}{2}[in]$  hasta  $16[in]$
- Deben estar siempre sumergidas en el fluido, es decir que se deben colocar por debajo del ND.
- Trabajan con cargas dinámicas pesadas, por lo que se conforman mediante arreglos de impulsores en serie
- Pueden ser bombas de eje vertical con el motor en superficie o con el motor sumergible acoplado a la bomba

Los factores de selección entre una bomba de eje vertical y sumergible son:

- Contaminación del líquido
- Servicio y mantenimiento
- Diámetro de la tubería de revestimiento
- Verticalidad del pozo

### 2.2.2.1. Bomba de eje vertical

Las bombas de eje vertical están conformadas por 4 partes principales. El motor en superficie, el cabezal, la bomba y la columna que consta del eje de transmisión, cojinetes y la tubería de producción o descarga, y puede ser lubricada por aceite o por el líquido bombeado. Las columnas lubricadas por aceite llevan el eje por dentro de una camisa que impide el contacto con el fluido bombeado y el aceite se suministra desde superficie a través del cabezal. Las columnas lubricadas por el fluido bombeado tienen el eje expuesto a lo largo de la columna. Se recomienda las columnas lubricadas por aceite cuando el fluido a bombear reacciona con el material del eje y no se recomienda cuando es un sistema de suministro de agua, mientras que las columnas lubricadas por el fluido son recomendadas cuando se tiene un fluido limpio.

Las ventajas de las bombas de eje vertical es el mantenimiento sencillo al motor en superficie y los costos bajos, mientras que su desventaja es que son recomendadas para pozos someros y con poca o nula inclinación.

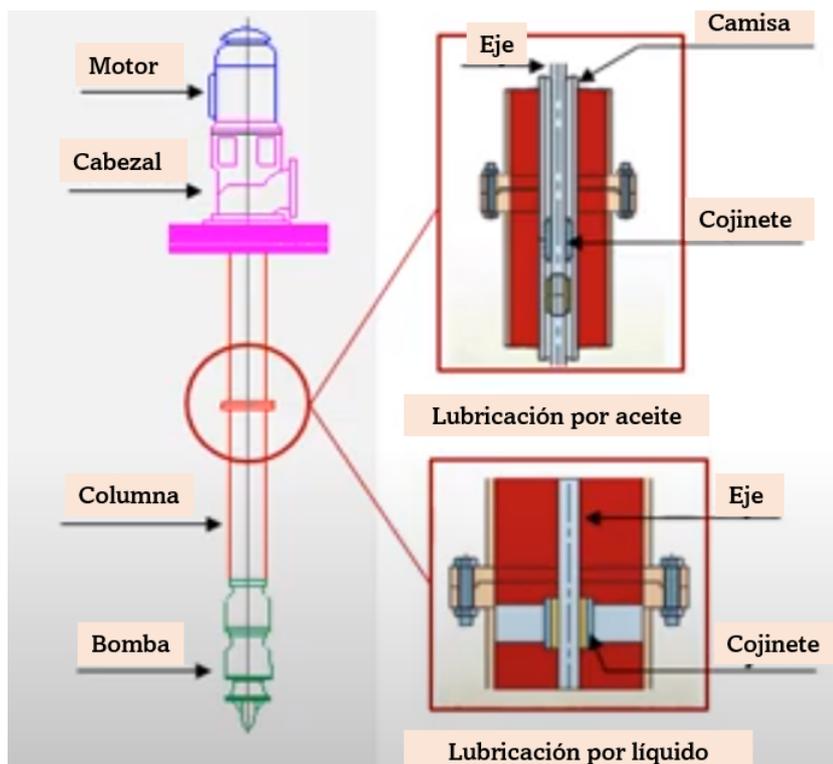


Figura 2.9: Bomba de eje vertical. [Escalada (12)]

#### 2.2.2.2. Bomba sumergible

La principal diferencia entre las bombas de eje vertical y las bombas sumergibles es que el motor se encuentra acoplado a la bomba en el fondo de pozo y es alimentado por un cable trifásico. Las ventajas que tienen las bombas sumergibles son que no necesitan un cabezal y no utiliza columna con eje, es decir, solo tiene la tubería de producción o descarga, y son equipos óptimos para pozos profundos y con inclinación. Las desventajas son los cuidados especiales que requiere el cable de alimentación ya que es necesario sacar todo el equipo para dar mantenimiento al motor y su costo elevado del mantenimiento.

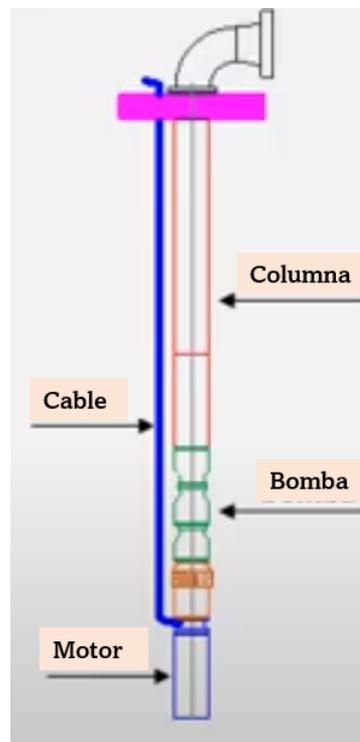


Figura 2.10: Bomba sumergible [Escalada (12)]

### 2.3. Ecuaciones fundamentales de hidráulica y sistemas de bombeo

Cuando hablamos de fluidos, la mayoría de los problemas se pueden resolver con una o más de las ecuaciones de continuidad, energía y cantidad de movimiento. Estas se desarrollan a partir de la ley de conservación de masa, primera ley de la termodinámica y la segunda ley de Newton. En este trabajo se utilizaron las ecuaciones de continuidad,

de energía, pérdidas de carga y potencia de un sistema hidráulico. Para el desarrollo de las siguientes ecuaciones se utilizó el libro "Sistemas de bombeo" [Cafaggi Félix et al. (6)].

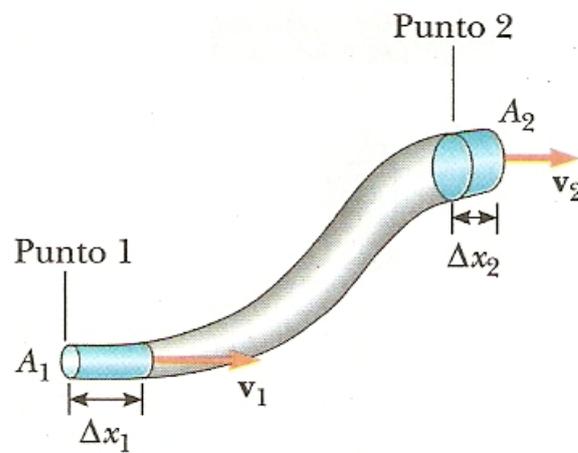
### 2.3.1. Ecuación de continuidad

La ecuación de continuidad es un caso específico de la ley de conservación de masa. Para su desarrollo se emplean volúmenes de control como el del punto 1 y punto 2 como se muestra en figura 2.11.

Si quisiera conocer la masa de fluido que ocupa el volumen de control 1.

$$m_1 = \rho_1 \Delta x_1 A_1$$

Donde  $\Delta x_1$  es la distancia del volumen,  $A_1$  es el área transversal, que debe ser igual en ambos lados del volumen y  $\rho_1$  es la densidad del fluido en el volumen 1.



**Figura 2.11:** Volumen de control 1

Aplica igual si se desea calcular la masa que pasa por el volumen de control 2

$$m_2 = \rho_2 \Delta x_2 A_2$$

Para expresar la masa del fluido en términos de velocidad  $V$  se utiliza

$$V = \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

Donde  $\Delta t$  es el tiempo que tarda el fluido en pasar por  $\Delta x$ . Se despeja  $\Delta x$  y se sustituye en las ecuaciones de masa

$$m_1 = \rho_1 v_1 A_1 \Delta t$$

$$m_2 = \rho_2 v_2 A_2 \Delta t$$

Si se desea calcular el flujo másico  $\dot{m}$  se divide la masa entre unidad de tiempo

$$\dot{m}_1 = \frac{\rho_1 v_1 A_1 \Delta t}{\Delta t}$$

$$\dot{m}_2 = \frac{\rho_2 v_2 A_2 \Delta t}{\Delta t}$$

$$\dot{m}_1 = \rho_1 v_1 A_1$$

$$\dot{m}_2 = \rho_2 v_2 A_2$$

Considerando que el gasto  $Q$  es igual a área por velocidad

$$Q = Av$$

También podría expresar al flujo másico como

$$\dot{m} = \rho Q$$

Considerando la ley de conservación de la masa

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2$$

## 2. MARCO TEÓRICO

---

$$\rho_1 v_1 A_1 = \rho_2 v_2 A_2$$

Si el fluido en estudio es incompresible, podemos asumir que su densidad no cambia respecto a la velocidad ni al área, por lo que

$$\rho_1 = \rho_2$$

$$v_1 A_1 = v_2 A_2$$

Lo que significa que el producto de la velocidad del fluido en un punto por el área transversal en ese mismo punto es igual en cualquier punto del volumen de control. A esto se le conoce como ecuación de continuidad.

### 2.3.2. Ecuación de la energía

Podemos aplicar la primera ley de la termodinámica al volumen de control. Esta ley establece que el cambio de energía interna de un sistema es igual a la suma de energía añadida al fluido y el trabajo hecho por el mismo.

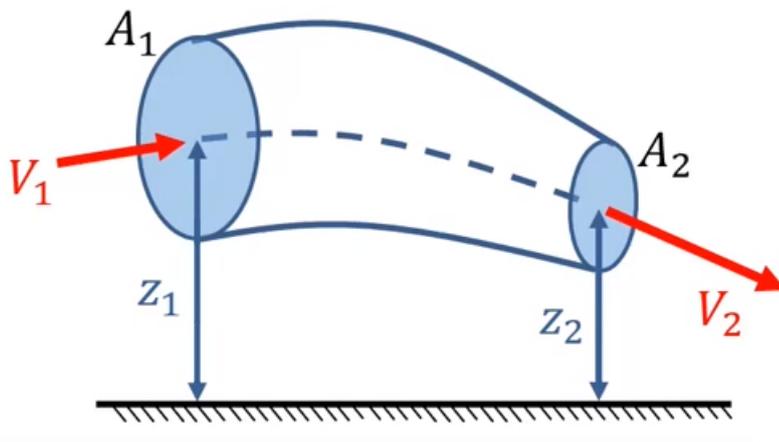


Figura 2.12: Volumen de control 2

Tomando como referencia la figura 2.12 podemos expresar matemáticamente dicha ley.

$$E_1 = E_2 + E_{interna}$$

Donde la  $E_1$  es la energía en el punto 1,  $E_2$  es la energía en el punto 2 y  $E_{interna}$  es el cambio de energía interna del sistema. Se puede expresar a  $E_1$  y  $E_2$  en términos de la energía potencial, energía cinética y trabajo del fluido:

$$E_1 = E_{p1} + E_{c1} + T_{f1}$$

$$E_2 = E_{p2} + E_{c2} + T_{f2}$$

Desarrollando  $E_p$ ,  $E_c$  y  $T_f$ :

$$\text{Energía potencial} = E_p = mgz$$

$$\text{Energía cinética} = E_c = \frac{1}{2}mv^2$$

$$\text{Trabajo del fluido} = T_f = pV = p \frac{m}{\rho}$$

Donde:

$m$  = masa

$g$  = gravedad

$z$  = altura

$v$  = velocidad

$V$  = volumen

$p$  = presión

$\rho$  = densidad

Entonces:

$$E_1 = mgz_1 + \frac{1}{2}m(v_1)^2 + p_1 \frac{m}{\rho}$$

$$E_2 = mgz_2 + \frac{1}{2}m(v_2)^2 + p_2 \frac{m}{\rho}$$

Para obtener la energía por unidad de peso  $H$  es necesario dividir  $E_1$  y  $E_2$  entre el peso ( $m * g$ )

## 2. MARCO TEÓRICO

---

$$\frac{E_1}{mg} = \frac{mgz_1}{mg} + \frac{1}{2} \frac{m(v_1)^2}{mg} + \frac{p_1}{mg} \frac{m}{\rho}$$

$$\frac{E_2}{mg} = \frac{mgz_2}{mg} + \frac{1}{2} \frac{m(v_2)^2}{mg} + \frac{p_2}{mg} \frac{m}{\rho}$$

$$H_1 = z_1 + \frac{(v_1)^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho g}$$

$$H_2 = z_2 + \frac{(v_2)^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho g}$$

Donde:

$z$  = Carga de posición [m]

$\frac{(v)^2}{2g}$  = Carga de velocidad [m]

$\frac{p}{\rho g}$  = Carga de presión [m]

$H$  = Energía por unidad de peso [m]

A esta expresión se le conoce como ecuación de Bernoulli, la cuál no considera la energía que se le aporta al fluido a través de mecanismos externos como bombas y compresores. Tampoco considera las perdidas por fricción, accesorios o mecanismos externos como motores. Estos factores deben agregarse a la ecuación con sus respectivos signos.

$$H_1 + h_B - h_r = H_2$$

$$z_1 + \frac{(v_1)^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho g} + h_B - h_r = z_2 + \frac{(v_2)^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho g}$$

Donde:

$h_B$  = Carga aportada al fluido por la bomba

$h_r$  = Perdida de carga por fricción y locales

Se despeja  $h_B$  de la expresión, ya que la carga que debe aportar la bomba es un dato solicitado en la cotización del equipo de bombeo.

$$h_B = \frac{(v_2)^2 - (v_1)^2}{2g} + \frac{p_2 - p_1}{\rho g} + h_r + z_2 - z_1$$
$$h_B = \frac{(v_2)^2 - (v_1)^2}{2g} + \frac{p_2 - p_1}{\gamma} + h_r + z_2 - z_1 \quad (2.1)$$

Donde:

$v$  = Velocidades del fluido  $[\frac{ft}{s}]$

$g$  = gravedad  $[\frac{ft}{s^2}]$

$p$  = presiones  $[\frac{lb}{ft^2}]$

$\gamma$  = Gravedad específica  $[\frac{lb}{ft^3}]$

$h_r$  = Pérdidas de carga  $[ft]$

$z$  = Alturas  $[ft]$

### 2.3.3. Pérdidas de carga

Para la aplicación correcta de la ecuación de energía se requiere estimar las pérdidas de carga  $h_r$ , que se compone por las pérdidas de fricción  $h_f$  y por las pérdidas locales  $h_l$

$$h_r = h_f + h_l$$

Se pueden estimar las pérdidas por fricción  $h_f$  con la ecuación de Darcy-Weisbach

$$h_f = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} \quad (2.2)$$

Donde:

$D$  = Diámetro de la tubería

## 2. MARCO TEÓRICO

---

$L$  = Longitud del arreglo de tuberías

$f$  = Factor de fricción de Darcy

El factor de fricción de Darcy es adimensional y es en función del número de Reynolds  $Re$  y de la rugosidad relativa  $\frac{\varepsilon}{D}$ .

