

Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Ingeniería

“ANÁLISIS DEL SISTEMA DE VACÍO DE UNA PLANTA DE
DESALACIÓN M.E.D. CON GEOTERMIA DE BAJA ENTALPÍA”

Tesis

Que para obtener el título de:

Ingeniero Mecánico



Presenta:

Fernando García Torres



Director de Tesis:

M.I. Héctor Miguel Aviña Jiménez.

Objetivo general

- Seleccionar y analizar el sistema de generación de vacío más conveniente para un prototipo funcional de desalación de agua de mar tipo MED con geotermia de baja entalpía (MED-LE).

Objetivos particulares

- Mostrar los aspectos generales sobre la geotermia y la desalación del agua de mar a nivel mundial.
- Establecer las principales características de los sistemas de vacío comúnmente usados en la industria, para con base en ello determinar el más conveniente para el sistema de desalación MED-LE.
- Realizar el análisis del equipo seleccionado considerando aspectos tanto termodinámicos como geométricos.
- Determinar los principales parámetros y condiciones operativas que provocan un buen desempeño del sistema de vacío.

Resumen

Con la finalidad de disminuir el problema de agotamiento continuo que sufren actualmente los combustibles fósiles y sus derivados, en el Instituto de Ingeniería de la UNAM se desarrollan proyectos relacionados con el aprovechamiento de fuentes energéticas alternas, entre los cuales se encuentra el sistema de desalación de agua de mar con energía geotérmica de baja entalpía denominado MED-LE (*Multiple Effect Distillation - Low Enthalpy*).

En el presente trabajo se analiza una parte vital para la operación del prototipo antes mencionado, que se relaciona directamente con el nivel de aprovechamiento de la energía que ingresa al sistema, referente al equipo de generación de vacío.

Es por ello que, antes de comenzar con el estudio, se muestra un estado del arte global que involucra los temas de interés, comenzando con la situación actual de la disponibilidad y aprovechamiento de la energía geotérmica, tanto a nivel mundial como para el caso particular de México, seguido del panorama global de la distribución del agua y la industria de la desalación del agua de mar, así como de las tecnologías empleadas para ello, y por último una revisión de los principales sistemas de generación de vacío.

Con base en lo anterior se realiza la selección del equipo de vacío más conveniente para el sistema MED-LE y se desarrolla el análisis del mismo, considerando los parámetros operativos establecidos y los recursos disponibles, con la finalidad de obtener la mayor cantidad de datos posible que permita conocer los aspectos técnicos suficientes del desempeño del equipo acoplado al sistema de desalación, ya sea para asegurar su buen funcionamiento o para completar el diseño del dispositivo.

De este estudio se concluye que el equipo de generación de vacío más conveniente es un eyector, por sus características físicas y su capacidad operativa alcanzada. Una vez establecido el tipo de sistema, se realiza el análisis del funcionamiento con dos fluidos de trabajo diferentes (aire y vapor de agua), de lo cual se obtiene que operativamente resulta mejor el desempeño global cuando se trabaja con vapor de agua, sin embargo la factibilidad de usar este fluido se ve limitada por la disponibilidad del mismo, a diferencia del aire que es un recurso ilimitado que puede ser utilizado sin problemas, teniendo como principal inconveniente sólo un incremento en la potencia requerida por el compresor; con base en estos parámetros, se establece que para el eyector del sistema MED-LE resulta conveniente usar aire como fluido motriz.

Nomenclatura

IDEA	Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía
IGME	Instituto Geológico y Minero de España
EGS-HDR	Sistema Geotérmico Mejorado de Roca Seca Caliente (Enhanced Geothermal System – Hot Dry Rock)
MSF	Destilación Súbita (flash)
MED	Destilación multiefecto
MED-LE	Destilación Multiefecto-Baja Entalpía (Multiple Effect Distillation-Low Enthalpy)
TVC	Termocompresión de vapor
DS	Destilación solar
CO	Congelación
FH	Formación de hidratos
DC	Destilación con membranas
CV	Compresión mecánica de vapor
OI	Ósmosis inversa
ED	Electrodialisis
ITI	Intercambio iónico
XPS	X-Ray Photoelectron Spectroscopy
SIMS	Secondary Ion Mass Spectrometry
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
iiDEA	Instituto de Ingeniería Desalación y Energías Alternas
IMPULSA	Investigación Multidisciplinaria de Proyectos Universitarios de Liderazgo y Superación Académica
P	Presión
T	Temperatura
V	Velocidad
A	Área
m	Gasto másico
h	Entalpía
ρ	Densidad
R	Constante particular del gas
\bar{R}	Constante universal de los gases
W	Peso molecular
M	Número de Mach
c	Velocidad local del sonido
γ	Razón de capacidades térmicas específicas
c_p	Capacidad térmica específica a presión constante
c_v	Capacidad térmica específica a volumen constante
S	Entropía

D	Diámetro
η	Eficiencia

Subíndices

0	Condiciones de estancamiento
$*, t$	Condiciones críticas
e, l	Salida de la tobera supersónica
b, x	Aguas arriba
y	Aguas abajo
p	Fluido primario
s	Al principio: Fluido secundario; al final: Isentrópico.
n	Tobera
m	Mezcla
d	Difusor
amb	Ambiente

Introducción

En el capítulo 1 se presenta una investigación del panorama mundial de la geotermia, en donde se muestra el potencial y nivel de aprovechamiento actual del recurso. Posteriormente se realiza el estudio particular de México, con la finalidad de brindar un panorama general del desarrollo que se tiene en el país y las oportunidades a futuro que representa la utilización de la energía geotérmica en diversas aplicaciones.

Del mismo modo, se presenta una investigación correspondiente a la industria de la desalación de agua de mar, por lo que en primer lugar se brinda una visión global de la distribución del agua en el mundo, y después se muestran las principales tecnologías de desalación y sus características más importantes, así como el principio de operación de cada una de ellas.

Por último se realiza una revisión de los principales equipos de generación de vacío, en donde se detallan sus ventajas y desventajas, así como los rangos operativos que alcanzan, entre otras características.

En el capítulo 2 se profundiza sobre el estudio de eyectores, uno de los sistemas de vacío más usados en la industria, en donde se analizan los fundamentos teóricos que rigen su principio de operación y se detallan algunos fenómenos físicos que pueden presentarse durante su funcionamiento, además de algunos datos técnicos que están relacionados con sus aplicaciones.

En el capítulo 3 se establece una metodología de cálculo, basada en los datos y recursos disponibles, para el análisis de un eyector como sistema de vacío de un prototipo funcional de desalación de agua de mar tipo MED con geotermia de baja entalpía, cuyo diseño se realizó en el Instituto de Ingeniería de la UNAM y recibe el nombre de MED-LE.

En el capítulo 4 se reportan los resultados obtenidos para el estudio del caso particular del prototipo de desalación antes mencionado, en donde se muestran los valores calculados para cada una de las zonas de análisis del sistema siguiendo la metodología planteada en el capítulo anterior. Se realizaron dos casos de estudio con la finalidad de comparar dos fluidos de trabajo

diferentes en el sistema (aire y vapor de agua), para con base en ello determinar cuál de los dos representa una mejor opción en el desempeño del equipo.

En el capítulo 5 se realizan las conclusiones correspondientes con base en los resultados reportados en el capítulo 4, y se analizan los valores obtenidos partiendo de las suposiciones establecidas y las leyes que rigen el comportamiento de los fluidos de trabajo en el proceso. Para cada caso de estudio se presentan las ventajas y desventajas que tiene su uso en el sistema, y posteriormente se establece la selección del mejor fluido para las condiciones operativas dadas.

Por último, se reporta el trabajo futuro que se debe considerar para los fines que se persigan, ya sea completar el diseño del eyector o validar experimentalmente los resultados obtenidos mediante este análisis.

Tabla de contenido

Objetivo general	1
Objetivos particulares.....	1
Resumen.....	1
Nomenclatura	2
Introducción	3
Lista de tablas.....	6
Lista de Figuras	7
Capítulo 1. Estado del arte	10
1.1 Energía geotérmica.....	10
Introducción	10
1.1.1 Geotermia.....	10
1.1.2 Desarrollo histórico y aplicaciones de la energía geotérmica	13
1.1.3 Situación actual del uso de la energía geotérmica.....	17
1.2 Desalación de agua de mar.....	23
Introducción	23
1.2.1 Tecnologías de desalación de agua de mar.....	25
1.2.1.1 Procesos de Destilación (MSF, MED, TVC, CV, DS, DC).	26
1.2.1.1.1 Destilación súbita multietapa (Flash) MSF.....	26
1.2.1.1.2 Destilación por múltiple efecto MED.....	27
1.2.1.1.3 Destilación por compresión de vapor (TVC y CV).....	28
1.2.1.1.4 Destilación solar (DS)	29
1.2.1.1.5 Destilación con membranas (DC)	29
1.2.1.2 Procesos de cristalización (CO, FH).	30

1.2.1.3	Procesos de filtración: Osmosis inversa (OI ó RO).....	30
1.2.1.4	Procesos de filtración selectiva: Electrodiálisis	31
1.2.1.5	Intercambio iónico.....	32
1.3	Sistemas de generación de vacío	32
	Introducción	32
1.3.1	Bombas.....	34
1.3.1.1	Bombas de Membrana.....	35
1.3.1.2	Bombas Rotativas de Paletas.....	36
1.3.1.3	Bombas de Pistón.....	37
1.3.1.4	Bombas Scroll.....	38
1.3.1.5	Bombas Roots.....	39
1.3.1.6	Bombas Difusoras.....	40
1.3.1.7	Bombas Turbomoleculares - Drag.....	40
1.3.1.8	Bombas de Sublimación de Titanio.....	41
1.3.1.9	Bombas Iónicas.....	42
1.3.1.10	Bombas Criogénicas.....	43
1.3.1.11	Bombas de anillo líquido.....	43
1.3.1.12	Bombas de canal lateral.....	44
1.3.2	Eyectores y eductores.....	45
1.4	Conclusiones	46
Capítulo 2.	Generalidades sobre eyectores.....	46
2.1	Introducción	46
2.2	Marco teórico	48
2.2.1	Leyes de conservación y Ley del gas ideal	48
2.2.1.1	Ecuación de continuidad	49
2.2.1.2	Ecuación de momento o momentum.....	49
2.2.1.3	Ecuación de energía	49
2.2.1.4	Ley del gas ideal.....	49
2.2.2	Número de Mach.....	49
2.2.3	Expansión isentrópica de un gas ideal.....	50
2.2.4	Fenómeno de estrangulamiento o de asfixia (<i>choking phenomena</i>).....	51
2.2.5	Ondas de choque	52
2.3	Conclusiones	54
Capítulo 3.	Cálculos.....	54
3.1	Introducción	54
3.2	Desarrollo matemático	56

