



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES**  
**ZARAGOZA**

---

---

***“Propuesta de sistema de vacío para la Desaladora  
Modular Geotérmica”***

TESIS PARA OBTENER EL TITULO DE  
**INGENIERO QUÍMICO**

PRESENTA:

**Zamora Téllez Laura Patricia**

DIRECTOR DE TESIS

**Dr. Héctor Miguel Aviña Jiménez**

Ciudad de México, 2016





Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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



## Agradecimientos

A mi asesor el Dr. Héctor Miguel Aviña Jiménez por haberme permitido trabajar en el grupo IIDEA durante mi servicio social y la tesis, por el apoyo y la confianza brindados.

A Fabián Rodríguez y Daniel de la Rosa por apoyarme durante todo este tiempo en la elaboración de este trabajo, compartiendo su conocimiento y guiándome.

A cada uno de l@s chic@s del grupo IIDEA por los momentos compartidos y por hacerme sentir parte del grupo.

A cada uno de los jurados por haberse tomado el tiempo de revisar éste trabajo y por la ayuda para mejorarlo.

A mis profesores por todo lo enseñado durante mi estancia en la FES Zaragoza.

Al Dr. Edtson Emilio Herrera Valencia quiero agradecerle especialmente por su apoyo y por tomarse un poco de su tiempo para ayudarme a pesar de no haber sido su alumna.

A mis amigos Raymundo Franco y Carlos Hernández por todos los momentos compartidos porque sin ustedes la universidad no hubiera sido lo mismo, por siempre estar ahí y sobre todo por soportarme.



## Dedicatorias

A mis papás Olivia Téllez y Alejandro Zamora, por haberme dado todo lo necesario para lograr cumplir mi meta, porque siempre estuvieron ahí conmigo apoyándome y dando todo de ustedes para darnos lo mejor a mi hermana y a mí, por la paciencia, comprensión y amor que siempre nos han tenido, porque siempre creyeron que lo lograría.

A mi hermana Yalinka por siempre ser mi cómplice de travesuras, porque a pesar de ser tan diferentes siempre nos hemos mantenido unidas, y gracias por haberme dado el mejor regalo, a mi hermoso ahijado.

A mi gran familia porque siempre creyeron en mí, en que lo lograría, siempre estuvieron al pendiente de cada paso de este largo proceso y siempre me apoyaron.

A mi novio Jonathan Pérez por siempre estar ahí cuando lo necesito, porque siempre me das tu apoyo incondicional, gracias por tu amor por todos los momentos que me has regalado, pero sobre todo por ser mi mejor amigo.

## Resumen

A lo largo de este trabajo, se realizó una investigación sobre el funcionamiento, análisis, usos de la geotermia y desalación de agua de mar, así como también las capacidades instaladas nacionales e internacionales. La definición de vacío y una breve historia fue fundamental para la realización de este trabajo, así como también la definición de muchos de los equipos que producen vacío.

Después de definir las condiciones de operación se realizó el balance de masa y energía de la DMG para obtener las características de las corrientes que serán enviadas al sistema de vacío. El balance de masa y energía realizado en la DMG fue comparado con el realizado en el simulador HYSYS y con el que se contaba en IIDEA.

A partir de las presiones en cada cámara y de las características de las corrientes obtenidas del balance de masa y energía de la DMG se eligieron tres equipos que podrían cumplir con esta condición los cuales son: eyector de aire, bomba de paletas y un sistema compuesto (eyector y bomba de anillo líquido), además se propusieron las conexiones que habría entre la DMG y los equipos elegidos. Para definir completas las propuestas se dimensionaron los equipos principales (cálculos en los anexos), los cuales también fueron simulados en HYSYS para comprobar los cálculos previos. Para tomar la decisión sobre qué sistema sería el más adecuado se elaboró una tabla comparativa mostrando una comparación técnica y económica de los tres sistemas propuestos.

# Índice

	<b>Pág.</b>
Agradecimientos .....	i
Dedicatorias.....	ii
Resumen.....	iii
Índice.....	iv
Índice de figuras.....	vii
Índice de tablas.....	ix
Nomenclatura .....	x
Objetivos .....	xi
Objetivo General .....	xi
Objetivo Particular .....	xi
Hipótesis.....	xi
Justificación.....	xii
Introducción .....	1
CAPITULO 1 Estado del arte sobre Geotermia y Desalación .....	2
1.1 Geotermia.....	2
1.1.1 Clasificación de sistemas y recursos geotérmicos.....	3
1.1.2. Usos y aplicaciones .....	5
1.1.3. Capacidad internacional instalada de recurso geotérmico.....	7
1.1.4 Capacidad nacional instalada del recurso geotérmico.....	8
1.2. Desalación de agua de mar .....	9
1.2.1 Sistemas térmicos.....	10
1.2.2 Sistemas mecánicos.....	10
1.2.3 Sistemas químicos.....	11
1.2.1. Desaladoras: tipos y descripción .....	11
1.2.1.1 Desaladora de múltiple efecto MED .....	12
1.2.1.2 Desaladora de evaporación súbita flash MSF .....	13
1.2.1.3 Desaladora Modular Geotérmica DMG .....	13
1.2.2. Capacidad internacional instalada de desalación de agua de mar .....	14
1.2.3 Capacidad nacional instalada de desalación de agua de mar .....	16
CAPÍTULO 2 Vacío .....	19

2.1. Definición de vacío .....	19
2.2. Clasificación de sistemas para generación de vacío.....	23
2.2.1. Equipos mecánicos para generación de vacío .....	24
2.2.1.1 Bomba de paletas .....	24
2.2.1.2 Bomba de anillo líquido .....	25
2.2.1.3 Bomba turbomolecular.....	26
2.2.1.4 Bomba Scroll.....	26
2.2.1.5 Bombas roots.....	27
2.2.2. Equipos térmicos para generación de vacío. ....	28
2.2.2.1 Bomba criogénica.....	28
2.2.2.2 Bomba de difusión .....	29
2.2.2.3 Eyector .....	29
2.2.3. Equipos químicos y de membrana para generación de vacío.....	30
2.2.3.1 Bomba de membrana.....	30
2.2.3.2 Bomba iónica.....	31
2.3. Aplicaciones del vacío .....	32
CAPÍTULO 3 Propuesta de un sistema de vacío para la unidad Desaladora Modular Geotérmica. 34	
3.1. Definición de requerimientos técnicos para el sistema. ....	34
3.2. Definición de propuestas.....	35
3.2.1. Justificación del sistema de vacío. ....	36
3.2.2. Descripción de propuestas.....	38
3.2.3. Propuesta de configuración física.....	39
CAPÍTULO 4 Simulación de la Desaladora Modular Geotérmica y de las propuestas de sistemas de vacío .....	42
4.1 Simulación.....	42
4.2 Simulación de DMG en ASPEN PLUS .....	47
4.3 Simulación de propuestas de vacío en HYSYS.....	52
4.3.1 Simulación de la primer propuesta.....	53
4.3.2 Simulación de la segunda propuesta .....	55
4.3.3 Simulación de la tercer propuesta .....	57
CAPÍTULO 5 Resultados.....	60
5.1 Análisis DMG .....	60
5.2 Comparación técnica y económica de las propuestas .....	61



5.3 Elección de propuesta.....	63
5.3.1 Descripción detallada de la propuesta elegida.....	63
6 Conclusiones .....	66
7 Trabajo a futuro.....	67
8 Bibliografía .....	68
9 Anexos.....	70

## Índice de figuras

	<b>Pág.</b>
Figura 1.1 Dinámica de la tierra [IGEO, 2004].....	2
Figura 1.2 Zonas geológicamente inestables de la corteza terrestre [IGEO, 2004] .....	3
Figura 1.3 Temperatura aproximada de los fluidos geotérmicos para usos directos [Lindal, 1973]... 6	
Figura 1.4 Diagrama general de desalación. [Elaboración propia] .....	10
Figura 1.5 Diagrama general de un proceso MED [Salmerón, 2012] .....	12
Figura 1.6 Diagrama general de un proceso MSF [Salmerón, 2012].....	13
Figura 1.7 Diagrama general de un proceso DMG [IIDEA, 2012].....	14
Figura 1.8 Capacidad instalada de desalación en el mundo [IDA, DesalData 2014].....	15
Figura 1.9 Generación de plantas desaladoras por tecnología [IDA, DesalData 2014] .....	15
Figura 2.10 Tipos de Presión [MetAs, 2002] .....	21
Figura 2.11 Tipos de Vacío [MetAs, 2002] .....	21
Figura 2.12 Equipos para rangos de vacío [Talavera y Farías, 2008] .....	23
Figura 2.13 Diagrama de una bomba de paletas [Tecnovac, 2012] .....	24
Figura 2.14 Funcionamiento de una bomba de paletas [Talavera y Farías, 2008].....	25
Figura 2.15 Diagrama de una bomba de anillo líquido [Tecnovac, 2012].....	25
Figura 2.16 Diagrama de una bomba turbo-molecular [Tecnovac, 2012] .....	26
Figura 2.17 Diagrama de una bomba Scroll [Tecnovac, 2012].....	27
Figura 2.18 Diagrama de una bomba Roots [Tecnovac, 2012].....	27
Figura 2.19 Diagrama de una bomba criogénica [Tecnovac, 2012].....	28
Figura 2.20 Diagrama de una bomba de difusión [Talavera y Farías, 2008] .....	29
Figura 2.21 Diagrama de un eyector [Imnateinsa, 2001]. .....	30
Figura 2.22 Diagrama de una bomba de membrana [Tecnovac, 2012].....	31
Figura 2.23 Diagrama de una bomba iónica [Tecnovac, 2012] .....	31
Figura 3.24 Diagrama de la propuesta 1 [Elaboración propia] .....	39
Figura 3.25 Diagrama de segunda propuesta [Elaboración propia] .....	40
Figura 3.26 Diagrama de tercer propuesta [Elaboración propia] .....	41
Figura 4.27 a) Logotipo de CHEMCAD, b) Hoja de trabajo del simulador .....	43
Figura 4.28 a) Logotipo de PRO II, b) Hoja de trabajo del simulador.....	44
Figura 4.29 a) Logotipo de ASPEN PLUS, b) Hoja de trabajo del simulador.....	45
Figura 4.30 a) Logotipo de HYSYS, b) Hoja de trabajo del simulador .....	46
Figura 4.31 Ventana de selección de paquetes de datos.....	47
Figura 4.32 Selección de elementos químicos y reacciones participantes en el proceso. a) Se seleccionan los elementos químicos que participan en las reacciones, b) Selección de las reacciones que se llevan a cabo.....	48
Figura 4.33 Separación de la DMG en sus operaciones unitarias [Elaboración propia] .....	48
Figura 4.34 DFP de la DMG en ASPEN PLUS [Elaboración propia].....	51
Figura 4.35 Resultados de los gases incondensables [ASPEN PLUS] .....	53
Figura 4.36 Diagrama de la primera propuesta [HYSYS] .....	53
Figura 4.37 Resultados de las corrientes de la primera propuesta [HYSYS].....	54

Figura 4.38 Resultados del compresor [HYSYS] .....	54
Figura 4.39 Datos del eyector [HYSYS].....	55
Figura 4.40 Diagrama de la segunda propuesta [HYSYS].....	56
Figura 4.41 Resultados de las corrientes de la segunda propuesta [HYSYS].....	56
Figura 4.42 Resultados de la bomba de vacío [HYSYS] .....	57
Figura 4.43 Diagrama de la tercera propuesta [HYSYS].....	57
Figura 4.44 Resultados de las corrientes de la tercera propuesta [HYSYS] .....	58
Figura 4.45 Resultados de la bomba de vacío de la tercera propuesta [HYSYS] .....	59
Figura 5.46 Comportamiento de la temperatura y el flujo de vapor en la primera cámara. a) Temperatura (verde) b) Flujo másico de vapor (azul) [Elaboración propia].....	60
Figura 5.47 Diagrama de fases del agua [Elaboración propia] .....	61
Figura 5.48 Diagrama del sistema de vacío propuesto con la DMG [Elaboración propia].....	65

## Índice de tablas

	<b>Pág.</b>
Tabla 1.1 Clasificación de recursos geotérmicos de acuerdo a su temperatura (°C) [IGA, 2014].	5
Tabla 1.2 Capacidad geotérmica instalada en el mundo [IGA, 2015].	8
Tabla 1.3 Tecnologías de desalación [Zúñiga, 2004].	11
Tabla 2.1 Resumen de tecnologías de vacío [Talavera y Farías, 2008].	19
Tabla 2.2 Composición del aire [Himmelblau, 2001].	20
Tabla 2.3 Unidades de conversión [Speria, 2008].	22
Tabla 2.4 Aplicaciones del vacío en sus diferentes rangos. [Diferentes fuentes]	32
Tabla 3.1 Variables fijas y variables base [Elaboración propia]	34
Tabla 3.2 Características de diseño de los equipos de la DMG [IIDEA]	35
Tabla 3.3 Rangos de aplicación de los distintos tipos de bomba [Ovedo, Lesino, 2003]	35
Tabla 3.4 Características ambientales de Baja California [tiempoytemperatura.es]	36
Tabla 3.5 Requerimientos de caramas de DMG [IIDEA]	36
Tabla 4.1 Lista de equipos, claves y descripciones para el DFP en ASPEN PLUS [Elaboración propia]	49
Tabla 4.2 Lista de líneas [Elaboración propia]	50
Tabla 4.3 Lista de equipos de la primera propuesta en HYSYS [Elaboración propia]	54
Tabla 4.4 Lista de equipos de la segunda propuesta en HYSYS [Elaboración propia]	56
Tabla 4.5 Lista de equipos de la tercera propuesta en HYSYS [Elaboración propia]	58
Tabla 5.1 Costo de equipos de la primera propuesta [Diferentes fuentes]	62
Tabla 5.2 Costo de equipos de la segunda propuesta [Diferentes fuentes]	62
Tabla 5.3 Costo de equipos de la tercera propuesta [Diferentes fuentes]	62
Tabla 5.4 Comparativa técnica y económica de las propuestas [Elaboración propia]	63

## Nomenclatura

### General

<b>C</b>	Cámara de la Desaladora Modular Geotérmica
<b>CFE</b>	Comisión Federal de Electricidad
<b>DMG</b>	Desaladora Modular Geotérmica.
<b>FC</b>	Factor de Concentración
<b>HV</b>	Alto Vacío (high vacuum)
<b>IDA</b>	International Development Association
<b>IIDEA</b>	Instituto de Ingeniería, Desalación y Energías Alternas.
<b>LV</b>	Bajo Vacío (low vacuum)
<b>MED</b>	Destilación Múltiple Efecto
<b>MSF</b>	Destilación por Evaporación Súbita Flash
<b>MV</b>	Medio Vacío (medium vacuum)
<b>MVC</b>	Compresión Mecánica de Vapor
<b>P</b>	Presión
<b>ppm</b>	Partes por millón
<b>T</b>	Temperatura
<b>UHV</b>	Ultra Alto Vacío (ultra-high vacuum)

### ASPEN

<b>B</b>	Bomba
<b>E</b>	Intercambiador de calor
<b>M</b>	Mezclador
<b>SP</b>	Separador
<b>T</b>	Tanque flash
<b>V</b>	Válvula

### HYSYS

<b>K</b>	Compresor
<b>MIX</b>	Mesclador
<b>OP</b>	Eyector
<b>P</b>	Bomba
<b>V</b>	Tanque separador

### Letras griegas

$\eta$	Eficiencia
$\Delta$	Diferencial

## Objetivos

### Objetivo General

Proponer un sistema de vacío para la Desaladora Modular Geotérmica de agua de mar (DMG) que se encuentra en investigación en el Instituto de Ingeniería Desalación y Energías Alternas de la UNAM.

### Objetivo Particular

Realizar una investigación sobre geotermia, desalación y vacío, incluyendo fundamentos, usos, equipos y perspectivas nacionales e internacionales.

Evaluar técnico-teórico, y económicamente los sistemas de vacío propuestos en este trabajo y elegir el mejor sistema de vacío para el sistema DMG.

## Hipótesis

Después de la investigación y las simulaciones a realizar, se obtendrá como resultado que el sistema óptimo para la DMG, es aquel que se adapte mejor técnicamente y que no tenga un costo muy elevado de instalación y operación.

## Justificación

Este trabajo tiene un área de oportunidad debido a que las desaladoras de agua como son las de Compresión Mecánica de Vapor, Destilación por Evaporación Súbita Flash y Destilación Múltiple Efecto funcionan en un medio de baja presión, es decir, a vacío. Los sistemas de vacío de las desaladoras de agua desarrolladas hasta el momento funcionan mediante eyectores que son los equipos más económicos en cuanto a mantenimiento y fácil manejo; estos funcionan mediante vapor. Pero ¿Dónde obtienen este vapor las plantas? Generalmente las desaladoras de agua se encuentran ubicadas muy cerca de alguna planta industrial que tenga como “desecho” grandes cantidades de vapor o como servicio auxiliar.

La Desaladora Modular Geotérmica es un proyecto de investigación que se encuentra en desarrollo por el Instituto de Ingeniería Desalación y Energías Alternas (IIDEA), el objetivo de la DMG es proporcionar agua potable en lugares muy alejados de las grandes ciudades utilizando geotermia como fuente de calentamiento. IIDEA cuenta con un prototipo de pruebas el cual se encuentra ubicado en Mexicali Baja California, el cual está en un lugar alejado de alguna planta industrial o algún suministro que pueda proporcionarle vapor para usar eyectores como sistema de vacío, como lo haría alguna de las desaladoras mencionadas anteriormente. El hecho de generar vapor no es económicamente factible debido a que se necesitarían muchos equipos para esto como son: la caldera y los equipos para generar agua con condiciones específicas para esta, es por ello que se busca un sistema de vacío que sea viable para la DMG.

## Introducción

En el mundo hay más de 7 mil millones de personas lo que provoca un incremento continuo en la demanda de alimento y agua. El agua dulce que podemos utilizar se encuentra en acuíferos, lagos y ríos principalmente, esto es 0.007% del total del agua en el planeta. El consumo de agua dulce es más rápido que los procesos de purificación, esto provoca escases de agua además de que existen lugares a los que no llega el agua dulce, esto ha provocado que se busquen nuevas tecnologías para la obtención de agua dulce. Nuestro planeta cuenta con 96.5% de agua salada distribuida en océanos y lagos salados, los cuales pueden ser fuente de obtención de agua dulce.

La capacidad de producir agua potable es el foco principal de la investigación de desalinización de agua de mar. Existen numerosos métodos para desalinizar el agua, incluida la ósmosis inversa, Destilación por Evaporación Súbita Flash y Destilación Múltiple Etapa, pero sus costos son muy elevados para llevar este tipo de tecnologías para los países que más carecen del recurso hídrico, por lo que se necesita de una tecnología que tenga un costo menor, como es el caso del uso de energías limpias como son: solar, eólica y geotérmica. Por otro lado, está el hecho de que muchas zonas con escasez de agua desalinizada, poseen un buen potencial de alguna de dichas energías, especialmente de la eólica o de la solar. Así, existen muchas localizaciones en las que el viento es un factor climatológico frecuente, como es el caso de un elevado número de islas mediterráneas

Este trabajo fue desarrollado en el Instituto de Ingeniería de la UNAM, el grupo IIDEA (Instituto de Ingeniería, Desalación y Energías Alternas) tiene como objetivo el contribuir a solucionar los problemas de escasez y contaminación de agua, potabilizar agua salobre y de mar, generación de energía eléctrica y la preservación de alimentos por medio de la deshidratación, esto de una manera amigable y responsable con el medio ambiente mediante el uso de energías alternas, como lo es la geotermia. El objetivo de IIDEA es el uso de la geotermia en Baja California, debido a que el lugar cuenta con enormes recursos geotérmicos en tierra y bajo el mar. Por ello, utilizar energía geotérmica para alimentar plantas desalinizadoras de agua de mar es una gran oportunidad.

# CAPITULO 1 Estado del arte sobre Geotermia y Desalación

En este capítulo se da una breve descripción sobre los conceptos de geotermia y desalación; así como la explicación de algunas de sus aplicaciones y cómo se han desarrollado a nivel nacional e internacional.

## 1.1 Geotermia

La palabra geotermia tiene raíz griega en dos palabras, “GEO” que significa tierra y “THERMOS” que significa calor; por lo que podemos entender a la geotermia como el calor almacenado en el interior de la tierra. Dicho calor se transmite desde del subsuelo y asciende a través de las capas de la tierra hasta la superficie de ésta, lentamente.

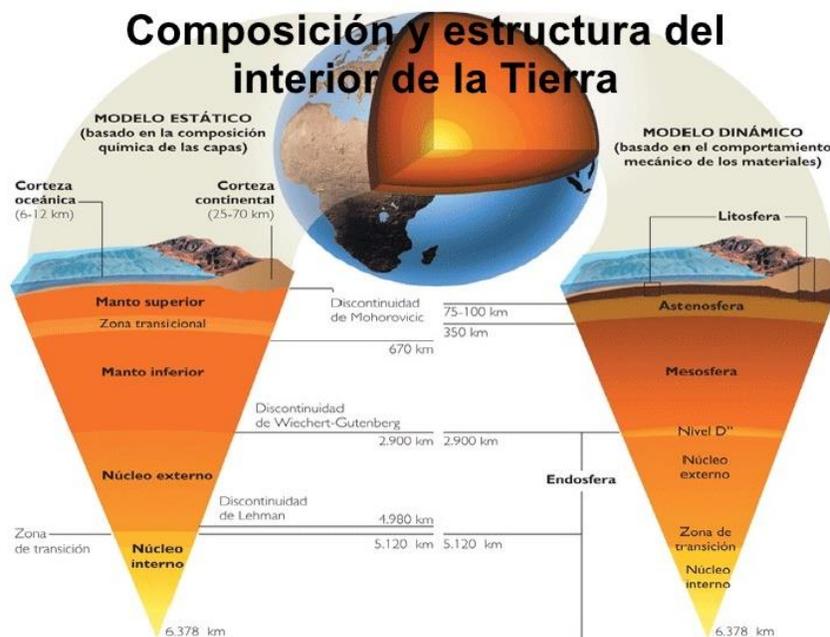


Figura 1.1 Dinámica de la tierra [IGEO, 2004]

La corteza terrestre está formada por diferentes estructuras llamadas “placas tectónicas” (figura 1.1), las cuales llegan a moverse unos centímetros por año. El origen de sistemas geotérmicos se relaciona con el movimiento de placas tectónicas y oceánicas, que al separarse o chocar constituyen regiones geotérmicamente activas. En las zonas en donde interactúan dichas placas, es en donde se han localizado los más importantes campos geotérmicos.

La figura 1.2 muestra donde se encuentran localizadas las placas tectónicas, sus límites, su desplazamiento y donde colisionan.



Figura 1.2 Zonas geológicamente inestables de la corteza terrestre [IGEO, 2004]

### 1.1.1 Clasificación de sistemas y recursos geotérmicos

Las condiciones que son requeridas para formar sistemas geotérmicos, en general, son proporcionadas por una masa de magma de alta temperatura, situada en la corteza terrestre; ya sea como una intrusión en proceso de enfriamiento o bien, como una cámara magmática que ha alimentado a un volcán. Este calor puede almacenarse en la roca o en acuíferos localizados a pocos kilómetros de profundidad, dando origen a los sistemas geotérmicos. Estos en algunas ocasiones se manifiestan en la superficie en forma de volcanes de lodo, fumarolas, géiseres, manantiales hidrotermales, suelos calientes, etc.

Se han identificado cinco tipos de sistemas geotérmicos: hidrotermales, geopresurizados, roca seca caliente, magmáticos y marinos (Gerencia de Geotermia IIE, 2000).

#### a) Hidrotermales

Un yacimiento geotérmico hidrotermal se compone de una fuente de calor, un acuífero y la llamada capa sello; conocidos como reservorios geotérmicos o yacimientos geotérmicos, y

son sistemas de agua muy caliente y/o vapor. Si las condiciones geológicas de la zona lo permiten se forma un acuífero de agua caliente o vapor a alta presión.

Se localizan preferentemente en los límites entre las diversas placas tectónicas en las que está fragmentada la capa sólida más externa del planeta. Particularmente en los límites de tipo convergente, donde chocan entre sí dos placas y una se introduce debajo de la otra, es muy frecuente la formación de magmas que eventualmente pueden actuar como fuentes de calor para dar lugar a sistemas geotérmicos.

### **b) Geopresurizados**

Son iguales a los hidrotermales, pero estos se encuentran a mayor profundidad, por lo tanto, el fluido contenido se encuentra a mayores condiciones de presión y temperatura. En éste se encuentran vapor, agua y metano.