Cuando el fluido es enviado a condiciones de flujo laminar ( $Re \leq 2100$ ), el factor de fricción solo depende del número de Reynolds y se calcula a partir de la ecuación de Hagen-Poiseuille [Anaya-Durand et al. (4)] :

$$f = \frac{64}{Re} \quad (2.3)$$

Por otro lado, cuando el flujo exhibe un régimen turbulento ( $Re \geq 4000$ ), el factor de fricción es generalmente calculado por la ecuación de Colebrook-White (CW) [Anaya-Durand et al. (4)]:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left[ \frac{\varepsilon}{3.7D} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}} \right]$$

Esta ecuación está basada en estudios experimentales en tuberías comerciales, y es apta para tuberías lisas y rugosas. Lewis F. Moody propuso la obtención del factor de fricción de manera gráfica a través del diagrama de Moody con base en la ecuación de Colebrook-White.

El problema con la ecuación de Colebrook-White es que el factor de fricción se encuentra implícito en la misma ecuación, impidiendo el despeje del factor de fricción y complicando su utilización, para lo cual se requiere del uso de métodos numéricos. Se han propuesto diversos modelos matemáticos que permiten la obtención del factor de fricción con ecuaciones explícitas, de las cuales se recomienda la correlación de Pavlov:

$$f = \left[ -2 \log \left[ \frac{1}{3.7} \frac{\varepsilon}{D} \right] + \left[ \frac{6.81}{Re} \right]^{0.9} \right]^{-2} \quad (2.4)$$

Donde:

$\varepsilon$  = Rugosidad absoluta [ $m$ ]

$D$  = Diámetro de la tubería [ $m$ ]

$Re$  = Densidad del fluido [*Adimensional*]

Cabe mencionar que para la zona de transición entre régimen laminar y turbulento no existe una correlación confiable para determinar el valor de factor de fricción, ya que

depende de varios factores como cambios de sección, de dirección del flujo y obstrucciones tales como válvulas corriente arriba de la zona considerada. Por ello, se recomienda, en caso de ser requerido, basarse en el Diagrama de Moody [Anaya-Durand et al. (4)].

El número de Reynolds se determina de la siguiente manera:

$$Re = \frac{vD\rho}{\mu} \quad (2.5)$$

Donde:

$v$  = Velocidad del fluido [ $\frac{m}{s}$ ]  
 $D$  = Diámetro de la tubería [ $m$ ]  
 $\rho$  = Densidad del fluido [ $\frac{kg}{m^3}$ ]  
 $\mu$  = Viscosidad del fluido [ $Pa * s$ ]

Para obtener el valor de la rugosidad relativa se debe dividir a la rugosidad absoluta  $\varepsilon$  entre el diámetro de la tubería  $D$ . Los valores de la rugosidad absoluta se encuentran en la tabla 2.1.

**Tabla 2.1:** Rugosidad absoluta de los materiales [Sotelo (20)]

Material	$\varepsilon[mm]$
Acero comercial	0.0460
Fundición asfaltada	0.1220
Hierro forjado	0.0500
Hierro fundido	0.2500
Hierro galvanizado	0.1500
Madera ensamblada	0.3050
PVC, plástico, cobre, latón, vidrio	0.0015

Como se mencionó anteriormente, Lewis F. Moody propuso una forma gráfica para calcular el factor de fricción  $f$  a través de un diagrama (2.13), donde en el eje x se lee el número de Reynolds  $Re$ , y se traza una línea recta hasta la curva con el valor más aproximado a la rugosidad relativa  $\frac{\varepsilon}{D}$  y se traza una línea recta al eje y para encontrar el valor de  $f$ . Este es el método recomendado para flujo transitorio ( $2100 < Re < 4000$ ).

## 2. MARCO TEÓRICO

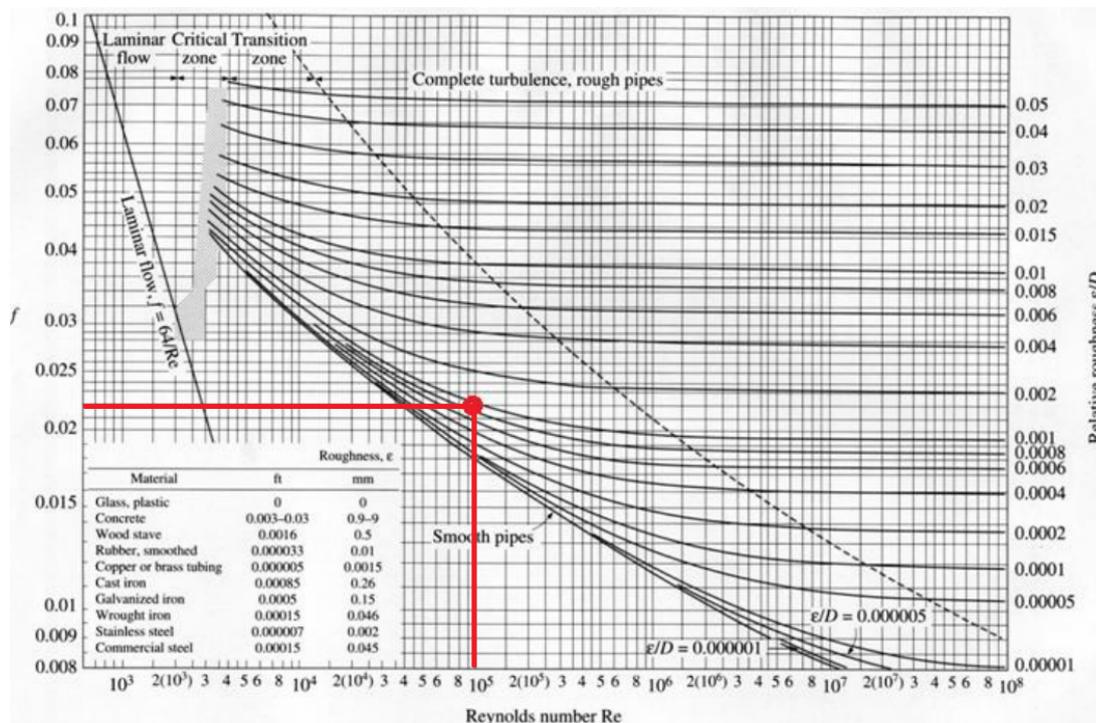


Figura 2.13: Diagrama de Moody. [González (14)]

Las pérdidas locales  $h_l$  se deben a cualquier obstáculo o accesorio en que el flujo necesite energía para pasar a través de él y se determina de la siguiente manera:

$$h_l = k \frac{v^2}{2g} \quad (2.6)$$

Donde  $k$  es una constante adimensional para cada tipo de accesorio. En la tabla 2.2.

**Tabla 2.2:** Coeficiente k de accesorios [Morris (18)]

<b>Accesorio</b>	<b>k</b>
Ampliación gradual	0.3
Boquilla	2.8
Codo 45°	0.4
Codo 90°	0.9
Codo de retorno	2.2
Entrada de borda	1.0
Entrada normal tanque tubo	0.5
Medidor de agua, disco	7.0
Medidor Venturí	2.5
Reducción gradual	0.2
Te paso directo	0.6
Te salida bilateral	1.8
Te salida lateral	1.3
Válvula de ángulo abierta	5.0
Válvula de cheque de bisagra	2.5
Válvula de compuerta abierta	0.2
Válvula de compuerta (1/2)	5.6
Válvula de globo abierta	10.0
Válvula de pie	1.6

Por lo tanto:

$$h_r = h_f + h_l = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} + \left[ k \frac{v^2}{2g} \right] \quad (2.7)$$

Donde:

$f$  = Factor de fricción [*Adimensional*]

$L$  = Longitud total de la tubería [*ft*]

## 2. MARCO TEÓRICO

---

$D$  = Diámetro de la tubería [ $ft$ ]

$v$  = velocidad del fluido [ $\frac{ft}{s}$ ]

$g$  = Gravedad [ $\frac{ft}{s^2}$ ]

$k$  = Coeficiente de accesorios [*Adimensional*]

### 2.3.4. Potencia hidráulica, potencia mecánica y eficiencia

Para calcular la energía total en el sistema es necesario multiplicar la carga total  $H$ , que representa la energía por unidad de peso que posee el fluido en una sección transversal, por el peso  $W$  del fluido en esa misma sección transversal.

$$E = WH$$

Donde el peso se puede expresar como  $W = \rho gV$

$$E = \rho gVH$$

La potencia  $P$  se puede definir como el flujo de energía, es decir, la transferencia de energía por unidad de tiempo

$$P = \frac{dE}{dt}$$

$$P = \rho g \frac{dV}{dt} H$$

La diferencia de volumen por unidad de tiempo  $\frac{dV}{dt}$  se conoce como gasto volumétrico  $Q$

$$P = \rho gQH$$

En el caso específico de la potencia hidráulica, ésta representa la rapidez con la cual una bomba entrega energía a un sistema de bombeo, y se debe usar la carga aportada al fluido con dicha bomba  $h_B$

$$P_h = \rho gQh_B = \gamma Qh_B \quad (2.8)$$

A esta expresión la dividimos entre el factor de conversión 550 para convertir de  $[\frac{ft*lb}{s}]$  a  $[hp]$

$$P_h = \frac{\gamma Q h_B}{550} \quad (2.9)$$

Donde:

$$\gamma = \text{Gravedad específica } [\frac{lb}{ft^3}]$$

$$Q = \text{Gasto o caudal } [\frac{ft^3}{s}]$$

$$h_B = \text{Carga de la bomba } [ft]$$

Para proporcionar potencia hidráulica útil ( $P_h$ ) al sistema, existe un proceso de transferencia de potencia mecánica  $P_m$  que recibe la bomba. En este proceso se deben considerar pérdidas de potencia internas por fricción en el cojinete, la empaquetadura y el sello de la flecha.

La eficiencia de una máquina permite conocer la cantidad de la energía (%) que puede ser convertida en energía útil. Dado que el flujo de energía de entrada y salida ocurre de manera simultánea, la eficiencia puede calcularse como el cociente entre la potencia de salida y la potencia de entrada. [Cafaggi Félix et al. (6)]

La potencia hidráulica ( $P_h$ ) que llega al impulsor es menor que la potencia mecánica  $P_m$  que es aplicada a la flecha de la bomba, ya que parte de esta potencia se pierde debido a la fricción. Por lo tanto, la eficiencia mecánica  $\eta_m$  se define de la siguiente forma:

$$\eta_m = \frac{P_h}{P_m}$$

La potencia y eficiencia mecánica de la bomba son datos proporcionados por los proveedores y su producto debe ser mayor o igual que la potencia hidráulica requerida en el sistema.

$$\eta_m * P_m \geq P_h \quad (2.10)$$

### 2.3.5. Cavitación

Cuando en un sistema a presión se tiene un líquido como fluido de trabajo, éste puede vaporizarse si la presión absoluta que lo rodea cae por debajo de la presión de vapor del mismo. [Cafaggi Félix et al. (6)]

## 2. MARCO TEÓRICO

---

Cuando existe cavitación se forman burbujas o cavidades de vapor del fluido, las cuales implosionan al recuperar presión, lo que causa grandes daños en los equipos e instalaciones. Este fenómeno ocurre en las zonas donde en el interior del sistema se tienen presiones bajas, y en una bomba dichas zonas se encuentran a la entrada de los álabes del impulsor. En la figura 2.14 muestran algunos daños causados a los rodets y álabes debido a la cavitación.



Figura 2.14: Daños causados por la cavitación [Google]

### 2.3.5.1. Carga de succión positiva neta (CSPN)

Es importante analizar la posibilidad de que se presente cavitación en una bomba. Para eso calculamos la carga de succión positiva neta (CSPN) también conocida por su nombre en inglés *Net positive suction head (NPSH)*.

Las zonas con mayor potencial a presentar cavitación se encuentran en el interior de la bomba y son de difícil acceso, por lo que se infiere la carga indirectamente midiendo la carga en la brida de succión.

Si la alimentación del fluido se encuentra a una elevación mayor al de la bomba, como se muestra en la figura 2.15, se le conoce como instalación de una bomba en carga.

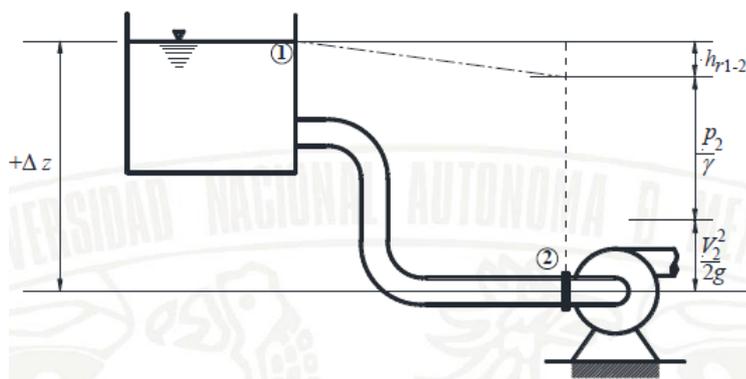
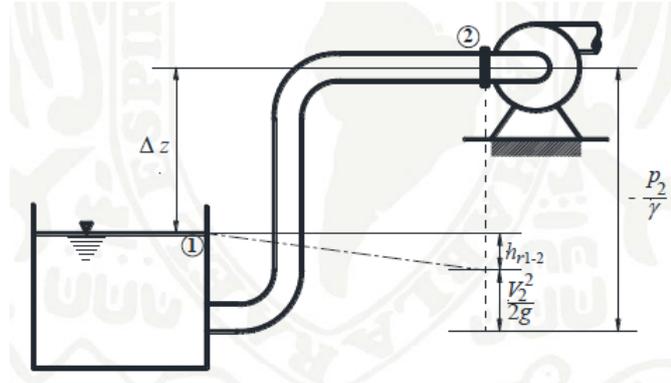


Figura 2.15: Instalación de una bomba en carga. [Cafaggi Félix et al. (6)]

Si el nivel de la alimentación es menor que el de la bomba, como se muestra en la figura 2.16, se lo conoce como instalación de una bomba en aspiración.



**Figura 2.16:** Instalación de una bomba en aspiración. [Cafaggi Félix et al. (6)]

Se puede definir a la carga de succión positiva neta disponible  $CSPN_D$  como la carga hidráulica disponible en la brida de succión, menos la carga de presión de vapor en la misma sección en la brida de succión de la bomba y se puede expresar de la siguiente manera:

$$CSPN_D = \frac{P_l - P_v}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g}$$

También se puede calcular como:

$$CSPN_D = \frac{P_l - P_v}{\gamma} + (\Delta z) - h_r \quad (2.11)$$

Donde:

$P_l$  = Presión del líquido en la succión [kPa]

$P_v$  = Presión de vapor del líquido a la temperatura en la succión [kPa]

$\gamma$  = Densidad relativa del agua  $[\frac{Kn}{m^3}]$

$\Delta z$  = Diferencia de altura entre la bomba y la alimentación [m]

$h_r$  = Pérdidas de carga entre la bomba y la alimentación [m]

Para bombas instaladas en carga el valor de  $\Delta z$  siempre es positivo, y cuando está instalada en aspiración  $\Delta z$  es negativo.