3.2.1	Cálculo de la tobera supersónica.....	57
3.2.2	Cálculo de la zona de mezclado	59
3.2.2.1	Modelo de área constante	59
3.2.2.2	Modelo de presión constante.....	62
3.2.3	Cálculo del difusor subsónico	65
3.2.4	Cálculo de la potencia necesaria para impulsar el fluido motriz.....	66
3.3	Conclusiones	66
Capítulo 4. Discusión y Resultados.....		66
4.1	Establecimiento de los parámetros operativos	66
4.2	Resultados para la tobera supersónica.....	67
4.3	Resultados para la cámara de mezclado usando el método de área constante	69
4.4	Resultados para la cámara de mezclado usando el método de presión constante	70
4.5	Resultados obtenidos para el difusor.....	72
4.6	Potencia requerida para accionar el sistema.....	72
4.7	Gráficas.	73
4.8	Conclusiones	76
Capítulo 5. Conclusiones.....		76
5.1	Conclusiones	76
5.2	Trabajo futuro.....	79
Bibliografía		80

Lista de tablas

Tabla 1.1. Clasificación de los yacimientos geotérmicos hidrotermales por diferentes autores. (Mary H. Dickson & Mario Fanelli, 2012)	12
Tabla 1.2. Clasificación general de los recursos geotérmicos. (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) y el Instituto Geológico y Minero de España (IGME), 2008)	13
Tabla 1.3. Potencia eléctrica geotérmica instalada a nivel mundial hasta el año 2012. (Geotermia.org.mx, 2012).....	20
Tabla 1.4. Países con mayor capacidad instalada para usos directos. (León, 2007)	21
Tabla 1.5. Usos directos de la energía geotérmica en México. (Apuntes de aprovechamiento de energía geotérmica FI, 2012)	22
Tabla 1.6. Capacidad de las centrales geotermoeléctricas instaladas en México. (Apuntes de aprovechamiento de energía geotérmica FI, 2012)	23
Tabla 1.7. Países con mayor capacidad de desalación de agua de mar instalada. (Solliclima-Energía Solar, 2009).....	25
Tabla 1.8. Procesos y métodos de desalación. (Santana, 2011)	25
Tabla 1.9. Características generales de los principales métodos de desalación. (Santana, 2011).....	32
Tabla 1.10. Unidades de presión y factores de conversión. (Lazzerio Technologie, 2012).....	33

Tabla 1.11. Tipos de vacío. (Tecnovac, 2012)	33
Tabla 1.12. Desarrollo histórico de las bombas de vacío. (Farías, 1995).....	34
Tabla 2.1. Selección del número de etapas de eyectores por vacío requerido. (Inmateinsa, 2012)	48
Tabla 2.2. Clasificación de flujos por número de Mach. (Calle, 2009)	50
Tabla 3.1. Características de los fluidos de trabajo y parámetros operativos del sistema MED-LE propuesto. (Salmerón, 2012)	55
Tabla 3.2. Código de colores empleado para el cálculo.....	56
Tabla 3.3. Datos necesarios para el análisis del eyector.	56
Tabla 4.1. Parámetros iniciales del cálculo.	67
Tabla 4.2. Condiciones de estancamiento del fluido primario.	68
Tabla 4.3. Condiciones críticas de la tobera supersónica.....	68
Tabla 4.4. Características isentrópicas de la tobera supersónica.....	68
Tabla 4.5. Características reales de la tobera supersónica.....	69
Tabla 4.6. Condiciones iniciales del fluido secundario.....	69
Tabla 4.7. Resultados obtenidos con el modelo de área constante.....	69
Tabla 4.8. Resultados obtenidos para la cámara de mezclado mediante el método de presión constante.....	70
Tabla 4.9. Resultados del difusor de acuerdo con los métodos de análisis utilizados.....	72
Tabla 4.10. Potencia necesaria para impulsar el fluido motriz.....	73
Tabla 5.1. Principales parámetros operativos del eyector analizado.....	78

Lista de Figuras

Figura 1.1. Estructura general de la Tierra. (Trillo, 2011)	11
Figura 1.2. Sistema geotérmico tradicional. (Trillo, 2011)	12
Figura 1.3. Primeros usos de la energía geotérmica por nativos americanos. (Piensa en grande. Piensa en geotérmica., 2010).....	14
Figura 1.4. Industria para obtener ácido bórico, Larderello, Italia. (Mary H. Dickson & Mario Fanelli, 2012)	14
Figura 1.5. Príncipe Piero Ginori Conti junto a su invento para producir electricidad. (Piensa en grande. Piensa en geotérmica., 2010).....	15
Figura 1.6. Bomba de calor geotérmica para calefacción doméstica. (Mary H. Dickson & Mario Fanelli, 2012)	16
Figura 1.7. Principales aplicaciones de la energía geotérmica de acuerdo a la temperatura del recurso. (Mary H. Dickson & Mario Fanelli, 2012).....	16
Figura 1.8. Zonas geotérmicas con mayor potencial energético. (Apuntes de aprovechamiento de energía geotérmica FI, 2012)	17
Figura 1.9. Zonas mundiales con mayor actividad geotérmica. (Trillo, 2011)	18
Figura 1.10. Distribución mundial de energía geotérmica instalada. (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) y el Instituto Geológico y Minero de España (IGME), 2008).....	18
Figura 1.11.Principales países productores de energía eléctrica geotérmica. (Apuntes de aprovechamiento de energía geotérmica FI, 2012)	19
Figura 1.12.Producción de calor por países. (Apuntes de aprovechamiento de energía geotérmica FI, 2012)	19

Figura 1.13. Usos directos de la energía geotérmica a nivel mundial. (Instituto Nacional de Electrificación- División de Desarrollo Geotérmico, 2007).....	20
Figura 1.14. Escenario mundial de energía geotérmica. (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) y el Instituto Geológico y Minero de España (IGME), 2008)	21
Figura 1.15. Zonas con actividad geotérmica en México. (CFE, 2010), (UNAM, 2005)	22
Figura 1.16. Distribución global del agua en el mundo. (CONAGUA, 2011).....	24
Figura 1.17. Sistema de desalación MSF. (Jaimes, 2008).....	27
Figura 1.18. Sistema de desalación MED. (Jaimes, 2008).....	28
Figura 1.19. Sistemas MED con distintos arreglos de alimentación, serie y paralelo. (Jaimes, 2008)	28
Figura 1.20. Sistema de desalación por compresión mecánica de vapor. (Jaimes, 2008)	29
Figura 1.21. Esquema general del proceso de destilación solar. (Urcelay, 2007).....	29
Figura 1.22. Proceso de destilación con membranas. (Payo, 1998).....	30
Figura 1.23. Desalación por ósmosis inversa. (Moya, 2004).....	31
Figura 1.24. Proceso de electrodiálisis. (Moya, 2004).....	31
Figura 1.25. Bomba de aire de Von Guericke usada en la demostración en Berlín y Magdeburgo. (Farías, 1995).....	34
Figura 1.26. Rangos de operación de las bombas de vacío. (Tecnovac, 2012).....	35
Figura 1.27. Principio de operación de las bombas con membrana. (Tecnovac, 2012).....	35
Figura 1.28. Capacidad de bombeo. Bomba de membrana serie MVP 15-4. (Tecnovac, 2012)	35
Figura 1.29. Componentes de las bombas rotativas de paletas. (Tecnovac, 2012)	36
Figura 1.30. Bombas rotativas de una y dos etapas. Velocidades de bombeo. (Tecnovac, 2012)	36
Figura 1.31. Capacidad de bombeo. Bomba rotativa de paletas serie DUO 20. (Tecnovac, 2012)	37
Figura 1.32. Principio de operación de las bombas rotativas de pistón. (Tecnovac, 2012)	37
Figura 1.33. Bombas rotativas de pistón serie 250-1 y 150-2. Velocidades de bombeo. (Tecnovac, 2012).....	38
Figura 1.34. Espirales de las Bombas Scroll, invertidas y con un defase de 180°. (Estébanez, 2011)	38
Figura 1.35. Constitución de las bombas roots y principio de operación. (Tecnovac, 2012)	39
Figura 1.36. Velocidad de bombeo de las bombas roots, con y sin <i>gas ballast</i> . (Tecnovac, 2012)	39
Figura 1.37. Corte esquemático de una bomba difusora y vacíos finales por etapa. (Marpa vacuum , 2012).....	40
Figura 1.38. Componentes de la bomba Turbomolecular - Drag. (Tecnovac, 2012).....	41
Figura 1.39. Esquema de la bomba de sublimación del titanio. (Nuevas Tecnologías y Contaminación de Atmósferas, 2012).....	41
Figura 1.40. Bomba iónica tipo diodo. (Tecnovac, 2012).....	42
Figura 1.41. Bomba iónica tipo triodo. (Tecnovac, 2012)	42
Figura 1.42. Principales componentes de una bomba criogénica. (Tecnovac, 2012).....	43
Figura 1.43. Componentes de una bomba de anillo líquido. (Sihi Perú, 2012).....	44
Figura 1.44. Bomba de canal lateral. (Certificado CE, 2010)	44
Figura 1.45. Sección transversal de un eductor. (schutte & koerting, 2011)	45
Figura 1.46. Sección transversal de un eyector. (schutte & koerting, 2011).....	45
Figura 2.1. Componentes principales de un eyector de vacío. (O. ELLEHAMER A/S, 2012) ..	47
Figura 2.2. Variación de velocidad y presión de las corrientes (primaria y secundaria) a lo largo del eyector. (Chemical Engineering and Processing, 2001).....	47

Figura 2.3. Volumen de control definido para flujo unidimensional. (Liao, 2008)	49
Figura 2.4. Perfil de presiones de un flujo isentrópico que pasa por un conducto convergente-divergente. (Liao, 2008)	51
Figura 2.5. Volumen de control para el estudio de una onda de choque normal. (Moran, 2004)	53
Figura 2.6. Intersección de las curvas de Fanno y Rayleigh como una solución de las ecuaciones de la onda de choque normal. (Moran, 2004).....	53
Figura 3.1. Configuración del sistema MED-LE propuesto. (Salmerón, 2012).....	54
Figura 3.2. Tobera supersónica. (Liao, 2008)	57
Figura 3.3. Esquema de un eyector de área constante en la zona de mezclado. (Liao, 2008).....	60
Figura 3.4. Volumen de control empleado para el modelo de área constante en la zona de mezclado. (Liao, 2008).....	60
Figura 3.5. Esquema de un eyector diseñado con sección de mezclado a presión constante. (Liao, 2008).....	63
Figura 3.6. Volumen de control empleado para el análisis de la zona de mezclado a presión constante. (Liao, 2008).....	63

Capítulo 1. Estado del arte

1.1 Energía geotérmica

Introducción

Este apartado se enfoca al estudio de la energía geotérmica, tanto en sus aspectos teóricos como en sus aspectos prácticos, para lo cual es necesario, en primer lugar, establecer una definición clara de la misma, posteriormente realizar una breve revisión de su desarrollo histórico y aplicaciones, y por último mostrar su aprovechamiento y el potencial que se tiene a nivel mundial.