### **c) Roca seca caliente**

Este sistema está formado solo por rocas; las cuales, son impermeables, pero se encuentran a muy altas temperaturas. Por lo cual es necesario inducir una forma de transferir el calor.

### **d) Volcánico o magmático**

Son sistemas de roca fundida existentes en aparatos volcánicos activos o a gran profundidad en zonas de debilidad cortical.

### **e) Marinos**

En el lecho marino hay grietas submarinas o cordilleras volcánicas submarinas en cuya cima está surgiendo continuamente lava. Al fluir la lava en el lecho marino, este se calienta y se emiten fuertes corrientes verticales de agua muy caliente asociada a gases y minerales.

Así mismo estos recursos se clasifican de la siguiente manera:

### **Clasificación de los recursos geotérmicos**

Para los sistemas hidrotermales los recursos existentes en un sistema geotérmico se pueden clasificar de la siguiente manera:

### Por temperatura:

La tabla 1.1 muestra como algunos autores clasifican los recursos geotérmicos de acuerdo a su temperatura y la entalpía.

**Tabla 1.1 Clasificación de recursos geotérmicos de acuerdo a su temperatura (°C) [IGA, 2014].**

	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
<b>Baja entalpía</b>	< 90	< 125	< 100	≤ 150	≤ 190
<b>Media entalpía</b>	90–150	125-225	100-200	----	---
<b>Alta entalpía</b>	> 150	> 225	> 200	> 150	> 190

Ref: (a) Muffler and Cataldi (1978); (b) Hochstein (1990); (c) Benderitter and Cormy (1990); (d) Nicholson (1993); (e) Axelsson and Gunnlaugsson (2000)

### Por fluido:

#### a) Vapor Dominante.

Como su nombre lo indica el producto que se obtiene en el cabezal es predominantemente vapor. Sin embargo, en estos sistemas existe la posibilidad de altos contenidos de gases incondensables, como son CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S. Sistemas de vapor “puro” contienen bajas cantidades de sólidos disueltos y/o en suspensión y esto representa pocos problemas por depósito de sales.

#### b) Líquido dominante (alta entalpía)

Producen una mezcla en el cabezal, típicamente, conteniendo del 15% a 85% en peso de vapor (Gerencia de Geotermia IIE, 2000).

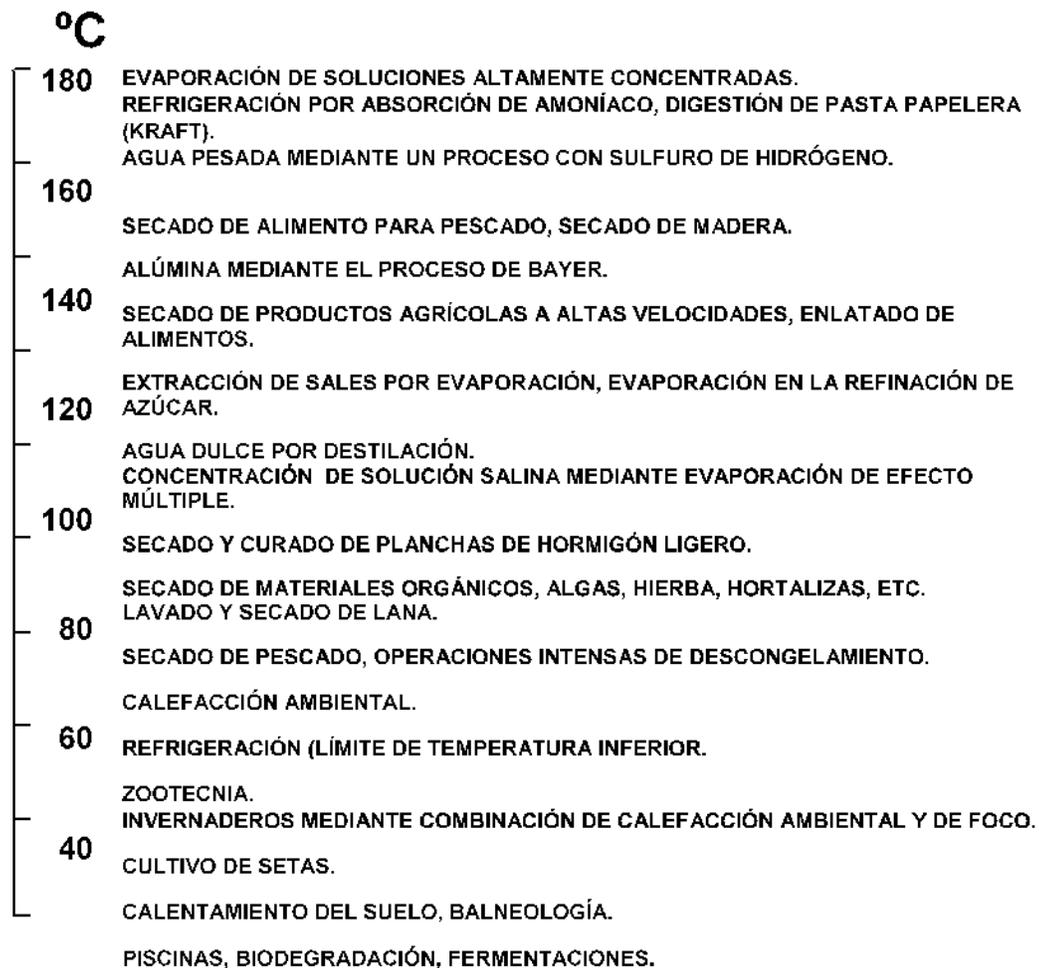
#### c) Líquido Dominante (baja entalpía)

La salida del cabezal es líquido, con temperaturas entre de 100 °C y 200 °C aproximadamente. Son más abundantes que los anteriores en una proporción de 10 a 1. Se encuentran en casi todos los países del mundo (Gerencia de Geotermia IIE, 2000).

## 1.1.2. Usos y aplicaciones

La existencia de anomalías superficiales tales como las erupciones volcánicas, geiseres y la actividad fumarólica, son evidencia de la gran cantidad de energía que se encuentra

almacenada dentro de la tierra en forma de calor. Este calor almacenado desde tiempos remotos se le ha dado un uso de acuerdo a la temperatura a la que se encuentre, dichos usos se pueden observar en la figura 1.3:



*Figura 1.3 Temperatura aproximada de los fluidos geotérmicos para usos directos [Lindal, 1973]*

Aparte de los usos, los recursos geotérmicos pueden ser aplicados de forma indirecta, y una de las aplicaciones mejor conocida es la generación eléctrica mediante ciclos de generación, los cuales dependen íntimamente del recurso geotérmico (temperatura y presión). A continuación, se enlistan las plantas en las cuales se aplica este recurso.

**a) Plantas de vapor seco.**

Estas plantas ocupan los sistemas geotérmicos de vapor dominante (vapor saturado o ligeramente sobrecalentado). El vapor es enviado directamente a las turbinas, a la salida de la turbina se obtiene un vapor húmedo, éste se condensa y es reinyectado al pozo.

**b) Plantas de separación de vapor (flash).**

Estas ocupan los sistemas en los que predomina el líquido, pero a lo largo de la trayectoria ascendente del líquido, sufre una caída de presión por lo que se produce vapor (flash). La mezcla se pasa por un separador, ahí se genera más vapor. Este último es enviado a la turbina y el líquido que aún queda se reinyecta junto con lo que se condensa a la salida de la turbina.

**c) Plantas de ciclo binario.**

Los sistemas de líquido dominante se utilizan en este tipo de plantas, el fluido no está lo suficientemente caliente como para generar vapor a lo largo de su trayecto ascendente.

En la obtención vapor para las turbinas es utilizado un fluido de trabajo secundario con menor punto de ebullición al del pozo (generalmente un refrigerante), este segundo fluido es llevado a su punto de ebullición con el fluido primario.

### **1.1.3. Capacidad internacional instalada de recurso geotérmico**

La energía geotérmica es una fuente de energía limpia y renovable que puede llegar a proporcionar una significativa parte de la energía requerida en el mundo.

Alrededor de ochenta países utilizan la energía geotérmica con distintas aplicaciones (AGM, 2013). La capacidad instalada de dichos países está estimada en alrededor de 12 mil MWe; en la tabla 1.2 se muestra la capacidad instalada de los países que cuentan con este recurso.

*Tabla 1.2 Capacidad geotérmica instalada en el mundo [IGA, 2015].*

<b>Continente</b>	<b>País</b>	<b>Capacidad instalada MW</b>	<b>Total por continente GW</b>
<b>Norte América</b>	Estados Unidos	3,450	3.45
<b>Latino América</b>	México	1,017	1.64
	Guatemala	52	
	El Salvador	204	
	Nicaragua	159	
	Costa Rica	207	
<b>Europa</b>	Alemania	27	2.3
	Australia	1	
	Islandia	665	
	Francia	16	
	Italia	916	
	Portugal	29	
<b>Asia</b>	Rusia	82	4.23
	Turquía	397	
	Japón	519	
	China	27	
	Filipinas	1,870	
	Indonesia	1,340	
<b>África</b>	Kenia	594	0.6
	Etiopía	7	
<b>Oceanía</b>	Australia	1	1.05
	Nueva Zelanda	1,005	
	Nueva Guinea	50	
<b>Total</b>		12.6 GWe	

### 1.1.4 Capacidad nacional instalada del recurso geotérmico

Hace 24 años México ocupaba el segundo lugar en aprovechamiento de la energía geotérmica (REVE, 2012), hoy ha caído al cuarto lugar como se puede observar en la tabla 1.2, mientras que países como Filipinas e Indonesia cuentan con programas para duplicar la cantidad de energía eléctrica con esta técnica (REVE, 2012).

México cuenta con varios campos geotérmicos identificados, los cuales generan el 2% de la capacidad eléctrica total del país operada por la CFE (Comisión Federal de Electricidad) (AGM, 2015).

Tales campos son los siguientes:

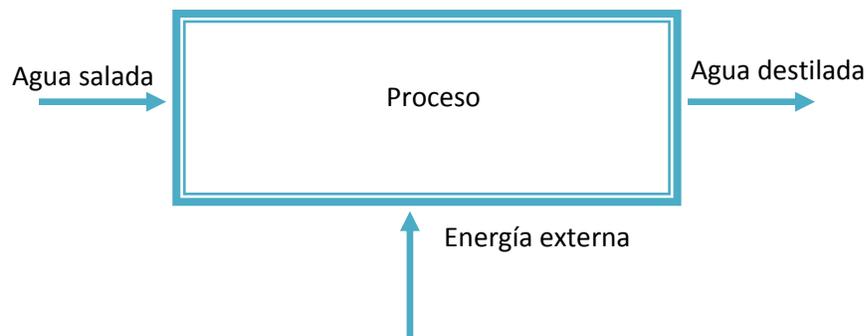
- 1) Cerro Prieto, B.C., cuenta con 720 MW de capacidad neta, constituida por cuatro unidades de 110 MW cada una, cuatro unidades de 37.5 MW cada una, una unidad de baja presión de 30 MW y cuatro unidades más de 25 MW cada una. Todas las unidades son a condensación de un solo flasheo (efecto de vaporización instantánea de un líquido caliente por un cambio de presión), excepto las de 37.5 MW que son de doble flasheo. Las cuatro unidades más antiguas de 37.5 MW cada una se encuentran actualmente fuera de operación, y por lo tanto la capacidad operativa (o capacidad efectiva) del campo es de 570 MW (AGM, 2015).
- 2) Los Azufres, Mich., con 194 MW de capacidad neta, constituida por cinco unidades a condensación de flasheo sencillo (una de 50 MW y cuatro de 26.5 MW cada una), siete unidades a contrapresión de 5 MW cada una y dos unidades de ciclo binario de 1.5 MW cada una. Estas dos unidades de ciclo binario están fuera de servicio, con lo que la capacidad operativa es de 191 MW (AGM, 2015).
- 3) Los Humeros, Pue., con 93.4 MW de capacidad instalada, integrada por ocho unidades a contrapresión de 5 MW cada una y dos unidades a condensación de 26.7 MW cada una. Sin embargo, cinco de las unidades de 5 MW no se encuentran en operación continua, sino que se utilizan como respaldo cuando alguna otra debe salir a mantenimiento, con lo cual la capacidad efectiva del campo es de 68.4 MW (AGM, 2015).
- 4) Las Tres Vírgenes, B.C.S., con 10 MW de capacidad, constituida por dos unidades a condensación (flasheo simple) de 5 MW cada una (AGM, 2015).
- 5) Cerritos Colorados, Jal., sin plantas en operación, pero con varios pozos perforados y un potencial evaluado por la CFE en 75 MW (AGM, 2015).

## 1.2. Desalación de agua de mar

El agua potable es indispensable para la vida diaria del hombre, pero escasea en la medida que la población aumenta; es desperdiciada por personas inconscientes, sumándole la

demanda de productos, producción de alimentos, demanda de agua potable; por lo que el agua potable escasea, por ello se necesitan alternativas para obtenerla.

La desalinización, también conocida como desalación, es el proceso por el cual, al agua con gran contenido de sales, como lo es el agua de mar (35,000 ppm) y las aguas salobres (5,000 a 10,000 ppm) se convierten en agua apta para el consumo humano, uso doméstico y utilización industrial, mediante la aplicación de energía (figura 1.4).



*Figura 1.4 Diagrama general de desalación. [Elaboración propia]*

La desalinización se logra por varios métodos, que están en competencia entre sí y, lógicamente, no todos ellos son utilizados en las mismas dimensiones.

### **1.2.1 Sistemas térmicos**

Estos son procesos principalmente de destilación, en los que el objetivo es obtener agua destilada mediante la adicción de calor, para provocar un cambio de estado, de líquido a vapor; la salinidad no influye en este proceso. Posteriormente, el vapor se condensa, para así obtener destilado que después recibirá un tratamiento para darle las características para su uso, el residuo es conocido como salmuera, la cual es desechada.

### **1.2.2 Sistemas mecánicos**

En estos sistemas, se ocupa un efecto mecánico de presurización de dos formas distintas. El primero, comprime vapor con la finalidad de ser utilizado como fuente de calentamiento para la evaporación del agua dentro de los equipos, además el líquido es “comprimido” de modo que se genere una evaporación instantánea de éste. El segundo, utiliza la presurización como medio para generar un diferencial de presión y transferir agua de un lado a otro y desalar de esta manera el agua.

### 1.2.3 Sistemas químicos

Permite la separación de mezclas por intercambio de iones a través de membranas que poseen una carga eléctrica.

El principio de separación obedece a un rechazo por interacción coulombiana entre membranas y los iones presentes en el agua. La energía se suministra por medio de campos eléctricos.

En la tabla 1.3 se muestra la división de los sistemas de desalinización y las tecnologías o métodos que tiene cada uno.

*Tabla 1.3 Tecnologías de desalación [Zúñiga, 2004]*

Separación	Energía	Proceso	Método
Agua de sales	Térmica	Evaporación	Destilación súbita flash (MSF)
			Destilación múltiple efecto (MED)
			Termo-compresión de vapor
		Destilación solar	
	Cristalización	Congelación	
		Formación de hidratos	
	Filtración y evaporación	Destilación con membranas	
Mecánica	Evaporación	Compresión mecánica vapor	
	Filtración	Ósmosis inversa	
Sales de agua	Eléctrica	Filtración selectiva	Electrodialisis
	Química	Intercambio	Intercambio iónico

#### 1.2.1. Desaladoras: tipos y descripción

Como objetivo de la tesis se tiene el estudio de la Desaladora Modular Geotérmica, la cual se encuentra en desarrollo por el grupo IIDEA, en el Instituto de Ingeniería de la UNAM. Para poder entender el funcionamiento de la DMG primero se tiene que saber el funcionamiento de dos métodos que al igual que la DMG utilizan energía térmica, debido a

que este tomo como base para su desarrollo la Desalación de múltiple efecto y la Desalación de evaporación súbita flash, las cuales son descritas a continuación.

### 1.2.1.1 Desaladora de múltiple efecto MED

La evaporación del agua de mar se produce de un lado de los tubos de un intercambiador aprovechando el calor desprendido por la condensación del vapor del otro lado de los tubos del mismo.

En el proceso MED (figura 1.5), el agua de mar que fue precalentada en la etapa de condensación del vapor generado en el último efecto, ingresa al primer efecto en donde se eleva su temperatura al punto de ebullición con vapor de calefacción. El agua de mar se rocía sobre la superficie de los tubos del evaporador, donde se forma inmediatamente una película delgada, la cual favorece su rápida ebullición y evaporación. El vapor producido es colectado en este efecto y enviado al interior de los tubos evaporadores del efecto siguiente, el cual opera a una temperatura y presión inferiores a las del anterior. La salmuera proveniente del primer efecto es también enviada al efecto siguiente. El vapor de cada uno de los efectos, se convierte en agua desalada al ser condensado en el evaporador del efecto siguiente. El proceso se repite varias veces, dependiendo del número de efectos en el sistema.

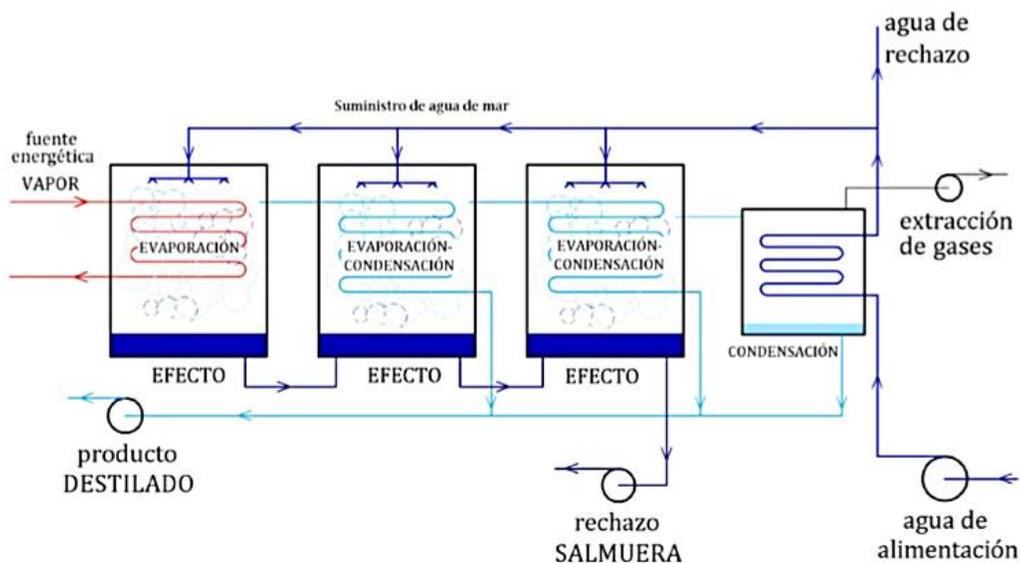


Figura 1.5 Diagrama general de un proceso MED [Salmerón, 2012]

### 1.2.1.2 Desaladora de evaporación súbita flash MSF

Este método se basa en el principio de reducir la presión del agua de mar por debajo del valor de su presión de vapor de equilibrio, ocurre una evaporación súbita (y por lo tanto de carácter irreversible). Solo un pequeño porcentaje del agua se evapora, de forma que la producción de la planta se logra mediante la operación de sucesivas etapas que funcionan a presiones que se van reduciendo progresivamente. Esto normalmente se logra introduciendo el agua de mar, previamente calentada a temperatura de ebullición con vapor de una fuente externa, en una cámara flash a través de un orificio, de forma tal, que provoca una caída de presión suficiente para que sea menor a la de saturación a esa temperatura, evaporando parte del agua salada. Debido a la naturaleza violenta y turbulenta de la evaporación, el área de la superficie del agua expuesta aumenta, beneficiando la producción de vapor. El vapor así producido pasa a través de mallas, donde se despoja de las gotas de salmuera que arrastra. Este vapor es condensado, luego sobre la superficie de tubos que alimentan el agua de mar a la planta. El agua de mar alimentada a la planta, es precalentada también de esta forma, con el calor cedido por el vapor durante la condensación (figura 1.6).

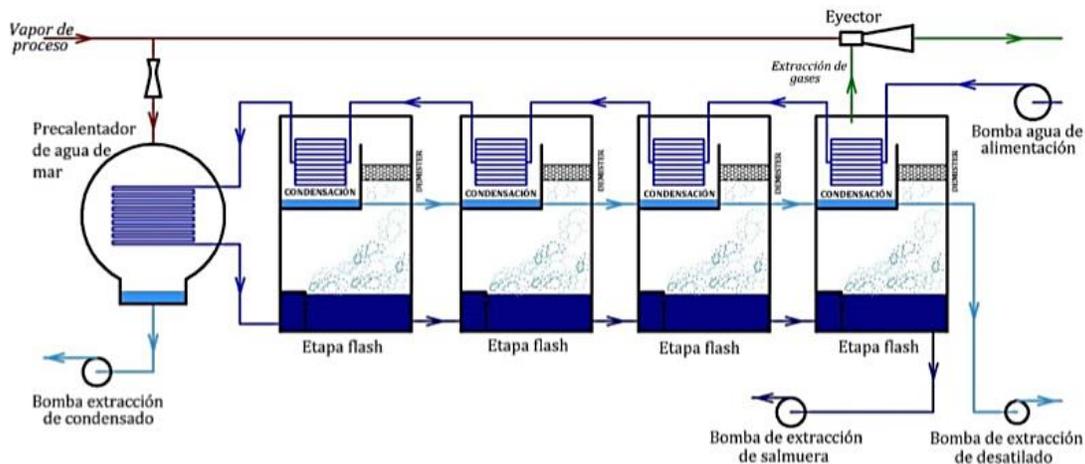


Figura 1.6 Diagrama general de un proceso MSF [Salmerón, 2012]

### 1.2.1.3 Desaladora Modular Geotérmica DMG

El sistema DMG es un método basado en los dos anteriores, el sistema se compone de distintas cámaras de evaporación a distintas presiones; teniendo un arreglo en paralelo. El agua de mar de alimentación requiere de un pre-tratamiento para eliminar desechos que pudiesen afectar a los equipos. Posteriormente, es precalentada con el producto del último

efecto o cámara, la alimentación se hace por la parte de arriba de éstas en forma de aspersión. Hay dos formas de calentamiento: i) una es el recurso geotérmico de baja entalpía, este va pasando por todas las cámaras hasta ceder su energía disponible ii) la otra es, a partir de la segunda cámara, donde entra el vapor generado en la cámara anterior. Este cede su energía y cambia de fase, de esta manera es sacado de la cámara.

El residuo o salmuera en cada cámara también pasa a la siguiente y una parte de ésta es evaporada por efecto de las bajas presiones a las que se encuentran las otras cámaras, al llegar a la última cámara es extraída para su desecho.

Las n-corrientes de destilado (“n” es el número de cámaras existentes en el proceso) se juntan y son enviadas a un pos-tratamiento, de donde se obtiene agua destilada con las características requeridas, lo que depende del uso que posteriormente se le dará (figura 1.7).

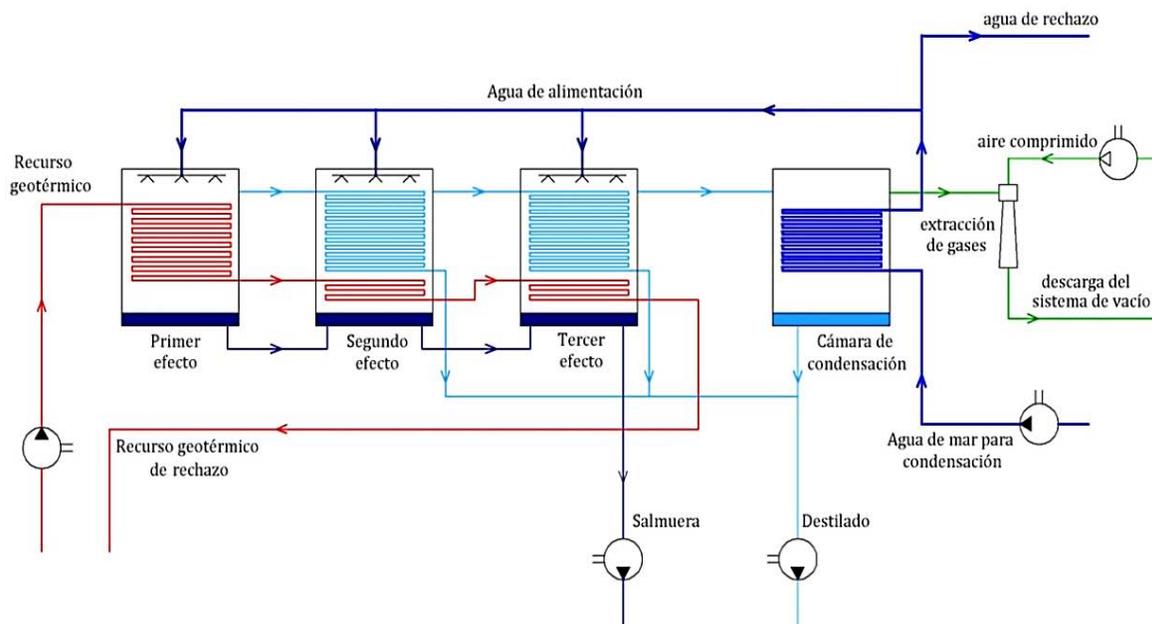


Figura 1.7 Diagrama general de un proceso DMG [IIDEA, 2012]

## 1.2.2. Capacidad internacional instalada de desalación de agua de mar

En el mundo existen pocos países que hasta ahora han desarrollado la tecnología de desalinización, en la figura 1.8 se observan los principales países y sus capacidades instaladas de desalación en m<sup>3</sup> por día.