En el caso específico de las bombas sumergibles y verticales no existe una diferencia de altura ni pérdidas de carga entre la bomba y la alimentación, ya que la succión se encuentra sumergida. Por lo tanto el CSPN se puede reducir a la siguiente expresión:

$$CSPN_D = \frac{P_l - P_v}{\gamma} \quad (2.12)$$

Los fabricantes determinan experimentalmente la carga de succión positiva neta mínima para que el impulsor trabaje adecuadamente, a este valor se le denomina carga de succión positiva neta requerida  $CSPN_R$ . El diseño del sistema de bombeo debe darnos un  $CSPN_D > CSPN_R$  para evitar cavitación en la bomba. Se recomienda una diferencia mínima de 0.5 [m]

$$CSPN_D = CSPN_R + 0.5[m]$$

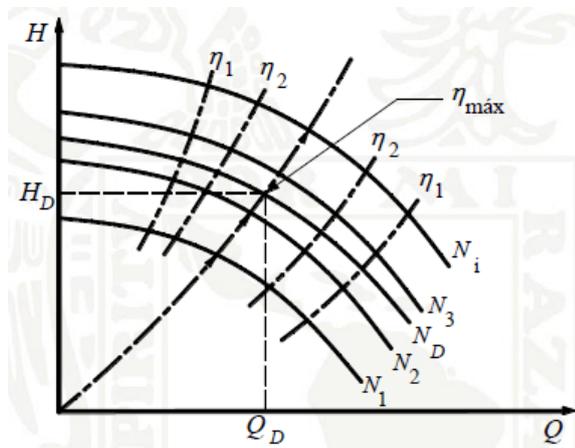
### 2.3.6. Curva característica de la bomba

Debido a la complejidad del flujo a través de una bomba, el comportamiento real de la misma no se puede predecir con exactitud sobre una base completamente teórica, por lo que es necesario acudir a la evidencia experimental a través de las pruebas a las que se somete la bomba. [Cafaggi Félix et al. (6)].

Las curvas características son la representación gráfica del comportamiento real de las bombas en las pruebas a las que lo fabricantes las someten. Estas curvas se presentan en el mismo plano y son:

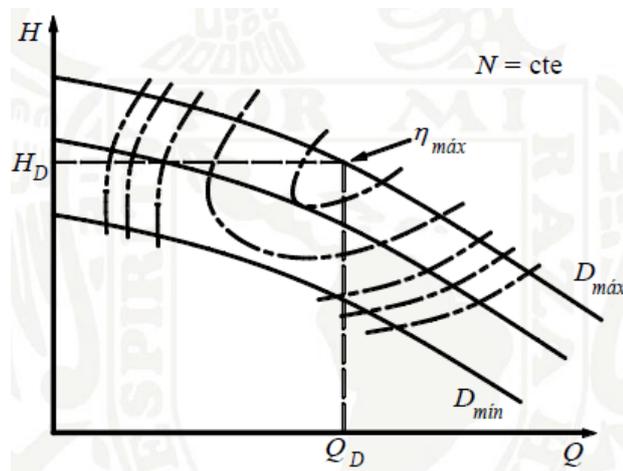
- Caudal - Carga (Q - H)
- Caudal - Eficiencia (Q -  $\eta$ )
- Caudal - Potencia (Q - P)
- Caudal - CSPN (Q - CSPN)

Algunas bombas pueden operar a distintas velocidades, y para cada una de ellas se puede realizar una curva, cómo lo muestra la figura 2.17.



**Figura 2.17:** Curva característica de una bomba a diferentes velocidades  $N_i$  [Cafaggi Félix et al. (6)]

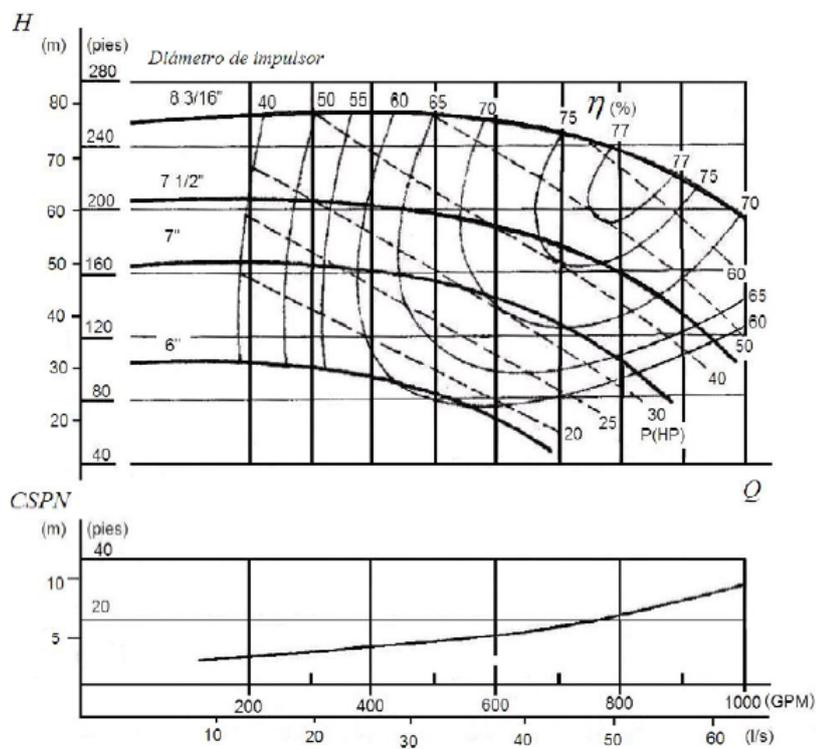
Lo mismo sucede cuando se utilizan distintos diámetros de impulsor, ya que usualmente las carcasas de las bombas están diseñadas para operar con un rango de diámetros de impulsor. En la figura 2.18 se ve como cambia el comportamiento de las curvas a distintos diámetros de impulsor.



**Figura 2.18:** Curva característica de una bomba con distintos diámetros de impulsor. [Cafaggi Félix et al. (6)]

En la figura 2.19 se ejemplifica una curva característica de una bomba a velocidad constante con 4 diámetros de impulsor. En el plano superior se encuentran las curvas de Q - H, Q - P y Q -  $\eta$ , mientras que en el plano inferior se grafica la curva Q - CSPN.

## 2. MARCO TEÓRICO



**Figura 2.19:** Curva característica de una bomba de una velocidad con distintos diámetros de impulsor. [Cafaggi Félix et al. (6)]

Al momento de cotizar un equipo de bombeo el proveedor proporciona una curva característica, de la cual es necesario verificar que al gasto de diseño, la bomba pueda vencer la carga requerida.

Para evitar la cavitación en la bomba se usa un factor de seguridad  $f_{seg}$ , el cual se calcula como el cociente del  $CSPN_D$  entre  $CSPN_R$  y se recomienda que su valor mayor a 1.5.

$$f_{seg} = \frac{CSPN_D}{CSPN_R} \quad (2.13)$$

Por último, siempre es deseable operar en las curvas de mayor porcentaje de eficiencia, sin embargo siempre se da prioridad a la funcionalidad.

# Planta DMG en el municipio de Los Cabos, BC Sur.

---

En este capítulo se describirá las características del físicas y geológicas de los pozos productores del fluido geotérmico, así como los requerimientos especificados de la planta DMG.

## 3.1. Ubicación

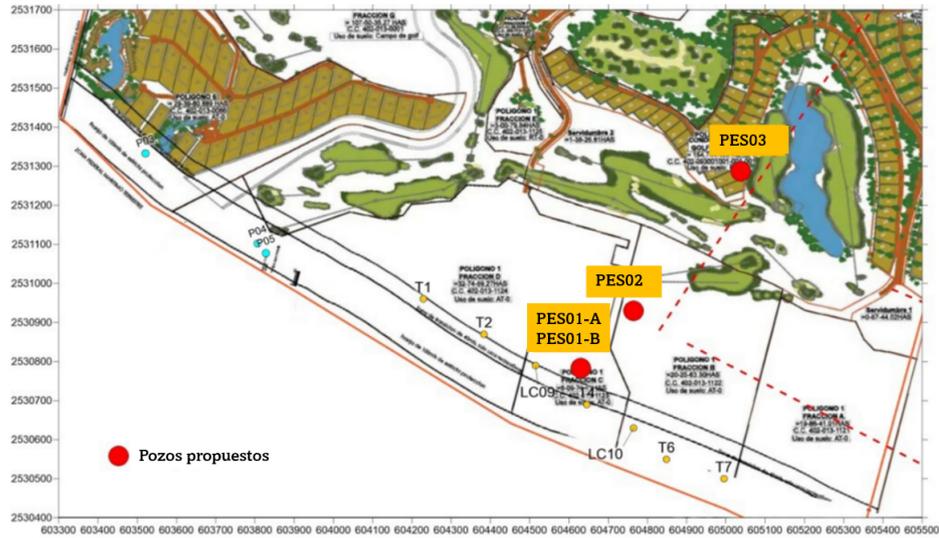
Los recursos hídricos renovables en nuestro país no son suficientes para cubrir la demanda actual. Este es un problema real en la península de Baja California, donde el potencial de crecimiento está siendo frenado, en parte, por la escasez de agua. Tan solo en el núcleo poblacional que contempla a Tijuana, Rosarito y Ensenada hay una demanda actual no cubierta de al menos  $68,060 \left[\frac{m^3}{d}\right]$ , se pronostica que para el 2030 esta cantidad incrementará a  $81,245 \left[\frac{m^3}{d}\right]$ . [iiDEA UNAM (15)]

Con el objetivo de determinar las condiciones de presión y temperatura favorables para el desarrollo de la propuesta de la planta DMG del grupo iiDEA, se perforaron dos pozos exploratorios someros en el municipio de Los Cabos, Baja California Sur, como se puede observar en la figura 3.1. En la tabla 3.1 se muestran las coordenadas UTM (sistema de coordenadas universal transversal de Mercator) de los pozos.

**Tabla 3.1:** Coordenadas UTM de los pozos exploratorios someros PES01A Y PES01B [Torres Rodríguez (22)]

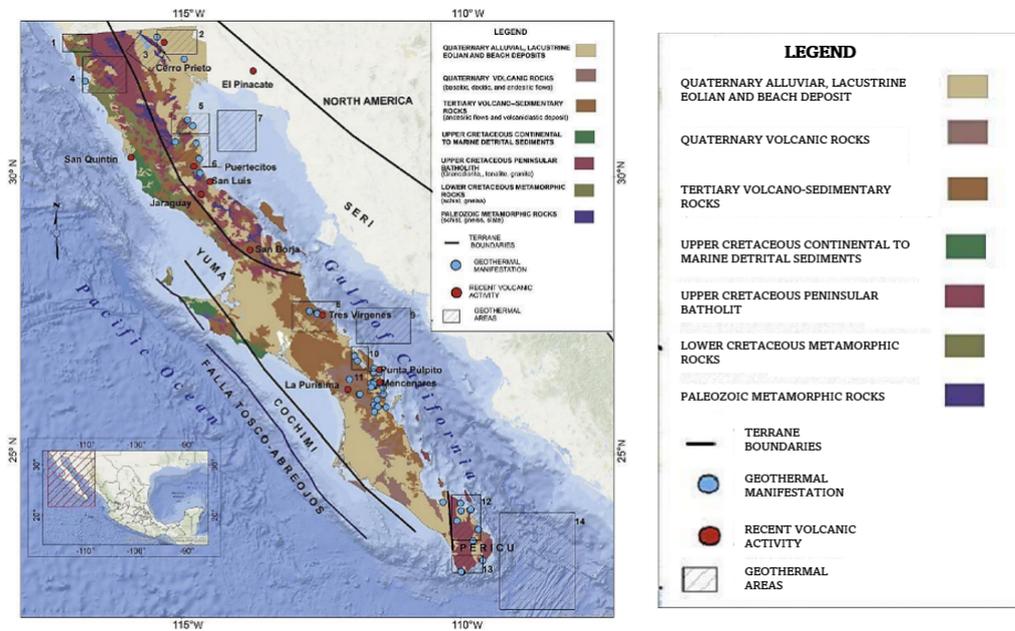
Pozo	Norte [m]	Sur [m]	Elevación [m]
PES01A	604,587.645	2'530,729.410	6.147
PES01B	604,597.405	2'530,718.760	6.115

### 3. PLANTA DMG EN EL MUNICIPIO DE LOS CABOS, BC SUR.



**Figura 3.1:** Localización de los pozos exploratorios someros PES01A Y PES01B [Torres Rodríguez (22)]

La selección de la ubicación se baso en el potencial geotérmico que tiene la región, así como en su accesibilidad al mar.



**Figura 3.2:** Mapa geológico de la península de Baja California con áreas geotérmicas. [iiDEA UNAM (15)]

Lo bondadoso de la península de Baja California es su ubicación geográfica, ya que cuenta con acceso al mar. El agua contenida en océanos y mares representa el 96.5% de los recursos hídricos del planeta, comparado con el agua necesaria para el desarrollo del ser humano se puede decir que los océanos y mares representan un recurso prácticamente inagotable, renovable si se considera el ciclo hidrológico natural del agua en el planeta. Otra ventaja real que tiene la península de BC es su disponibilidad de energía renovable, entre ellas, la energía geotérmica, este recurso tiene alta presencia en la península por la alta incidencia de fallas geológicas, como se observa en la figura 3.2. [iiDEA UNAM (15)]

## 3.2. Características de los pozos exploratorios

### 3.2.1. Pozo PES01A

El pozo PES01A tiene una profundidad de 42.5 m con una terminación de cemento, como se muestra en la figura 3.3. Al pozo se le hicieron registros de presión-temperatura obteniendo los perfiles de la figura 3.4 y con una prueba de aforo con *airlifting* se obtuvieron los datos de la tabla 3.2.