1.1.1 Geotermia

Por definición, la energía es la capacidad de los cuerpos o conjunto de éstos para efectuar un trabajo. Todo cuerpo material que pasa de un estado a otro produce fenómenos físicos que no son otra cosa más que manifestaciones de alguna transformación de la energía. (Definición.org)

En la naturaleza existen diversas fuentes de energía, diferentes a las tradicionales, que se presentan en forma potencial con posibilidades de utilización prácticamente ilimitadas para la vida humana, y cuyo aprovechamiento representa un impacto ambiental mínimo, a este tipo de energías se les denomina *Energías Alternas*. Por otro lado se encuentran las *Energías Renovables*, provenientes de fuentes energéticas que se renuevan constantemente, y que teóricamente no se agotan con el paso del tiempo, sin importar su nivel de utilización.

Partiendo de lo anterior, dado que el calor es una forma de energía y la energía geotérmica es el calor contenido en el interior de la Tierra que genera fenómenos geológicos a escala planetaria, se puede afirmar que por sus características la energía geotérmica se encuentra dentro de ambas clasificaciones. El termino *energía geotérmica* es a menudo utilizado para indicar aquella porción del calor de la Tierra que puede o podría ser recuperado y explotado por el hombre; en este sentido se utilizará dicho termino en el presente trabajo. (Mary H. Dickson & Mario Fanelli, 2012)

Por otro lado, en la práctica, se le denomina *geotermia* al estudio y utilización de la energía geotérmica que es transportada a través de la roca y/o fluidos, y que se desplaza desde el interior de la corteza terrestre hacia los niveles superficiales de la misma dando origen a los sistemas geotérmicos, descritos más adelante.

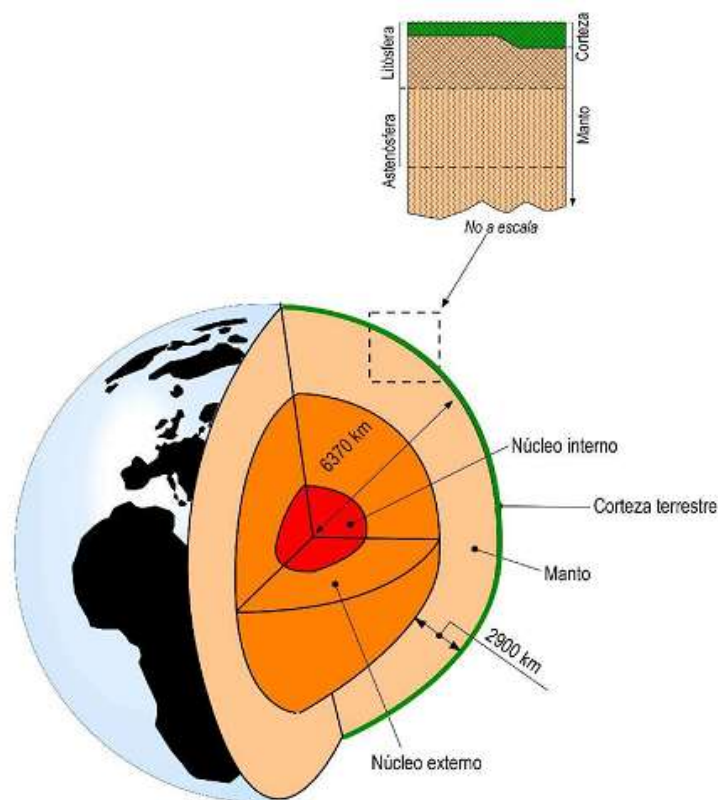


Figura 1.1. Estructura general de la Tierra. (Trillo, 2011)

Como se observa en el esquema anterior, la tierra se constituye por tres capas: el núcleo, el manto y la corteza. El núcleo presenta un estado sólido en su interior y líquido en su exterior, y alcanza temperaturas de hasta $4200[^\circ\text{C}]$. El manto, que envuelve al núcleo, presenta una textura plástica hacia el centro y es sólido en su exterior (litósfera), y su temperatura oscila en un rango de entre los $1000[^\circ\text{C}]$ y los $3000[^\circ\text{C}]$. Por último la corteza, cuyo espesor varía entre los $5[\text{Km}]$ y $20[\text{Km}]$ en las profundidades oceánicas, y desde $30[\text{Km}]$ hasta $70[\text{Km}]$ sobre los continentes, mantiene una temperatura de $1000[^\circ\text{C}]$ en el interior y $15[^\circ\text{C}]$ o $20[^\circ\text{C}]$ en promedio en su exterior. (Trillo, 2011)

En la superficie terrestre se pueden identificar distintas manifestaciones de la energía geotérmica, como volcanes, aguas termales, géiseres, fumarolas y volcanes de fango, entre otras; sin embargo, no todas ellas permiten su aprovechamiento, ya que para tal efecto es necesario que la energía se acumule en algún cuerpo que pueda ser manejado o procesado con cierta facilidad, debido a esto, la forma más común de aprovechamiento es en base a la concentración de energía en el agua que rellena los poros y huecos de algunas formaciones rocosas, mejor conocidos como *sistemas o yacimientos geotérmicos*, que idealmente están constituidos por una fuente calor, un reservorio, una capa sello y el fluido.

Los sistemas geotérmicos se pueden clasificar de acuerdo con su ubicación y características en:

- Sistemas hidrotermales.
- Sistemas de roca seca caliente.
- Sistemas marinos.
- Sistemas magmáticos.
- Sistemas geopresurizados.

Para el caso de este estudio solo se presentan las generalidades de los sistemas hidrotermales en los cuales comúnmente se necesita cumplir con ciertas características (Figura 1.2)

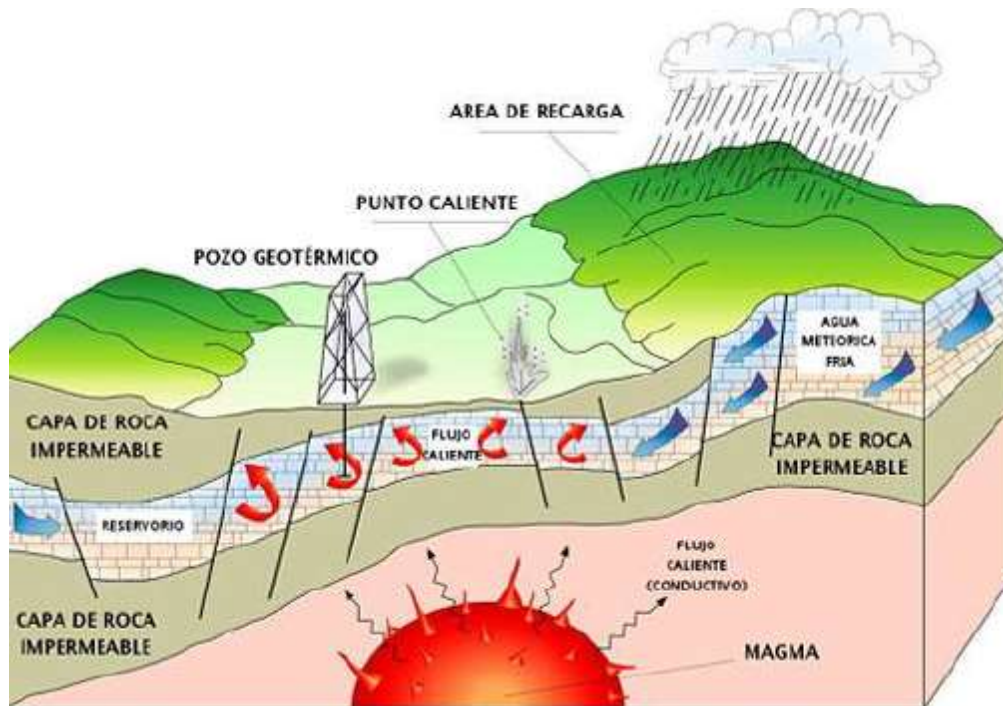


Figura 1.2. Sistema geotérmico tradicional. (Trillo, 2011)

Como consecuencia de las condiciones termodinámicas del sistema agua-roca, el agua adquiere características químicas específicas, enriqueciéndose en sales minerales provenientes de la disolución de las rocas en contacto, dando origen a lo que se denomina *fluido geotérmico*. De esta forma, el fluido en condiciones de presión y temperatura adecuadas, sirve de vehículo para el aprovechamiento de la energía proveniente del subsuelo. (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) y el Instituto Geológico y Minero de España (IGME), 2008)

Los yacimientos geotérmicos convencionales se clasifican de acuerdo con el nivel energético de los recursos contenidos en ellos, por lo que podemos encontrar yacimientos de alta, media y baja entalpía. Algunos autores proponen los siguientes rangos de temperatura para dichas clasificaciones:

Tabla 1.1. Clasificación de los yacimientos geotérmicos hidrotermales por diferentes autores. (Mary H. Dickson & Mario Fanelli, 2012)

	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
Recursos de baja entalpía	< 90 [°C]	< 125 [°C]	< 100 [°C]	≤ 150 [°C]	≤ 190 [°C]
Recursos de media entalpía	90–150 [°C]	125-225 [°C]	100-200 [°C]	-	-
Recursos de alta entalpía	> 150 [°C]	> 225 [°C]	> 200 [°C]	> 150 [°C]	> 190 [°C]

Ref:

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

Sin embargo, en algunas situaciones también se utiliza el término de *Yacimientos geotérmicos de muy baja entalpía* y *Yacimientos geotérmicos no convencionales*, dependiendo de su temperatura, las tecnologías de aprovechamiento empleadas en ellos y su aplicación, principalmente. En la siguiente tabla se muestra una clasificación general de los recursos geotérmicos.