TOP 10 DE PAÍSES POR CAPACIDAD INSTALADA DE DESALACIÓN



Figura 1.8 Capacidad instalada de desalación en el mundo [IDA, DesalData 2014]

En la figura 1.9 se muestra la generación de las plantas desaladoras por tecnologías.

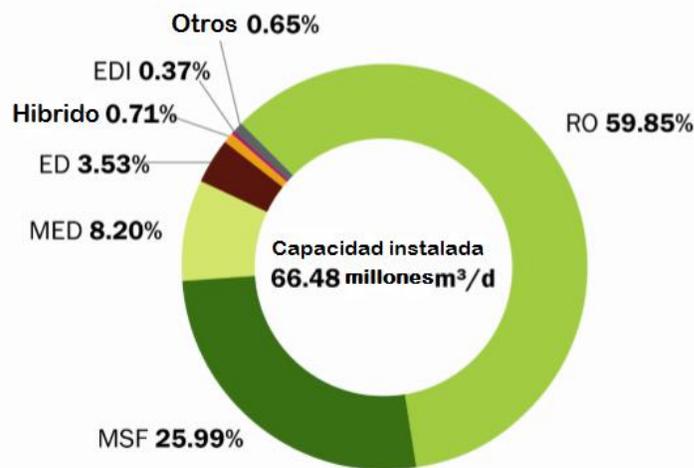


Figura 1.9 Generación de plantas desaladoras por tecnología [IDA, DesalData 2014]

La desalinización es una tecnología que ha ayudado a disipar las tensiones políticas en el Medio Oriente y también ha permitido que algunas sociedades logren despuntar, como en el caso de Arabia Saudita, país que en la actualidad ostenta el primer lugar en desalinización de agua de mar (figura 1.8). Arabia Saudita es uno de los países más grandes del Medio Oriente, su extensión territorial cubre un área de 2 253 000 km<sup>2</sup>, y por sus condiciones climáticas también es considerado como uno de los más áridos del mundo. Arabia recibe, en promedio,

100 mm de lluvia al año, nivel considerado muy bajo, por lo que es común que por años no llueva, además, carece totalmente de ríos superficiales (IDA, DesalData 2014).

Para los sauditas la desalinización fue y ha sido una solución efectiva para sus problemas de agua que les permitió crecer y desarrollarse demográfica y económicamente. Asimismo, parece que su experiencia se ha convertido en un ejemplo a seguir, pues de acuerdo con la bibliografía especializada y los expertos, la desalinización se encamina a convertirse en la opción más viable para combatir la falta de agua, es decir, la desalinización se está estableciendo como en el paradigma a seguir. Según José Antonio Medina, ex presidente de International Desalination Association (IDA), para el año 2015 se habrá desalinizado 97 000 000 de m<sup>3</sup> por día en el mundo (IDA, DesalData 2014).

Este dato indica que la desalinización es una tecnología cada vez más utilizada, sobre todo porque diversas circunstancias se conjugan: en primer lugar, la demanda de agua aumentará exponencialmente, mientras que las reservas de agua dulce comenzarán a colapsar. En segundo, los precios de la desalinización siguen decreciendo y la eficacia tecnológica de los métodos y los procesos desalinizadores sigue incrementándose.

### **1.2.3 Capacidad nacional instalada de desalación de agua de mar**

México enfrenta muchos problemas debido a la falta de abastecimientos como son: distribución inequitativa de agua, escasez en los lugares con clima cálido, contaminación y crecimiento poblacional, lo que provoca en el país un auge de los proyectos para instalar plantas desaladoras en zonas costeras del país.

De acuerdo con el Gobierno de México, en el país hay 35 millones de personas que padecen escasez de agua, por lo que ya se habla incluso de proyectos para desalinizar el agua de mar, por lo que desde 1960 se inició la desalinización en México mediante destilación, pero la crisis petrolera encareció la producción de agua mediante este proceso, desde entonces y con el paso de los años se ha desarrollado la desalación para poder lograr abastecer a poblaciones con escasez de agua [IMTA, 2015].

En 2007, la IDA contó en México 435 plantas desaladoras, de las cuales 282 se encontraban en operación. Esta infraestructura se halla distribuida en todo el país. El estado con el mayor número de desaladoras es Quintana Roo, con 124 unidades; le sigue Baja California Sur, con 71. Éste último cuenta con la planta municipal más grande del país, en los Cabos, que produce 200 L/s de agua potable (17 280 m<sup>3</sup>/d) y abastece a una parte de Cabo San Lucas. El costo por m<sup>3</sup> actualmente está alrededor de \$10.50 (IDA, DesalData 2014).

En 2012 México inició el proceso de definición de una norma oficial para Regulación de la desalación en México. La legislación mexicana establece; que las aguas saladas interiores, en el mar territorial y las aguas salobres son dominio público; es así, que las actividades relacionadas con la desalinización, de acuerdo a la Ley de Aguas Nacionales, requieren de una concesión, pero aún no ha llegado a su conclusión. A pesar de ello, existen proyectos de desalación para abasto de poblaciones del Noroeste de México. Los caudales instalados varían de 2.2 a 4.4 m<sup>3</sup>/s [IMTA, 2015].

Respecto a la desalinización o desalación, la legislación no la menciona. Asimismo, las dependencias federales con atribuciones para reglamentar la desalación no han establecido una norma para regular las obras de toma agua de mar, la disposición de las descargas de salmuera y el impacto al ambiente.

### **Conclusión:**

De acuerdo a lo leído anteriormente podemos decir que tanto la geotermia como la desalación, tienen mucho potencial para ser usados en nuestro tiempo, como se observa, México aún no es capaz de posicionarse en los primeros lugares en uso de estas tecnologías, pero de acuerdo con investigaciones, nuestro país tiene mucho potencial en recurso geotérmico.

La desalación en México no es una práctica nueva, sin embargo, una inadecuada implementación no ha permitido que sea una opción viable a largo plazo. La insuficiencia de estudios y proyectos es un problema no resuelto en la gestión del agua, que afecta seriamente el proceso de inversión y origina problemas de impacto ambiental y abandono. Se dificulta cumplir con los presupuestos gubernamentales; las obras se encarecen al construirse con



malos proyectos o con proyectos elaborados apresuradamente que, en suma, nada ayudan a conducir un proceso ordenado de planeación, entre otros aspectos

Por otro lado, las inversiones asignadas para elaborar estudios y proyectos no han sido suficientes lo que ha dado como resultado una débil cartera de proyectos.

.

## CAPÍTULO 2 Vacío

En el capítulo anterior, se habló sobre geotermia y desalación, mencionando que algunas desaladoras funcionan a presiones bajas para poder evaporar el agua de mar.

En éste capítulo, se dará una breve descripción del concepto de vacío, historia, los equipos con los que se puede generar vacío y sus aplicaciones en la vida diaria que se le da.

### 2.1. Definición de vacío

Algunos filósofos griegos consideraban que el vacío significaba falta de contenido; y esto se convirtió en un obstáculo para entender los principios tecnológicos básicos del mismo.

Pero fue a mediados del siglo XVII cuando el concepto de vacío comenzó a entenderse mediante algunos experimentos, estos primeros experimentos fueron desarrollados por Gasparo Berti, Evangelista Torricelli y Blass Pascal; y a partir de ellos se comenzaron a desarrollar instrumentos y equipos para hacer vacío como lo es el de Vom Guericke llamado “*Los hemisferios de Magdeburgo*”. Para observar mejor los avances de las tecnologías del vacío, en la tabla 2.1 se muestra un resumen de éstas.

*Tabla 2.4 Resumen de tecnologías de vacío [Talavera y Farías, 2008].*

<b>Año</b>	<b>Autor</b>	<b>Descubrimiento</b>
<b>Siglo VIII</b>	Hauskbee y Nollet	Mejoras a la bomba de Von Guericke
<b>1850</b>	Geissler y Toepler	Bomba de columna de Hg
<b>1865</b>	Sprengel	Bomba de gota de Hg
<b>1905</b>	Wolfgang Gaede	Bomba de vacío o rotatoria
<b>1913</b>	Wolfgang Gaede	Bomba molecular de vacío
<b>1915</b>	Wolfgang Gaede	Bomba de difusión
<b>1916</b>	Irving Langmuir	Condensación-difusión
<b>1923</b>	F. Holweck	Bomba molecular
<b>1935</b>	Wolfgang Gaede	Bomba de balastra
<b>1936</b>	Kenneth Hickman	Bomba de difusión de aceite
<b>1953</b>	Schwartz y Herb	Bomba iónica
		Bomba criogénica

Desde entonces, el vacío ha formado parte importante en procesos industriales, muchos de los cuales no podrían haberse realizado sin éste, como por ejemplo la fabricación de semiconductores o espectroscopia de masas.

El aire es una mezcla que contiene aproximadamente  $10^{25}$  partículas por  $m^3$  en el aire a un bar de presión. En la atmosfera, esta mezcla de gases está constituida por los gases y proporciones que se presentan en la tabla 2.2.

<b>Porcentaje</b>	<b>Gas</b>
<b>78%</b>	Nitrógeno
<b>21%</b>	Oxigeno
<b>1%</b>	Otros gases (dióxido de carbono y argón)

Para alcanzar un estado de depresión, un espacio debe estar vacío, es decir, desprovista de todo el material gaseoso contenido en un volumen de control.

Las consecuencias de esto, es que la presión en este espacio es muy baja, ya que no contiene o solo un pequeño número de partículas, las cuales ejercen una fuerza en un área como resultado del impacto entre ellas y una pared.

Por lo tanto, la presión está definida de la forma siguiente:

$$P = \frac{Fuerza}{Área}$$

En teoría, un vacío absoluto, donde no hay partículas de materia en el espacio, la presión es igual a 0. El vacío era entendido como el estado en el cual, existe una ausencia total de presión, pero es muy difícil llegar a ese estado, sin embargo, la mejor definición de vacío de acuerdo a la Sociedad Americana del Vacío (1958), éste se refiere a aquellos estados cuyos valores de presiones son menores a la presión atmosférica normal (760 mmHg). La figura 2.1 muestra de manera gráfica lo dicho anteriormente.

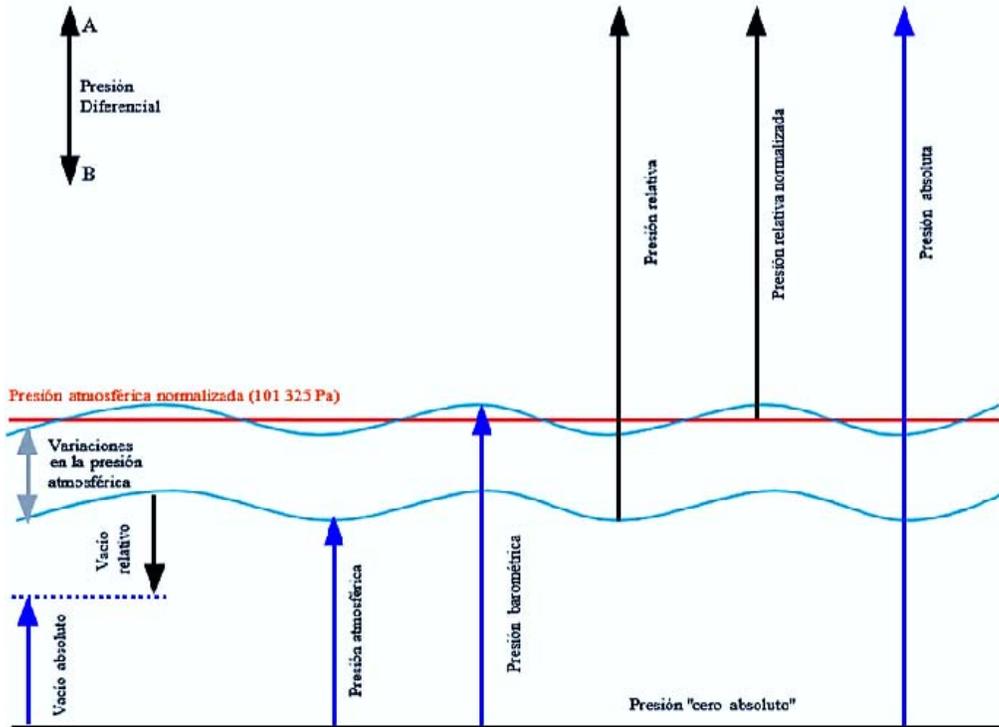


Figura 2.10 Tipos de Presión [MetAs, 2002]

Por lo tanto, se puede decir que, al ir disminuyendo la cantidad de gas en un sistema, habrá menor presión, y mayor generación de vacío, lo que permite que exista una clasificación de grado de vacío como se muestra en la figura 1.2.

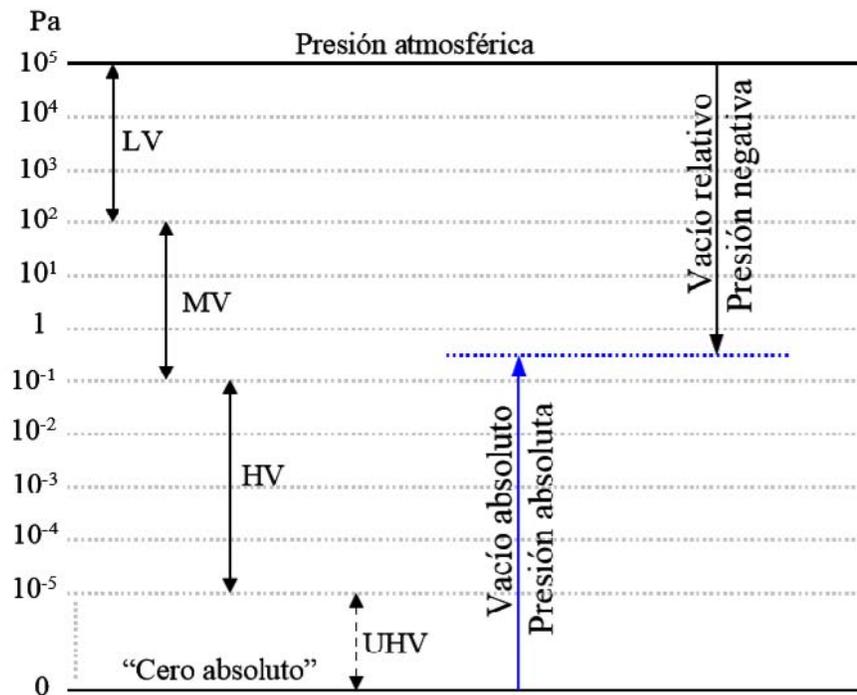


Figura 2.11 Tipos de Vacío [MetAs, 2002]

Entonces se habla de bajo, medio, alto y ultra vacío; de mayores a menores intervalos.

**Bajo vacío (LV).** Los intervalos de presiones con estas características van desde 100 kPa a 100 Pa. Con las técnicas usuales para hacer vacío (que se describen más adelante).

**Medio vacío (MV).** Presión del gas alcanza de 100 Pa a 0.1 Pa

**Alto vacío (HV).** El intervalo de presiones se extiende cerca de 0.1 Pa a 10 $\mu$ Pa. La composición de gases residuales presenta un alto contenido de vapor de agua (H<sub>2</sub>O).

**Ultra alto vacío (UHV).** La presión es menor a 10 $\mu$ Pa. Las superficies internas de los recipientes se mantienen *limpias* de gas. En este intervalo el componente dominante de los gases residuales es el hidrógeno.

De las diferentes unidades de medida que existen para la presión, la tecnología del vacío generalmente usa las unidades: Pascal [Pa], hectoPascal [hPa], Bar [bar] e Milibar [mbar]. La conversión entre Pascal y Bar es la siguiente:

$$0,001 \text{ bar} = 1 \text{ mbar} = 1 \text{ hPa} = 100 \text{ Pa}$$

Además de estas últimas, existen otras unidades de medida que son utilizadas, las cuales se pueden observar en la tabla 2.3.

*Tabla 2.6 Unidades de conversión [Elaboración propia]*

	<b>Bar</b>	<b>kPa</b>	<b>Atm</b>	<b>Kg/cm<sup>2</sup></b>	<b>Torr (mmHg)</b>
<b>Bar</b>	1	100	0,9869	1,0197	750
<b>kPa</b>	0,01	1	0,009869	0,00102	7,5
<b>Atm</b>	1,013	101,3	1	1,033	760
<b>Kg/cm<sup>2</sup></b>	0,9807	98,067	0,9678	1	735,528
<b>Torr (mmHg)</b>	0,00133	0,1333	0,001316	0,00136	1

## 2.2. Clasificación de sistemas para generación de vacío

Un sistema de vacío es aquel dispositivo o equipo que se encarga de extraer las moléculas de gas de un volumen de control, también se encarga de extraer o eliminar aquellos contaminantes o elementos no deseados en productos, sistemas o procesos.

La selección del equipo para hacer vacío que va a emplearse para un cierto proceso, se define por sus parámetros específicos, los cuales, determinan sus propiedades. Los parámetros más importantes que se deben considerar para la selección de un sistema de vacío son las siguientes:

- Rango de presión más bajo que genera
- El intervalo de presión
- La velocidad de succión o bombeo
- Presión de descarga
- El gas o gases con que trabaja

En la figura 2.2, se observa un diagrama con el tipo de equipo de vacío y sus rangos de presión en los que pueden trabajar.

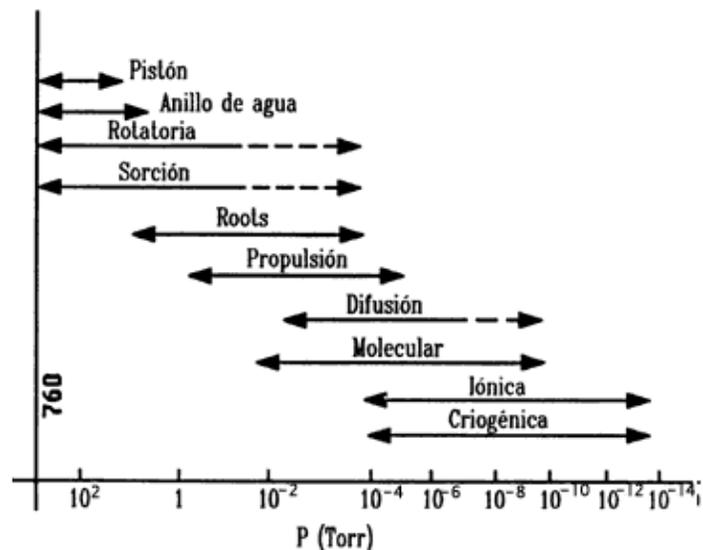


Figura 2.12 Equipos para rangos de vacío [Talavera y Farías, 2008]

Los equipos de vacío existentes pueden clasificarse de la siguiente forma:

## 2.2.1. Equipos mecánicos para generación de vacío

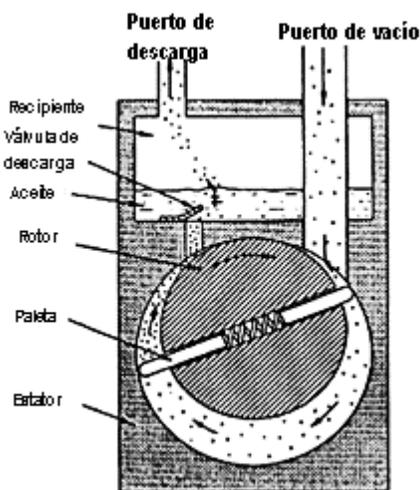
Los equipos mecánicos son aquellos que requieren de energía de un motor eléctrico por medio de una banda o directamente.

Las bombas mecánicas fueron las primeras bombas en ser utilizadas. En 1905, Gaede desarrollo una bomba mecánica, que es similar a las bombas de paletas rotatorias selladas con aceite que son utilizadas actualmente (Talavera y Farías, 2008).

### 2.2.1.1 Bomba de paletas

Pertencen a la familia de las bombas mecánicas y son ideales para todos los procesos que requieren bombas sin lubricación de aceite, y se componen de paletas rígidas de expansión centrífuga y una carcasa.

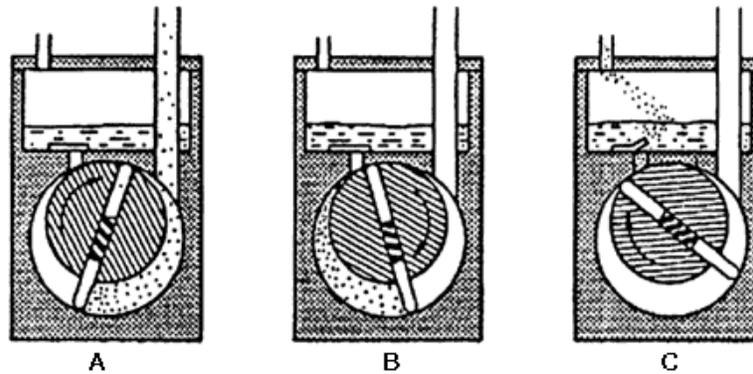
Estas bombas se construyen en el sistema rotativo a paletas, el cual consta de un rotor donde se alojan las paletas de expansión centrífugas, las cuales se desplazan sobre el perímetro del cilindro, el cual está montado excéntricamente al eje del motor. Todo el sistema se encuentra exento de lubricación. En la figura 2.4 se muestra el diagrama de una bomba de paletas con las partes que la componen.



*Figura 2.13 Diagrama de una bomba de paletas [Tecnovac, 2012]*

El mecanismo de funcionamiento se muestra en la figura 2.5; donde: A) las paletas comienzan a girar cuando el rotor se mueve, y de ésta manera el gas es succionando y

acomodado entre las paletas. B) El gas se comienza a empujar hacia la válvula de descarga, donde es comprimido. C) La válvula de descarga se abre y el gas es expulsado de la bomba.



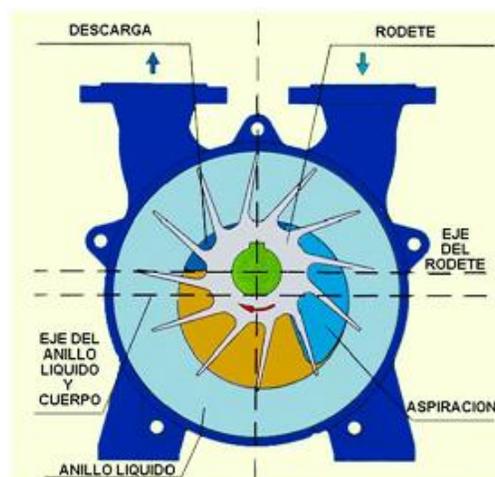
*Figura 2.14 Funcionamiento de una bomba de paletas [Talavera y Farías, 2008]*

### 2.2.1.2 Bomba de anillo líquido

Una bomba de anillo líquido se utiliza para vacío operacional limitado hasta 33-40 mbar, dependiendo de la temperatura del líquido de anillo.

Este tipo de bombas, se suelen utilizar para manejar mezclas de gases que contienen vapores condensables.

El funcionamiento de una bomba de anillo líquido es muy similar al de una bomba de paletas ya que como lo muestra la figura 2.6, cuando el gas entra, es encerrado entre las paletas del rodete y el anillo líquido. Cuando el rodete gira, el anillo líquido comprime el gas y lo impulsa hacia la salida del anillo.



*Figura 2.15 Diagrama de una bomba de anillo líquido [Tecnovac, 2012]*

### 2.2.1.3 Bomba turbomolecular

Ésta, al igual que la anterior, es un tipo de bomba de paletas que tiene una turbina o motor con álabes que se mueven a velocidades supersónicas cerca de las paletas fijas. El objetivo del movimiento supersónico, es modificar la trayectoria de flujo de las moléculas del gas, a través de los álabes que se encuentran en movimiento (rotor), y los de estado estacionario (estator), cada parte de rotor-estator es una etapa de bombeo. Estas bombas se pueden adaptar secundariamente a otra bomba para así lograr mayor nivel de vacío y por lo tanto mayor eficiencia.