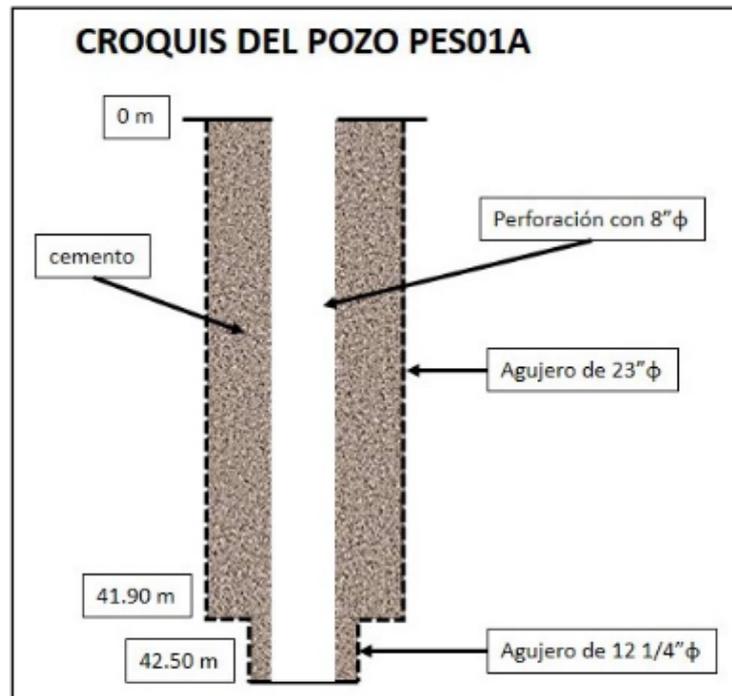
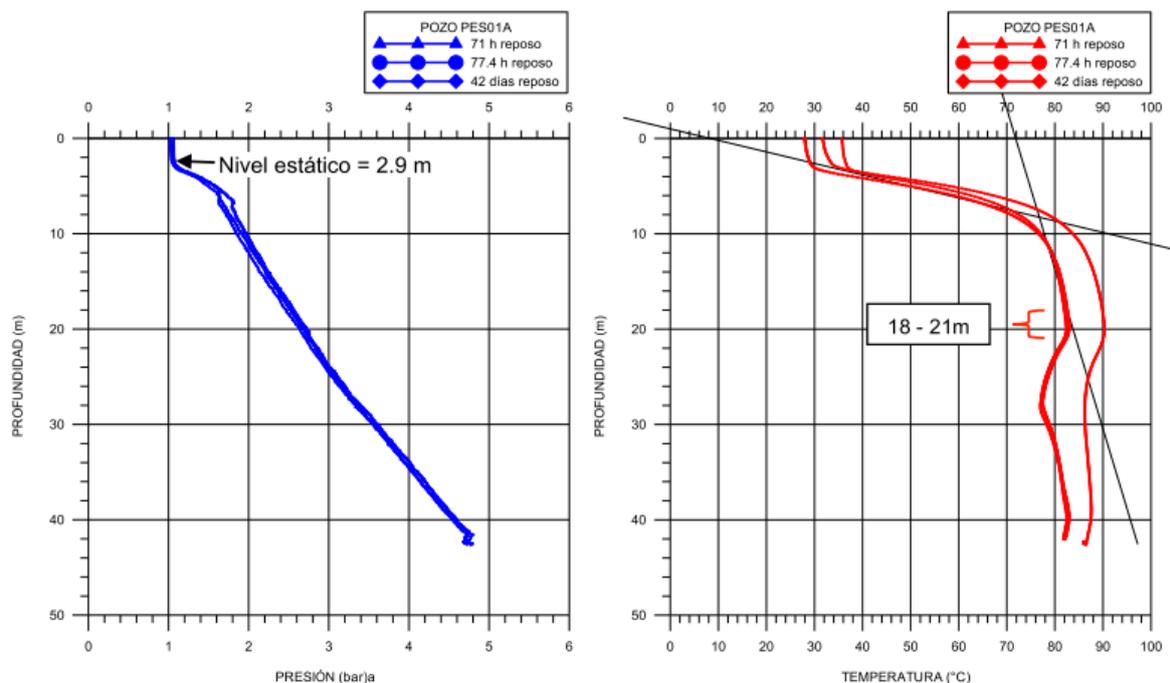


Figura 3.3: Croquis del pozo exploratoria PES01A. [Torres Rodríguez (22)]

### 3. PLANTA DMG EN EL MUNICIPIO DE LOS CABOS, BC SUR.

**Tabla 3.2:** Datos generales del pozo PES01A. [Torres Rodríguez (22)]

Profundidad [m]	42.5
Nivel estático [m]	2.9
Nivel dinámico [m]	15.5
Diámetro [in]	8
Rugosidad del concreto [m]	0.00018

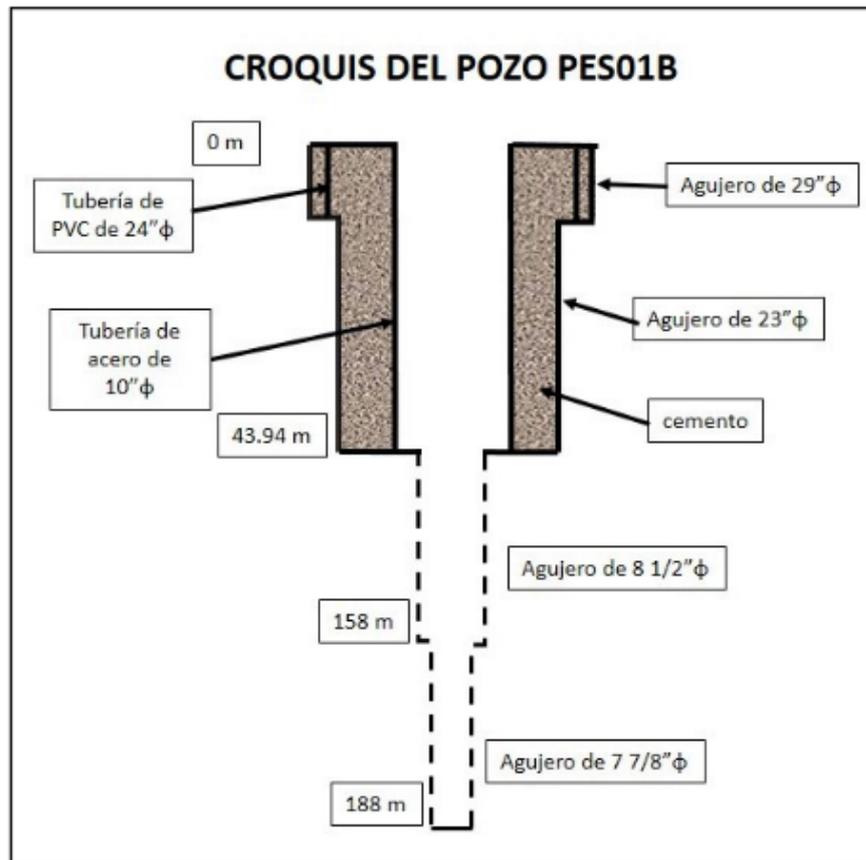


**Figura 3.4:** Perfiles de presión-temperatura del pozo exploratoria PES01A. [Torres Rodríguez (22)]

#### 3.2.2. Pozo PES01B

El pozo PES01B tiene una profundidad de 188 m, pero su mayor diferencia con el pozo PES01A es su terminación con tubería de revestimiento de PVC de 24 [in] y tubería de acero de 10 [in], como se muestra en la figura 3.5. Al igual que al pozo PES01A, se le hicieron registros de presión-temperatura pero a tres profundidades distintas, 42.5 [m], 100 [m] y 188 [m]. Se puede observar los perfiles a la profundidad

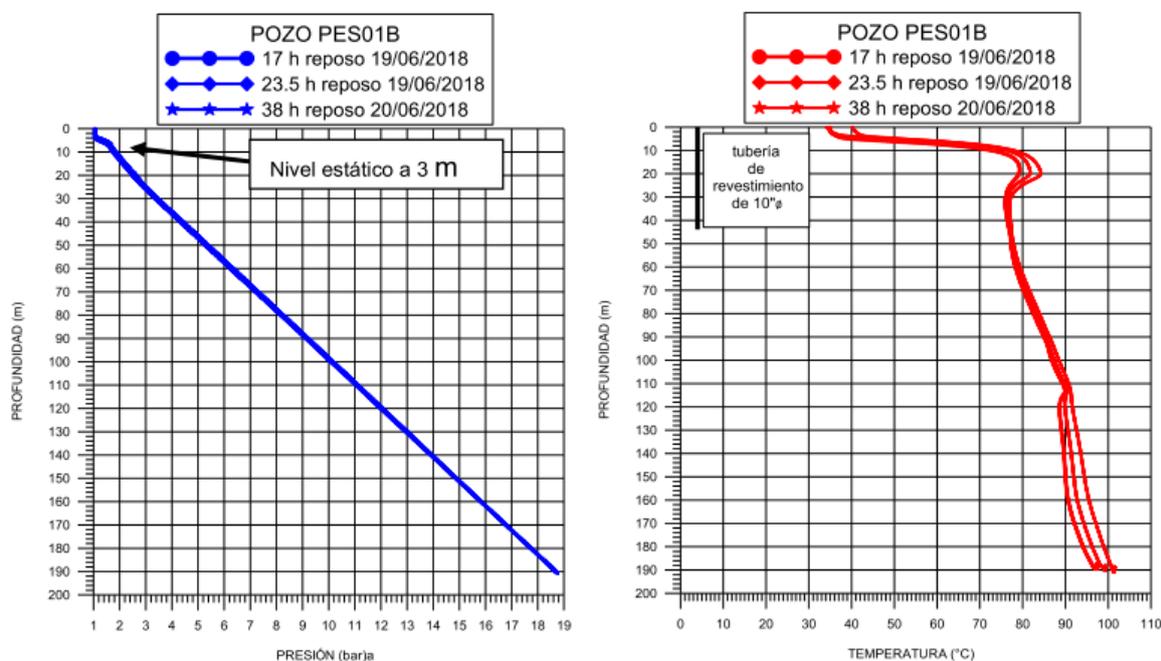
total de 188 [m] en la figura 3.6 y con una prueba de aforo con *airlifting* se obtuvieron los datos de la tabla 3.3.



**Figura 3.5:** Croquis del pozo exploratoria PES01B. [Torres Rodríguez (22)]

**Tabla 3.3:** Datos generales del pozo PES01B [Torres Rodríguez (22)]

Profundidad [m]	188
Nivel estático [m]	3
Nivel dinámico [m]	Abatido
Diámetro [in]	10
Rugosidad del acero [m]	0.000046



**Figura 3.6:** Perfiles presión-temperatura del pozo exploratoria PES01B. [Torres Rodríguez (22)]

La prueba de aforo con *airlifting* tuvo una duración de 1 hora para aligerar la columna y provocar flujo de agua caliente de la formación hacia la superficie. La inyección de aire inició con una presión de 2 [bar] y una vez que empezó a fluir se mantuvo en 1.72 [bar]. Es importante mencionar que una prueba de aforo confiable debe durar entre 48 y 72 horas, por lo que es recomendable ampliamente volver a realizar la prueba cuando se tenga el equipo de bombeo.

Se analizaron los recortes de perforación. De 0 a 41 [m] son depósitos de playa (arenas) con cuarzo, feldespato biotita, horblenda. A partir de los 41 [m] la roca es tonalita con biotita, cuarzo, plagioclasa y anfíbol. La tonalita es una roca de escasa permeabilidad. Es por ello que en el análisis de los registros no fue posible detectar el fracturamiento presente en la roca.

Para este trabajo se utilizó el pozo PES01B como el pozo productor por su terminación.

### 3.3. Características del fluido

La presión reportada en la tabla 3.4 es la presión nominal de entrada de fluido geotérmico a la unidad desaladora. En la tabla 3.5 se puede observar el análisis com-

posicional del agua donde se determinó la salinidad/conductividad del agua con la concentración de iones cloruro, la cual fue 33,135 ppm y corresponde a la salinidad del agua de mar.

**Tabla 3.4:** Propiedades del fluido geotérmico

<b>Presión</b> [ <i>bar</i> ]	2.0
<b>Temperatura</b> [ $^{\circ}\text{C}$ ]	90.0
<b>pH</b> [-]	8.5
<b>Viscosidad</b> [ <i>Pa * s</i> ]	0.001005
<b>Densidad relativa</b> [ $\frac{lb}{ft^3}$ ]	62.4

**Tabla 3.5:** Análisis composicional del agua

$Cl^{-}$	19,218
$Na^{+}$	10,346
$SO_4^{2-}$	3,564
$Mg^{2+}$	1,240
$Ca^{2+}$	1,066
$K^{+}$	391
$CO_2$	128
$HCO_3^{-}$	109
$SiO_2$	35
$Sr^{2+}$	14
$B^{3+}$	2.75
$Zn^{2+}$	1.9
$Fe^{2+}$	1.3
$F^{-}$	0.75
$Li^{+}$	0.4

### 3.4. Requerimientos de la planta DMG

En el diagrama de flujo de la ingeniería básica de la planta DMG (figura 3.7) se distinguen 5 líneas de tuberías de interés para el sistema de bombeo del fluido geotérmico.

- 112 = Línea del pozo a la bomba
- 113 = Línea de la bomba a la primer cámara
- 114 = Línea de la primer cámara a la segunda cámara
- 115 = Línea de la segunda cámara a la tercer cámara
- 116 = Línea de la tercer cámara a reinyección

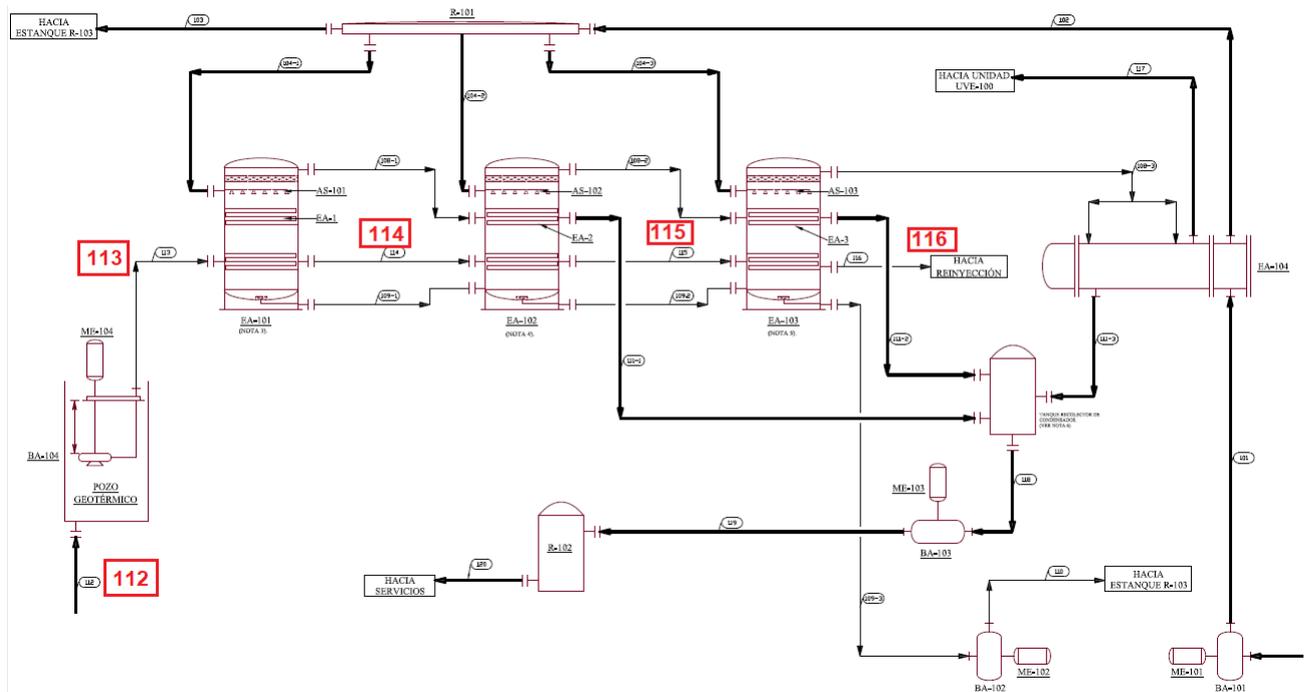


Figura 3.7: Diagrama de flujo planta DMG

En el documento de balance de materia y energía se puede encontrar las condiciones operativas de todas las líneas de tuberías que involucran la planta DMG. En la tabla 3.6 se puede observar las condiciones operativas relevantes de las 5 líneas de interés en el sistema de bombeo.