Tabla 1.2. Clasificación general de los recursos geotérmicos. (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) y el Instituto Geológico y Minero de España (IGME), 2008)

Recursos geotérmicos		Temperaturas	Tecnología	Aplicación
Muy baja entalpía		5 - 25 [°C]	Utiliza bomba de calor	Usos directos
				Climatización
Convencionales	Baja entalpía	25 - 50 [°C]	Puede precisar bomba de calor	Usos directos
		50 - 100 [°C]		Usos directos
	Media entalpía	100 - 150 [°C]	Ciclos binarios	Electricidad
				Procesos
Alta entalpía	> 150 [°C]		Electricidad	
No convencionales	EGS - HDR	> 150 [°C]	Ciclos binarios	Electricidad
	Supercríticos	> 300 [°C]		Electricidad
				Hidrógeno

Comúnmente mas no forzosamente, los yacimientos de alta entalpía se localizan en zonas de flujo de calor anómalo, mientras que los de baja entalpía corresponden a zonas estables de la corteza, lo que condiciona su aprovechamiento. (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) y el Instituto Geológico y Minero de España (IGME), 2008)

1.1.2 Desarrollo histórico y aplicaciones de la energía geotérmica

Una vez aclarados algunos de los principales conceptos que se emplearán a lo largo del documento, se presenta una breve reseña del desarrollo en el estudio y utilización de la energía geotérmica.

Desde hace mucho tiempo comenzó la utilización del calor proveniente del interior de la tierra, aunque su origen era desconocido, tal como se puede observar en los restos arqueológicos encontrados en Niisato, Japón, que datan de la Tercera Glaciación, hace entre 15,000 y 20,000 años, y que corresponden a objetos tallados en piedra volcánica. Por otro lado, hace más de 10,000 años, los Paleo-Indios de América del Norte, ya usaban las aguas termales para cocinar alimentos y sus minerales con propósitos medicinales.

Las aguas y los barros termales fueron utilizados por las primeras civilizaciones, aproximadamente 3,500 años A.C., pero fueron los griegos y posteriormente los romanos los que dejaron numerosos ejemplos de la aplicación de la energía geotérmica en la calefacción urbana y en los tradicionales balnearios y baños públicos, que se convirtieron en gigantescos centros de ocio, salud y negocio. Así comenzó a expandirse el uso de los recursos geotérmicos por toda Europa, Asia y América principalmente, junto con la extracción de minerales como azufre, caolín y óxidos de hierro de las fuentes geotermales.



Figura 1.3. Primeros usos de la energía geotérmica por nativos americanos. (Piensa en grande. Piensa en geotérmica., 2010)

Existen registros de que en el año 1330 ya existía una red de distribución de agua caliente en algunas casas en Chaudes-Aigues, Francia, servicio por el cual los usuarios pagaban una cuota, y que era utilizado como calefacción y para lavar pieles y lana. Al mismo tiempo, en Italia, en la región de Volterra, en Toscana, pequeñas lagunas con agua caliente salobre de las que se escapaba vapor a más de 100[°C] eran explotadas para extraer ácido sulfúrico concentrado y alumbre. (Trillo, 2011)

De esta manera, y por mucho tiempo, el hombre utilizó los recursos geotérmicos en aplicaciones sencillas y directas, hasta que finales del siglo XVI y principios del XVII se comenzó a tomar importancia en el tema, al observarse que en minas recién cavadas la temperatura incrementaba proporcionalmente con la profundidad. Estas deducciones fueron completamente empíricas hasta que en 1740 se realizaron las primeras mediciones mediante termómetros, en Belfort, Francia. En el siglo XIX, gracias a los avances tecnológicos y científicos, fue posible explorar la tierra a mayor profundidad, lo que dio paso al desarrollo de nuevas formas de aprovechamiento.

En 1818, en Larderello, Italia, se descubrió un yacimiento de sales de boro, y fue el francés Francois Larderel quien en 1827 fundó una industria para extraerlas, sustituyendo la madera que era empleada como combustible por el recurso geotérmico del sitio para el proceso de evaporación en los contenedores de metal, este hecho marcó el inicio de la utilización de los recursos geotérmicos a nivel industrial.

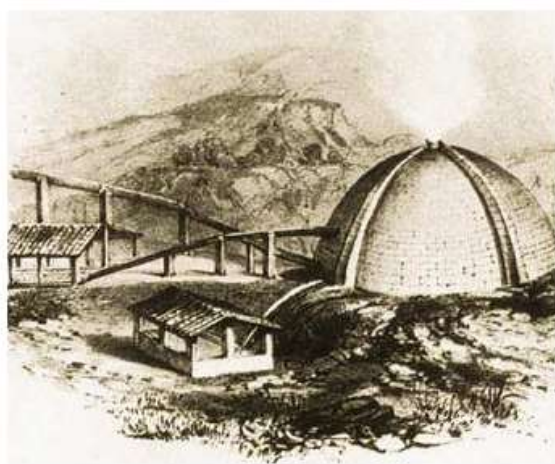


Figura 1.4. Industria para obtener ácido bórico, Larderello, Italia. (Mary H. Dickson & Mario Fanelli, 2012)

A partir de aquella industria se enfatizó el uso de la energía geotérmica en distintas zonas del mundo. El primer pozo profundo se realizó en el año de 1883, en el Barrio de Grenelle, en París, de 548[m] de profundidad y tardó ocho años en construirse; el agua captada tenía una temperatura de 30[°C]. Posteriormente, en 1892, entró en funcionamiento la primera red local de calefacción urbana en Boise, Idaho, U.S.A.

Un factor importante en el desarrollo de nuevas tecnologías de aprovechamiento fue el hecho de cubrir las necesidades de la creciente población. La industria del ácido bórico en Larderello dio paso, en 1904, a la generación de electricidad a partir de vapor geotérmico en un dispositivo inventado por el Príncipe Piero Ginori Conti, entrando en funcionamiento en 1913 una central de 250 [KW]. (Apuntes de aprovechamiento de energía geotérmica FI, 2012)



Figura 1.5. Príncipe Piero Ginori Conti junto a su invento para producir electricidad. (Piensa en grande. Piensa en geotérmica., 2010)

En Japón, los primeros pozos se perforaron en 1919 en Beppu, seguidos de los excavados en 1921 en The Geysers, California, U.S.A., y en el Tatio, Chile, con lo que para el año de 1942 la capacidad geotérmica instalada alcanzaba los 127.65 [MWe]. En 1958 entró en operación una pequeña planta geotermoeléctrica en Nueva Zelanda, en 1959 otra en México y al año siguiente una en Estados Unidos. La primera red moderna de calefacción urbana alimentada por energía geotérmica se instaló en Reikjavik, Islandia, en 1930. Desde entonces, redes de calefacción que utilizan la energía geotérmica se encuentran en funcionamiento en Francia, Italia, Hungría, Rumanía, Rusia, Turquía, Georgia, China, Estado Unidos y la propia Islandia. En esa misma época comenzó a utilizarse el vapor para producir energía mecánica en diversas aplicaciones, como elevar líquidos y mover sistemas de poleas, por ejemplo.

Las bombas de calor tomaron un auge importante justo después de la Segunda Guerra Mundial, ya que muchos países fueron atraídos por la energía geotérmica al considerarla muy competitiva con respecto de otras fuentes de energía; a partir de este hecho el desarrollo en las tecnologías de explotación aumentó considerablemente, ya que universidades e industrias mostraron interés en su aprovechamiento. Sin embargo fue entre 1970 y 1990, y debido al alza de los precios del crudo y sus derivados, y a partir de que la contaminación ambiental se convirtió en un problema a nivel mundial, cuando el empleo de bombas de calor geotérmicas empezó a conocer un desarrollo prometedor a nivel internacional. (Armstead H. C., 1989)



Figura 1.6. Bomba de calor geotérmica para calefacción doméstica. (Mary H. Dickson & Mario Fanelli, 2012)

Hasta entonces fue cuando la explotación del recurso dejó de enfocarse solamente en los yacimientos visibles o identificables sobre la corteza terrestre, y se comenzó a fomentar el desarrollo de las exploraciones de campo e investigaciones científicas, con lo cual se inició en todo el mundo una actividad importante en el uso de energía geotérmica para producción de energía eléctrica o para calefacción y suministro de agua caliente, entre otras actividades.

Como se ha descrito, las aplicaciones de la energía geotérmica son muy variadas, y su uso depende directamente del potencial energético del fluido contenido en los distintos tipos de yacimientos y sus características. En el siguiente esquema se aprecian las principales aplicaciones del recurso geotérmico actualmente:

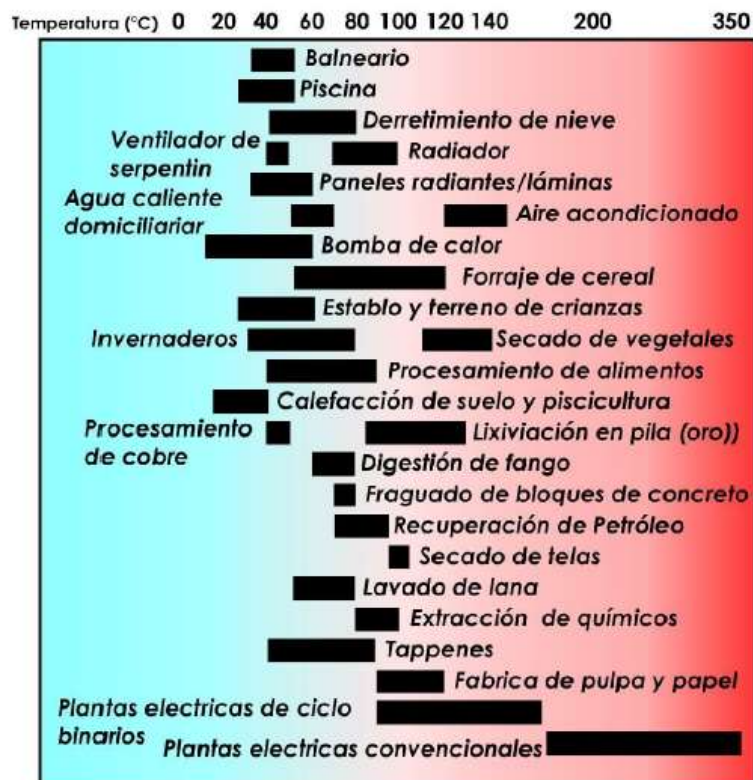


Figura 1.7. Principales aplicaciones de la energía geotérmica de acuerdo a la temperatura del recurso. (Mary H. Dickson & Mario Fanelli, 2012)

1.1.3 Situación actual del uso de la energía geotérmica

Para comprender el potencial energético que representa la geotermia a nivel mundial, es necesario mencionar algunos estudios que muestran la magnitud de tal situación, sin embargo, es conveniente aclarar, en primer lugar, de dónde proviene tal contenido de calor.