En la figura 2.7, se muestra un diagrama de la parte interna de una bomba turbomolecular y las partes que la conforman.

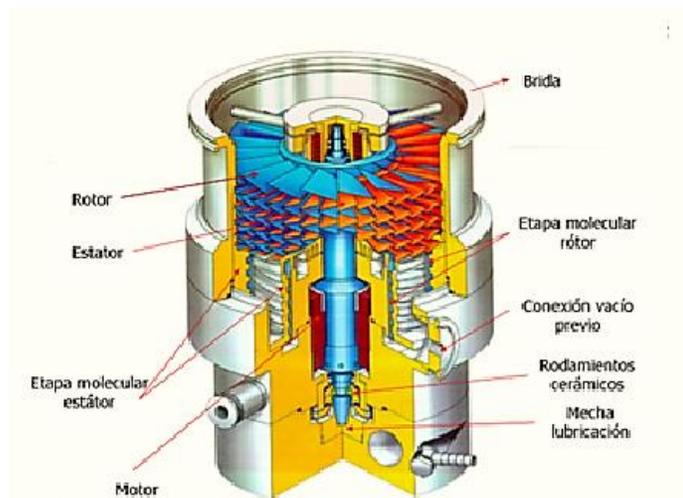


Figura 2.16 Diagrama de una bomba turbo-molecular [Tecnovac, 2012]

### 2.2.1.4 Bomba Scroll

Se consideran este tipo de bombas como la última generación de las bombas rotativas de paletas, pero en las bombas scroll se han cambiado estas últimas por un rotor en forma de espiral, el cual rueda o gira sobre la superficie del rotor.

Estas bombas generan vacío mediante un mecanismo en espiral. Los espirales capturan el gas y éste es desplazado y comprimido hacia el centro de los espirales. La figura 2.8, muestra este mecanismo y las partes que conforman la bomba.

Estas bombas se usan como apoyo de las bombas turbomoleculares.

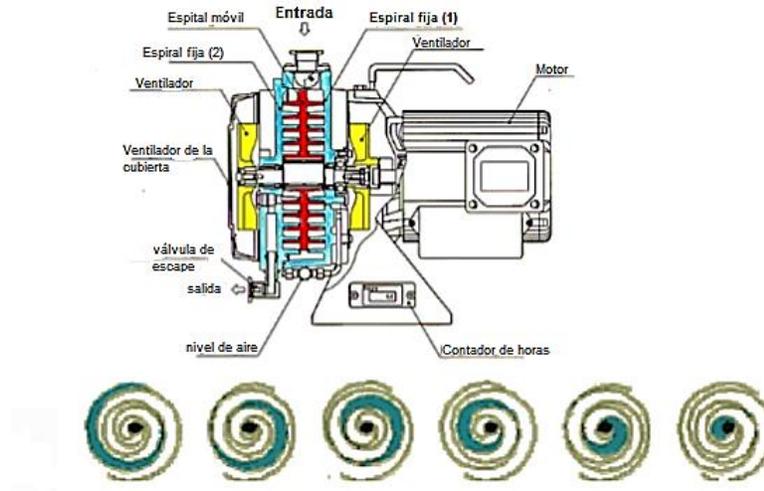


Figura 2.17 Diagrama de una bomba Scroll [Tecnovac, 2012]

### 2.2.1.5 Bombas roots

Son bombas de tipo de desplazamiento positivo con dos rotores en forma de ochos que giran sin tocarse entre ellos, uno en sentido contrario del otro. Los principales elementos que constituyen las bombas roots son los rotores, la cámara de bombeo y la válvula de sobrepresión. El principio de operación consta de cuatro etapas, que se describen gráficamente en la figura 2.9.

Estas bombas se usan habitualmente para incrementar la velocidad de bombeo de un sistema; o para alcanzar un vacío final más bajo (es decir de apoyo).

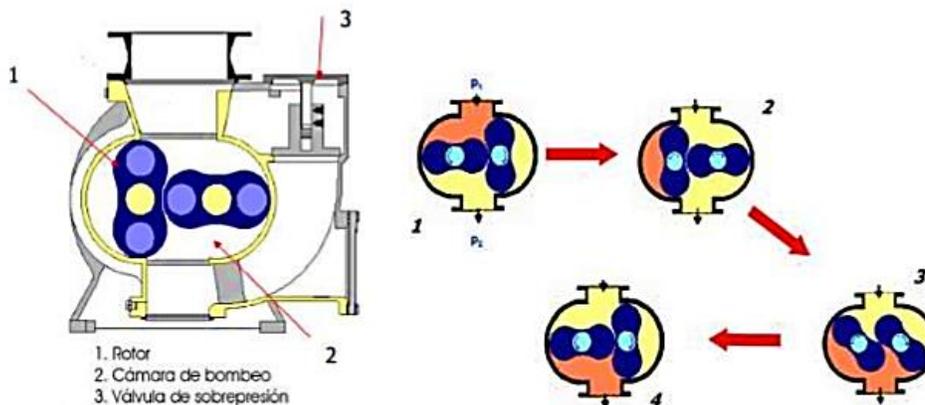


Figura 2.18 Diagrama de una bomba Roots [Tecnovac, 2012]

## 2.2.2. Equipos térmicos para generación de vacío.

Un sistema térmico, es aquel que utiliza la temperatura como medio para generar vacío, ya sea enfriando o calentando el interior de la bomba para succionar los gases dentro de un sistema de control.

### 2.2.2.1 Bomba criogénica

Estas bombas están basadas en el principio de condensación de los gases, por lo tanto, la bomba consta de una superficie fría a la temperatura de nitrógeno o hidrógeno líquido. Estos se hacen pasar por un circuito cerrado que enfría el metal y cuando pasa el gas éste es condensado. Antes de encender la bomba debe haber al menos  $7 \times 10^{-3}$  torr, pero no hace falta un bombeo continuo de una bomba mecánica como en la difusora y turbomolecular. Para apagar la bomba debe bombearse mediante una bomba mecánica para evacuar los gases depositados en el metal.

Grandes cantidades de gas pueden ser almacenadas en el interior de la bomba. Eventualmente, la bomba necesitará ser descongelada o regenerada. La regeneración es el proceso de calentar el interior de la criobomba para revaporizar los gases congelados emitiéndolos a la atmósfera. Se lleva a cabo parando el refrigerador.

La figura 2.10, muestra el esquema de una bomba criogénica.

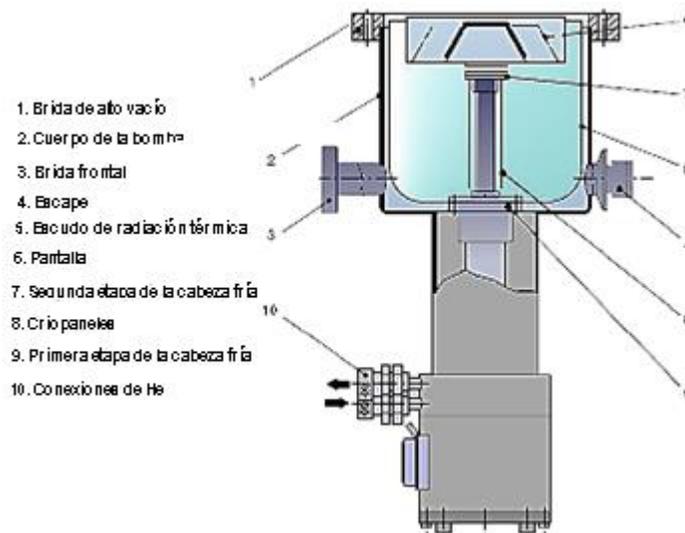


Figura 2.19 Diagrama de una bomba criogénica [Tecnovac, 2012].

### 2.2.2.2 Bomba de difusión

Es un dispositivo diseñado para bombear los gases con un chorro de vapor de alta velocidad como medio de transporte. Este proceso tiene lugar debido a que los gases se resisten a la difusión en la corriente de vapor, y son más propensos a moverse a lo largo de la misma.

El vapor utilizado para transportar el gas es típicamente el producto de punto de ebullición de aceites especializados, tales como, aceite de silicona en la sección del calentador de la bomba. Cuando se dirige el aceite a través de la boquilla de la bomba, el vapor es acelerado considerablemente y arrastra el gas con él, a través del punto de descarga de la bomba.

La figura 2.11 muestra el diagrama de una bomba de difusión.

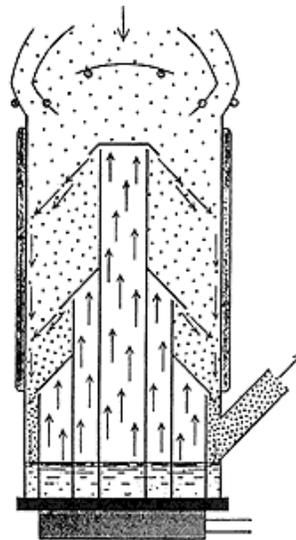


Figura 2.20 Diagrama de una bomba de difusión [Talavera y Farías, 2008]

### 2.2.2.3 Eyector

El eyector es una bomba de vacío, que no tiene partes móviles y que es capaz de alcanzar presiones absolutas de entre 1 micrón y 30 inHg.

El principio de funcionamiento es el siguiente: el fluido motriz, generalmente vapor, pero puede ser cualquier otro fluido, es acelerado en una tobera convergente-divergente, convirtiendo la presión en velocidad, debido al efecto Venturi, la presión en la descarga es muy baja, produciendo una succión del fluido aspirado en la cámara de mezcla. La mezcla del fluido motriz y aspirado es introducida en el difusor, donde se transforma la velocidad en

presión, obteniendo en la descarga una presión intermedia entre la del fluido motriz y el impulsado.

El eyector está formado básicamente por tres elementos: Cámara de aspiración, tobera y difusor de mezcla, los cuales se muestran en la figura 2.12.

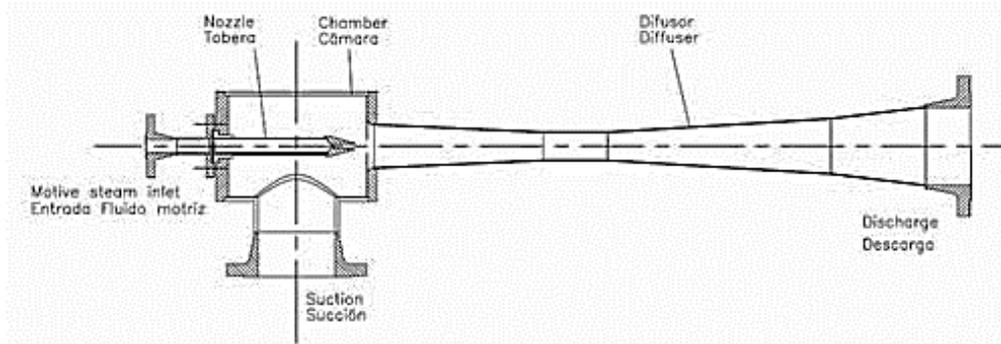


Figura 2.21 Diagrama de un eyector [Imnateinsa, 2001].

## 2.2.3. Equipos químicos y de membrana para generación de vacío

### 2.2.3.1 Bomba de membrana

Su funcionamiento es muy sencillo ya que está basado en el cambio continuo de volumen de una cámara de bombeo, en la cabeza del pistón está instalada la membrana que oscila por el empuje por el pistón, haciendo que el gas se comprima en el interior. En la cabeza del pistón está instalada la membrana que oscila empujado por el pistón haciendo que el aire se comprima en el interior.

La cámara de presión tiene una válvula de seguridad que evita que la presión dentro de la cámara sea excesiva.

Estas bombas son utilizadas principalmente en procesos químicos debido al bajo nivel de humedad que mantienen, por lo que se les considera como bombas totalmente secas. El mantenimiento general que requieren es cambio de membranas y de válvulas.

En la figura 2.13 se muestra el principio de funcionamiento de la bomba de membrana.

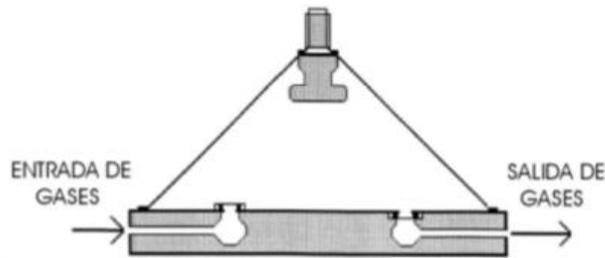


Figura 2.22 Diagrama de una bomba de membrana [Tecnovac, 2012].

### 2.2.3.2 Bomba iónica

Las bombas iónicas usualmente son usadas para eliminar trazas de gas dentro de una cámara para conseguir un alto vacío. Su principio de funcionamiento está basado en la ionización de las moléculas de gas.

Existen dos tipos de bombas iónicas las de tipo diodo y las de tipo triodo, las cuales se pueden observar en la figura 2.14.

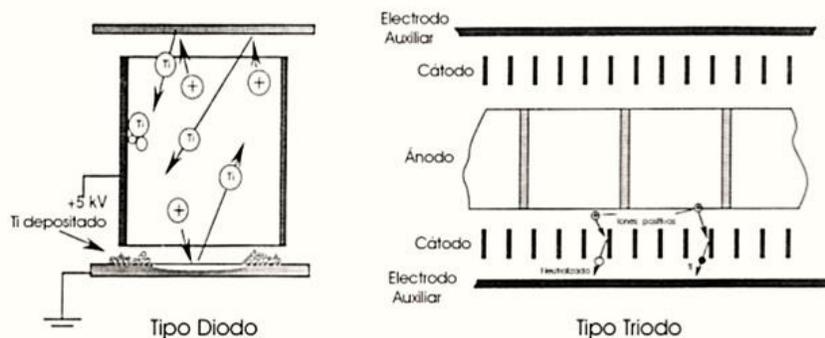


Figura 2.23 Diagrama de una bomba iónica [Tecnovac, 2012]

**Tipo diodo:** compuesta por dos cátodos y un ánodo con varios cilindros y un imán que rodea la bomba. Cuando se produce la descarga, los electrones se dirigen al ánodo, los electrones ionizan las moléculas de gas que van apareciendo, de esta forma, los iones positivos producidos bombardean los cátodos y arrancan las moléculas de titanio que forman las películas “getter” sobre la superficie del ánodo.

**Tipo triodo:** se añaden dos electrodos auxiliares, con lo que además de solucionar el problema de bombeo de gases nobles, se aumenta la capacidad de bombeo.

### 2.3. Aplicaciones del vacío

El vacío no estriba tanto en su generación, ni en el significado físico que tiene, sino en su gran utilidad que lo hace acreedor de un número enorme de estudios y usos. Dependemos del vacío desde el proceso fundamental que es respirar, hasta en los más grandes adelantos industriales y científicos.

En la tabla 2.4 se mencionan las aplicaciones que se le dan al vacío en base al grado de vacío y los equipos que se utilizan para generar ese grado de vacío.

*Tabla 2.7 Aplicaciones del vacío en sus diferentes rangos. [Diferentes fuentes]*

<b>Rango de vacío</b>	<b>Equipos</b>	<b>Aplicaciones</b>
<b>Bajo vacío</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Bombas mecánicas</li> <li>•Eyector</li> <li>•Bombas de gas de una y dos etapas</li> </ul>	<p>Aplicaciones en la tecnología de manipulación industrial.</p> <p>El material y el acabado superficial de piezas.</p>
<b>Medio vacío</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Bomba de difusión</li> <li>•Bomba por propulsión</li> <li>•Bomba rotatoria</li> </ul>	<p>Desgasificación de acero, producción de la bombilla, secado de los plásticos, liofilización de alimentos, etc.</p>
<b>Alto vacío</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Bomba de difusión</li> <li>•Bomba molecular</li> </ul>	<p>Fundición o recocido de metales, fabricación de tubos de rayos catódicos.</p>
<b>Ultra vacío</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Bomba criogénica</li> <li>•Bomba iónica</li> </ul>	<p>Pulverización de metales, metalización al vacío (recubrimiento de metales), así como de fusión de haz de electrones.</p>

## Conclusión

Se puede decir que a lo largo de la historia el haber descubierto el vacío fue un gran avance en la tecnología ya que sin él no podrían existir algunas cosas, tales como; tubo de electrones o como es el caso de la desalación, ya que el vacío es una parte muy importante, ya que sin él se necesitaría mayor cantidad de energía calorífica para destilar el agua de mar.

La tecnología de vacío, por otro lado, ha contribuido al avance médico, y un ejemplo de esto es el equipo utilizado en la *respiración artificial*. Cuando el acto de la respiración ha cesado, se puede renovar el aire en los pulmones con este método mecánico, el cual comprende dos técnicas denominadas *resucitadores* y *respiradores corporales* ("pulmones de acero").

## CAPÍTULO 3 Propuesta de un sistema de vacío para la unidad Desaladora Modular Geotérmica.

En este capítulo se da la información básica sobre las condiciones de operación de la Desaladora Modular Geotérmica (DMG), así como la descripción de las propuestas que se adecuan a dichas condiciones junto con su diagrama de flujo de proceso.

### 3.1. Definición de requerimientos técnicos para el sistema.

El agua de mar es una mezcla de componentes en los que se encuentran sales, las cuales se forman con los siguientes iones:  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}_2^-$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{Ca}^+$ ,  $\text{SO}_4^{-2}$  y gases incondensables ( $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ), estas sustancias deberán ser reducidas para tener una adecuada calidad del agua. El objetivo de la DMG (Desaladora Modular Geotérmica) es obtener un agua destilada (producto) con bajo contenido de sales y de incondensables.

La tabla 3.1 muestra las variables más importantes del balance realizado en REFPROP, es un data bank que se puede usar en Excel, el balance se puede ver con más detalle en el anexo A.

<i>Tabla 3.1 Variables fijas y variables base [Elaboración propia]</i>	
<b>Variable</b>	<b>Valor</b>
<b>Flujo de destilado</b>	40 m <sup>3</sup> /día
<b>Factor de concentración (FC)</b>	1.4
<b>Flujo de agua de mar por cámara</b>	70 m <sup>3</sup> /día
<b>Flujo geotérmico</b>	430 m <sup>3</sup> /día
<b>Flujo total de gases incondensables</b>	16.35 m <sup>3</sup> /día

La tabla 3.2 muestra las condiciones de operación establecidas para los equipos internos de la DMG.

**Tabla 3.2 Características de diseño de los equipos de la DMG [IIDEA]**

<b>PINCH (°C) monofase</b>	6
<b><math>\Delta T</math>condensadores (°C)</b>	8
<b>PINCH (°C) bifase</b>	6
<b><math>\eta</math> interno de los intercambiadores</b>	0.9
<b><math>\eta</math> interno de los condensadores</b>	0.9
<b><math>\eta</math> bombas</b>	0.65
<b><math>\Delta P</math> intercambiador monofasico (KPa)</b>	30

### 3.2. Definición de propuestas.

Las propuestas que aquí se presenta son a base de cálculos teóricos realizados, los cuales se presentan en los anexos, los cálculos en la parte de la de simulación pueden cambiar debido a malas consideraciones realizadas durante los cálculos, o debido a un mal manejo del simulador.

De acuerdo a las especificaciones de la desaladora se requiere de un equipo que genere un bajo vacío con las condiciones mencionadas en la tabla 3.1. La siguiente tabla muestra los equipos que pueden llegar a funcionar en ese rango.

**Tabla 3.3 Rangos de aplicación de los distintos tipos de bomba [D. J. Hucknall, 2003]**

<b>Ultra vacío</b>	<b>Alto vacío</b>	<b>Medio vacío</b>	<b>Bajo vacío</b>
Bomba criogénica	Bomba de difusión	Bomba de difusión	Bombas mecánicas
Bomba iónica	Bomba molecular	Bomba por propulsión	Eyector
		Bomba rotatoria	Bombas de gas de una y dos etapas

La DMG se encuentra ubicada en un territorio cerca del mar (Península de Baja California), por lo tanto, las condiciones pueden llegar a ser corrosivas, debido al medio ambiente en el que se encuentra ubicada, en consecuencia, el equipo puede sufrir daño. Se requiere de un equipo fácil de cambiar y que sea económico.

Se darán distintas propuestas de sistemas de vacío, las cuales serán comparadas energéticamente y económicamente en un simulador, para así elegir la mejor opción y la que mejor se adecue al proceso.

Los fluidos a emplear en sistema de vacío, ya que la mayoría de los sistemas usan un eyector como parte del sistema.

#### a) Fluido primario

El fluido primario será el aire. Las condiciones del aire las da el lugar donde se ubica la DMG en este caso Baja California.

<b>Humedad</b>	<b>60 %</b>
<b>Humedad relativa</b>	10 – 40 %
<b>Temperatura</b>	30 °C
<b>Presión</b>	0.1 MPa

#### b) Fluido secundario

El fluido secundario es una mezcla de aire, vapor de agua e incondensables. Las condiciones están fijadas por las cámaras.

	<b>Cámara 1</b>	<b>Cámara 2</b>	<b>Cámara 3</b>
<b>Presión (bar)</b>	0.016	0.013	0.01
<b>Temperatura (°C)</b>	55	51	47

### 3.2.1. Justificación del sistema de vacío.

El vacío en las cámaras ayuda a que el agua de mar disminuya su punto de ebullición, por lo tanto, requiere de menos energía térmica o calorífica para evaporarla y que ésta, al entrar las cámaras genere una vaporización instantánea. Que el agua de mar disminuya su punto de ebullición también ayuda a que las sales no se evaporen junto con el agua, en consecuencia, se quedan en el fondo de la cámara junto con el agua que no se evaporó. Además, el agua de mar al aumentar su temperatura libera los gases disueltos en ella, los cuales serán eliminados mediante el sistema de vacío.

Para lograr lo anterior antes de que el agua entre a las cámaras se tienen que eliminar los gases contenidos en las cámaras; al ingresar el agua, como se explicó anteriormente se generara un vapor flash lo cual provocara un incremento en la presión de las cámaras, por lo tanto, hay que eliminar dichos gases.

La presión que actúa sobre un líquido influye significativamente sobre su punto de ebullición. El agua ebulle a 100 °C si está sometida a una presión de 1 atmósfera, sin embargo, si la presión disminuye hasta 0.06 atmósferas, la ebullición se produce a 0 °C. Es por eso que en lugares cada vez más altos, donde la presión es cada vez menor, el agua puede ebullicir a temperaturas menores a 100 °C.

Los elevados puntos de ebullición y fusión del agua se deben a que la molécula es altamente polar; las sales disueltas son electrolitos en solución acuosa ionizada, por lo que da al agua de mar propiedades fisicoquímicas complejas, el punto de ebullición del agua se eleva y el punto de congelación disminuye. Desde un punto de vista molecular, cuando se eleva la temperatura del agua, las moléculas se mueven más rápido, chocan con más frecuencia, y liberan más moléculas. Los iones de las sales toman un poco de espacio, haciendo menos colisiones entre las moléculas de agua, por lo que no libera tantas moléculas de vapor como el agua pura lo haría. Por lo que se requiere más energía (una temperatura más alta) para que el agua salada empiece a ebullicir.

Para evitar usar mayor cantidad de energía se necesita disminuir el punto de ebullición y para lograr lo anterior se tiene que disminuir la presión del sistema, a lo que se llama destilación a vacío. Lo importante en ésta destilación es que al crear un vacío en el sistema se puede reducir el punto de ebullición de la sustancia casi a la mitad. El proceso consiste en generar un vacío parcial dentro del sistema de destilación para destilar sustancias por debajo de su punto de ebullición normal.

Por otra parte, en el caso de los gases se presenta un comportamiento diferente de la que poseen los sólidos al estar disueltos en un líquido. Tanto la presión como la temperatura tienen una fuerte influencia sobre su solubilidad.

Al aumentar la temperatura, se incrementa la energía cinética de las partículas de soluto y solvente, con lo que las fuerzas intermoleculares se debilitan. De esta forma, se establecen interacciones entre sus partículas y las de solvente, favoreciendo la mezcla.

En el caso de los gases, la disminución de fuerzas intermoleculares “libera” a las moléculas de gas de las fuerzas que las mantienen en solución, liberándose del recipiente, observándose que, al aumentar la temperatura, disminuye la solubilidad de un gas en un solvente como el agua.

### **3.2.2. Descripción de propuestas.**

De las propuestas que aquí se presentan, las cuales fueron elegidas de acuerdo de acuerdo a la tabla 3.3 presentada en este capítulo, el dimensionamiento de los equipos se puede observar en los anexos.