**Tabla 3.6:** Condiciones operativas de la planta DMG

	<b>112</b>	<b>113</b>	<b>114</b>	<b>115</b>	<b>116</b>
Flujo volumétrico [ $\frac{m^3}{h}$ ]	16.86	16.86	16.56	16.52	16.48
Temperatura [°C]	90.00	90.03	61.54	57.29	52.15
Presión [ <i>bar</i> ]	1.10	2.00	2.00	2.00	2.00
Fracción gas [-]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fracción líquido [-]	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Densidad [ $\frac{kg}{m^3}$ ]	965.10	965.20	982.40	984.60	987.10

### 3.5. Accesorios y aditamentos

De la tabla de materiales de los isométricos para las líneas 112 y 113 se seleccionaron todos los accesorios y aditamentos excepto la tornillería y empaques. Debido a que la lista no especifica los valores del coeficiente  $k$  para accesorios se les asignó un equivalente de la tabla 2.2 presentada en el capítulo anterior. Los accesorios quedan descritos en la tabla 3.7.

**Tabla 3.7:** Coeficientes  $k$  de accesorios en las líneas 112 y 113

<b>Accesorio</b>	<b>Cantidad</b>	<b>k</b>	<b>Cantidad * k</b>
Boquilla	10	2.8	28.0
Codo 90°	1	0.9	0.9
Entrada de borda	3	1.0	3.0
Reducción gradual	3	0.2	0.6
Te salida bilateral	1	1.8	1.8
Válvula de compuerta abierta 1/2	7	5.6	39.2
			73.5

# Cálculo y selección del sistema de bombeo

---

Para la selección del equipo de bombeo es necesario éste soporte la temperatura y los efectos corrosivos del fluido geotérmico y del agua de mar. Además, se debe considerar la información siguiente para el proveedor:

- Curva caudal vs nivel dinámico y el perfil de presión a cada uno de los caudales, los cuales se obtienen de una prueba de aforo.
- Tipo de formación en el pozo
- La carga de la bomba  $h_B$ , que se obtiene de los cálculos hidráulicos del sistema.
- El voltaje de la bomba, dependiendo de las instalaciones del lugar

Con los datos que se tienen sobre el pozo PES01B no es posible obtener toda la información necesaria para cotizar el equipo de bombeo. En este capítulo se desarrollan y fundamentan las suposiciones y propuestas necesarias.

## 4.1. Prueba de aforo

La prueba de aforo permite establecer cuál es el caudal óptimo al que se debe explotar un pozo y es la operación que culmina la construcción del mismo. [Subdirección General de Agua Potable Drenaje y Saneamiento (21)]

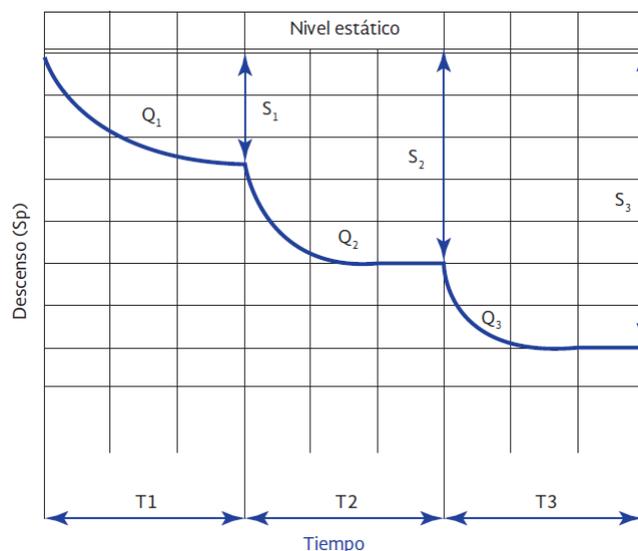
Esta prueba es de suma importancia para la selección del equipo de bombeo ya que tiene como finalidad determinar dos parámetros básicos, el nivel dinámico a distintos caudales y el caudal óptimo de bombeo. El principal problema con esta prueba es que se necesita un equipo de bombeo para realizar la prueba, y normalmente ésta se solicita con base en experiencias previas, ya sean de la región o del mismo pozo.

La prueba consiste en medir el nivel estático del pozo, sumergir la bomba a una profundidad por debajo del nivel dinámico esperado a la velocidad máxima de la bomba y seleccionar distintos escalones de bombeo. En cada escalón se toman lecturas del nivel dinámico, del piezómetro y se verifica se mantengan las revoluciones por minuto de la bomba en los intervalos de tiempo mostrados en la Tabla 4.1. El tiempo necesario para una prueba confiable es de 72 [h], aunque se puede reducir a 48 [h] si se conoce la región o el pozo.

**Tabla 4.1:** Intervalo de tiempo para las mediciones en la prueba de aforo [Subdirección General de Agua Potable Drenaje y Saneamiento (21)]

Núm	Tiempo	Núm	Tiempo	Núm	Tiempo	Núm	Tiempo	Núm	Tiempo
1	1 min	6	10 min	11	1 h 30 min	16	5 h	21	10 h
2	2 min	7	15 min	12	2 h	17	6 h	22	fin en aforo 48 h
3	4 min	8	20 min	13	2 h 30 min	18	7 h	22	fin en aforo 72 h
4	6 min	9	45 min	14	3 h	19	8 h		
5	8 min	10	1 h	15	4 h	20	9 h		

Por ejemplo: Se seleccionan los escalones de bombeo a 900, 1400 y 1900 [rpm]. Para cumplir con las 72 [h] de la prueba se debe bombear durante 24 [h] cada escalón de bombeo y hacer las mediciones en cada intervalo de tiempo mencionado en la tabla 4.1. Si se conoce el comportamiento del pozo se puede bombear 16 [h] cada escalón. El comportamiento de la prueba se muestra en la figura 4.1.



**Figura 4.1:** Bombeo escalonado en una prueba de aforo [Subdirección General de Agua Potable Drenaje y Saneamiento (21)]

## 4. CÁLCULO Y SELECCIÓN DEL SISTEMA DE BOMBEO

---

En el pozo PES01B se hizo una prueba de aforo con *airlifting* que tuvo como objetivo obtener la temperatura del fluido a boca del pozo, sin embargo, no es útil para determinar el nivel dinámico al caudal requerido por la planta DMG.

Debido a esto se decidió colocar el nivel de bombeo a una profundidad donde sea seguro el no abatimiento del pozo, es decir que se encuentre por debajo del nivel dinámico del pozo a cualquier velocidad de la bomba, sin llegar al fondo del agujero descubierto para evitar el arrastre de arenas. El nivel de bombeo propuesto es de 90 [m].

### 4.2. Ubicación de la planta DMG

Se estima que la planta DMG se instale al pie del pozo PES01B y terminado el proceso de desalación se reinyecte al mismo pozo PES01B. Usando la herramienta Google Earth se consideró una distancia de 100 [m] de la planta DMG con respecto al pozo PES01B y otros 100 [m] de regreso. Debido a ello se consideró para el cálculo hidráulico 210 [m] de longitud de tubería en superficie sin cambio de altura, y 90 [m] de profundidad hasta el nivel de bombeo en el pozo. En la figura 4.2 se presenta la propuesta del sistema de tubería en superficie del pozo PES01B a la planta DMG y su reinyección.

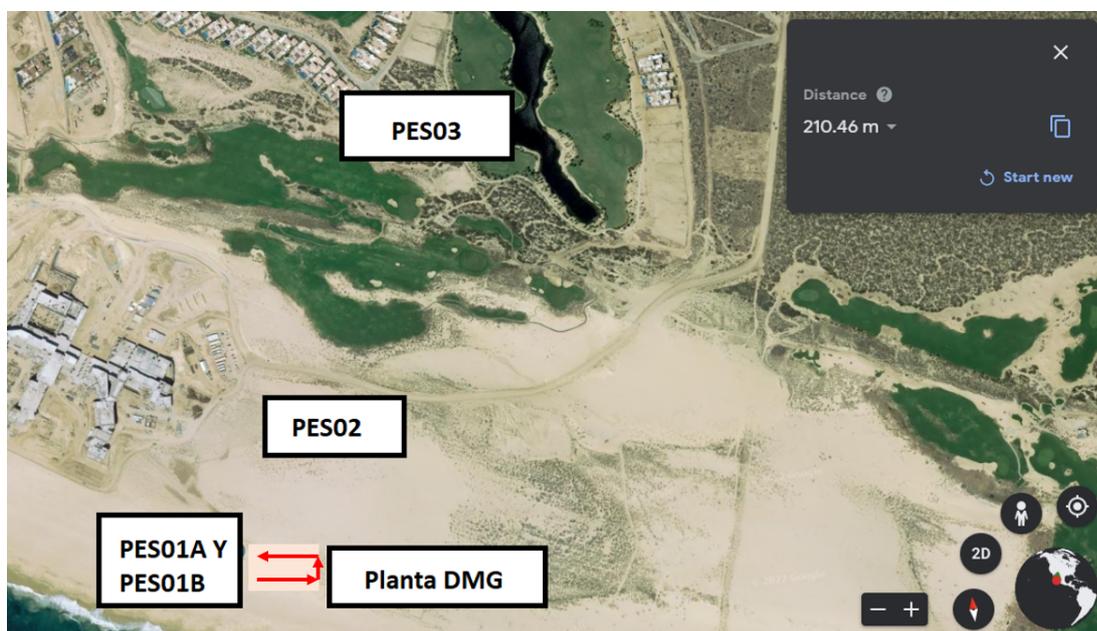


Figura 4.2: Distancia del pozo PES01B hasta la planta DMG. (Editado de Google Earth)

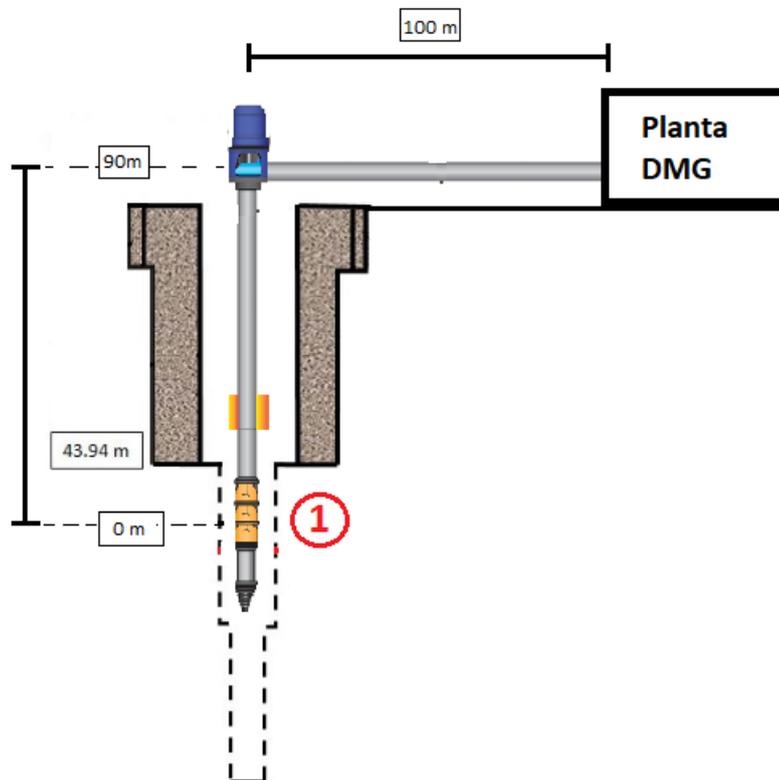
### 4.3. Cálculo del sistema de bombeo

Para empezar el cálculo del sistema de bombeo es necesario indicar ciertas consideraciones y propuestas hechas:

- Se utilizará el pozo PES01B para los cálculos.
- Se colocará la bomba a una profundidad de 90 [m] como se muestra en la figura 4.3 , según lo visto en la sección 4.1.
- La ubicación de la planta DMG se instalará a 100 [m] de distancia con respecto del pozo PES01B , según lo visto en la sección 4.2 , por lo que la distancia del arreglo de tubería será de 210 [m] considerando su retorno para reinyección.
- La velocidad de descarga de la bomba  $v_1$  y de entrada a la planta DMG  $v_2$  son iguales, y deben estar contenidos entre 1 [ $\frac{m}{s}$ ] y 2 [ $\frac{m}{s}$ ]. La velocidad propuesta es de 1.5 [ $\frac{m}{s}$ ]
- La bomba se debe de diseñar o seleccionar para operar con un flujo equivalente al 125 % del valor de operación, por lo tanto el flujo volumétrico es de 21.075 [ $\frac{m^3}{h}$ ]
- Para los cálculos de descarga la altura de referencia 1 será la profundidad de la bomba  $z_1 = 0$  [m], y la altura de referencia 2 será la planta DMG en superficie  $z_2 = 90$  [m] como se muestra en la figura 4.3, por lo que considerando la profundidad de la bomba, la distancia del cabezal del pozo a la planta DMG y su retorno para reinyección, la longitud total de la línea es de 300 [m] .
- Para los cálculos en la succión la altura de referencia  $z_1$  es el nivel dinámico del pozo el cual se desconoce, por lo que el valor  $z_1$  será una variable y se calcularán todos los posibles casos. El nivel de referencia 2 es la profundidad de la bomba  $z_2 = 0$  [m].

#### 4. CÁLCULO Y SELECCIÓN DEL SISTEMA DE BOMBEO

---



**Figura 4.3:** Diagrama del sistema de bombeo [m]

Se calcula el diámetro necesario al caudal requerido y la velocidad propuesta:

**Tabla 4.2:** Datos para la selección del diámetro de la TP

$Q$	$21.075 \left[ \frac{m^3}{h} \right]$	$0.0059 \left[ \frac{m^3}{s} \right]$
$v$	$1.5 \left[ \frac{m}{s} \right]$	$1.5 \left[ \frac{m}{s} \right]$

$$A = \frac{Q}{v} = \frac{0.0059 \left[ \frac{m^3}{s} \right]}{1.5 \left[ \frac{m}{s} \right]} = 0.0039 [m^2]$$

$$D = \sqrt{\frac{4 * A}{3.1416}} = \sqrt{\frac{4 * 0.0039 [m^2]}{3.1416}} = 0.0704 [m] = 2.77 [in]$$

El diámetro inmediato superior para tuberías comerciales es 3 [in], sin embargo es

necesario tomar en cuenta las opciones de tubería en el mercado, donde también se puede encontrar tubería de 4 [in].

Si con 4 [in] de diámetro y 21.075 [ $\frac{m^3}{h}$ ] la velocidad se mantiene entre 1 [ $\frac{m}{s}$ ] y 2 [ $\frac{m}{s}$ ] es factible seleccionar dicha tubería de producción.

$$D = 4[in] = 0.1016[m]$$

$$A = 3.1416 * \frac{d^2}{4} = 3.1416 * \frac{0.1016^2}{4} = 0.0081[m^2]$$

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{0.0059[\frac{m^3}{s}]}{0.0081[m^2]} = 0.7284[\frac{m}{s}]$$

Ya que la velocidad no se encuentra en el rango establecido se selecciona la tubería de 3 [in] como tubería de producción y se calcula la velocidad.

$$D = 3[in] = 0.0762[m]$$

$$A = 3.1416 * \frac{d^2}{4} = 3.1416 * \frac{0.0762^2}{4} = 0.0046[m^2]$$

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{0.0059[\frac{m^3}{s}]}{0.0046[m^2]} = 1.2836[\frac{m}{s}]$$

El diámetro exterior de una tubería de acero comercial de 3 [in] de diámetro interior es de 3.4 [in].