Independientemente de los estudios realizados para conocer el régimen energético de la tierra, los nuevos modelos toman en consideración el calor generado continuamente por el decaimiento de los isótopos radiactivos de larga vida del Uranio (U238, U235), del Torio (Th 232) y del Potasio (K40), la energía primordial de la acreción planetaria y el calor disipado al espacio, concluyendo que el planeta se encuentra en un proceso de enfriamiento continuo muy lento. La temperatura del manto ha disminuido entre 300[°C] y 350[°C] en tres mil millones de años, sin embargo, en su base se tienen cerca de 4000[°C] aún. Por otro lado, se ha estimado que el contenido total de calor en la Tierra calculado para una temperatura ambiente de 15[°C] promedio, es del orden de 12.6×10^{24} [MJ] y que el contenido de calor de la corteza es de unos 5.4×10^{21} [MJ]. (Mary H. Dickson & Mario Fanelli, 2012)

Otro estudio realizado por Stacey y López en 1998, arrojó que el flujo calórico total de la tierra es de aproximadamente 42×10^{12} [W] de convección, radiación y conducción, de los cuales 8×10^{12} [W] provienen de la corteza, 32.3×10^{12} [W] del manto y 1.7×10^{12} [W] del núcleo. Considerando que el calor radiogénico del manto se estima en 22×10^{12} [W], y la tasa de enfriamiento de esta parte de la tierra es 10.3×10^{12} [W], aunque estimaciones más recientes y confiables indican que el flujo calórico total de la tierra es alrededor 6% mayor al estimado anteriormente. (Armstead H. C., 1983)



Figura 1.8. Zonas geotérmicas con mayor potencial energético. (Apuntes de aprovechamiento de energía geotérmica FI, 2012)

De las zonas mostradas en el esquema anterior, algunas de ellas presentan mayor actividad geotérmica debido a sus condiciones geográficas.



Figura 1.9. Zonas mundiales con mayor actividad geotérmica. (Trillo, 2011)

Como se ha mencionado, solo una porción de esa energía puede ser aprovechada, sin embargo, no se trata de una fuente energética pequeña. En seguida se muestran algunos datos correspondientes al uso de la energía geotérmica, en donde se puede apreciar claramente su impacto global.

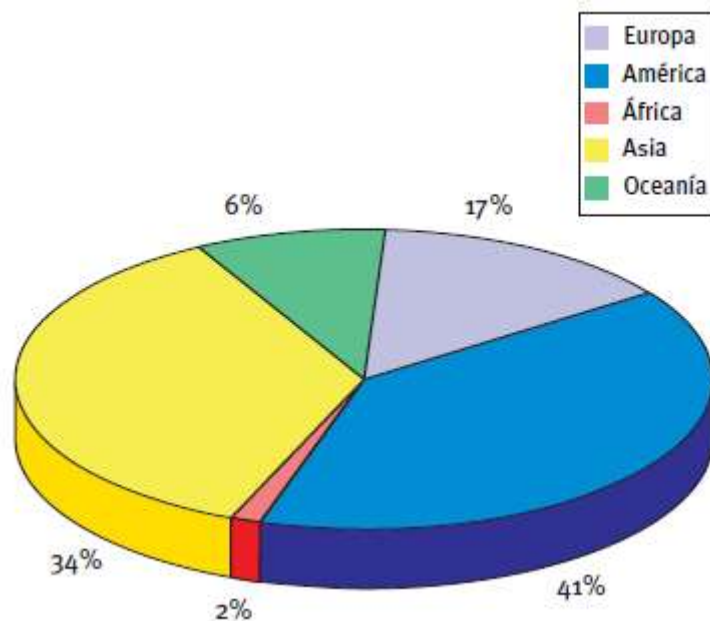


Figura 1.10. Distribución mundial de energía geotérmica instalada. (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) y el Instituto Geológico y Minero de España (IGME), 2008)

Actualmente, y desde hace ya varios años, los principales usos de la energía geotérmica corresponden a las bombas de calor y a la producción de energía eléctrica. En menos de 15 años se ha llegado a la situación actual, con más de un millón de instalaciones de bombas de calor

instaladas, no sólo en América del Norte, Estados Unidos y Canadá, sino también en algunos países europeos, particularmente en Suecia, Suiza, Alemania y Austria.

En el año 2000, la capacidad geotermoeléctrica instalada a nivel mundial era de 8,000 [MWe], pasando a 9,000 [MWe] en el año 2005. Por lo que respecta a los usos no eléctricos de la energía geotérmica, en el año 2000 la capacidad instalada en 59 países era de unos 15,000 [MWt]. En 2005, la capacidad instalada en 72 países ascendió a alrededor de 28,000 [MWt], de los cuales unos 15,000 [MWt] correspondían a bombas de calor geotérmicas.

La electricidad generada a partir de energía geotérmica se ha mostrado atractiva hacia los países en vías desarrollo, por lo económico que resulta si se cuenta con el recurso, y juega un papel importante en el esquema energético de varios países, por ejemplo, en 2001 la energía eléctrica producida por geotermia en Filipinas fue el 27% de la electricidad total generada, del 12.4% en Kenya, del 11.4% en Costa Rica y del 4.3% en el Salvador. (Apuntes de aprovechamiento de energía geotérmica FI, 2012)



Figura 1.11.Principales países productores de energía eléctrica geotérmica. (Apuntes de aprovechamiento de energía geotérmica FI, 2012)



Figura 1.12.Producción de calor por países. (Apuntes de aprovechamiento de energía geotérmica FI, 2012)

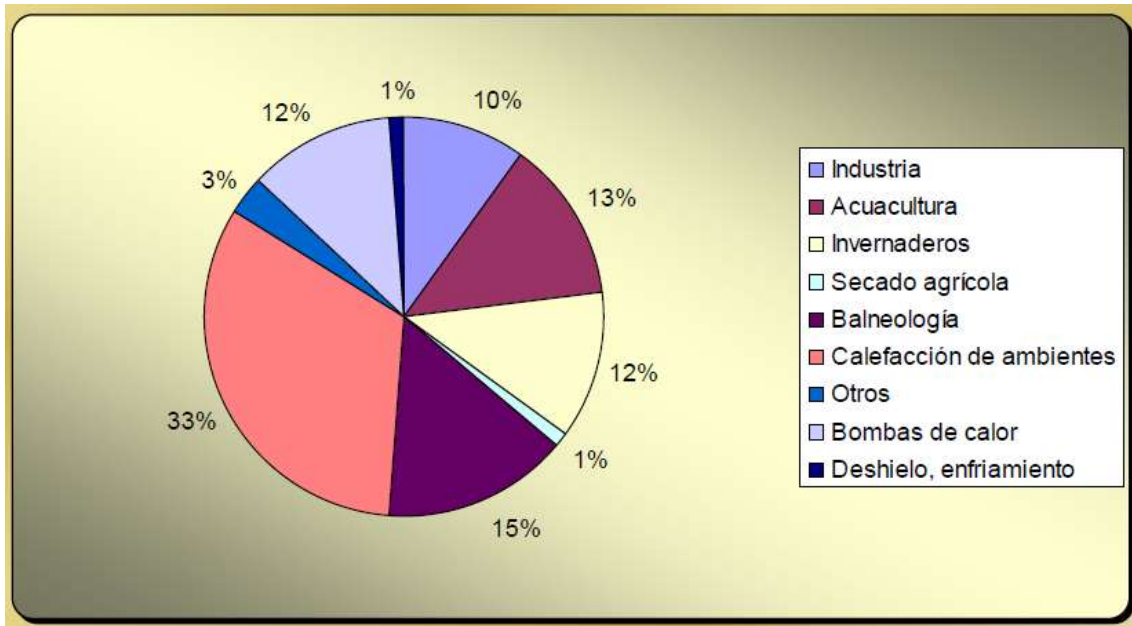


Figura 1.13. Usos directos de la energía geotérmica a nivel mundial. (Instituto Nacional de Electrificación-División de Desarrollo Geotérmico, 2007)

A continuación se muestra la lista de los países con mayor capacidad instalada para producción eléctrica.

Tabla 1.3. Potencia eléctrica geotérmica instalada a nivel mundial hasta el año 2012. (Geotermia.org.mx, 2012)

No.	País	MWe
1	Estados Unidos	3,151.5
2	Filipinas	1,904.0
3	Indonesia	1,197.3
4	México	958.0
5	Italia	882.5
6	Islandia	664.6
7	Nueva Zelanda	628.0
8	Japón	536.0
9	Costa Rica	207.1
10	El Salvador	204.4
11	Kenia	172.0
12	Nicaragua	123.5
13	Rusia	81.9
14	Turquía	76.8
15	Papúa-Nueva Guinea (Isla Lihir)	56.0
16	Guatemala	52.0
17	China (incluye Tíbet)	24.2
18	Portugal (Islas Azores)	23.0
19	Francia (Isla Guadalupe y Alsacia)	17.2
20	Etiopía	7.3
21	Alemania	6.6

22	Austria	1.4
23	Tailandia	0.3
24	Australia	0.1

Como se observa, en cuarto lugar se sitúa México, con una potencia total instalada de 958 [MWe] y cerrando la lista de los 5 principales países en potencia geotérmica instalada se encuentra Italia, con 882 [MWe]. En los últimos 2 años el país más activo ha sido Islandia, que ha doblado su capacidad de potencia instalada llegando a 664.6 [MWe], país que produce el 99.9% de electricidad a partir de energías renovables. Cabe mencionar que las tecnologías empleadas para la producción eléctrica son principalmente de tres tipos:

- Descarga atmosférica de la turbina de vapor convencional (Contrapresión).
- Condensación de la descarga de la Turbina convencional de vapor.
- Plantas binarias de potencia.