#### **Primera propuesta:**

Estará compuesto de un eyector de aire y un compresor. Este será lleve el aire a la presión que requiera el eyector. La descarga del eyector será a la atmósfera. Constará de su instrumentación básica de control los cuales son: la válvula de globo para mantener el vacío en la cámara, una válvula de regulación de presión para el compresor, una válvula de cierre para el flujo de aire del compresor y una válvula de seguridad (alivio) para la línea de vacío. La línea del compresor contará con un indicador de presión y la de vacío con un vacuómetro.

#### **Segunda propuesta:**

Constará solamente de una bomba de paletas para alcanzar el vacío requerido. Tendrá como sistemas auxiliares dos filtros, uno para partículas sólidas y otro para gotas de agua. Su sistema de instrumentación será una válvula de bola para sellar la cámara, la válvula de alivio como seguridad del sistema y dos válvulas anti-retorno, una antes de la bomba y otra posterior a ella. Contará solo con un vacuómetro.

#### **Tercera propuesta:**

Este será un sistema híbrido con un eyector con una bomba de paletas, y los filtros para evitar daños en la bomba. Su sistema de instrumentación será: la válvula de regulación de vacío, la válvula de alivio como seguridad del sistema las válvulas de globo antes y después de la bomba, así como también su válvula anti-retorno. El sistema de medición de presión estará compuesto por un vacuómetro.

### **3.2.3. Propuesta de configuración física.**

A continuación, se pueden observar los diagramas de las propuestas descritas anteriormente, la figura 3.1 corresponde a la primera propuesta, la figura 3.2 a la segunda y la de 3.3 a la tercera.

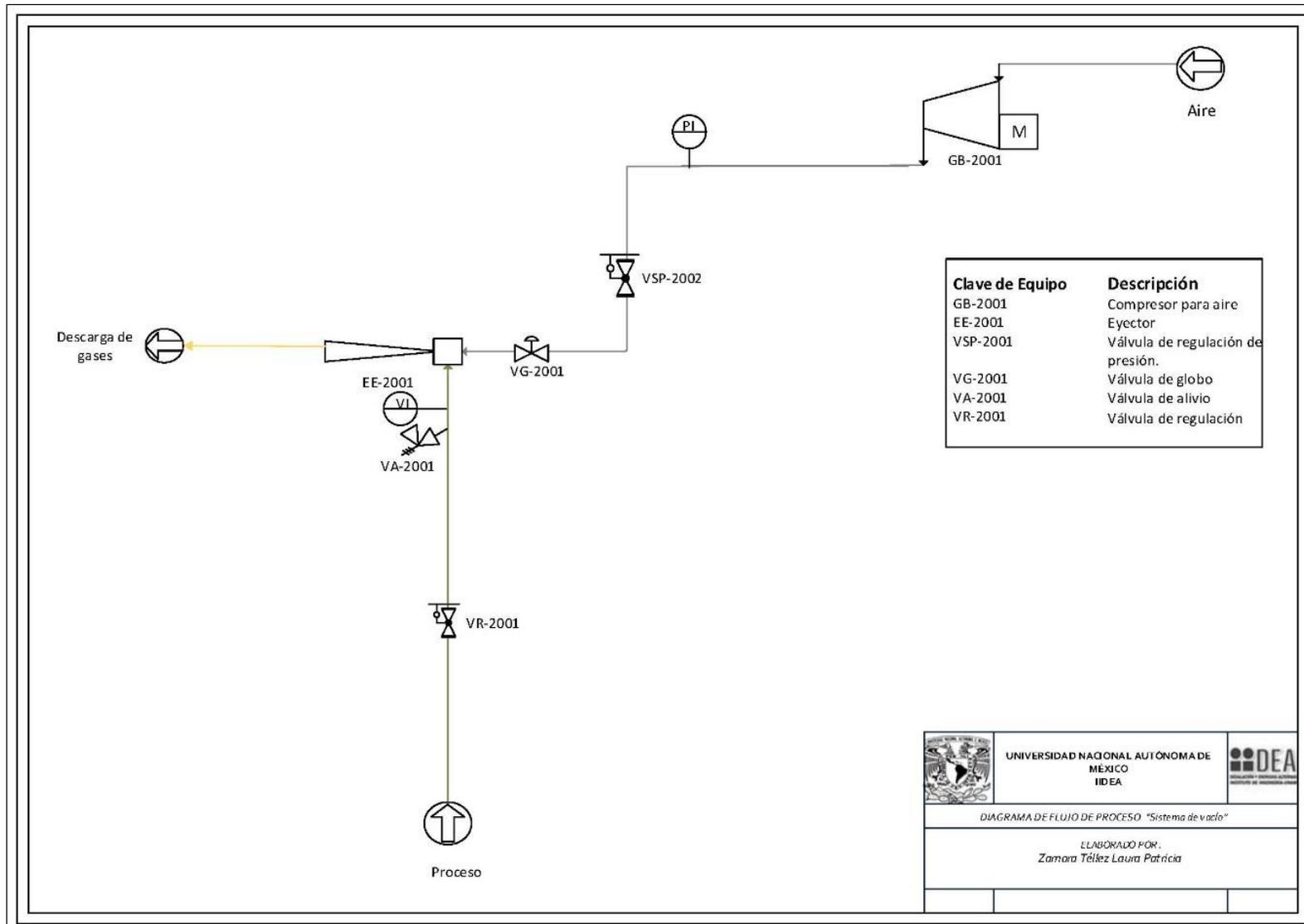


Figura 3.24 Diagrama de la propuesta 1 [Elaboración propia]

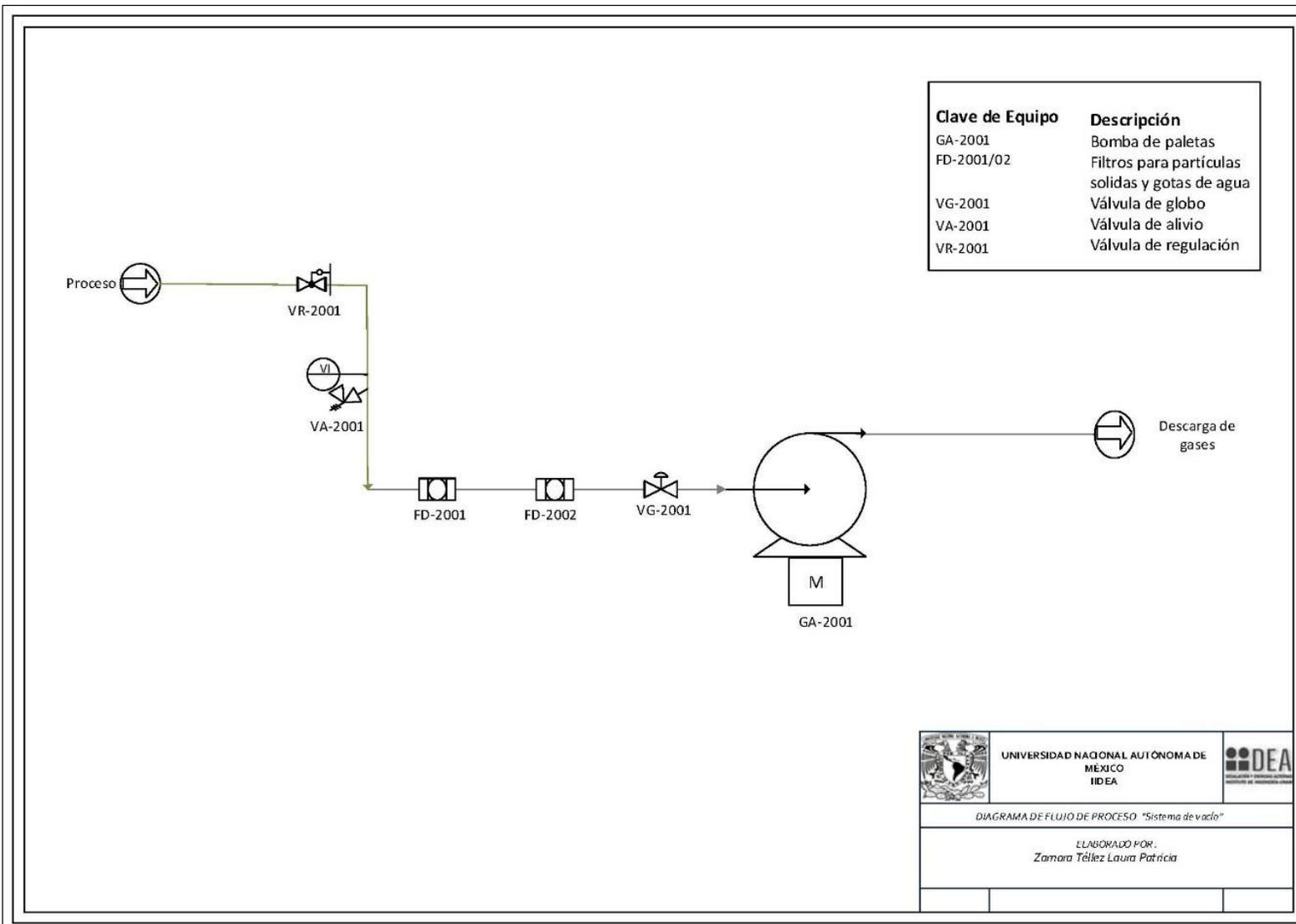


Figura 3.25 Diagrama de segunda propuesta [Elaboración propia]

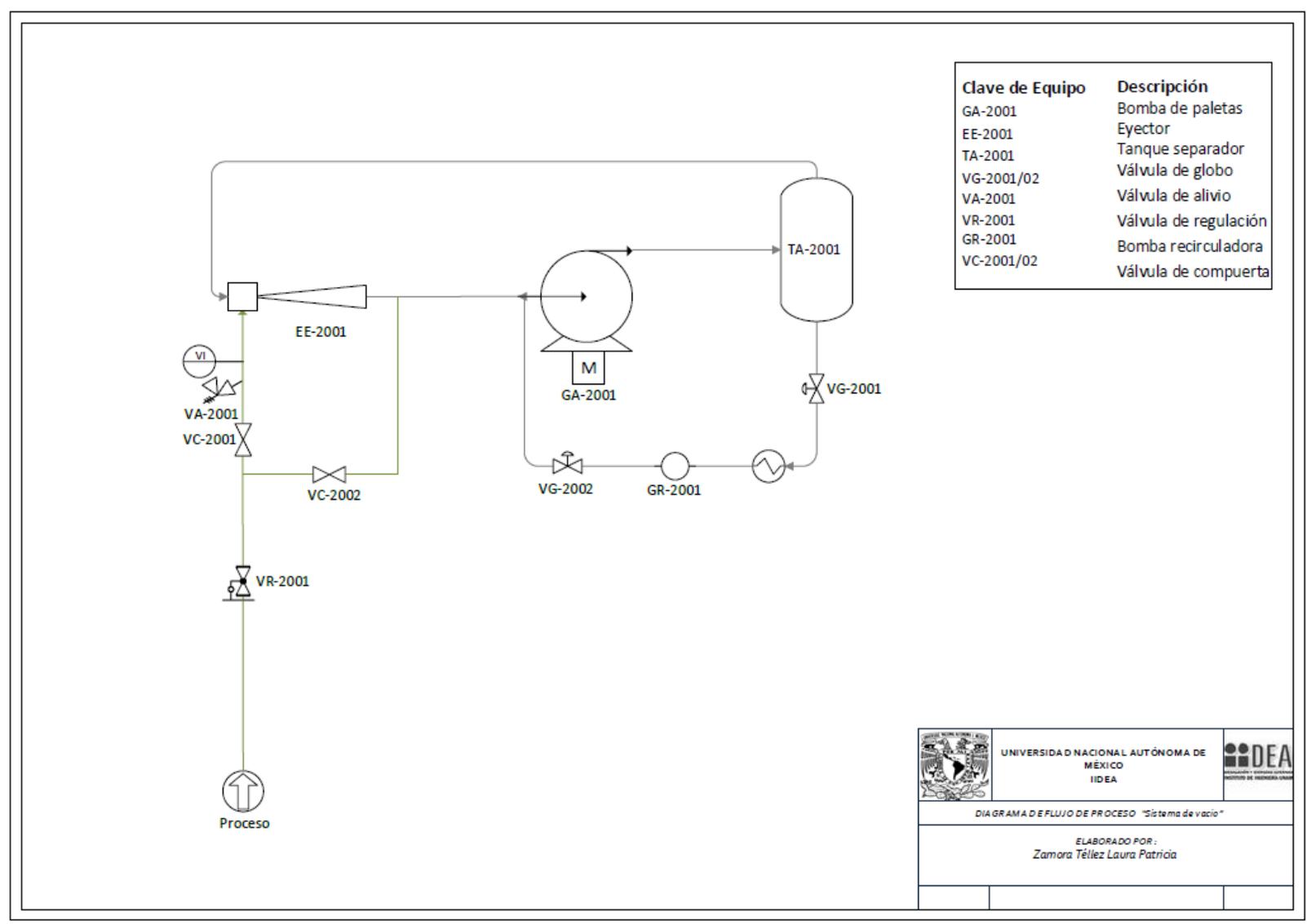


Figura 3.26 Diagrama de tercer propuesta [Elaboración propia]

## **CAPÍTULO 4 Simulación de la Desaladora Modular Geotérmica y de las propuestas de sistemas de vacío**

En este capítulo se habla sobre algunos simuladores comerciales que existen para procesos químicos, se hace la elección del simulador a emplear para el análisis de la DMG y de las propuestas para el sistema de vacío, dando una breve explicación de lo que se realizó en los simuladores y dando algunos resultados de los cálculos principales obtenidos por el simulador.

### **4.1 Simulación**

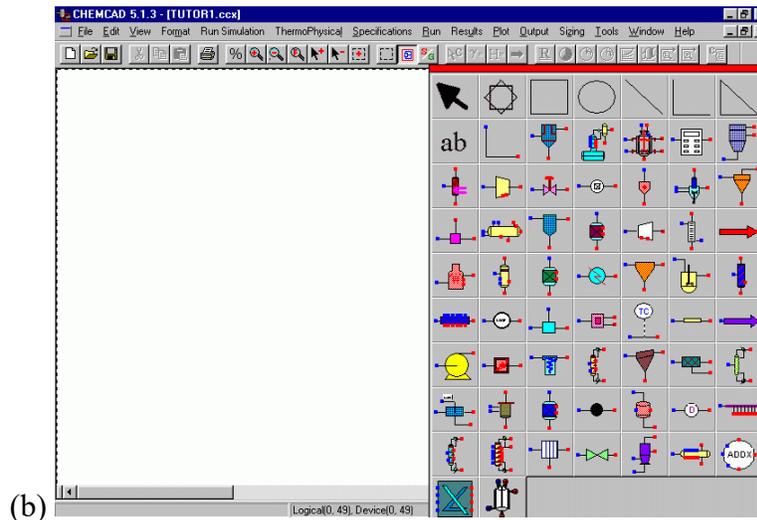
La simulación es una herramienta que se usa en ingeniería para proporcionar datos de forma rápida y eficiente, así como también para la comprobación de cálculos, evaluación de sistemas y equipos sin tener que dañar los equipos y evitar riesgos en los mismos y en el personal. Existen diferentes tipos de simuladores y cada uno cuenta con sus características propias; para el caso de estudio de esta tesis se trata de una simulación, en la que pueden ser utilizados los siguientes simuladores como CHEMCAD, PRO II, ASPEN PLUS y HYSYS. Los cuatro son usados en ingeniería de procesos, con el fin de realizar cálculos de los balances de materia, energía y eventualmente cantidad de movimiento, de un proceso cuya estructura y datos preliminares de los equipos que lo componen, son conocidos.

#### **CHEMCAD**

El programa cuenta con una amplia base de datos de materiales, diversos modelos termodinámicos e interfaces abiertas para MS-Excel y Visual Basic. Es utilizado para estudiar y calcular cargas de calor, requerimientos de energía, equilibrios químicos y de fases, el comportamiento de equipos complejos como torres multi-etapas, balances de masa, dimensionamiento de equipos, entre otros cálculos. En la figura 4.1, se observan el logotipo del software y su hoja de trabajo.



(a) PROCESS SIMULATION SOFTWARE

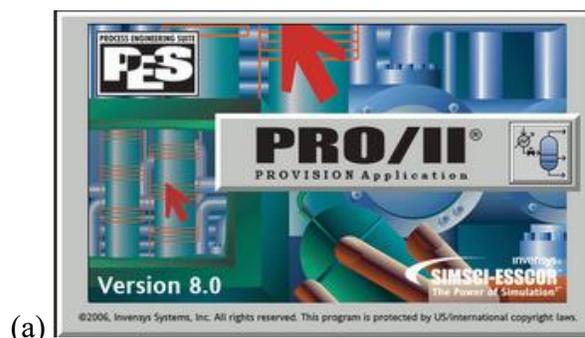


(b) Hoja de trabajo del simulador

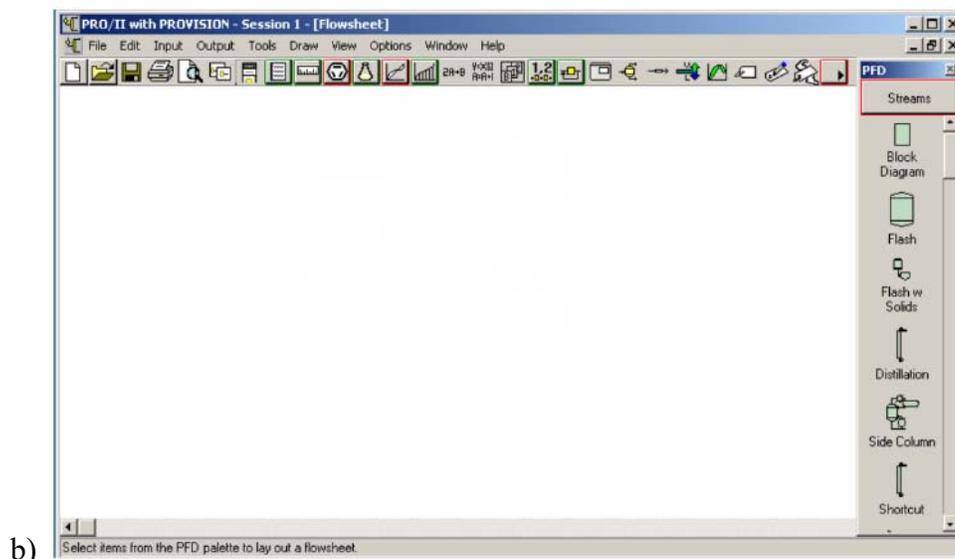
## PRO II

Es una herramienta que permite a los ingenieros realizar lo esencial de su proceso o planta. Tiene el poder y la flexibilidad para simular una amplia gama de procesos en estado estacionario, realiza balances de masa y energía rigurosos para una amplia gama de procesos químicos. Ofrece resultados sólidos y precisos basados en métodos termodinámicos estándar de la industria y los datos de las propiedades físicas.

En la figura 4.1 se observan el logotipo y la hoja de trabajo de PRO II.



(a)



*Figura 4.28 a) Logotipo de PRO II, b) Hoja de trabajo del simulador*

## ASPEN PLUS

AspenTech ha desarrollado muchos programas dentro del marco de la simulación de procesos químicos, entre ellos se destaca el paquete Aspen Engineering Suite, el cual básicamente está desarrollado para aplicaciones del campo de la ingeniería, en general. Entre los diversos programas de este paquete se encuentran programas como Aspen Plus, Aspen Dynamics, Aspen Properties, Aspen OLI, Aspen Process Manual, Aspen Hysys, entre otros.

Aspen Plus es un programa básicamente de simulación de procesos químicos, en el cual además de simulaciones de diagramas de flujo, se puede realizar: estimación de propiedades de compuestos, análisis de sensibilidad de variables de proceso, obtener especificaciones de diseño de proceso, y, síntesis y análisis de procesos químicos, entre otras tareas del diseño de procesos y equipos.

Propiedades de ASPEN:

- Bases de datos de componentes puros y específicos de cualquier aplicación.
- Sistemas de estimación para constantes de propiedades.
- Bases de datos para parámetros de interacción binaria.
- Sistemas de regresión de datos.
- Sistemas para electrolitos.

La figura 4.3, muestra el logotipo y la hoja de trabajo de ASPEN PLUS.

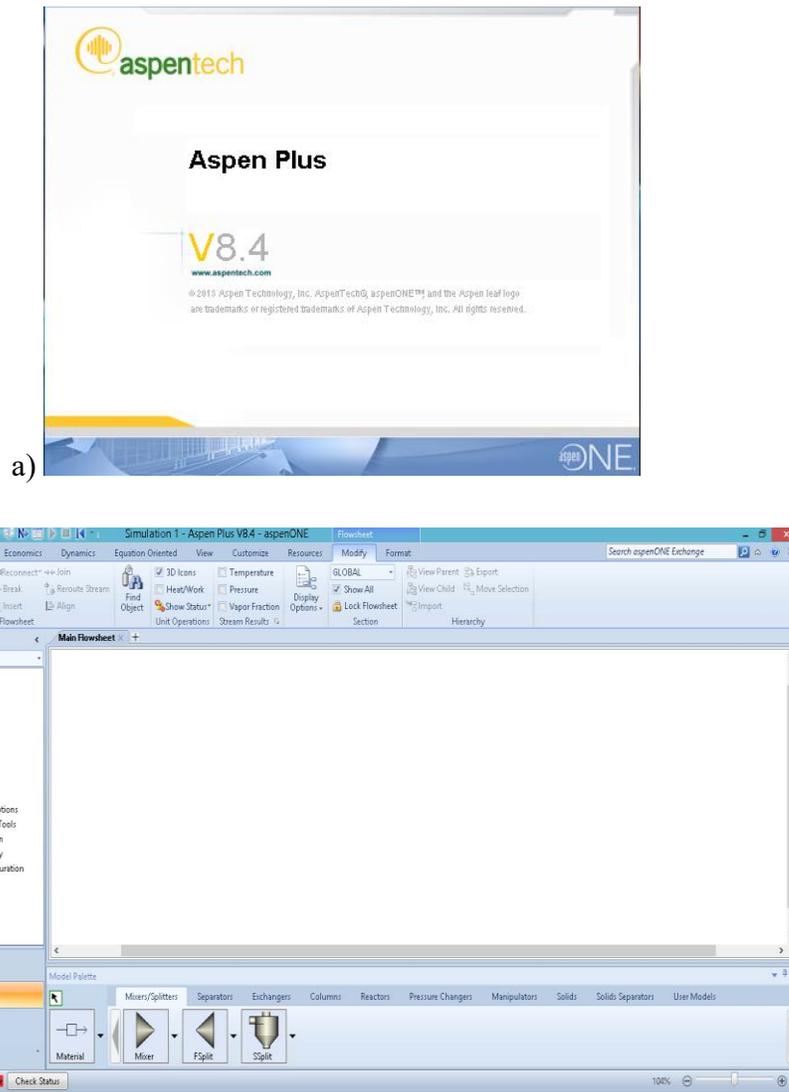


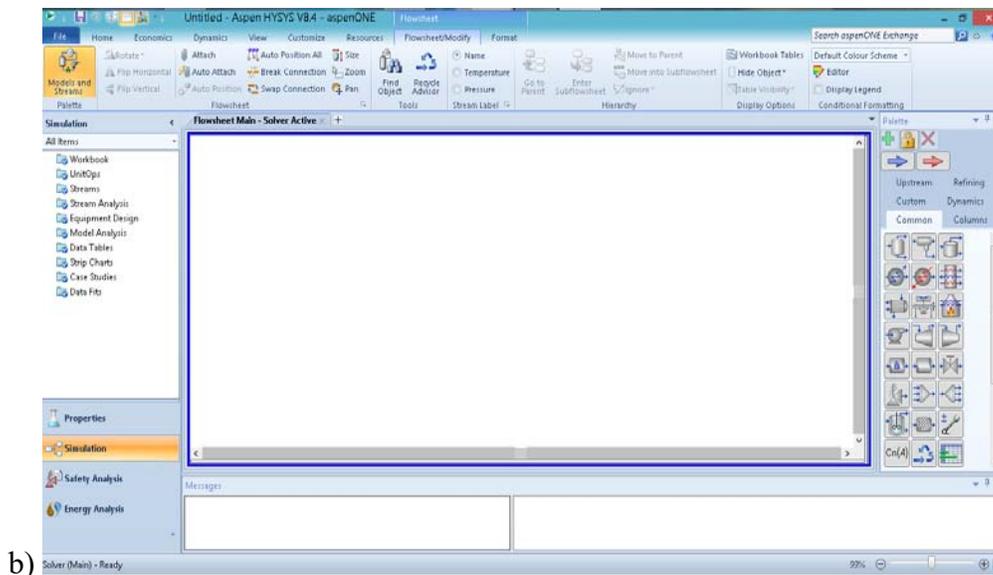
Figura 4.29 a) Logotipo de ASPEN PLUS, b) Hoja de trabajo del simulador

## HYSYS

Como se mencionó anteriormente, éste simulador también pertenece a AspenTech, es un software, utilizado para simular procesos en estado estacionario y dinámico, por ejemplo, procesos químicos, farmacéuticos, alimenticios, entre otros. Posee herramientas que nos permite estimar propiedades físicas, realizar balances de materia y energía, determinar equilibrios líquido-vapor y la simulación de muchos equipos de Ingeniería Química.