#### **4.3.1. Pérdidas de carga en la succión y carga de succión positiva neta disponible**

Es importante determinar las pérdidas de carga en la succión ( $h_r Succ$ ) de la bomba porque es un factor importante al momento de calcular la carga de succión positiva neta disponible ( $CSPN_D$ ) en el sistema, la cuál debe ser mayor a la Carga de Succión Positiva Neta requerida ( $CSPN_R$ ) por la bomba para evitar que se presente cavitación. Se hicieron las siguientes consideraciones para su cálculo:

#### 4. CÁLCULO Y SELECCIÓN DEL SISTEMA DE BOMBEO

---

- Al no conocer el nivel dinámico del pozo se calculará un valor de  $h_r Succ$  y de  $CSPN_D$  para cada nivel dinámico posible, que va desde el nivel estático a 3 [m] hasta el caso crítico en el que el nivel dinámico cae al mismo nivel o por debajo del nivel de bombeo a 90 [m].
- Para la sección entre los 0 [m] y los 44 [m] de profundidad del pozo, el flujo de la succión pasará en el espacio anular entre el diámetro interior de la tubería de revestimiento (TR) de 10 [in] que se muestra en la figura 3.5 y el diámetro exterior de la tubería de producción TP de 3.4 [in] que se calculó en la sección 4.3.
- Para la sección entre los 44 [m] y los 90 [m] de profundidad del pozo, el flujo de la succión pasará en el espacio anular entre el diámetro interior de agujero descubierto (BH) de 8.5 [in] que se muestra en la figura 3.5 y el diámetro exterior de la tubería de producción TP de 3.4 [in] que se calculó en la sección 4.3.
- Para la sección entre los 0 [m] y los 44 [m] existe un cambio abrupto de diámetro entre la TR 10 [in] y el BH de 8.5 [in], por lo que se considera una equivalencia a 3 ampliaciones graduales y un codo de 45 de la tabla 2.2 de constantes  $k$  2.2 dando una  $\sum k TR = 1.3$ .
- Para la sección entre los 44 [m] y los 90 [m] existe un cambio abrupto de dirección a la entrada de la bomba, por lo que se considera una equivalencia a 3 ampliaciones graduales y un codo de 90 de la tabla 2.2 de constantes  $k$  2.2 dando una  $\sum k BH = 1.8$ .
- La rugosidad de la sección de la TR de 10 [in] es la del acero comercial proporcionada en la tabla 2.1.
- Se desconoce la rugosidad de la sección de BH de 8.5 [in], por lo que se considera la mayor rugosidad proporcionada en la tabla 2.1, que es la de la madera.
- El valor de la presión de vapor del agua a las condiciones de temperatura del pozo (95 C) es de 84.608 [kPa] según el *Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties Database* (REFPROP).
- El valor de presión del agua a los distintos niveles dinámicos posibles es la presión atmosférica de 110 [kPa] ya que se considera un sistema de venteo en el cabezal.

Se recolectaron los datos vistos en el capítulo 3 y las propuestas hechas en el capítulo 4, hacemos conversión de unidades a sistema internacional para el cálculo de las pérdidas en la succión como se muestra en la tabla 4.3:

**Tabla 4.3:** Datos para  $h_R$  en la succión

$Q$	21.075 [ $\frac{m^3}{h}$ ]	0.0059 [ $\frac{m^3}{s}$ ]
$g$	9.81 [ $\frac{m}{s^2}$ ]	9.81 [ $\frac{m}{s^2}$ ]
$\gamma$	62.40 [ $\frac{lb}{ft^3}$ ]	9.80 [ $\frac{kn}{m^3}$ ]
$\rho$	965.20 [ $\frac{kg}{m^3}$ ]	965.20 [ $\frac{kg}{m^3}$ ]
$\mu$	0.001005 [ $Pa * s$ ]	0.001005 [ $Pa * s$ ]
$p_{liq}$	1.10 [ $Bar$ ]	110.00 [ $Kpa$ ]
$p_{vap}$ @ 95 °C	0.846 [ $Bar$ ]	84.60 [ $Kpa$ ]
$\varepsilon$ TR 10 [ $in$ ]	0.046 [ $mm$ ]	0.000046 [ $m$ ]
$\varepsilon$ BH 8.5 [ $in$ ]	0.305 [ $m$ ]	0.000305 [ $m$ ]
$\sum k$ TR 10 [ $in$ ]	1.30	1.30
$\sum k$ BH 8.5 [ $in$ ]	1.80	1.80
$d.i_{TR}$	10.00 [ $in$ ]	0.254 [ $m$ ]
$d.i_{BH}$	8.50 [ $in$ ]	0.2159 [ $m$ ]
$d.e_{TP}$	3.40 [ $in$ ]	0.0864 [ $m$ ]

Cuando se analiza flujo en espacio anular es recomendable manejar el concepto de diámetro hidráulico, que se puede calcular como la resta del cuadrado de los diámetros entre el diámetro exterior.

$$d.h_{TR} = \frac{(d.i_{TR})^2 - (d.e_{TP})^2}{d.i_{TR}} = \frac{(0.254[m])^2 - (0.0864[m])^2}{0.254[m]} = 0.2246[m]$$

$$d.h_{BH} = \frac{(d.i_{BH})^2 - (d.e_{TP})^2}{d.i_{BH}} = \frac{(0.2159[m])^2 - (0.0864[m])^2}{0.2159[m]} = 0.1813[m]$$

Se calcula el área para los diámetros hidráulicos en la TR y BH :

$$A_{TR} = 3.1416 * \frac{(d.h_{TR})^2}{4} = 3.1416 * \frac{(0.2246[m])^2}{4} = 0.0396[m^2]$$

$$A_{BH} = 3.1416 * \frac{(d.h_{BH})^2}{4} = 3.1416 * \frac{(0.1813[m])^2}{4} = 0.0258[m^2]$$

#### 4. CÁLCULO Y SELECCIÓN DEL SISTEMA DE BOMBEO

---

Con el caudal y las áreas de los diámetro hidráulicos se puede calcular la velocidad a la que fluye el agua por la TR y por el BH:

$$v_{TR} = \frac{Q}{A_{TR}} = \frac{0.0059[\frac{m^3}{s}]}{0.0396[m^2]} = 0.1477[\frac{m}{s}]$$

$$v_{BH} = \frac{Q}{A_{BH}} = \frac{0.0059[\frac{m^3}{s}]}{0.0258[m^2]} = 0.2266[\frac{m}{s}]$$

Se calcula el número de Reynolds para la sección de la TR  $Re_{TR}$  y para la sección del BH  $Re_{BH}$  con la ecuación 2.5 :

$$Re_{TR} = \frac{0.1477[\frac{m}{s}] * 0.2246[m] * 965.2[\frac{kg}{m^3}]}{0.001005[Pa * s]} = 31,866.97$$

$$Re_{BH} = \frac{0.2266[\frac{m}{s}] * 0.1813[m] * 965.2[\frac{kg}{m^3}]}{0.001005[Pa * s]} = 39,472.19$$

Ya que  $Re > 4000$  en ambas secciones, calculamos el factor de fricción para la TR  $f_{TR}$  y el factor de fricción para el BH  $f_{BH}$  con la ecuación 2.4.

$$f_{TR} = [-2 \log[\frac{1}{3.7} \frac{0.000046[m]}{0.02246[m]}] + [\frac{6.81}{31,866.97}]^{0.9}]^{-2} = 0.0137$$

$$f_{BH} = [-2 \log[\frac{1}{3.7} \frac{0.000305[m]}{0.01813[m]}] + [\frac{6.81}{39,472.19}]^{0.9}]^{-2} = 0.0223$$

Se puede calcular las pérdidas de carga por fricción  $h_f$  con la ecuación 2.2 y las pérdidas de carga locales  $h_l$  con la ecuación 2.6 para cada posible nivel dinámico, que va desde los 3 [m] del nivel estático hasta los 90 [m] del nivel de la bomba. Con las pérdidas de carga totales  $h_r$  podemos calcular la carga de succión positiva neta disponible en el sistema  $CSPN_D$  para cada nivel dinámico posible. La tabla 4.6 muestra los resultados.

**Tabla 4.4:** Pérdidas de carga y Carga de Succión Positiva Neta disponible para cada posible nivel dinámico (Parte 1-3)

Nivel dinámico [m]	Sumergencia [m]	$hf_{succ}$ [m]	$hl_{succ}$ [m]	$hr_{succ}$ [m]	$CSPN_D$ [m]
90	0	0	0.004711831	0.004711831	2.585726479
89	1	0.000322958	0.004711831	0.005034789	3.58540352
88	2	0.000645916	0.004711831	0.005357748	4.585080562
87	3	0.000968875	0.004711831	0.005680706	5.584757604
86	4	0.001291833	0.004711831	0.006003664	6.584434646
85	5	0.001614791	0.004711831	0.006326622	7.584111687
84	6	0.001937749	0.004711831	0.006649581	8.583788729
83	7	0.002260708	0.004711831	0.006972539	9.583465771
82	8	0.002583666	0.004711831	0.007295497	10.58314281
81	9	0.002906624	0.004711831	0.007618455	11.58281985
80	10	0.003229582	0.004711831	0.007941414	12.5824969
79	11	0.003552541	0.004711831	0.008264372	13.58217394
78	12	0.003875499	0.004711831	0.00858733	14.58185098
77	13	0.004198457	0.004711831	0.008910288	15.58152802
76	14	0.004521415	0.004711831	0.009233246	16.58120506
75	15	0.004844373	0.004711831	0.009556205	17.58088211
74	16	0.005167332	0.004711831	0.009879163	18.58055915
73	17	0.00549029	0.004711831	0.010202121	19.58023619
72	18	0.005813248	0.004711831	0.010525079	20.57991323
71	19	0.006136206	0.004711831	0.010848038	21.57959027
70	20	0.006459165	0.004711831	0.011170996	22.57926731
69	21	0.006782123	0.004711831	0.011493954	23.57894436
68	22	0.007105081	0.004711831	0.011816912	24.5786214
67	23	0.007428039	0.004711831	0.01213987	25.57829844
66	24	0.007750997	0.004711831	0.012462829	26.57797548
65	25	0.008073956	0.004711831	0.012785787	27.57765252
64	26	0.008396914	0.004711831	0.013108745	28.57732956
63	27	0.008719872	0.004711831	0.013431703	29.57700661
62	28	0.00904283	0.004711831	0.013754662	30.57668365
61	29	0.009365789	0.004711831	0.01407762	31.57636069

#### 4. CÁLCULO Y SELECCIÓN DEL SISTEMA DE BOMBEO

**Tabla 4.5:** Pérdidas de carga y Carga de Succión Positiva Neta disponible para cada posible nivel dinámico (Parte 2-3)

Nivel dinámico [m]	Sumergencia [m]	$hf_{succ}$ [m]	$hl_{succ}$ [m]	$hr_{succ}$ [m]	$CSPN_D$ [m]
60	30	0.009688747	0.004711831	0.014400578	32.57603773
59	31	0.010011705	0.004711831	0.014723536	33.57571477
58	32	0.010334663	0.004711831	0.015046495	34.57539182
57	33	0.010657622	0.004711831	0.015369453	35.57506886
56	34	0.01098058	0.004711831	0.015692411	36.5747459
55	35	0.011303538	0.004711831	0.016015369	37.57442294
54	36	0.011626496	0.004711831	0.016338327	38.57409998
53	37	0.011949454	0.004711831	0.016661286	39.57377702
52	38	0.012272413	0.004711831	0.016984244	40.57345407
51	39	0.012595371	0.004711831	0.017307202	41.57313111
50	40	0.012918329	0.004711831	0.01763016	42.57280815
49	41	0.013241287	0.004711831	0.017953119	43.57248519
48	42	0.013564246	0.004711831	0.018276077	44.57216223
47	43	0.013887204	0.004711831	0.018599035	45.57183927
46	44	0.014210162	0.004711831	0.018921993	46.57151632
45	45	0.01453312	0.004711831	0.019244952	47.57119336
44	46	0.014856078	0.004711831	0.01956791	48.5708704
43	47	0.014924364	0.006157466	0.02108183	49.56935648
42	48	0.01499265	0.006157466	0.021150116	50.56928819
41	49	0.015060936	0.006157466	0.021218401	51.56921991
40	50	0.015129221	0.006157466	0.021286687	52.56915162
39	51	0.015197507	0.006157466	0.021354973	53.56908334
38	52	0.015265793	0.006157466	0.021423258	54.56901505
37	53	0.015334078	0.006157466	0.021491544	55.56894677
36	54	0.015402364	0.006157466	0.02155983	56.56887848
35	55	0.01547065	0.006157466	0.021628115	57.56881019
34	56	0.015538935	0.006157466	0.021696401	58.56874191
33	57	0.015607221	0.006157466	0.021764687	59.56867362
32	58	0.015675507	0.006157466	0.021832972	60.56860534
31	59	0.015743792	0.006157466	0.021901258	61.56853705
30	60	0.015812078	0.006157466	0.021969544	62.56846877

**Tabla 4.6:** Pérdidas de carga y Carga de Succión Positiva Neta disponible para cada posible nivel dinámico (Parte 3-3)

Nivel dinámico [m]	Sumergencia [m]	$hf_{succ}$ [m]	$hl_{succ}$ [m]	$hr_{succ}$ [m]	$CSPN_D$ [m]
29	61	0.015880364	0.006157466	0.022037829	63.56840048
28	62	0.015948649	0.006157466	0.022106115	64.56833219
27	63	0.016016935	0.006157466	0.022174401	65.56826391
26	64	0.016085221	0.006157466	0.022242686	66.56819562
25	65	0.016153506	0.006157466	0.022310972	67.56812734
24	66	0.016221792	0.006157466	0.022379258	68.56805905
23	67	0.016290078	0.006157466	0.022447544	69.56799077
22	68	0.016358364	0.006157466	0.022515829	70.56792248
21	69	0.016426649	0.006157466	0.022584115	71.56785419
20	70	0.016494935	0.006157466	0.022652401	72.56778591
19	71	0.016563221	0.006157466	0.022720686	73.56771762
18	72	0.016631506	0.006157466	0.022788972	74.56764934
17	73	0.016699792	0.006157466	0.022857258	75.56758105
16	74	0.016768078	0.006157466	0.022925543	76.56751277
15	75	0.016836363	0.006157466	0.022993829	77.56744448
14	76	0.016904649	0.006157466	0.023062115	78.5673762
13	77	0.016972935	0.006157466	0.0231304	79.56730791
12	78	0.01704122	0.006157466	0.023198686	80.56723962
11	79	0.017109506	0.006157466	0.023266972	81.56717134
10	80	0.017177792	0.006157466	0.023335257	82.56710305
9	81	0.017246077	0.006157466	0.023403543	83.56703477
8	82	0.017314363	0.006157466	0.023471829	84.56696648
7	83	0.017382649	0.006157466	0.023540114	85.5668982
6	84	0.017450934	0.006157466	0.0236084	86.56682991
5	85	0.01751922	0.006157466	0.023676686	87.56676162
4	86	0.017587506	0.006157466	0.023744972	88.56669334
3	87	0.017655792	0.006157466	0.023813257	89.56662505

### 4.3.2. Pérdidas de carga en la descarga

Las pérdidas de carga en la descarga  $h_{r_{desc}}$  son más sencillas de calcular en este caso, ya que se conoce la distancia exacta del recorrido del fluido en la descarga de la bomba, por lo que sólo se determina un valor de  $h_{r_{desc}}$ . Las consideraciones hechas para este cálculo fueron:

- Considerando la profundidad de bombeo, la distancia del cabezal del pozo a la planta DMG y su retorno al pozo para reinyección la distancia total  $L$  resultante es de 300 [m].
- El flujo de descarga pasará dentro de la tubería de producción TP de 3 [in] que se calculó en la sección 4.3. La tubería de transporte en superficie será la misma que la TP.
- Se toma un valor de  $\sum k$  en la descarga de = 73.5, según lo visto en el capítulo 3 en la tabla 3.7.
- Con el caudal y diámetro de la TP la velocidad de flujo es de 1.2836 [ $\frac{m}{s}$ ], según lo calculado en la sección 4.3.
- La rugosidad de la TP es la del acero comercial proporcionada en la tabla 2.1.