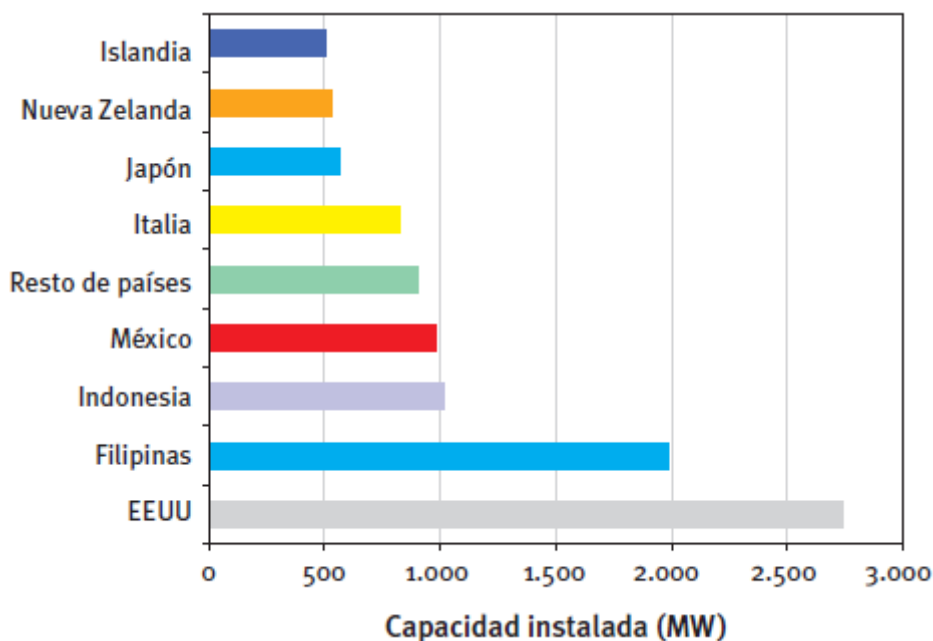


Figura 1.14. Escenario mundial de energía geotérmica. (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) y el Instituto Geológico y Minero de España (IGME), 2008)

Con respecto a los usos directos de la energía geotérmica se presenta la siguiente tabla, que muestra la capacidad instalada de los principales países productores a nivel mundial.

Tabla 1.4. Países con mayor capacidad instalada para usos directos. (León, 2007)

<i>PAIS</i>	<i>ENERGIA TJ/año</i>	<i>CAPACIDAD MW_t</i>
CHINA	45 373	3 687
SUECIA	36 000	3 840
ESTADOS UNIDOS	31 239	7 817
ISLANDIA	23 813	1 791
TURQUÍA	19 623	1 177
HUNGRÍA	7 940	694

ITALIA	7 554	607
NUEVA ZELANDA	7 086	308
BRASIL	6 622	360
GEORGIA	6 307	250
RUSIA	6 143	308
FRANCIA	5 196	308
JAPON	5 161	413
OTROS	53 361	6 264
TOTAL	261 418	27 824

La utilización de la energía geotérmica en México se encuentra aún en desarrollo, sin embargo, representa una alternativa confiable a las fuentes energéticas tradicionales, ya que el potencial del país es basto por las condiciones geográficas del mismo. Las zonas con recurso geotérmico en el país son las que se encuentran marcadas en el siguiente mapa:

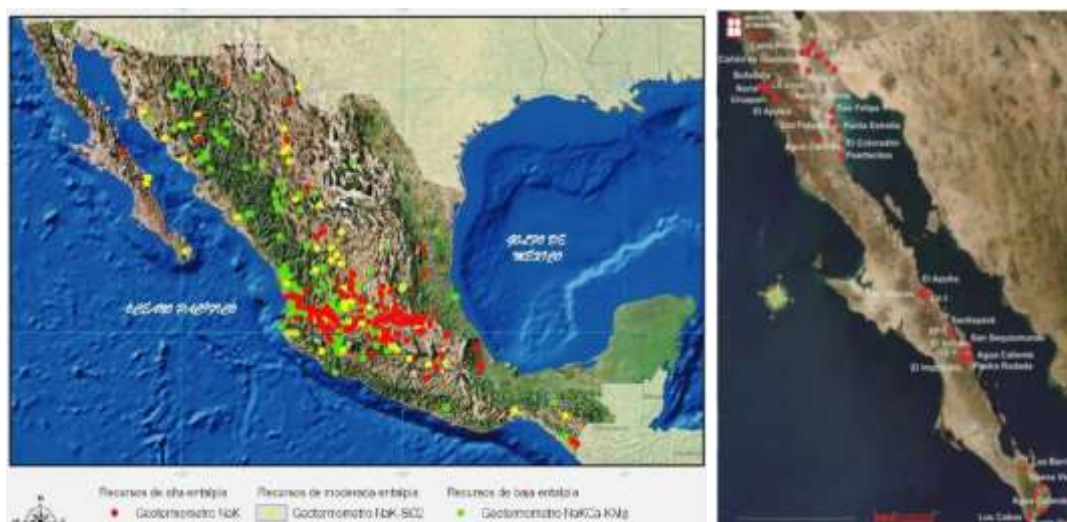


Figura 1.15. Zonas con actividad geotérmica en México. (CFE, 2010), (UNAM, 2005)

Al igual que en los demás países, en México los usos directos en los que es empleada la energía geotérmica son balneología, calefacción, invernaderos, secado de frutas y secado de madera, entre otros.

Tabla 1.5. Usos directos de la energía geotérmica en México. (Apuntes de aprovechamiento de energía geotérmica FI, 2012)

USOS	MWt	TJ/año
Calefacción individual	0.460	4.397
Calefacción de invernaderos	0.004	0.059
Secado agrícola	0.007	0.101
Bañarse y nadar	155.347	4,018.229
Total	155.818	4,022.786

La capacidad geotermoeléctrica instalada en México se muestra en la tabla de abajo, en donde también se pueden apreciar algunos datos técnicos importantes, como es la producción de vapor y las unidades en operación, que reflejan directamente el potencial energético y recursos disponibles en cada una de ellas.

Tabla 1.6. Capacidad de las centrales geotermoelectricas instaladas en México. (Apuntes de aprovechamiento de energía geotérmica FI, 2012)

Central	Localización	Capacidad (MW)	Generación anual (GWh)	Producción de vapor (millo ton)	Factor de planta (%)	Unidades en operación
Cerro prieto	Mexicali, Baja California	720	5186	50	81.8	13
Los azufres	Michoacán	188	1517	14.6	91.8	15
Los Humeros	Humeros, Puebla	40	313.4	4.83	92	8
Tres Vírgenes	Baja California Sur	10	41.2	0.55	47	2

1.2 Desalación de agua de mar

Introducción

El agua no solo es un recurso indispensable para la existencia de la vida sino también para el desarrollo de la sociedad, ya que se utiliza en la gran mayoría de los procesos industriales. Sin embargo no toda el agua es adecuada para tales propósitos, depende del grado de salinidad de la misma, y casi siempre se requiere agua dulce.

El grado de salinidad está definido por el número total de sólidos disueltos [TDS] medido en miligramos por litro [mg/l] o partes por millón [ppm]. Los valores comúnmente usados de acuerdo con el tipo de agua son los siguientes:

- Agua de mar: 15,000 – 50,000 [mg/l] TDS
- Agua salada o salobre: 1,500 – 15,000 [mg/l] TDS
- Agua de río: 500 – 3,000 [mg/l] TDS
- Agua pura: <500 [mg/l] TDS

La tierra tiene aproximadamente 1,386 millones de kilómetros cúbicos de agua [MKm³], de los cuales el 97.5 % es agua salada y el resto es agua dulce. De los 34.7 [MKm³] de agua dulce (2.5 %), el 69 % está congelado en los casquetes polares y algunas regiones montañosas. El 29.9 % están en acuíferos subterráneos (10.36 [MKm³]), el 0.9 % (0.32 MKm³) se localiza en la atmósfera y sólo el 0.3 % (0.104 [MKm³]) está distribuida en ríos, lagos, arroyos, acuíferos, embalses etc. (Díaz, 2004)



Figura 1.16. Distribución global del agua en el mundo. (CONAGUA, 2011)

Como se aprecia, el recurso disponible para su aprovechamiento directo es muy limitado, y debido al rápido aumento de la población mundial se encuentra en un estado de agotamiento crítico. Sin embargo, si nos referimos al agua salada, se puede afirmar que es un recurso ilimitado que se podría explotar si se le da un tratamiento adecuado.

La desalinización o desalación se define como el proceso de remover la sal y otros minerales del agua. Este proceso es comúnmente usado para hacer potable al agua de mar, sin embargo también puede aplicarse para obtener agua ultra pura cuyas propiedades distan mucho de las del agua potable y que es útil para ciertos procesos industriales. Cabe señalar que, mientras mayor sea la salinidad del agua de alimentación o mientras mayor sea el grado de pureza deseado, mayor será la cantidad de energía requerida en el proceso (DesalData, 2012). A lo largo de este tema se explicarán las características de los principales métodos de desalación de agua de mar, pero antes de ello se mostrará un panorama general de la industria de la desalación a nivel mundial.

La industria de la desalación ha continuado con su imparable crecimiento en estos últimos años. En la actualidad, más de 150 países del mundo utilizan la desalación para hacer frente a la falta de recursos hídricos, desde Australia hasta China y Japón, Estados Unidos, España y otros países europeos, Oriente Medio y el Norte de África.

Actualmente, la capacidad instalada correspondiente a las 13,869 plantas desaladoras en todo el mundo es de aproximadamente 62.8 millones de metros cúbicos por día [Mm³/día], de los cuales el 62% corresponden a la desalación de agua de mar, el 19% a aguas salobres y el 5% a la reutilización de aguas residuales depuradas, el resto a otras fuentes menores, y analizando las tecnologías empleadas, el panorama actual es el siguiente: el 59% de la capacidad instalada corresponde a ósmosis inversa, en segundo lugar se encuentra la evaporación flash de múltiple etapa (MSF) con un 27%, seguida de la evaporación múltiple efecto (MED) con un 9% y por último la electrodiálisis con un 4%. El 1% restante corresponde a otras tecnologías. (DesalData, 2012)

Las principales aplicaciones y usos a los que se ha destinado el agua producida por todas estas instalaciones se ha repartido en los siguientes sectores: 68% para municipios y 22% para entidades industriales. El agua desalada también se ha empleado en la industria energética (5%), agricultura (2%) y en la industria turística y militar.

El top 10 de los países con mayor capacidad de desalación es el siguiente:

Tabla 1.7. Países con mayor capacidad de desalación de agua de mar instalada. (Soliclima-Energía Solar, 2009)

Lugar	País	[Mm ³ /día]
1	Arabia Saudita	10.759
2	Emiratos Árabes	8.428
3	Estados Unidos	8.133
4	España	5.249
5	Kuwait	2.876
6	Argelia	2.675
7	China	2.259
8	Qatar	1.712
9	Japón	1.493
10	Australia	1.184

En conjunto, estos diez países suman aproximadamente el 71% de la capacidad global contratada.