Los parámetros de diseño como número de tubos de un intercambiador de calor, diámetro de la carcasa y número de platos de una columna de destilación no puede ser calculado por HYSYS.

En la figura 4.4, se muestra el logotipo y la hoja de trabajo de HYSYS, en la que se puede observar que es muy similar a ASPEN PLUS debido a que pertenecen a la misma empresa (ASPENTECH).



**Figura 4.30 a) Logotipo de HYSYS, b) Hoja de trabajo del simulador**

De los simuladores mencionados anteriormente, ASPEN PLUS fue elegido para realizar la simulación de la DMG, debido a que es el más completo en cuanto a contenido de equipos y sustancias químicas. HYSYS se eligió para simular el sistema de vacío porque contaba con

el eyector. A pesar de que éste último tenía un equipo principal del sistema de vacío, no fue posible simular la DMG con el sistema de vacío porque HYSYS en su base de datos no tenía algunos de los componentes del agua de mar.

## 4.2 Simulación de DMG en ASPEN PLUS

En los paquetes preliminares con los que cuenta ASPEN se encuentra el de electrolitos (figura 4.5), como se ha mencionado anteriormente el agua de mar es una disolución electrolítica, por lo que el paquete termodinámico para electrolitos fue elegido.

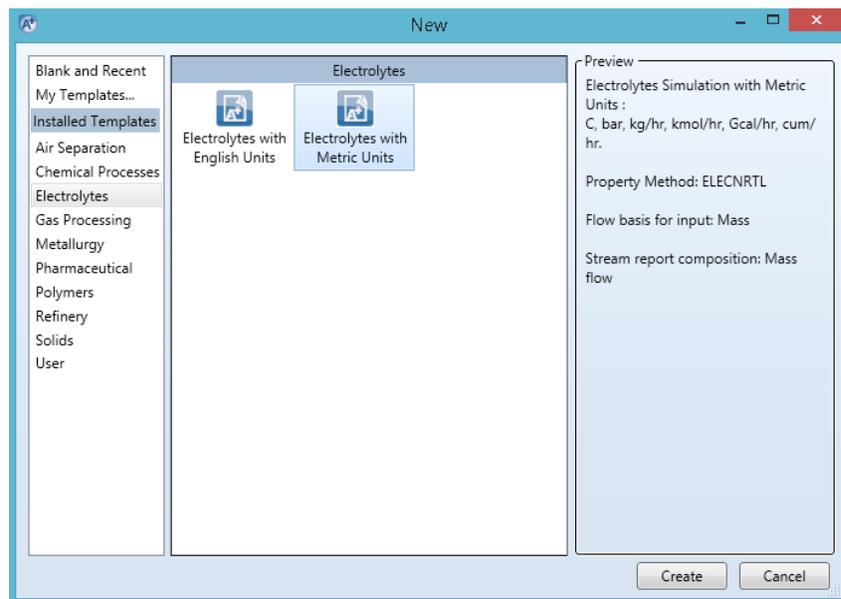
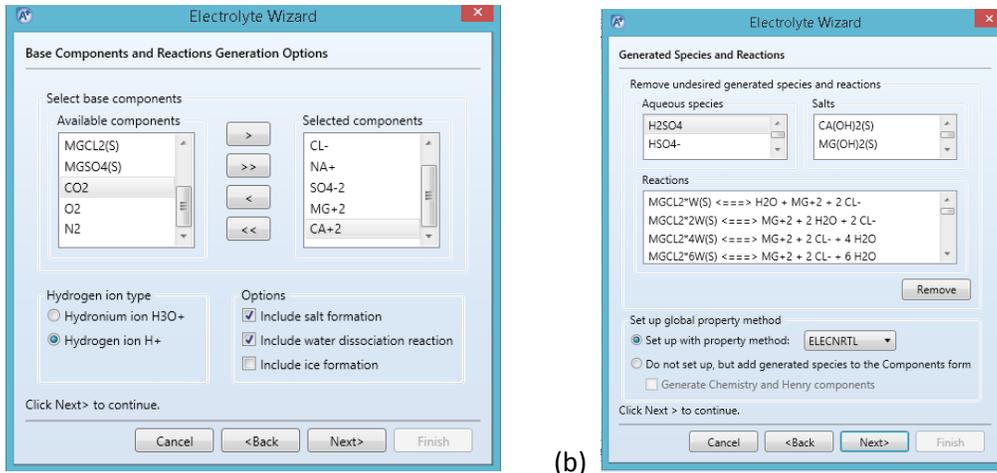


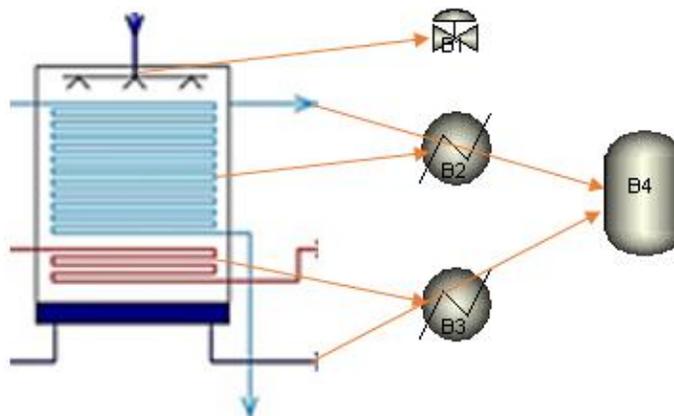
Figura 4.31 Ventana de selección de paquetes de datos

Después de haberse elegido los componentes se llevan a cabo las reacciones de interacción de moléculas, esto es para tener en cuenta los posibles compuestos que se forman, ya que como se sabe el agua separa en iones a las sales. En la figura 4.6 se observan las ventanas donde se generan las reacciones, en la figura (a) se eligieron los componentes que intervinieron, en este caso lo iones y el agua, además de, el tipo ion con el que van a interactuar, ya sea  $H^+$  o  $H_3O^+$ , y los productos que se quiere que se formen. En la figura (b) se eligen las reacciones que se pueden formar con la interacción de los iones elegidos previamente, así como también las especies formadas.



(a) (b)  
**Figura 4.32 Selección de elementos químicos y reacciones participantes en el proceso. a) Se seleccionan los elementos químicos que participan en las reacciones, b) Selección de las reacciones que se llevan a cabo.**

La DMG es un equipo complejo, el cual, para ser simulado fue descompuesto en operaciones unitarias básicas, las cuales fueron: válvulas para llegar a la presión de vacío, intercambiadores de calor por donde pasa el fluido geotérmico y evaporadores flash para separar la mezcla liquido-vapor. La figura 4.7, muestra cómo se realizó esta separación.



**Figura 4.33 Separación de la DMG en sus operaciones unitarias [Elaboración propia]**

En cada equipo fueron insertados los datos ya establecidos, cubriendo los grados de libertad requeridos por cada uno, y se corrió la simulación

Las tablas 4.6 y 4.7 se muestran la lista de equipos y de líneas con sus descripciones para el mejor entendimiento de la figura 4.8, la cual muestra el diagrama de los balances de masa y energía de la DMG, los cuales fueron hechos en ASPEN PLUS.

*Tabla 4.6 Lista de equipos, claves y descripciones para el DFP en ASPEN PLUS [Elaboración propia]*

<b>Equipo</b>	<b>Clave de equipo</b>	<b>Descripción</b>
<b>Condensador</b>	E-01/03/05	Condensar el vapor saliente de T-01/02/03 usando el agua de mar.
<b>Intercambiador de calor</b>	E-02/04/06	Aumentar la fracción de vapor de la mezcla liq-vap de agua de mar.
<b>Tanque flash</b>	T-01/02/03	Separar la fase líquida de la de vapor.
<b>Tanque flash 2</b>	SP-01/02/03	Separar los gases incondensables del destilado.
<b>Válvulas</b>	V-01/02/03/04/05	Llevar a las presiones de vacío requeridas.
<b>Bomba</b>	B-01	Succión del agua de mar.
<b>Bombas</b>	B-02/03/04	Succión del destilado.
<b>Separador</b>	S-01	Dividir el flujo de agua de mar de entrada para cada sección.
<b>Mezclador</b>	M-01	Unir los flujos de destilado
<b>Mezclador</b>	M-02	Unir los flujos de incondensables.

*Tabla 4.7 Lista de líneas [Elaboración propia]*

<b>Fluido</b>	<b>Clave de línea</b>	<b>Color de línea</b>
<b>Agua de mar</b>	AM, C, E	
<b>Flujo geotérmico</b>	G	
<b>Vapor</b>	V	
<b>Condensado</b>	CO, D	
<b>Salmuera</b>	S	
<b>Incondensables</b>	I	

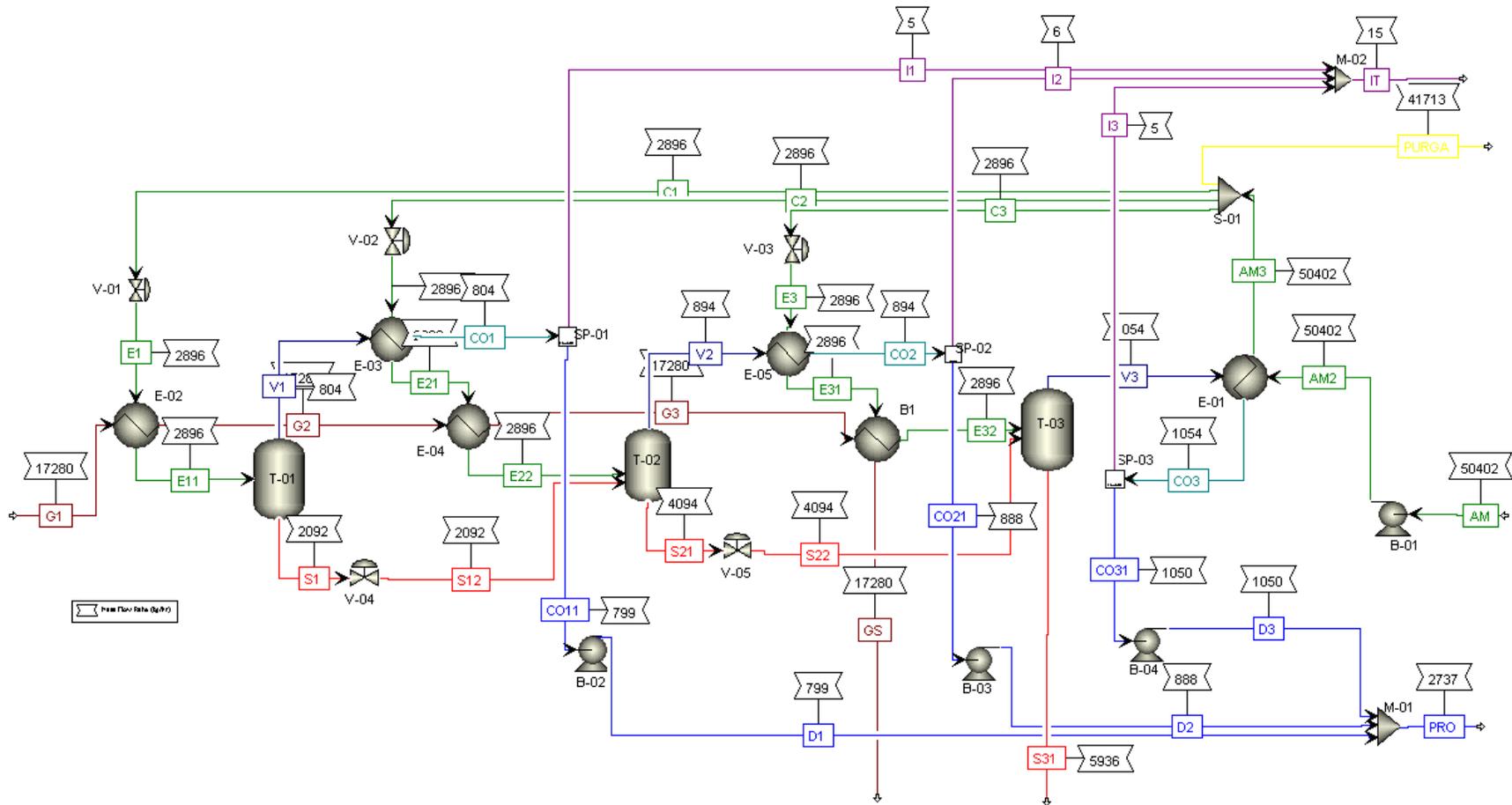


Figura 4.34 DFP de la DMG en ASPEN PLUS [Elaboración propia]

### 4.3 Simulación de propuestas de vacío en HYSYS

Como se mencionó anteriormente, no fue posible realizar en el mismo simulador el sistema de vacío y la DMG. El no haber realizado las simulaciones en el mismo simulador, puede generar una diferencia en los datos obtenidos debido a que en dichos simuladores no fueron consideradas las mismas variables, especialmente en los equipos de cada simulador, además, no se estaría considerando la interacción equipo-equipo.

Las válvulas y los indicadores no fueron contemplados debido a que HYSYS solo cuenta con un tipo de válvula y con ningún tipo de indicador. A pesar de eso serán contemplados en el costo total de cada propuesta.

Para la elección del método termodinámico se tomó en cuenta los gases involucrados y las condiciones a las que se encontraban, por lo tanto, la ecuación de estado que daría un resultado aproximado es Peng-Robinson.

La figura 4.9 muestra una temperatura de 35.4°C, pero esta temperatura está tomada a partir de las corrientes de condensado; ya que en ASPEN no se cuenta con un equipo que separe dos corrientes de gases se optó por hacer la separación en estados de agregación diferentes. Sin embargo, en la DMG la temperatura real a la cual salen los gases es de 51 °C, éste cambio que se presenta en la temperatura es debido a que en la DMG los gases son extraídos cuando se hace la vaporización del agua de mar, sin en cambio en la simulación la extracción de éstos gases se hace después de condensar el agua.

Display: Streams		Format: ELEC_M	
		IT	
▶	Temperature C	35.4	
▶	Pressure bar	0.1	
▶	Vapor Frac	1	
▶	Solid Frac	0	
▶	Mole Flow kmol/hr	0.007	
▶	Mass Flow kg/hr	0.172	
▶	Volume Flow cum/hr	1.815	
▶	Enthalpy Gcal/hr	> -0.001	
▶	Mass Flow kg/hr		
▶	H2O	0.057	
▶	NITRO-01	0.071	
▶	OXYGE-01	0.042	
▶	CARBO-01	0.002	

Figura 4.35 Resultados de los gases incondensables [ASPEN PLUS]

### 4.3.1 Simulación de la primera propuesta

A partir de las corrientes conocidas se simuló el eyector y el compresor para corroborar los datos obtenidos previamente. El eyector presenta una geometría estándar, por lo que se tuvieron que calcular previamente las medidas. La figura 4.10 muestra el diagrama realizado en HYSYS de la primera propuesta del sistema de vacío, la tabla 4.3 la descripción de equipo.

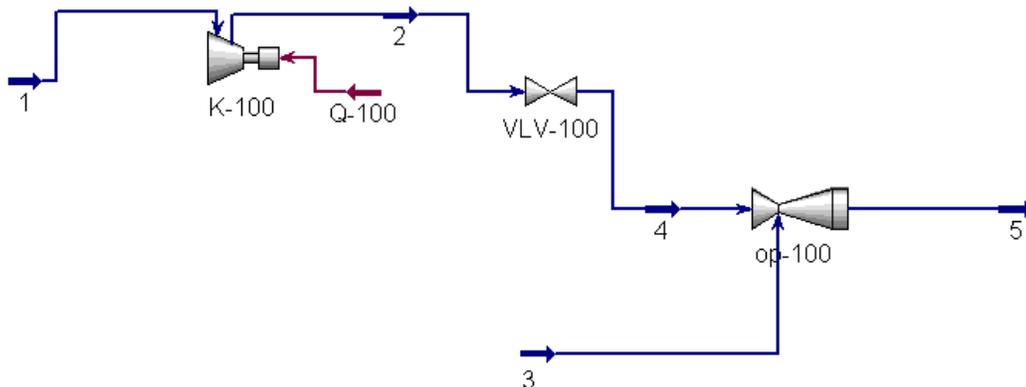


Figura 4.36 Diagrama de la primera propuesta [HYSYS]

**Tabla 4.8 Lista de equipos de la primera propuesta en HYSYS [Elaboración propia]**

Equipo	HYSYS ID	Descripción
<b>Compresor</b>	K-100	Presurizar el flujo de aire a la presión requerida, en la entrada del eyector.
<b>Eyector</b>	Op-100	Generar vacío, dentro de las cámaras.

Name	1	2	3	4	5
Pressure [kPa]	101.3	210	10	200	19.0627
Temperature [C]	35	130.576	52	130.562	130.264
Mass Flow [kg/h]	26352	26352	10.424	26352	26362.4
Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h]	29.96	29.96	0.011538	29.96	29.9715
Vapor / Phase Fraction	1	1	1	1	1
Molar Enthalpy [kJ/kgmole]	279.19	3049.59	-6977.85	3049.59	3045.72
Utility Type	-1 ▾	-1 ▾	-1 ▾	-1 ▾	-1 ▾
Stream Price Factor					
Stream Price Basis	Molar Flow ▾				
Cost Flow [Cost/hr]					

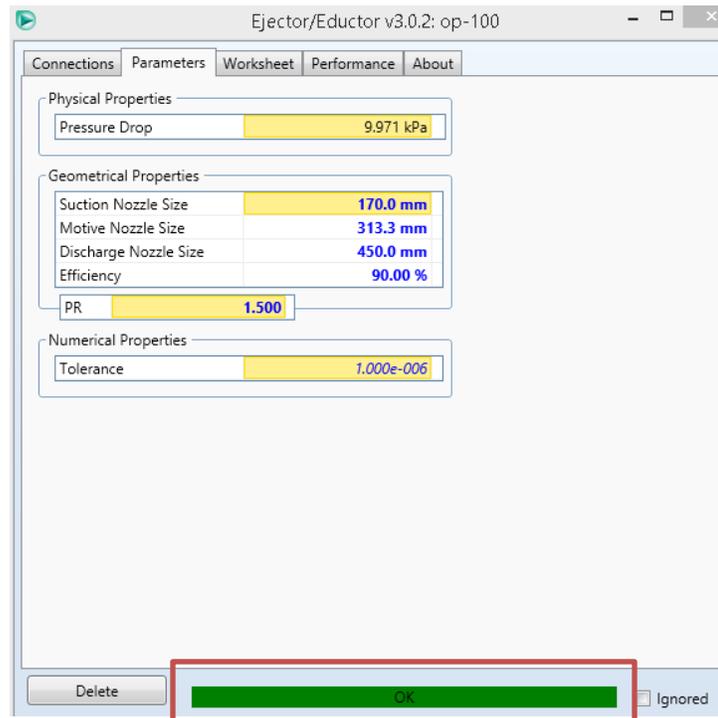
**Figura 4.37 Resultados de las corrientes de la primera propuesta [HYSYS]**

Name	K-100
Compressor Speed [rpm]	119.43
Power [kW]	5.74176
Capacity (act feed vol flow) [ACT_m3/h]	188.599
Adiabatic Efficiency	75
Polytropic Efficiency	77.4009
Compressor Volume [m3]	0
Delta T [C]	95.5763
Delta P [kPa]	108.7
Polytropic Head [m]	7553
Adiabatic Head [m]	7318.71
Dynamic Head [m]	7318.71
Polytropic Fluid Head [kJ/kg]	74.0696
Adiabatic Fluid Head [kJ/kg]	71.772
Dynamic Fluid Head [kJ/kg]	71.772
Polytropic Head Factor	1.00021
Polytropic Exponent	1.59069
Isentropic Exponent	1.40494

**Figura 4.38 Resultados del compresor [HYSYS]**

La figura 4.11 muestra la tabla de balance de materia y energía obtenido de la simulación de la primera propuesta. En la figura 4.12 se observa las características del compresor que es requerido por el eyector.

En la figura 4.13 se muestran las características de diseño del eyector. En el caso de que las dimensiones del eyector fueran incorrectas el recuadro verde estaría en amarillo y diría “Not Solved”, por lo que se puede asumir que los cálculos realizados y que serán mostrados en los anexos, son correctos.



*Figura 4.39 Datos del eyector [HYSYS]*

### 4.3.2 Simulación de la segunda propuesta

La segunda propuesta como se sabe, consta de una bomba de paletas, pero debido a las limitaciones del simulador, no se cuenta como tal con bombas de vacío, así que se contempló con un compresor ya que el funcionamiento de la bomba es similar a éste, al cual se le dieron las características de la bomba. La figura 4.14 muestra el diagrama de la propuesta 2.

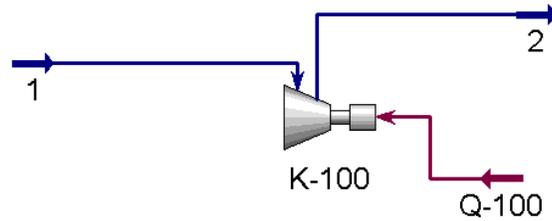


Figura 4.40 Diagrama de la segunda propuesta [HYSYS]

La tabla 4.4, muestra la descripción de los equipos mostrados en la figura 4.14.

Tabla 4.9 Lista de equipos de la segunda propuesta en HYSYS [Elaboración propia]

Equipo	HYSYS ID	Descripción
Compresor	K-100	Realizar la función de la bomba de vacío: succión de gases incondensables.

La figura 4.15, muestra las características de las corrientes de la bomba. Para la simulación fueron insertados los datos de: flujo másico, temperatura y presión de la corriente 1 y solo la presión de la corriente de salida.

Name	1	2
Pressure [kPa]	10	101.325
Temperature [C]	51	428.437
Mass Flow [kg/h]	10.424	10.424
Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h]	0.011538	0.011538
Vapor / Phase Fraction	1	1
Molar Enthalpy [kJ/kgmole]	-7007.38	4641.89
Utility Type	-1 ▾	-1 ▾
Stream Price Factor		
Stream Price Basis	Molar Flow ▾	Molar Flow ▾
Cost Flow [Cost/hr]		

Figura 4.41 Resultados de las corrientes de la segunda propuesta [HYSYS]

La figura 4.16. muestra la tabla de los datos calculados del compresor.

Name	K-100
Compressor Speed [rpm]	
Power [kW]	4.26116
Capacity (act feed vol flow) [ACT_m3/h]	94.6357
Adiabatic Efficiency	45
Polytropic Efficiency	35.8107
Compressor Volume [m3]	0
Delta T [C]	1309.53
Delta P [kPa]	91.325
Polytropic Head [m]	53738.9
Adiabatic Head [m]	30012.7
Dynamic Head [m]	53738.9
Polytropic Fluid Head [kJ/kg]	526.998

Figura 4.42 Resultados de la bomba de vacío [HYSYS]

### 4.3.3 Simulación de la tercer propuesta

La tercera propuesta, consta de un sistema híbrido (sistema compuesto), los equipos principales son: una bomba de anillo líquido y un eyector, esto para que se genere una mayor succión. En la figura 4.17 se muestra el diagrama de la tercera propuesta, la bomba P-100 encerrada en color rojo, muestra una ligera línea amarilla, esto significa que no fue resuelta de forma adecuada debido a que no es una bomba de anillo líquido como es necesario. Las descripciones de los equipos usados en ésta propuesta son mostradas en la tabla 4.5.