Se consideran los datos y realizan la conversión de unidades necesarios para el cálculo de  $h_{R_{desc}}$  en la tabla 4.7

**Tabla 4.7:** Datos para  $h_R$  en la descarga

$Q$	21.075 [ $\frac{m^3}{h}$ ]	0.0059 [ $\frac{m^3}{s}$ ]
$g$	9.81 [ $\frac{m}{s^2}$ ]	9.81 [ $\frac{m}{s^2}$ ]
$\rho$	965.2 [ $\frac{kg}{m^3}$ ]	965.2 [ $\frac{kg}{m^3}$ ]
$\mu$	0.001005 [Pa * s]	0.001005 [Pa * s]
$L$	300[m]	300[m]
$v$	1.2836 [ $\frac{m}{s}$ ]	1.2836 [ $\frac{m}{s}$ ]
$\varepsilon$ <b>TP</b>	0.046 [mm]	0.000046 [m]
$d.i.TP$	3 [in]	0.0762 [m]

Se calcula el número de Reynolds dentro de la TP con la ecuación 2.5.

$$Re_{TP} = \frac{1.2836[\frac{m}{s}] * 0.0762[m] * 965.2[\frac{kg}{m^3}]}{0.001005[Pa * s]} = 93,943.82$$

Ya que  $Re > 4000$ , calculamos el factor de fricción en la TP  $f_{TP}$  con la ecuación 2.4

$$f_{TP} = [-2 \log[\frac{1}{3.7} \frac{0.000046[m]}{0.0762[m]}] + [\frac{6.81}{93,943.82}]^{0.9}]^{-2} = 0.0174$$

Con las ecuaciones 2.2 y 2.6 se pueden calcular las pérdidas de carga por fricción en la TP  $hf_{TP}$  y las pérdidas de carga locales en la TP  $hl_{TP}$ .

$$hf_{TP} = 0.0174 * \frac{300[m]}{0.0762[m]} \frac{(1.2836[\frac{m}{s}])^2}{2 * 9.81[\frac{m}{s^2}]} = 5.7627[m]$$

$$hl_{TP} = 73.5 \frac{(1.2836[\frac{m}{s}])^2}{2 * 9.81[\frac{m}{s^2}]} = 6.1732[m]$$

Las pérdidas de carga totales  $hr$  son la suma de las perdidas de carga por fricción  $hf_{TP}$  y las pérdidas de carga locales  $hl_{TP}$ .

$$hr_{desc} = hf_{TP} + hl_{TP} = 5.7627[m] + 6.1732[m] = 11.9359[m]$$

### 4.3.3. Carga dinámica total de la bomba y potencia

La carga dinámica total  $h_B$  es un valor importante que se debe de proporcionar a los proveedores al momento de cotizar un equipo de bombeo, ya que la bomba debe tener la capacidad de vencer esa carga. Las consideraciones tomadas para su cálculo son las siguientes:

- Al no conocer el nivel dinámico del pozo se calculará un valor de  $h_B$  y de  $P$  para cada nivel dinámico posible, que va desde el nivel estático a 3 [m] hasta el caso crítico en el que el nivel dinámico cae al mismo nivel o por debajo del nivel de bombeo a 90 [m].
- La presión del fluido en el punto de referencia 1 (nivel dinámico) es la presión atmosférica de 1.1 [bar], ya que se considera un venteo en el cabezal del pozo.
- La presión del fluido en el punto de referencia 2 (Planta DMG) es de 2 [bar], según lo establecido en la tabla 3.4.
- Considerando que el diámetro en la descarga de la bomba y en la entrada a la planta DMG es el mismo y el caudal no cambia, la velocidad en estos puntos son iguales  $v_1 = v_2$ .

#### 4. CÁLCULO Y SELECCIÓN DEL SISTEMA DE BOMBEO

---

Volvemos a hacer cambio de unidades a sistema inglés para el cálculo de la  $h_B$  y la potencia requerida de la bomba  $P$ :

**Tabla 4.8:** Datos para  $h_B$  y  $P$

$Q$	21.075 [ $\frac{m^3}{h}$ ]	0.2067 [ $\frac{ft^3}{s}$ ]
$d.i.TP$	3 [ $in$ ]	3 [ $in$ ]
$h_r$	11.93 [ $m$ ]	39.16 [ $ft$ ]
$p_1$	2 [ $bar$ ]	4177.09 [ $\frac{lb}{ft^2}$ ]
$p_2$	1.1 [ $bar$ ]	2297.4 [ $\frac{lb}{ft^2}$ ]
$\gamma$	62.4 [ $\frac{lb}{ft^3}$ ]	62.4 [ $\frac{lb}{ft^3}$ ]
$v_1$	1.2836 [ $\frac{m}{s}$ ]	4.2116 [ $\frac{ft}{s}$ ]
$v_2$	1.2836 [ $\frac{m}{s}$ ]	4.2116 [ $\frac{ft}{s}$ ]
$g$	9.81 [ $\frac{m}{s^2}$ ]	32.185 [ $\frac{ft}{s^2}$ ]
$L$	300 [ $m$ ]	984.25 [ $ft$ ]

Se calcula la carga de la bomba  $h_B$  con la ecuación 2.1 y la potencia hidráulica requerida en el sistema  $P_h$  con la ecuación 2.9 para cada posible nivel dinámico. Los resultados se pueden observar en la tabla 4.11.

**Tabla 4.9:** Carga Dinámica Total de la Bomba y potencia requerida (Parte 1-3)

Nivel dinámico [m]	$h_B$ [m]	$CSPN_D$ [m]	$P_h$ [hp]
90	111.122934	2.585726479	8.549055518
89	110.122934	3.58540352	8.472122204
88	109.122934	4.585080562	8.395188891
87	108.122934	5.584757604	8.318255577
86	107.122934	6.584434646	8.241322264
85	106.122934	7.584111687	8.16438895
84	105.122934	8.583788729	8.087455637
83	104.122934	9.583465771	8.010522323
82	103.122934	10.58314281	7.93358901
81	102.122934	11.58281985	7.856655696
80	101.122934	12.5824969	7.779722383
79	100.122934	13.58217394	7.70278907
78	99.12293403	14.58185098	7.625855756
77	98.12293403	15.58152802	7.548922443
76	97.12293403	16.58120506	7.471989129
75	96.12293403	17.58088211	7.395055816
74	95.12293403	18.58055915	7.318122502
73	94.12293403	19.58023619	7.241189189
72	93.12293403	20.57991323	7.164255875
71	92.12293403	21.57959027	7.087322562
70	91.12293403	22.57926731	7.010389248
69	90.12293403	23.57894436	6.933455935
68	89.12293403	24.5786214	6.856522621
67	88.12293403	25.57829844	6.779589308
66	87.12293403	26.57797548	6.702655994
65	86.12293403	27.57765252	6.625722681
64	85.12293403	28.57732956	6.548789367
63	84.12293403	29.57700661	6.471856054
62	83.12293403	30.57668365	6.39492274
61	82.12293403	31.57636069	6.317989427

#### 4. CÁLCULO Y SELECCIÓN DEL SISTEMA DE BOMBEO

---

**Tabla 4.10:** Carga Dinámica Total de la Bomba y potencia requerida (Parte 2-3)

Nivel dinámico [m]	$h_B$ [m]	$CSPN_D$ [m]	$P_h$ [hp]
60	81.12293403	32.57603773	6.241056113
59	80.12293403	33.57571477	6.1641228
58	79.12293403	34.57539182	6.087189487
57	78.12293403	35.57506886	6.010256173
56	77.12293403	36.5747459	5.93332286
55	76.12293403	37.57442294	5.856389546
54	75.12293403	38.57409998	5.779456233
53	74.12293403	39.57377702	5.702522919
52	73.12293403	40.57345407	5.625589606
51	72.12293403	41.57313111	5.548656292
50	71.12293403	42.57280815	5.471722979
49	70.12293403	43.57248519	5.394789665
48	69.12293403	44.57216223	5.317856352
47	68.12293403	45.57183927	5.240923038
46	67.12293403	46.57151632	5.163989725
45	66.12293403	47.57119336	5.087056411
44	65.12293403	48.5708704	5.010123098
43	64.12293403	49.56935648	4.933189784
42	63.12293403	50.56928819	4.856256471
41	62.12293403	51.56921991	4.779323157
40	61.12293403	52.56915162	4.702389844
39	60.12293403	53.56908334	4.62545653
38	59.12293403	54.56901505	4.548523217
37	58.12293403	55.56894677	4.471589904
36	57.12293403	56.56887848	4.39465659
35	56.12293403	57.56881019	4.317723277
34	55.12293403	58.56874191	4.240789963
33	54.12293403	59.56867362	4.16385665
32	53.12293403	60.56860534	4.086923336
31	52.12293403	61.56853705	4.009990023
30	51.12293403	62.56846877	3.933056709

**Tabla 4.11:** Carga Dinámica Total de la Bomba y potencia requerida (Parte 3-3)

Nivel dinámico [m]	$h_B$ [m]	$CSPN_D$ [m]	$P_h$ [hp]
29	50.12293403	63.56840048	3.856123396
28	49.12293403	64.56833219	3.779190082
27	48.12293403	65.56826391	3.702256769
26	47.12293403	66.56819562	3.625323455
25	46.12293403	67.56812734	3.548390142
24	45.12293403	68.56805905	3.471456828
23	44.12293403	69.56799077	3.394523515
22	43.12293403	70.56792248	3.317590201
21	42.12293403	71.56785419	3.240656888
20	41.12293403	72.56778591	3.163723574
19	40.12293403	73.56771762	3.086790261
18	39.12293403	74.56764934	3.009856947
17	38.12293403	75.56758105	2.932923634
16	37.12293403	76.56751277	2.855990321
15	36.12293403	77.56744448	2.779057007
14	35.12293403	78.5673762	2.702123694
13	34.12293403	79.56730791	2.62519038
12	33.12293403	80.56723962	2.548257067
11	32.12293403	81.56717134	2.471323753
10	31.12293403	82.56710305	2.39439044
9	30.12293403	83.56703477	2.317457126
8	29.12293403	84.56696648	2.240523813
7	28.12293403	85.5668982	2.163590499
6	27.12293403	86.56682991	2.086657186
5	26.12293403	87.56676162	2.009723872
4	25.12293403	88.56669334	1.932790559
3	24.12293403	89.56662505	1.855857245

#### 4.4. Cotización del equipo de bombeo

Con los cálculos realizados anteriormente se obtuvo la información necesaria para el proveedor y comparar su propuesta con los resultados de este capítulo.

Anteriormente el grupo iiDEA había trabajado satisfactoriamente con las bombas Ruhrpumpen, pero ninguna de ellas había sido bomba de pozo profundo. Es por ello que se consideraron otras opciones de proveedores con el fin de seleccionar la que mejor se adapte al pozo PES01B. Se cotizó con la empresa Grundfos, a la cual se le compartió la información de la tabla 4.12.

**Tabla 4.12:** Datos proporcionados al proveedor para la cotización

<b>Caudal</b>	21.075 [ $\frac{m^3}{h}$ ]
<b>Temperatura</b>	95 [°C]
<b>Voltaje</b>	240 - 480 [V]
<b>Fluido</b>	Agua

El proveedor propuso 2 bombas sumergibles. Se muestran sus características en la tabla 4.13 y en las figuras 4.4 y 4.5

**Tabla 4.13:** Características de las bombas propuestas por el proveedor

	<b>Bomba 10 [hp]</b>	<b>Bomba 7.5 [hp]</b>
<b>Diametro de descarga [in]</b>	3	3
<b>Diámetro del motor [in]</b>	6	4
<b>Q @ Condiciones operativas [<math>\frac{m^3}{h}</math>]</b>	22.13	21.02
<b><math>h_B</math> @ Condiciones operativas [m]</b>	71.66	65.09
<b><math>P_m</math> @ Condiciones operativas [hp]</b>	8.39	7.05
<b><math>\eta_m</math> @ Condiciones operativas [%]</b>	69	70.7
<b><math>CSPN_R</math> [m]</b>	7.93	7.71
<b>Costo [Dls]</b>	3,283.40	2,725.79
<b>Material del impulsor</b>	Acero inoxidable	Acero inoxidable

#### 4.4 Cotización del equipo de bombeo

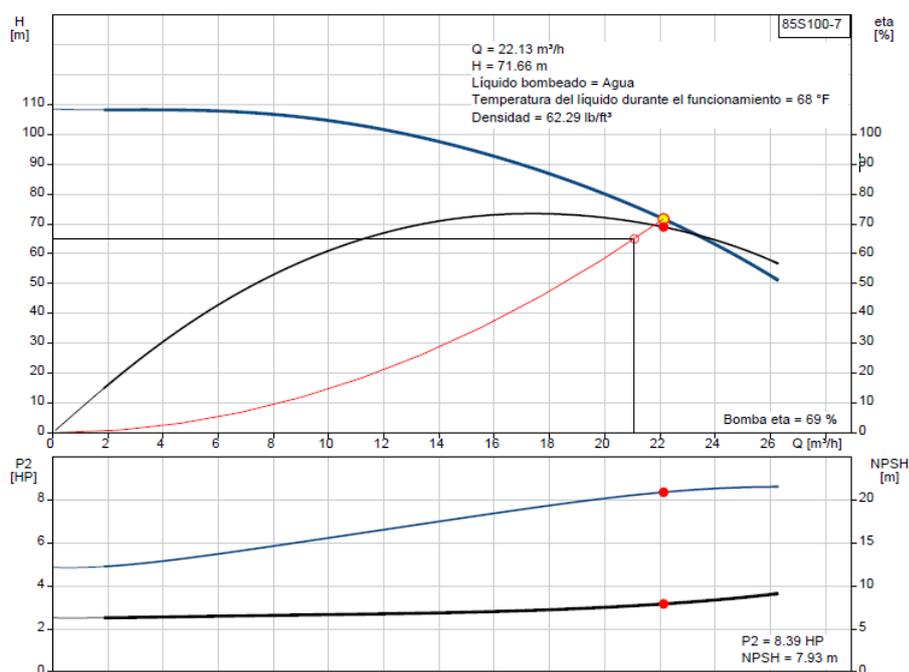


Figura 4.4: Curva característica de la bomba de 10 [hp]

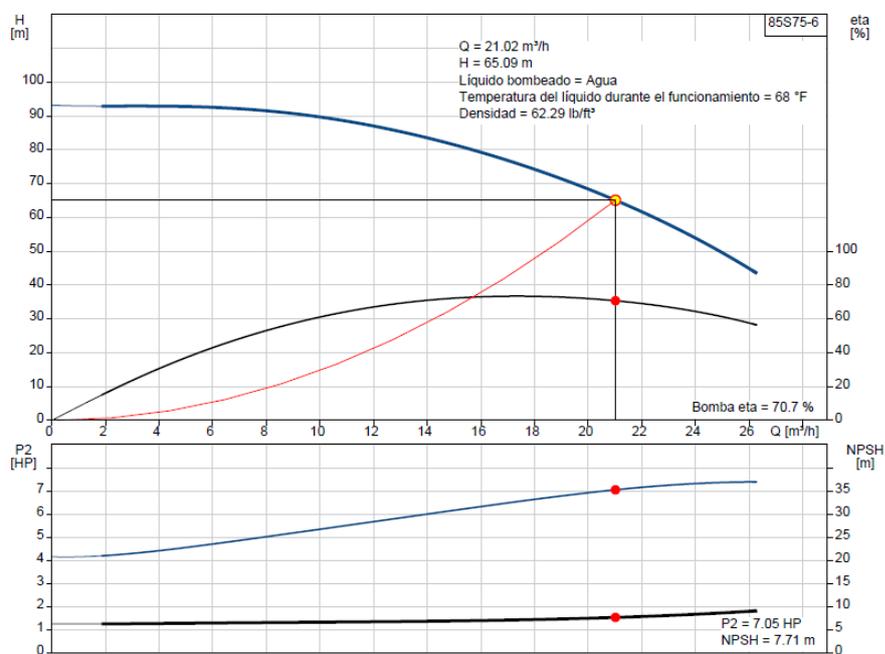


Figura 4.5: Curva característica de la bomba de 7.5 [hp]

#### 4. CÁLCULO Y SELECCIÓN DEL SISTEMA DE BOMBEO

---

En ambos equipos el diámetro del motor es menor que el diámetro del agujero descubierto de  $8\frac{1}{2}$  [in], por lo que es factible su instalación a la profundidad de bombeo propuesta. De la misma manera, el material del impulsor es de acero inoxidable por lo que el proveedor asegura que los equipos son aptos para la temperatura del fluido geotérmico.