México cuenta con 171 plantas desaladoras: 30 % no opera, 53 % del total (90) son utilizadas para fines turísticos, con una capacidad instalada de 26,942 [m³/d] (311 l/s), 12 % (20) son para uso industrial, equivalente a una capacidad instalada de 18,403 [m³/d] (211 l/s). El país cuenta con una capacidad comprobada para desalar agua de 67,487 [m³/d] (781 l/s), sin embargo, el 65.5 % del total de plantas desaladoras pertenecen a particulares. (Díaz, 2004)

1.2.1 Tecnologías de desalación de agua de mar

Una vez establecidos los conceptos fundamentales para la comprensión del tema de la desalación de agua de mar, se presentan las principales tecnologías utilizadas y sus características generales.

Los distintos procesos existentes se pueden clasificar en *térmicos*, *mecánicos* o *eléctricos*, según el principio de funcionamiento del sistema, o en dos grandes tipos, de acuerdo con el tratamiento que se le da al agua salada: *Procesos que separan el agua de la disolución* y *Procesos que separan los iones salinos*. Dentro de estos dos grandes grupos se puede hacer la siguiente clasificación:

Tabla 1.8. Procesos y métodos de desalación. (Santana, 2011)

Separación	Energía	Proceso	Método	Simbología
Agua de sales	Térmica	Evaporación	Destilación Súbita (flash)	MSF
			Destilación multiefecto	MED
			Termo compresión de vapor	TVC
			Destilación solar	DS

		Cristalización	Congelación	CO
		Filtración y evaporación	Formación de hidratos	FH
			Destilación con membranas	DC
	Mecánica	Evaporación	Compresión mecánica de vapor	CV
		Filtración	Ósmosis inversa	OI
Sales de agua	Eléctrica	Filtración selectiva	Electrodiálisis	ED
		Química	Intercambio	Intercambio iónico ITI

1.2.1.1 Procesos de Destilación (MSF, MED, TVC, CV, DS, DC).

Todos ellos se basan en la separación del agua mediante la evaporación y condensación posterior de dicho vapor. Los procesos se diferencian unos de otros por la forma de aportar al ciclo la energía necesaria para lograr el cambio de estado y, en algunos casos, los sistemas de recuperación del calor latente del vapor al condensarse. Los sistemas actuales constan de varias etapas y recirculación de salmuera.

Sin embargo, calentar el agua hasta evaporarla requiere de gran cantidad de energía calorífica y por lo tanto de altos costos. Además, sustancias como carbonatos y sulfatos, encontradas en el agua de mar, pueden provocar incrustaciones al ser calentadas a temperaturas mayores a 95 [°C], ya que en tales condiciones empiezan a despedir soluciones que se adhieren a los materiales; tales incrustaciones ocasionan problemas térmicos y mecánicos y, una vez formadas, son difíciles de remover. (Jaimes, 2008)

Es por ello que en este tipo de equipos es necesario reducir la temperatura de ebullición del agua. Para lograrlo se recurre a sistemas de vacío, generalmente mediante eyectores, con los cuales se disminuye la presión en el interior de las cámaras de evaporación y, en consecuencia, el punto de ebullición del agua contenida. Las presiones de vacío en el sistema también contribuyen a la evaporación sucesiva del agua en distintas cámaras, con lo que se aprovecha al máximo la energía calorífica del agua ya calentada. El número de etapas necesarias dependerá del tipo de sistema empleado y del vacío logrado.

1.2.1.1.1 Destilación súbita multietapa (Flash) MSF

Es el proceso más utilizado en el mundo, sobre todo en Oriente Medio, ya que permite el tratamiento de aguas con alta salinidad, temperatura y contaminación. Su capacidad de obtener agua destilada es mayor con respecto a los otros sistemas y dada la forma instantánea en que se produce la evaporación, el problema de las incrustaciones se ve reducido; sin embargo esto hace que el consumo de energía se eleve considerablemente.

En un sistema MSF, el agua a desalar se hace pasar, primeramente, a través de una serie de intercambiadores de calor colocados dentro de las cámaras de evaporación, con esto se logra que el flujo de agua de alimentación se precaliente conforme avanza a través de dichas cámaras, debido a la condensación del vapor generado en etapas posteriores.

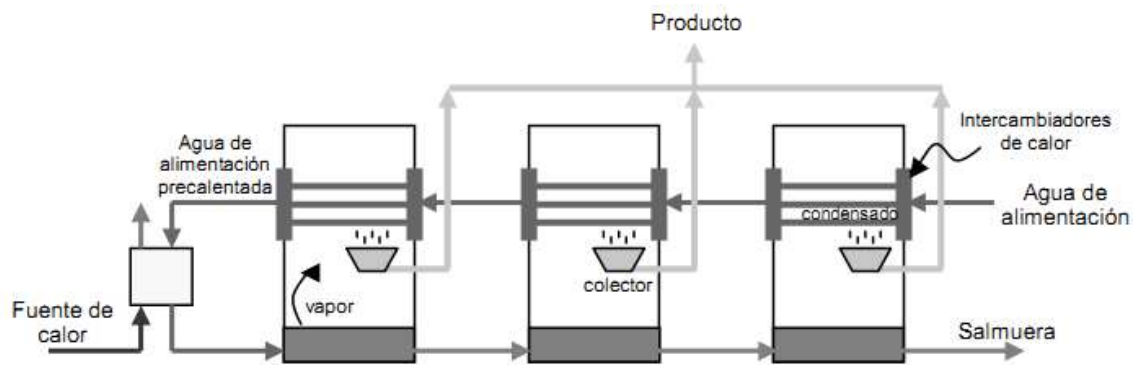


Figura 1.17. Sistema de desalación MSF. (Jaimes, 2008)

Una vez precalentada el agua, ésta se extrae del sistema y se hace pasar a través de otro intercambiador, donde absorbe energía de una fuente externa, generalmente alguna extracción de vapor de una caldera o turbina, y después es introducida a la primera cámara de evaporación instantánea. En esta primera cámara, y como consecuencia de la presión vacuométrica dentro de la misma, parte del agua se empieza a evaporar; el vapor generado, al ceder energía en los intercambiadores de precalentamiento, se condensa y es extraído como producto. Esta introducción del agua caliente en la cámara causa una evaporación rápida, casi explosiva (flashing), de ahí el nombre del proceso. La salmuera remanente se hace pasar a las siguientes cámaras, con presiones cada vez menores, donde se lleva a cabo el mismo procedimiento. Finalmente se colecta el destilado de cada cámara y se desecha la salmuera obtenida en la última etapa.

La temperatura del agua, después de haber sido calentada con la fuente de calor externa, varía entre los 90 y los 120 °C, generalmente. A mayores temperaturas la eficiencia del sistema se incrementa, pero la formación de incrustaciones también es mayor. El número de cámaras empleadas en estas plantas comúnmente varía entre 4 y 40, de lo cual depende directamente la capacidad de desalación obtenida.

1.2.1.1.2 Destilación por múltiple efecto MED

Mediante los sistemas MED es posible obtener grandes caudales de agua pura y, al igual que los sistemas MSF, son fácilmente acoplables a intercambiadores de calor que aprovechan el calor residual de algunos procesos industriales. Tiene un mejor rendimiento global que las plantas MSF y el costo de operación e instalación es menor.

Para llevar a cabo el procedimiento de destilación se recurre a una serie de cámaras, llamadas efectos, que se encuentran a presiones escalonadas de vacío; el agua a desalar se hace pasar por el primer efecto en donde recibe energía calorífica de la fuente de calor y, en consecuencia, cierta cantidad se evapora. La manera de alimentación del agua salada es por medio de un conjunto de aspersores, por lo que la evaporación se produce de forma natural en una cara de los tubos del intercambiador, aprovechando el calor latente desprendido por la condensación del vapor en la otra cara del mismo.

La reducción gradual de presión en los efectos permite que el agua se pueda evaporar a temperaturas cada vez más bajas y que el vapor obtenido en cada cámara pueda ceder su energía en la siguiente.

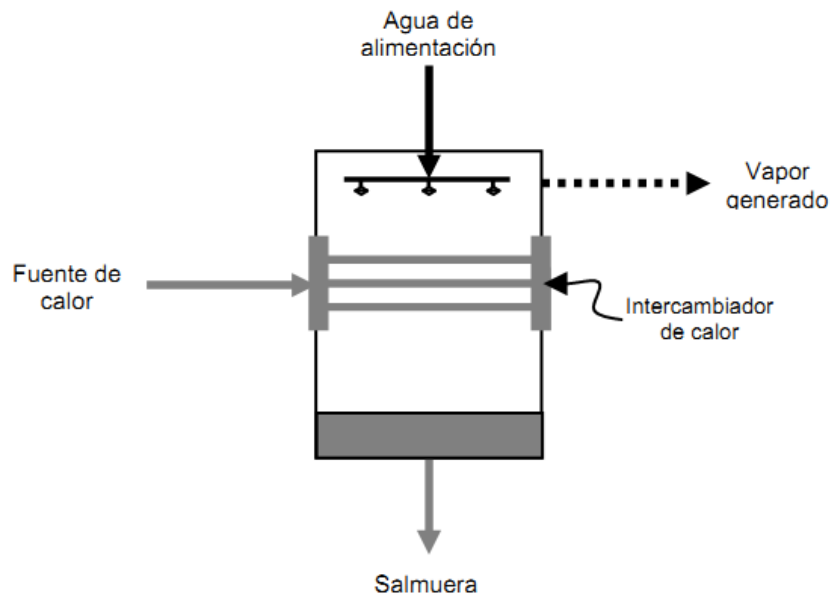


Figura 1.18. Sistema de desalación MED. (Jaimes, 2008)

Una vez que el vapor generado ha cedido su calor en el intercambiador y se ha condensado, éste se recolecta y se extrae como producto. Los actuales sistemas MED operan, comúnmente, a temperaturas máximas de 80 [°C], y en plantas grandes se pueden emplear de 8 a 16 efectos. La salmuera resultante puede ser utilizada en el siguiente efecto o desechada, dependiendo de la configuración del sistema. Los posibles arreglos del sistema MED, de acuerdo a la forma en la que se suministra el agua de alimentación, son con alimentación en serie o en paralelo, tal como se observa en los siguientes esquemas.