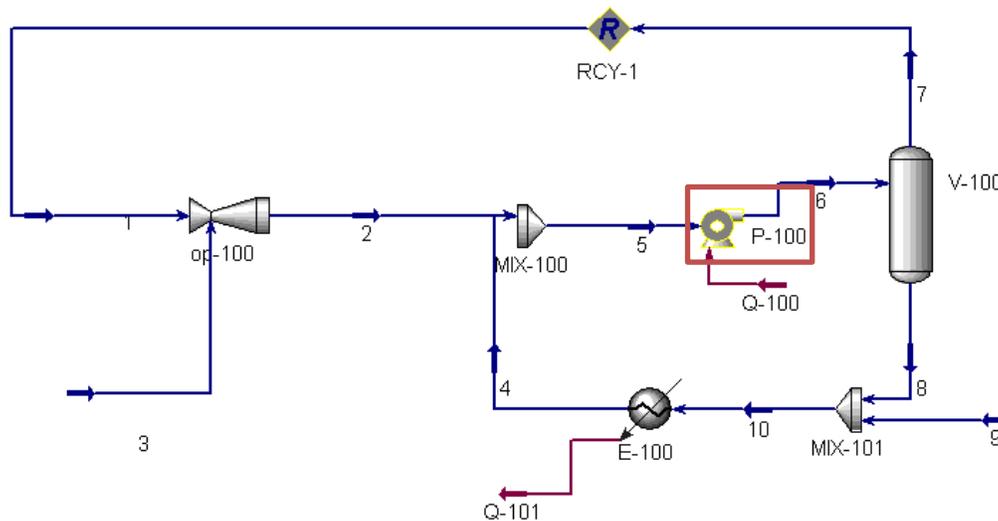


Figura 4.43 Diagrama de la tercera propuesta [HYSYS]

**Tabla 4.10 Lista de equipos de la tercera propuesta en HYSYS [Elaboración propia]**

Equipo	HYSYS ID	Descripción
<b>Bomba</b>	P-100	Realiza una mayor succión en el sistema, así como alimentar al eyector con los gases liberados
<b>Eyector</b>	Op-100	Genera vacío dentro de las cámaras, con la ayuda de la bomba.
<b>Tanque separador</b>	V-100	Separar el líquido del gas
<b>Enfriador</b>	E-100	Enfriar el agua de recirculación.

La figura 4.18 muestra las condiciones de operación de cada corriente en la simulación del sistema híbrido.

Name	1	3	4	2	5	6	7	8	10	9
Pressure [kPa]	13.9967	10	151.987	10.0005	10.0005	13.91	13.91	13.91	13.91	101.325
Temperature [C]	15.8251	52	15	16.5563	13.9585	15.7735	15.7735	15.7735	15.7889	35
Mass Flow [kg/h]	457.885	10.424	5987.92	468.309	6456.23	6456.23	469.31	5986.92	5987.92	1.00062
Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h]	0.503173	0.011538	6	0.514711	6.51471	6.51471	0.515707	5.999	6	0.00100264
Vapor / Phase Fraction	1	1	0	1	0.0494016	0.047723	1	0	0	0
Molar Enthalpy [kJ/kgmole]	-36779.1	-6977.85	-286997	-36148.6	-275066	-275005	-36872	-286939	-286938	-285444
Utility Type	-1 ▾	-1 ▾	-1 ▾	-1 ▾	-1 ▾	-1 ▾	-1 ▾	-1 ▾	-1 ▾	-1 ▾
Stream Price Factor										
Stream Price Basis	Molar Flow ▾									

**Figura 4.44 Resultados de las corrientes de la tercera propuesta [HYSYS]**

Al igual que en la primera propuesta, ésta cuenta con un eyector, el cual es de las mismas características geométricas, solo que con distintas condiciones de entrada. En la figura 4.19, se muestran los resultados de la bomba de vacío.

Name	K-100
Compressor Speed [rpm]	
Power [kW]	2081.87
Capacity (act feed vol flow) [ACT_m3/h]	144000
Adiabatic Efficiency	75
Polytropic Efficiency	80.2604
Compressor Volume [m3]	0
Delta T [C]	278.675
Delta P [kPa]	85.1365
Polytropic Head [m]	23267.6
Adiabatic Head [m]	21742.6
Dynamic Head [m]	23267.6
Polytropic Fluid Head [kJ/kg]	228.177
Adiabatic Fluid Head [kJ/kg]	213.222
Dynamic Fluid Head [kJ/kg]	228.177
Polytropic Head Factor	1.00175

*Figura 4.45 Resultados de la bomba de vacío de la tercera propuesta [HYSYS]*

## Conclusión

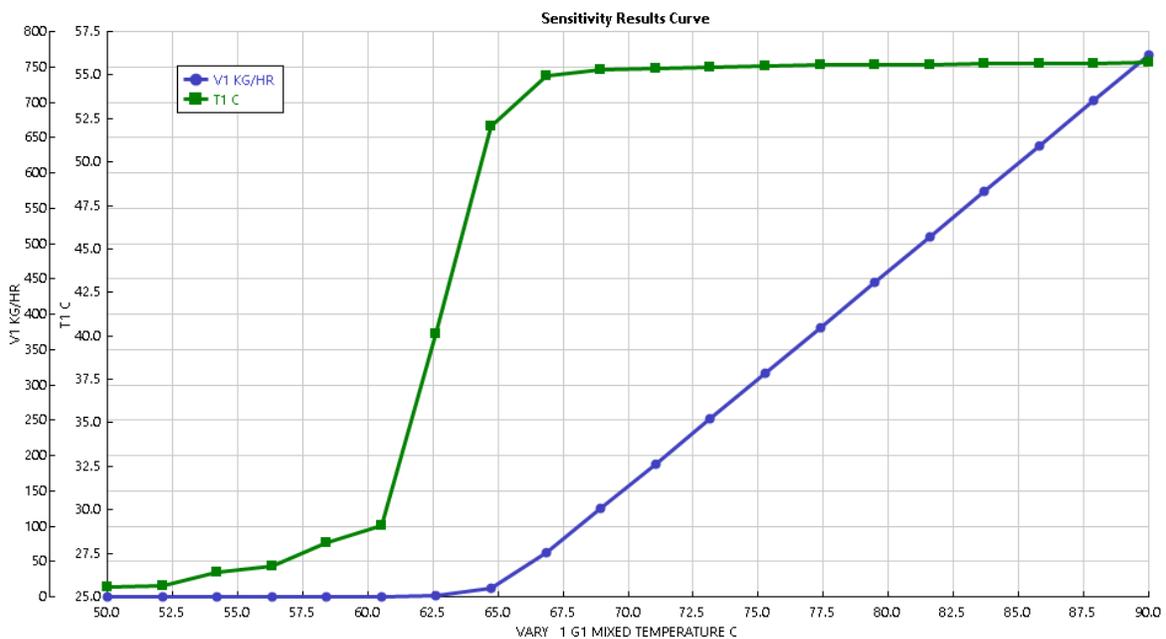
Los simuladores han sido de mucha ayuda, para facilitar cálculos, y disminuir el tiempo de obtención de éstos, pero también se debe tener en cuenta que estos pueden tener errores debido a los criterios considerados en los datos ingresados por la persona que los utilice, así como se muestra en los resultados de algunos de los equipos, quien los maneje debe ser consciente de los resultados y poder tomar decisiones de si el simulador dio resultados coherentes.

## CAPÍTULO 5 Resultados

En este capítulo se muestran la comparación de los sistemas, desde una vista técnica y económica, así como un breve análisis de la desaladora.

### 5.1 Análisis DMG

En la DMG se tiene una variable limitante, la temperatura del fluido geotérmico, la cual oscila entre 50 y 90 °C. La figura 5.1 muestra cómo se comportaría el flujo y la temperatura del vapor de la primera cámara (0.016 MPa).



**Figura 5.46 Comportamiento de la temperatura y el flujo de vapor en la primera cámara. a) Temperatura (verde) b) Flujo másico de vapor (azul) [Elaboración propia]**

Se observa que, si la temperatura del fluido geotérmico desciende a 65 °C, no se tendría producto y por ende al afectarse la primera cámara se afectarían las otras dos. Debido a que la temperatura no se puede controlar y puede ser posible que disminuya, la forma de solucionar esto es disminuir la presión de vacío. Lo cual se tendría que tener cuidado en no disminuirla demasiado, ya que como se sabe al disminuir la presión se disminuye la temperatura de ebullición y eso ayudaría a obtener destilado, además se corre el riesgo de llegar al punto triple del agua.

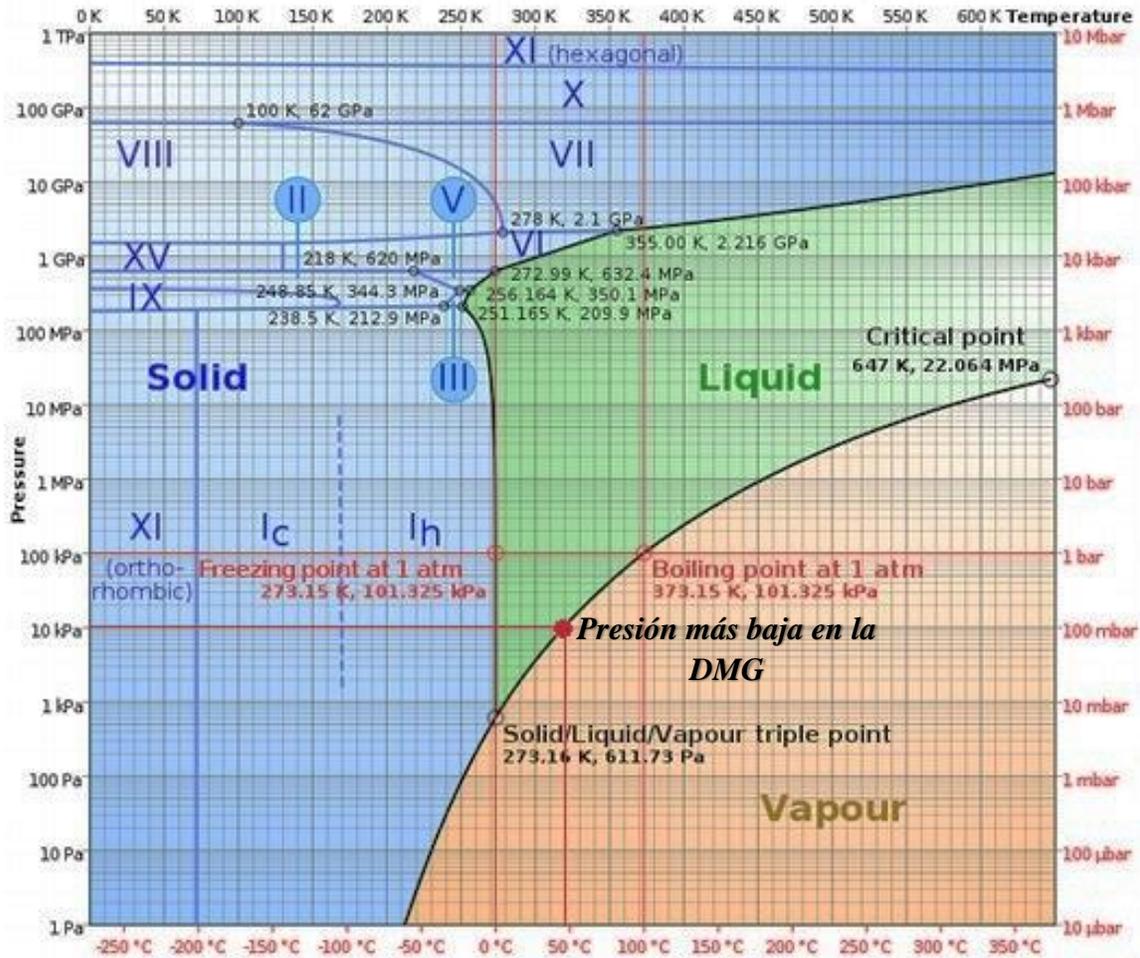


Figura 5.47 Diagrama de fases del agua [Elaboración propia]

En la figura 5.2 se puede observar que tan cerca se encuentran las condiciones del sistema (Punto rojo) del punto triple, es por ello que no se debe disminuir demasiado la presión de operación del sistema.

## 5.2 Comparación técnica y económica de las propuestas

Las tablas 5.1, 5.2 y 5.3 muestran el costo de los equipos de cada propuesta, sin tomar en cuenta la cantidad de equipo y accesorios que se necesitaría de cada uno.

### Propuesta 1

*Tabla 5.11 Costo de equipos de la primera propuesta [Diferentes fuentes]*

<b>Equipo</b>	<b>Costo MN</b>
<b>Eyector</b>	5,199.00
<b>Compresor</b>	43.145.00
<b>Vacuómetro</b>	300.00
<b>Válvula</b>	394.00
<b>Conexiones</b>	2,650.00
<b>Regulador de vacío con set eléctrico</b>	3,200.00

### Propuesta 2

*Tabla 5.12 Costo de equipos de la segunda propuesta [Diferentes fuentes]*

<b>Equipo</b>	<b>Costo MN</b>
<b>Bomba 5 hp</b>	63,200.00
<b>Trampa para líquidos (filtro)</b>	4,290.00
<b>Vacuómetro</b>	300.00
<b>Conexiones</b>	2,650.00
<b>Regulador de vacío con set eléctrico</b>	3,200.00

### Propuesta 3

*Tabla 5.13 Costo de equipos de la tercera propuesta [Diferentes fuentes]*

<b>Equipo</b>	<b>Costo MN</b>
<b>Eyector</b>	5,199.00
<b>Bomba de anillo líquido</b>	275,000.00
<b>Vacuómetro</b>	300.00
<b>Conexiones</b>	2,650.00
<b>Regulador de vacío con set eléctrico</b>	3,200.00

La fuente de la energía térmica de la DMG es el fluido geotérmico, éste se encuentra disponible las 24 horas del día los 375 días del año, por lo que la DMG puede trabajar ese tiempo. El costo operativo eléctrico se obtuvo a partir de la tarifa eléctrica en baja california el cual es: 1.574 \$/kwh.

**Tabla 5.14 Comparativa técnica y económica de las propuestas [Elaboración propia]**

<b>Propuesta</b>	<b>Primera propuesta (Eyector)</b>	<b>Segunda propuesta (Bomba)</b>	<b>Tercera propuesta (Hibrido)</b>
<b>Eficiencia</b>	20 %	40 %	65 %
<b>Tiempo de succión</b>	135 s	103 s	135 s
<b>Presión final alcanzable (bar)</b>	0.1	$1 \times 10^{-2}$	$1 \times 10^{-4}$
<b>Costo total de la propuesta (equipos)</b>	\$ 61,888.00	\$ 80,640.00	\$ 293,349.00
<b>Energía eléctrica total (kW)</b>	5.742	4.261	5.966
<b>Gasto mensual de energía MN</b>	\$ 6,507.29	\$ 4,828.90	\$ 6,761.14

### 5.3 Elección de propuesta

En la tabla 5.4 se presentan las características y costos de los tres sistemas, se observa que el más económico es la primera propuesta, pero con la desventaja de presentar la menor eficiencia, por otro lado, la propuesta tres alcanza una mayor presión de vacío, pero es el que requiere una mayor inversión, adicionalmente a los equipos mencionados de la tercera propuesta se requeriría de un eyector de arranque. La propuesta 2 es la más adecuada ya que tiene la mayor eficiencia, la presión de vacío es adecuada ya que alcanza la presión requerida y la puede disminuir un poco más, además el costo total no es muy elevado.

#### 5.3.1 Descripción detallada de la propuesta elegida

En ésta sección se presenta la propuesta elegida en la cual se dio una descripción preliminar del equipo e instrumentación necesaria. Dicha propuesta consta de: una bomba de paletas de



5 HP, la cual estará conectada a cada una de las cámaras mediante una tubería de 1 ½ " de diámetro de acero al carbón ASTM A53-B, para mantener las diferentes presiones en las cámaras se conectarán reguladores de presión de acero inoxidable de 1 ½ " con un set regulador eléctrico automático, además, la línea tendrá un filtro separador de acero inoxidable con conexión al tanque de recuperación de condensados.

La figura 5.3 muestra el diagrama completo de la DMG con el sistema de vacío propuesto.

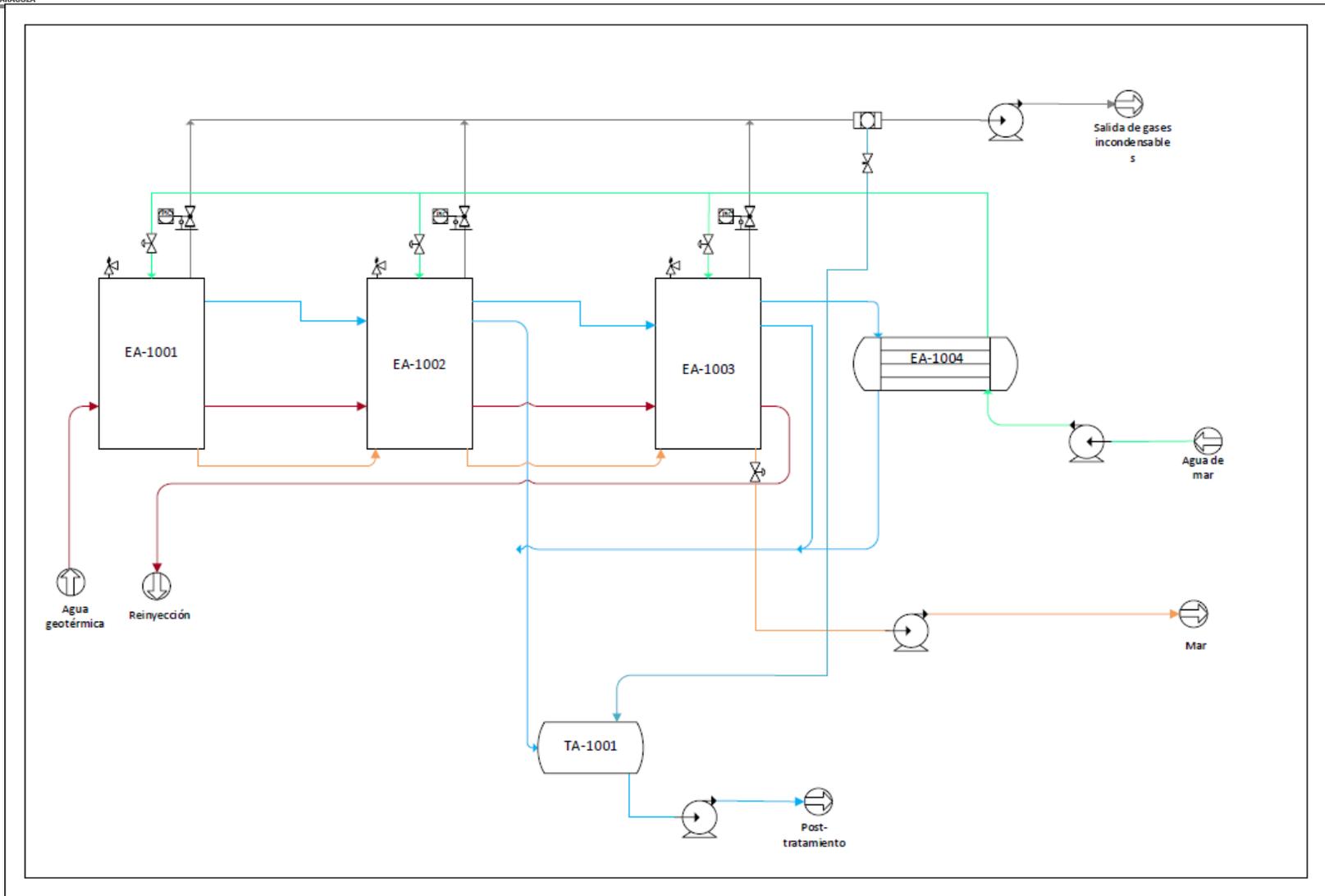


Figura 5.48 Diagrama del sistema de vacío propuesto con la DMG [Elaboración propia]

## 6 Conclusiones

La Desaladora Modular Geotérmica, como se puede observar a lo largo de este trabajo, es un sistema que tiene mucho que ofrecer, ya que usa energía geotérmica como medio de calentamiento, la cual se encuentra en muchos lugares de nuestro país, sin embargo, no se ha aprovechado del todo éste recurso, ya sea por mala planeación de los proyectos o debido a cuestiones políticas.

Los sistemas de vacío son de mucha ayuda en todos aquellos sistemas donde se requiere mover objetos, disminuir la presión y por ende la temperatura, así como también extraer gases, como lo es en las desaladoras de Compresión Mecánica de Vapor (MVC), Destilación por Evaporación Súbita Flash (MSF), Destilación Múltiple Efecto (MED) y para el caso de la DMG. Sin embargo, se necesitaba un sistema que fuera adecuado para ella, debido a las ubicaciones aisladas que esta puede tener, por lo que no es posible usar vapor para los eyectores como lo hacen las demás desaladoras.

Cada una de las propuestas que fueron presentadas cumplen con los requerimientos del rango de presión en la DMG, debido a que se buscaba el sistema con mayor eficiencia y menor costo, por lo cual, de los sistemas presentados se optó la propuesta dos, a pesar de no mostrar la mayor eficiencia, fue la presenta un equilibrio entre eficiencia y costo entre las tres propuestas. Además, que en ésta propuesta el tiempo de succión de los gases es un 24% menor a las otras dos, lo cual implicaría un gasto aproximado del 29% menor a las otras. Adicionalmente, si la DMG requiriera de menor presión, la propuesta 2 se le podría acoplar equipos que pudieran ser necesarios y ésta propuesta ocupa un menor espacio físico debido a que no requiere muchos equipos.

La DMG al ser un equipo complejo se tuvo que buscar la forma de simularlo en ASPEN debido a que éste simulador no tiene estos equipos al igual que HYSYS no contenía todos equipos de vacío por lo que se buscó una forma similar de hacerlos, a pesar de que el eyector si se encontraba disponible no permitía mucha manipulación de algunos datos.

## 7 Trabajo a futuro

Debido a que los datos presentados en el desarrollo del presente trabajo solo son teóricos sería necesario realizar las pruebas a nivel piloto en el prototipo de la DMG con el que cuenta IIDEA para comprobar dichos datos y posteriormente escalarlo a nivel industrial o buscar algún simulador el cual permita realizar la simulación tanto de la DMG como del sistema de vacío de forma dinámica para obtener datos más precisos.

## 8 Bibliografía

AGM (2015), Recuperado: 14 de marzo del 2015 de Asociación Geotérmica Mexicana Geotermia.org.mx

AspenTech (1999), *Modeling Processes with electrolytes*, Estados Unidos.

Chang R, Colledge W., (2002), *Química*, Ed. McGraw-Hill, séptima edición, Colombia.

D. J. Hucknall (2003), *Vacuum Technology: Calculations in Chemistry*, Ed. RS.C, Cambridge, pág. 233

Dr. Iriarte Le Bert Gerardo, (2011) *Evaluación de la Energía Geotérmica en México*.

García Martínez Fermín, Tesis para obtener grado: Ing. Mecánico, *Comparativa energética de sistemas térmicos de desalación con energía geotérmica de baja entalpia*, 2014

García Torres Fernando, Tesis para obtener grado: Ing. Mecánico. *Análisis del sistema de vacío de una planta de desalación M.E.D. con geotermia de baja entalpia*, 2013.

González González Miguel Alejandro, (2009) *Geotermia como alternativa energética en México*.

Himmelblau David M (2001), *Principios básicos de cálculos en Ingeniería Química*, Ed. Prentice-Hall Hispanoamérica, Sexta Edición, pág. 748.

IGA (2015), Recuperado: 14 de marzo del 2015 de International Geothermal Association, Geotermia.org.mx

IGEO (2004), Recuperado: 12 de marzo del 2015 de Instituto de Geociencias Universidad de Madrid, <http://www.igeo.ucm-csic.es/investigacion/lineas-investigacion/dinamica-terrestre-observacion-tierra>

IIE (2000), Recuperado: 16 de marzo del 2015 de Gerencia de Geotermia, <http://www.ineel.mx/boletin032008/tendencias.pdf>

Inmateinsa. Equipos de vacío. Eyectores. Recuperado el 27 de mayo del 2015 de Sistemas de vacío, <http://www.inmateinsa.com/pdf/brochure.pdf>

Levenspiel, O., (1993), *Engineering Flow and Heat Exchange*, Ed. Reverté, Barcelona.

Lindal B., (1973). *Industrial and other applications of geothermal energy. geothermal energy*, volumen 12, H. C. H. Armstead, Earth Science, UNESCO, Paris.

Ludwig, Ernest E., (1999). *Applied Process Design for Chemical and Petrochemical Plants*, volumen 1, 3<sup>er</sup> Edición, Gulf Professional Publishing, Estados Unidos.

Ludwig, Ernest E., (1999). *Applied Process Design for Chemical and Petrochemical Plants*, volumen 3, 3<sup>er</sup> Edición, Gulf Professional Publishing, Estados Unidos.

Mathioulakis E., Belessiotis V., Delyannis E., (2007) *Desalination by using alternative energy: Review and state-of-the-art*, Revista ELSEVIER, recuperado de: ScienceDirect

MetAs, (2002), *Tipos de presión y vacío*, Revista de metrología, núm. 03

Orche Enrique, (2010) *La energía geotérmica*.