Se comparó los cálculos obtenidos de la tabla 4.11 con las propiedades de las bombas de la tabla 4.13 buscando los intervalos de nivel dinámico en los que se cumplan las siguientes condiciones:

- El factor de seguridad  $f_{seg}$  para evitar cavitación en la bomba debe ser mayor a 1.5.
- La carga  $h_B$  del sistema debe ser igual o menor a la carga a condiciones operativas de la bomba, ya que si se supera este valor el equipo no será capaz de mover el fluido hasta la superficie.
- la potencia hidráulica calculada debe ser igual o menor a el producto de la potencia y eficiencia mecánica de la bomba a las condiciones operativas.

##### 4.4.1. Bomba sumergible 10 [hp]

Usando la ecuación 2.13, el  $CSPN_D$ :

$$f_{seg} \geq 1.5$$

$$CSPN_D \geq 7.93[m] * 1.5$$

$$CSPN_D \geq 11.895[m]$$

La  $h_B$ :

$$h_B \leq 71.66[m]$$

Usando la ecuación 2.10, la  $P_h$ :

$$P_h \leq 8.39[hp] * 0.69$$

$$P_h \leq 5.78[hp]$$

El intervalo de nivel dinámico en el que se cumplen las 3 condiciones anteriores va desde los 3 [m] hasta los 50 [m]. Esto quiere decir que esta bomba funcionará correctamente desde el escenario ideal donde el pozo no se abate y el nivel dinámico es el mismo que el nivel estático a 3 [m] hasta el escenario crítico donde el pozo se abate 47 [m], es decir que llega a un nivel dinámico de 50 [m].

Sin embargo el intervalo de nivel dinámico recomendado para esta bomba va desde los 28 [m] hasta los 50 [m], ya que por arriba de los 28 [m] se tiene una carga de bombeo en el sistema inferior a la carga de la bomba requerida al máximo gasto, según la figura 4.4, teniendo un sobregasto que puede causar futuros problemas al motor de la bomba. Este problema se puede solucionar estrangulando el flujo con una válvula para aumentar la carga de la bomba y disminuir el gasto al caudal requerido por la planta DMG.

#### 4.4.2. Bomba sumergible 7.5 [hp]

Usando la ecuación 2.13, el  $CSPN_D$ :

$$f_{seg} \geq 1.5$$

$$CSPN_D \geq 7.71[m] * 1.5$$

$$CSPN_D \geq 11.565[m]$$

La  $h_B$ :

$$h_B \leq 65.09[m]$$

Usando la ecuación 2.10, la  $P_h$ :

$$P_h \leq 7.05[hp] * 0.707$$

$$P_h \leq 4.98[hp]$$

El intervalo de nivel dinámico en el que se cumplen las 3 condiciones anteriores va desde los 3 [m] hasta los 43 [m]. Esto quiere decir que esta bomba funcionará correctamente desde el escenario ideal donde el pozo no se abate y el nivel dinámico es el mismo que el nivel estático a 3 [m] hasta el escenario crítico donde el pozo se abate 40 [m], es decir que llega a un nivel dinámico de 43 [m].

#### 4. CÁLCULO Y SELECCIÓN DEL SISTEMA DE BOMBEO

---

Sin embargo el rango de nivel dinámico recomendado para esta bomba va desde los 22 [m] hasta los 43 [m], ya que por arriba de los 22 [m] se tiene una carga de bombeo en el sistema inferior a la carga de la bomba requerida al máximo gasto, según la figura 4.5, teniendo un sobregasto que puede causar futuros problemas al motor de la bomba. Este problema se puede solucionar estrangulando el flujo con una válvula para aumentar la carga de la bomba y disminuir el gasto al caudal requerido por la planta DMG.

## Conclusiones

---

Dentro del plan "desarrollo tecnológico para el aprovechamiento de la geotermia de baja entalpía", el grupo iiDEA del Instituto de Ingeniería tiene una variedad de proyectos para utilizar la energía geotérmica de manera directa, siendo pioneros en su uso industrial, yendo en contra de la creencia común de que los únicos recursos geotérmicos rentables son los de alta entalpía para producción de energía eléctrica.

Entre los diferentes proyectos se tienen deshidratadores de alimentos, bombas de calor, secadores de café, producción de cerveza artesanal, balneología, ciclo binario y desaladoras de agua de mar, siendo este último proyecto en el que se basa la presente tesis.

Para que este tipo de proyectos tomen relevancia deben satisfacer una necesidad o demanda de forma rentable, así como comprobar su factibilidad técnica, siendo este último punto el objetivo principal de esta tesis.

Del capítulo 1 podemos concluir que México es un país con bastos recursos energéticos renovables, que sumado al aumento de necesidades básicas en todo el país abren una ventana de oportunidades para este tipo de proyectos.

En el caso de estudio de esta tesis, la necesidad básica que se desea cubrir es la escasez de agua en la zona turística de los Cabos Baja California Sur, donde se ha visto un atraso de crecimiento debido a dicho problema. Al estar en una zona costera, una de las soluciones probadas ampliamente es la desalación de agua de mar, siendo la ósmosis inversa el método de desalación más utilizado. Sin embargo este tipo de procesos requieren de un alto consumo de energía eléctrica que no los hacen factibles económicamente en todas las situaciones. El uso de energías renovables en los procesos de desalación proporcionan una alternativa eficiente, siendo la energía geotérmica ideal para la implementación de una planta de desalación con un proceso térmico similar al MED, ya que la península de Baja California presenta un alto potencial geotérmico.

El capítulo 2 hace especial énfasis a la importancia, funcionamiento y ecuaciones necesarias para el cálculo y selección de un sistema de bombeo. Muchas veces se toma como secundario o irrelevante este sistema, pero hacer un correcto cálculo y selección del equipo de bombeo nos asegura una buena eficiencia de bombeo y consumo energético.

## 5. CONCLUSIONES

---

co, y en el caso especial de un proyecto geotérmico nos permite tener menores pérdidas de calor a través del arreglo de tuberías. De los distintos tipos de bombas se recomiendan las bombas de eje vertical o las bombas sumergibles para pozos. La selección entre un tipo u otro depende de las condiciones operativas requeridas, la verticalidad y profundidad del pozo, así como de condiciones externas del entorno.

El conocimiento y estudio de la zona, el pozo y el fluido geotérmico son tareas esenciales para comprender con que información contamos y que otra información es necesaria investigar, calcular u obtener mediante pruebas. El capítulo 3 tiene como finalidad reunir toda la información existente del proceso de perforación, como la geometría del pozo, las propiedades de las tuberías, las propiedades del fluido, tipo de formación, el nivel estático del pozo y la ubicación del pozo.

Esta información se encuentra incompleta, y por si misma no sirve para la selección de un equipo de bombeo ya que no se le hizo una prueba de aforo al pozo y se desconoce el nivel dinámico a distintos caudales, por lo que escoger un nivel de bombeo depende del conocimiento de la zona y el pozo.

Con el fin de solucionar el problema de la incertidumbre del nivel dinámico, en el capítulo 4 se propuso un nivel de bombeo profundo y se realizaron los cálculos hidráulicos necesarios para todos los posibles niveles dinámicos entre el nivel estático a 3 [m] y el nivel de bombeo propuesto a 90 [m], haciendo un especial énfasis en los cálculos de la Carga de Succión Positiva Neta para evitar cavitación en el equipo de bombeo, ya que el fluido a transportar se encuentra muy cerca de la temperatura de ebullición.

Este método resultó en una amplia base de datos que considera desde el escenario ideal, donde el pozo no se abate con el caudal requerido y el nivel dinámico es igual al nivel estático, hasta el escenario crítico donde el nivel dinámico cae por debajo del nivel de bombeo. Esta base de datos fue comparada con los requisitos de una bomba de 10 [hp] y otra de 7.5 [hp], mostrando que ambos equipos pueden operar en amplios rangos de niveles dinámicos para este pozo. Sin embargo este método tiene varias consideraciones antes de seleccionar un equipo de bombeo:

- El nivel de bombeo propuesto se encuentra en una zona de agujero descubierto, por lo que es necesario verificar que el pozo no se ha colapsado. En dicho caso se debe proponer un nuevo nivel de bombeo dentro de la tubería de revestimiento y realizar de nuevo el análisis.
- Se debe considerar el posible uso de accesorios extra para el estrangulamiento del flujo en caso de que la bomba presente sobregasto.
- La diferencia de costos entre la bomba de 10 [hp] y la de 7.5 [hp] es considerable, y su rango operativo solo cambia en 7 [m], por lo que es recomendable considerar equipos de menor potencia si se busca economizar, sin embargo no es factible buscar equipos de mayor potencia por su alto aumento de costo y bajo aumento de rango operativo.

- 
- Al desconocer el nivel dinámico se debe priorizar la funcionalidad del equipo sobre la eficiencia.

Aunque el trabajo realizado en esta tesis proporciona un amplio panorama útil para la selección del equipo de bombeo, la mayor recomendación es conseguir una bomba con el fin de hacer una prueba de aforo confiable, descrita en el capítulo 4, para caracterizar el comportamiento del pozo. Con esta prueba se genera la curva de aforo del pozo y se puede conocer el nivel dinámico al gasto requerido por la planta DMG, lo que facilita la selección de un equipo de bombeo óptimo para el proceso.

La adquisición de una bomba para la prueba de aforo representa una fuerte inversión, sin embargo se puede utilizar en futuros proyectos donde el recurso geotérmico no se encuentre en superficie, y abre una puerta de oportunidades a proyectos como la reutilización de pozos petroleros abandonados como fuente de calor de baja entalpía.

# Bibliografía

---

- [1] Abdelkareem, M. A., El Haj Assad, M., Sayed, E. T., and Soudan, B. (2018). Recent progress in the use of renewable energy sources to power water desalination plants. *Desalination*, 435(November 2017):97–113. 5
- [2] Agudelo C., R. M. (2005). El agua, recurso estratégico del siglo XXI. *El agua, recurso estratégico del siglo XXI*, 23(1):91–102.
- [3] Alkaisi, A., Mossad, R., and Sharifian-Barforoush, A. (2017). A Review of the Water Desalination Systems Integrated with Renewable Energy. *Energy Procedia*, 110(December 2016):268–274.
- [4] Anaya-Durand, A. I., Cauich-Segovia, G. I., Funabazama-Bárcenas, O., and Gracia-Medrano-Bravo, V. A. (2014). Evaluación de ecuaciones de factor de fricción explícito para tuberías. *Educacion Quimica*, 25(2):128–134.
- [5] Association, I. D. (2008). Desalination yearbook 2007-2008. *IDA*, page 208.
- [6] Cafaggi Félix, A. A., Rodal Canales, E. A., and Sánchez Huerta, A. (2021). *Sistemas de Bombeo*. Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, primera ed edition.
- [7] Chiasson, A. D. (2016). *Geothermal Heat Pump and Heat Engine System*. ASME PRESS.
- [8] CONAGUA (2018). Estadísticas del agua en México. *Comisión Nacional del Agua*, page 303.
- [9] Correa, F. (2008). El impacto social y económico de la desalación de agua de mar. *Desalación de agua con energías renovables*, pages 103–123.
- [10] Cortés A, F. (2000). Desalinización del agua. *Ingeniería Hidráulica en México*, XV:27–49.
- [11] Dickson, M. H. and Fanelli, M. (2003). *Geothermal energy. Utilization and technology*. UNESCO PUBLISHING.

- [12] Escalada, c. d. i. O. (2020). CÁLCULO, SELECCIÓN E INSTALACIÓN, DE BOMBAS DE POZO PROFUNDO, 21 de Agosto de 2020.
- [13] Gomez Arellano, V., Iglesias Rodriguez, E., and García Gutiérrez, A. (2008). La energía geotérmica: una opción tecnológica y económicamente madura. *Boletín IIE*, pages 102–114.
- [14] González, J. (2013). Cálculo para evitar la cavitación en un sistema de bombeo mediante el uso de  $n_{psa}$  y  $n_{psr}$ .
- [15] iiDEA UNAM (2018). Propuesta de proyecto estratégico - Modalidad “A”. Technical report, UNAM.
- [16] IRENA (2017). Geothermal Power: Technology Brief. *POWER ENGINEERING Advances and Challenges*, pages 179–215.
- [17] Llopis Trillo, G. and Rodrigo Angulo, V. (2008). *Guía de la Energía Geotérmica*. Dirección General de Industria, Energía y Minas.
- [18] Morris, H. M. (1967). Hydraulics of energy, dissipation in steep, rough channels. *Hydraulics*.
- [19] Rodríguez Zárate, E. F. (2013). *Diseño Y Análisis Térmico Hidráulico De Una Desaladora Modular Geotérmica De Baja Entalpia*. PhD thesis, Universidad Nacional Autónoma de México.
- [20] Sotelo, G. (1997). Hidráulica general volumen 1 fundamentos. *Editorial LIMUSA. Impreso en México*, pages 217–296.
- [21] Subdirección General de Agua Potable Drenaje y Saneamiento (2015). *Rehabilitación de pozos*. Comisión Nacional del Agua CONAGUA.
- [22] Torres Rodríguez , M. A. (2018). Reporte del análisis e interpretación de los registros de presión- temperatura realizados en los pozos exploratorios PES01A Y PES01B. Technical report, Diamante Cabo San Lucas.