Peñate Suárez Baltasar (2011), *Una visión global de las tecnologías de desalación y de su margen de ahorro energético*, Canarias.

REVE (2012), Recuperado el 28 de mayo del 2015 de Revista Eólica y del Vehículo Eléctrico, <http://www.evwind.com/2012/11/14/la-energia-geotermica-en-mexico/>

Salmerón Vergara Juan Alberto, Tesis para obtener grado de: M. I., *Análisis y diseño de una desaladora de agua de mar de múltiple efecto con recurso geotérmico de baja entalpía MED-LE*, 2012.

Talavera Laura, Farías Mario, (2008.) *El vacío y sus aplicaciones*, Ed. S.L. Fondo de Cultura, España.

Tecnovac. (2012). Curso de vacío. Recuperado el 27 de mayo del 2015, de Tecnología de vacío, <http://www.uhv.es/sites/milka/doc/Curso%20de%20vacio%20Tecnovac.pdf>

Wachtel Alan, (2010), *Geothermal Energy*, Ed. Chelsea Clubhouse.

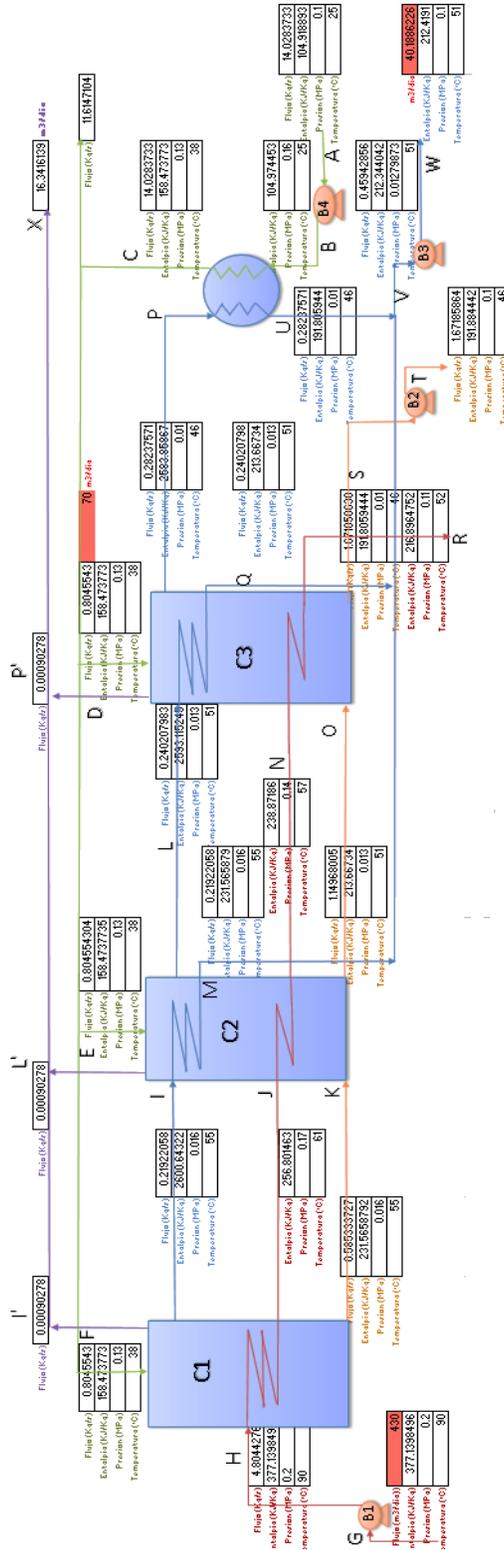
Walas, Stanley M., (1990). *Chemical Process Equipment Selection and Design*, Butterworth-Heinemann Series in Chemical Engineering, Estados Unidos.

Watanawanavet, Somsak, Tesis para obtener grado: Maestro en Ciencias. *Optimization of a high-efficiency jet ejector by computational fluids dynamic software*, 2005.

Zúñiga, J. (2004). *La desalinización: una opción a tener en cuenta*, Revista iberoamericana de automática e informática industrial, núm. 26 artículo 04.

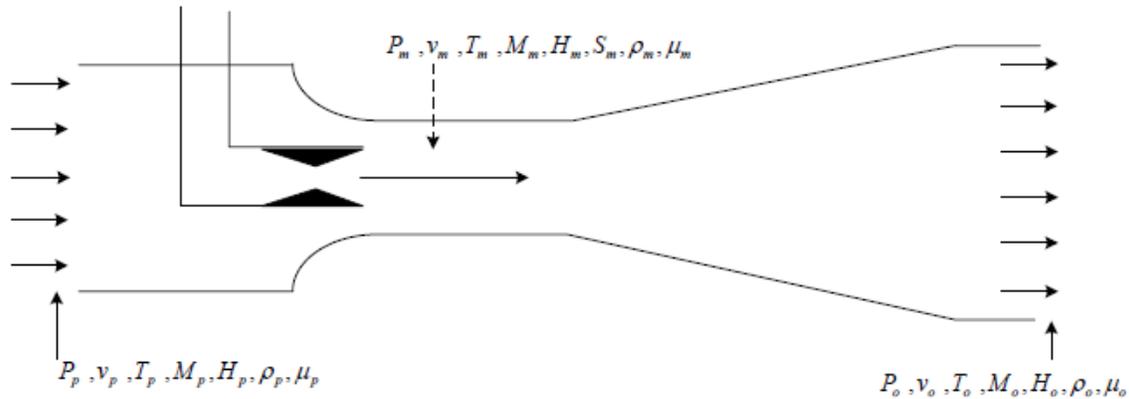
# 9 Anexos

## ANEXO A BALANCE DE MASA Y ENERGIA



## ANEXO BCÁLCULO DE LOS EQUIPOS DE LA PROPUESTA 1

Para el diseño del eyector se tiene las siguientes consideraciones:



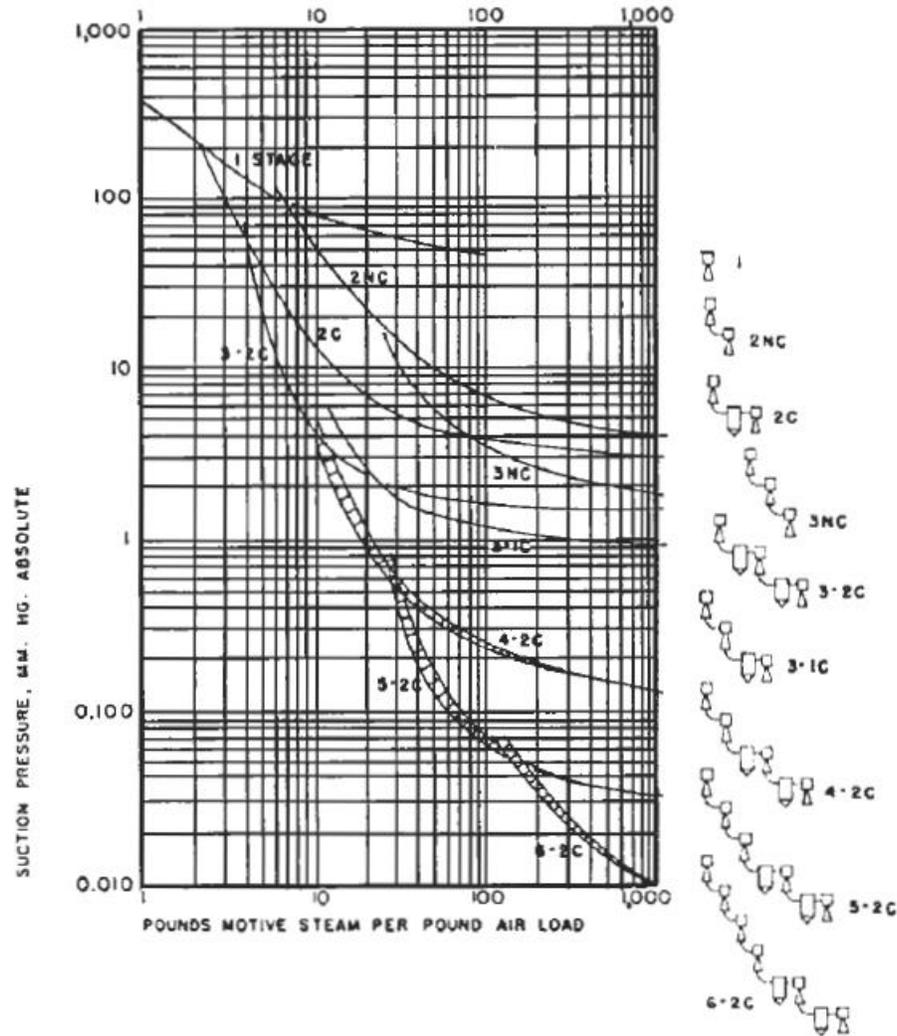
### Parámetros de flujo de un eyector

$$\text{Razón de compresibilidad} = \frac{P_o}{P_p} \quad (1)$$

$$\text{Razón de arrastre} = \text{Razón de flujo másico} = \frac{M_m}{M_p} \quad (2)$$

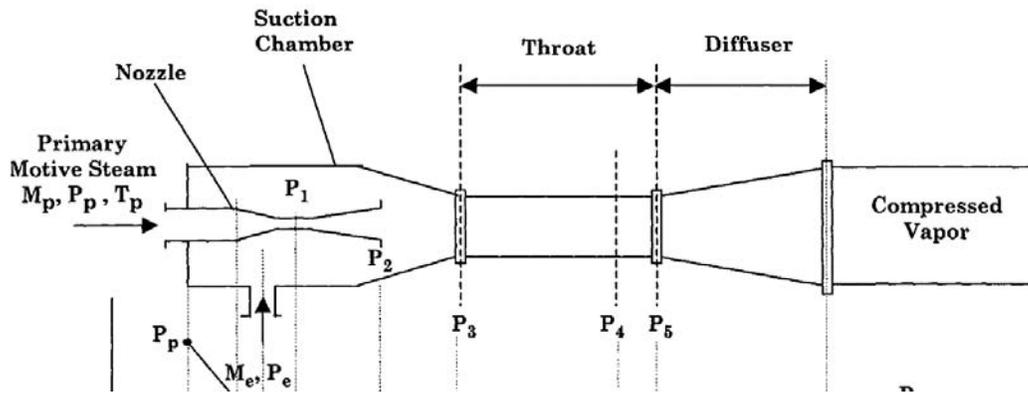
Los eyectores diseñados con  $P_o/P_p > 2$  trabajarán a flujo crítico (sónico) a través de la contracción del difusor. Si  $P_o/P_p < 2$  el flujo será subcrítico (subsónico), lo que permite un mejor control de la capacidad. Los eyectores a flujo crítico se usan en la mayoría de los servicios para producir vacío, para minimizar el número de etapas.  $P_o/P_p$  debe mantenerse entre 6 y 10 para optimizar la eficiencia (PDVSA, 1997).

Con la siguiente correlación se puede obtener el flujo de aire:



*Requerimientos de flujo de aire para diferentes etapas de eyección*

De acuerdo a las consideraciones anteriores se obtuvieron los resultados mostrados en las siguientes tablas.



*Puntos de flujo del eyector*

Punto	P	e	1	2	3	4	5	C
Flujo masa [kg/s]	0.06	0.003	0.1	0.06000	0.06300	0.06300	0.06300	0.06300
Presión [Mpa]	0.3	0.0100	0.148610	0.0095	0.0095	0.0095	0.0682	0.0801
Temperatura [°C]	95.6	51	35	-136	-109.88	-109.88	77.25	80.60
Entalpia [kJ/kg]	369.4	401	309	157	150.04	150.04	169.43	169.79
Entropía [kJ/kgK]	6.762	8.101	6.78	6.90	---	---	---	---
Densidad [kg/m3]	2.832	0.098	1.68	0.21	0.1978	0.1978	0.1978	0.1978
Cv [kJ/kgK]	0.7234	0.92908	0.719	0.716	0.7258	0.7258	0.7258	0.7217
Cp [kJ/kgK]	1.0130	1.26684	1.008	1.003	1.0161	1.0161	1.0161	1.0095
R [kJ/kgK]	0.2896	0.33776	0.289	0.288	0.2904	0.2904	0.2904	0.2878
k	1.40	1.36	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40
Número de Mach	----	0.275	1	2.751	2.509	2.509	0.5122	0.4609
Velocidad de fluido [m/s]		106	353	648	646	646	193	174
	1	Ae/A2	D1 [cm]	A2/A1	A3/A1		91.03814495	
Relación de área		0.43	1.132	3.3313	6.8796		0.000692018	
Diámetro [cm]	2.96	1.35	1.13	2.07	2.97	2.97	2.97	6.98

## COMPRESOR

Para la potencia del compresor se tienen las siguientes ecuaciones:

$$H = \frac{k}{k-1} P_1 u_1 \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \quad (3)$$

$$HP = \frac{w * H}{\eta} \quad (4)$$

Los resultados del compresor se muestran en la siguiente tabla:

<b>Aire</b>			
<b>k</b>	1.4		
<b>P1 (lbf/in2)</b>	14.7		
<b>P2 (lbf/in2)</b>	36.27		
<b>u (in/s)</b>	105		
<b>w (lb/s)</b>	0.13227778		
<b>H (lbf/ft-s)</b>	19084.5419		
<b>HP (lbf/lb-ft)</b>	2524.4608	<b>6.55704103</b>	<b>HP</b>

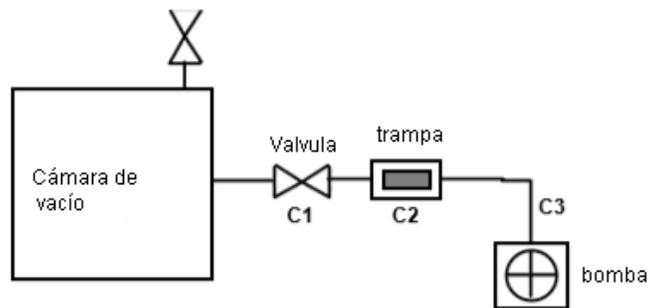
## ANEXO C CALCULO DE LOS EQUIPOS DE LA PROPUESTA 2

Ecuaciones para el cálculo de la bomba:

En los sistemas a vacío que están conectados a una bomba de vacío a través de una tubería, ocurre una resistencia del fluido como resultado de la fricción entre las moléculas de gas y la superficie de la pared de la tubería y entre las moléculas mismas, a esto se le llama conductividad o conductancia y está definida como:

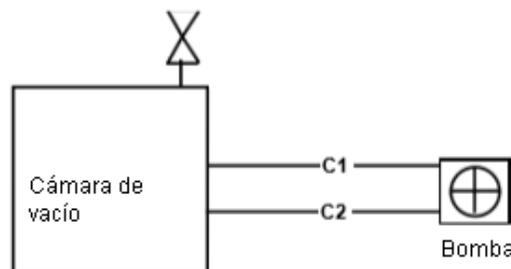
$$C = \frac{Q}{\Delta P} \quad (5)$$

Incluso muchos sistemas simples de vacío están compuestos de muchos elementos de conductividad, algunos conectados en serie y otros en paralelo, como se muestra a continuación.



*Conductancia de elementos en serie*

$$\frac{1}{C_T} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i} \quad (6)$$



*Conductancia de elementos en paralelo*

$$C_T = \sum_{i=1}^n C_i \quad (7)$$

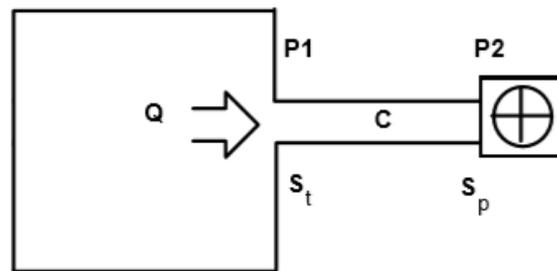
La potencia de la bomba se obtiene a partir de las siguientes ecuaciones.

$$H_{ad} = \frac{(k)}{(k-1)} RT_1 \frac{(P_2)^{\frac{k-1}{k}}}{(P_1)} - 1 \quad (8)$$

$$HP_{ad} = \frac{wH_{ad}}{550} \quad (9)$$

Del lado de la cámara se tiene  $P_1=Q/S_t$  y similarmente del lado de la bomba  $P_2=Q/S_p$ . Se puede hacer uso de la relación de estas variables y la conductividad para obtener la siguiente ecuación para la velocidad de bombeo.

$$\frac{1}{c} = \frac{1}{S_t} - \frac{1}{S_p} \quad (10)$$



*Sistema simple de vacío*

El sistema de vacío es un sistema de elementos en serie, la siguiente tabla se observan los resultados de la bomba de paletas.

	<b>Cp</b>	<b>Cv</b>	<b>x</b>	
<b>H2O</b>	1.8723	1.4108	0.3205	
<b>N2</b>	1.039	0.743	0.4105	
<b>O2</b>	0.918	0.658	0.2491	
<b>CO2</b>	0.846	0.657	0.0197	
	<b>Cpm</b>	<b>Cvm</b>		
	1.27192165	0.9340136		
<b>PMm</b>	20.76		<b>w [lb/min]</b>	0.383
<b>k</b>	1.36178065		<b>V ft3</b>	3339.61392
<b>R [lb*ft/lbmol-R]</b>	1545		<b>n lbmol</b>	0.451
<b>P1 [lb/in2]</b>	1.31	<b>P2 [lb/in2]</b>	14.7	
<b>T1 [R]</b>	583.5	<b>T2 [R]</b>	554.67	
<b>Z1</b>	1.54947354			
<b>Had [lb*ft/lb]</b>	216903.289			
<b>HP</b>	5.59420604			

### ANEXO D CALCULO DE LOS EQUIPOS DE LA PROPUESTA 3

Como se mencionó en el trabajo el eyector de la propuesta 1 es el mismo de la propuesta 3, solo que en vez de compresor tiene una bomba de anillo líquido, de la cual se obtuvieron los siguientes resultados:

<b>PMm</b>	<b>29</b>			<b>w [lb/min]</b>	<b>12.66</b>
<b>k</b>	1.4			<b>V ft3</b>	152230.499
<b>P1 [lb/in2]</b>	1.47	<b>P2 [lb/in2]</b>	14.7	<b>n lbmol</b>	35.002
<b>T1 [R]</b>	554.27	<b>T2 [R]</b>	554.67		
<b>Z1</b>	1.07507505				
<b>Had [lb*ft/lb]</b>	103485.772				
<b>HP</b>	12.1308321				

## ANEXO E DIAMETRO DE TUBERIA

Para el diámetro de la tubería para el transporte de los gases a vacío, se deben seguir los siguientes pasos:

1. Convertir el flujo másico en flujo volumétrico,  $q_m$  [ft<sup>3</sup>/min] con la siguiente ecuación:

$$q_m = w * \frac{359}{M} * \frac{760}{P_t} * \frac{T}{492} * \frac{1}{60} \quad (11)$$

Donde:

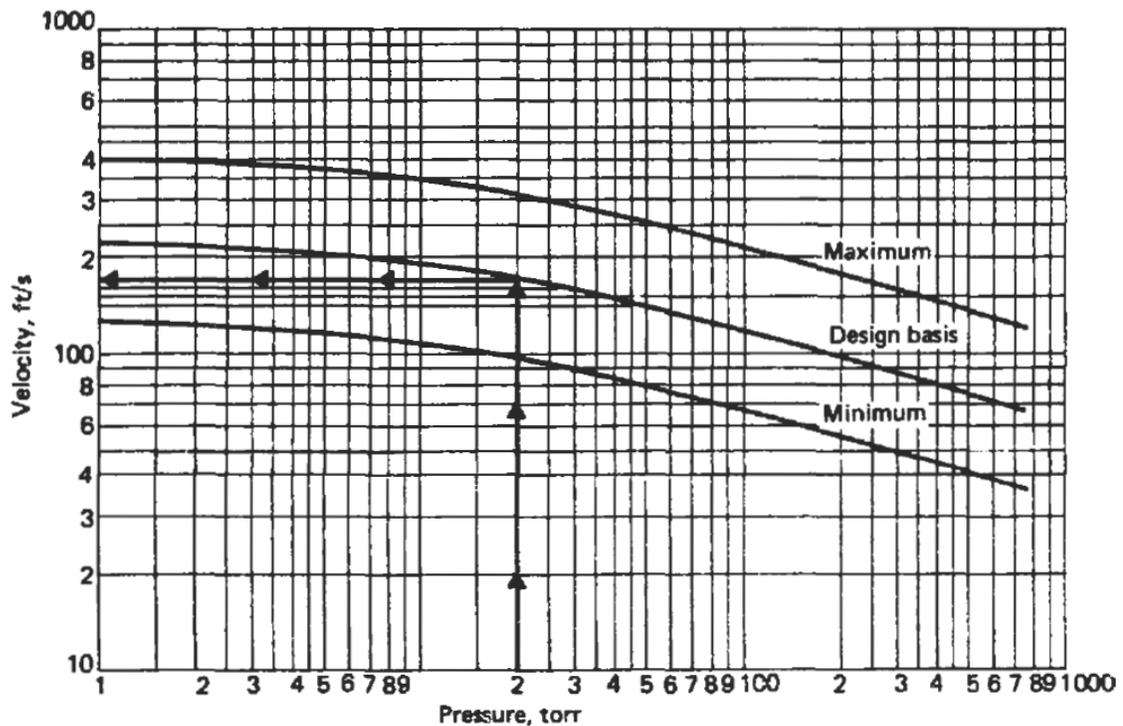
w = flujo masico [lb/hr]

M = peso molecular

T = temperatura [°R]

P<sub>t</sub> = presión [torr]

2. Calcular sección por sección desde el tanque de proceso hasta el equipo de succión.
3. Obtener la velocidad, v [ft/s] de la siguiente tabla.

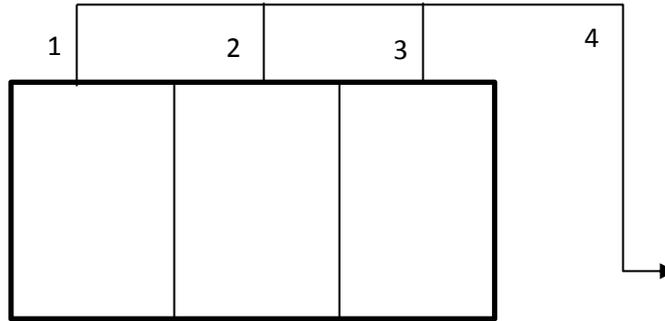


Velocidad para sistemas de vacío

4. Determinar el diámetro de la tubería, D [ft].

$$D = 0.146 \sqrt{\frac{q_m}{v}} \quad (12)$$

Por lo que las salidas de gas en cada cámara y el cabezal principal queda de la siguiente manera:



*Diámetro de la tubería del sistema de vacío*

<b>qm (ft<sup>3</sup>/min)</b>	<b>20.6106549</b>	<b>33.64488</b>	<b>24.8356045</b>	<b>84.8988863</b>
<b>u (ft/s)</b>	116	122	130	130
<b>Diametro (ft)</b>	0.06154174	0.07667123	0.06381438	0.11798646
<b>D (in)</b>	0.73850086	0.92005476	0.76577255	1.41583754
<b>∅</b>	1	1	1	1.5

## ANEXO F CÁLCULO DE LA CAÍDA DE PRESIÓN

Con la ecuación 13 se calculó la caída de presión

$$\Delta P_T = \frac{0.625 \rho f L q_m^2}{d^5} \quad (13)$$

La siguiente tabla muestra el cálculo de la longitud total de los accesorios:

Accesorio	#	L/D	Lei	Let	
Valvula	3	35	4.697	14.091	
t's	0.67	20	2.684	1.78933333	
codo 90°	2	30	4.026	8.052	
salida	3	59	7.9178	23.7534	
				47.6857333	Lta (ft)

La siguiente tabla muestra el resultado de la caída de presión, junto con los cálculos adicionales que fueron necesarios para llegar a ésta:

<b>D (in)</b>	<b>0.73850086</b>	<b>0.92005476</b>	<b>0.76577255</b>	<b>1.41583754</b>
<b>Ø</b>	1	1	1	1.5
<b>Di (ft)</b>	0.0874	0.0874	0.0874	0.1342
<b>s (ft<sup>2</sup>)</b>	0.006	0.006	0.006	0.01414
<b>ua (ft/s)</b>	57.2518192	93.458	68.9877902	100.069409
<b>ρ (lb/ft<sup>3</sup>)</b>	0.06629227			
<b>μ (lb/ft-s)</b>	0.00291567			
<b>Re</b>	305.336008			
<b>f</b>	0.07		<b>Lt (ft)</b>	93.6057333
<b>ΔP (torr)</b>	180.666896			
<b>P2 (torr)</b>	105.656896			