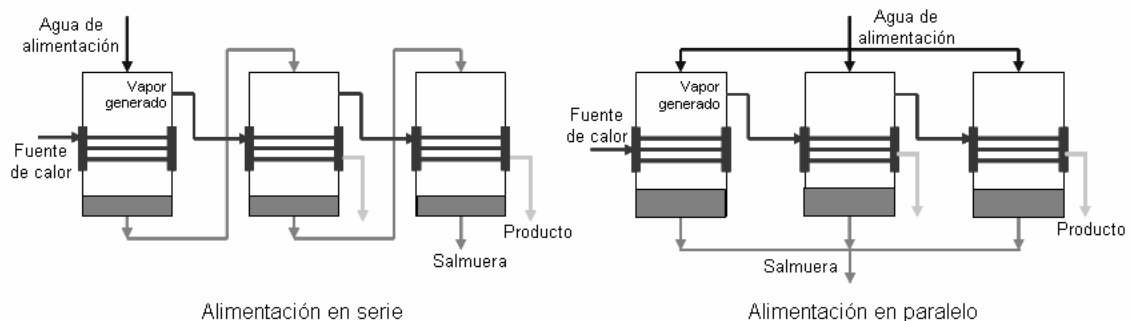


Figura 1.19. Sistemas MED con distintos arreglos de alimentación, serie y paralelo. (Jaimes, 2008)

1.2.1.1.3 Destilación por compresión de vapor (TVC y CV)

En este proceso el agua de alimentación es precalentada en un intercambiador de calor con la energía residual del agua ya desalada y de la salmuera. El agua a desalar es posteriormente introducida en una cámara de evaporación, a presión de vacío, donde absorbe energía en forma de calor hasta evaporarse; el vapor generado es después comprimido y, en consecuencia, incrementa su temperatura. Una vez comprimido el vapor, éste se hace pasar a través de un intercambiador de calor, donde cede energía al agua de alimentación que está por evaporarse; al ceder energía, el vapor se condensa y puede ser extraído como producto. Finalmente, el condensado obtenido y el agua no evaporada (salmuera) se envían al intercambiador de precalentamiento.

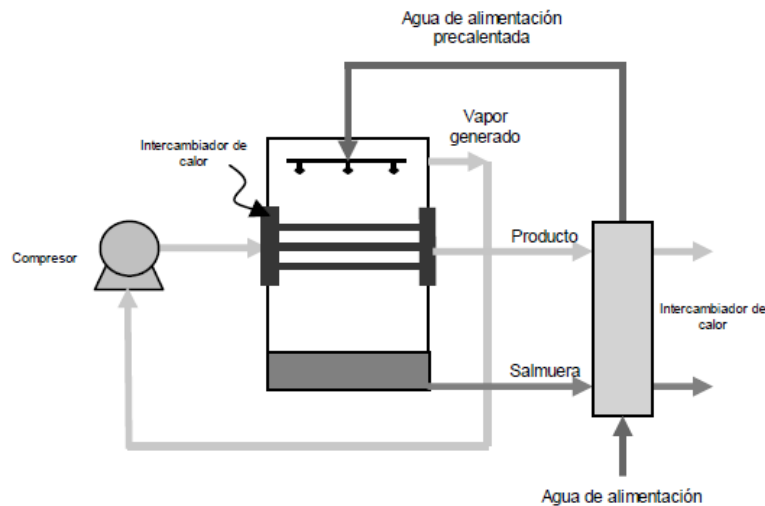


Figura 1.20. Sistema de desalación por compresión mecánica de vapor. (Jaimes, 2008)

Los procesos de desalación por compresión de vapor son particularmente empleados en plantas de pequeña y mediana capacidad. Para comprimir el vapor generado en estos sistemas pueden emplearse dos tipos de equipos, un compresor mecánico o uno térmico (eyector). Tanto el primero, que requiere energía eléctrica para operar, como el segundo pueden crear también el vacío necesario para la evaporación.

1.2.1.1.4 Destilación solar (DS)

Es el método ideal para producir agua en zonas áridas y muy aisladas del resto de las poblaciones. A pesar de tener un costo energético nulo y mínima inversión necesaria, su baja rentabilidad reside en su baja producción por metro cuadrado de colector, al destilarse tan sólo unos litros al día, bajo condiciones climatológicas favorables. Por lo tanto no se han desarrollado a gran escala en lugares con un consumo elevado de agua dulce.

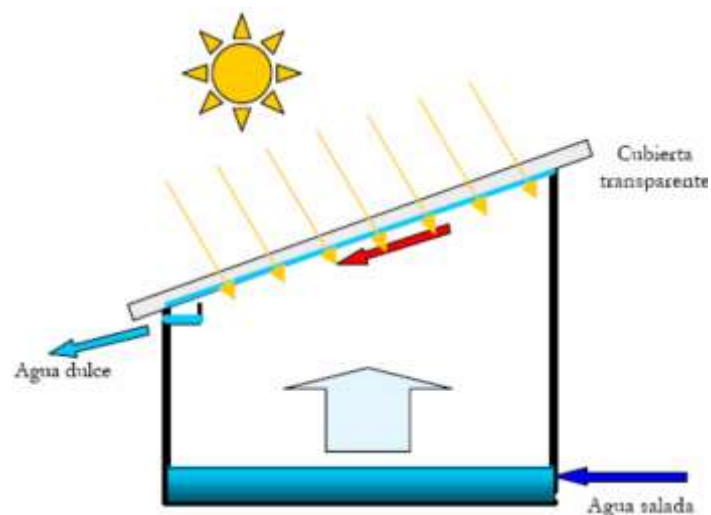


Figura 1.21. Esquema general del proceso de destilación solar. (Urcelay, 2007)

1.2.1.1.5 Destilación con membranas (DC)

Es un proceso de evaporación en el cual la membrana no forma parte activa en la separación; las membranas utilizadas son microporosas hidrófobas, por lo que sus poros no se mojan por la mezcla líquida. La diferencia de presiones parciales entre las secciones del sistema, debida a la

diferencia de temperaturas aplicada entre las dos caras de la membrana, provoca que el vapor se transporte del lado caliente al lado frío.

En este sistema la evaporación del líquido se lleva a cabo en el lado caliente (1), posteriormente se realiza el transporte del vapor generado, a través de los poros de la membrana hasta la zona de menor presión y temperatura (2), en donde se obtiene el producto final por medio de la condensación de dicho vapor.

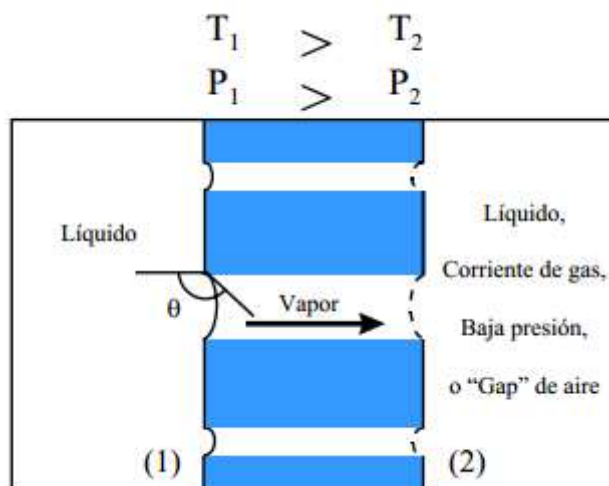


Figura 1.22. Proceso de destilación con membranas. (Payo, 1998)

1.2.1.2 Procesos de cristalización (CO, FH).

El proceso de cristalización consiste en separar los cristales de hielo, teóricamente de agua pura, que se forman cuando se rebasa el punto de congelación de las soluciones salinas; el agua dulce se obtiene fundiendo dichos cristales de hielo. Otro método basado en el mismo principio de la cristalización, consiste en obtener, mediante la adición de hidrocarburos a la solución salina, unos hidratos complejos en forma cristalina, con una relación (molécula de hidrocarburo) / (molécula de agua) del orden de 1/18.

El rendimiento energético de estos procesos de cristalización es mayor que en los de destilación, pero las dificultades tecnológicas de separación y lavado de los cristales han hecho que no se apliquen industrialmente. (Corral, 2006)

1.2.1.3 Procesos de filtración: Osmosis inversa (OI ó RO).

La ósmosis inversa (RO) es un método para extraer sólidos disueltos del agua utilizando una membrana semipermeable, que permite el paso del agua e impide el de las sales. A diferencia del proceso de destilación con membranas, antes mencionado, en la RO no se involucra ningún cambio de fase.

Para que el agua atraviese la membrana es necesario que el fluido alcance una presión mayor a la presión osmótica natural, para lo cual se utilizan generalmente bombas de alta presión, del orden de 5.4 a 8.2 [MPa]. En algunos casos se acopla un sistema de recuperación de energía a la corriente de salmuera que abandona la membrana a alta presión. La fracción de agua desalinizada producida por estas plantas es aproximadamente 30-45%. (Ramilo, 2007)

Antes de alimentar el agua de mar al sistema, es necesario someterla a un pretratamiento fisicoquímico, que incluye desinfección con cloro para evitar el crecimiento bacteriológico,

filtración multimedia para reducir la cantidad de sólidos totales suspendidos (SST), filtración con cartuchos para proteger las membranas de RO y decoloración de bisulfito de sodio.

Aunque el principio de operación es el mismo, existen dos configuraciones de RO: de fibra hueca y de arrollamiento espiral, y con respecto al arreglo de los módulos de membranas son tubulares y las de plato y marco. Su uso depende de las características del lugar y los recursos disponibles, así como los requerimientos del usuario.

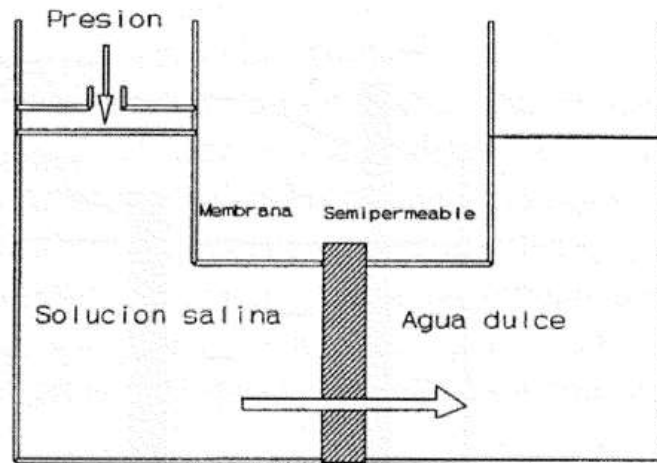


Figura 1.23. Desalación por ósmosis inversa. (Moya, 2004)

1.2.1.4 Procesos de filtración selectiva: Electrodialisis

Entre los procesos que separan sales, o los iones de la sal, se encuentra la electrodiálisis, que utiliza membranas semipermeables, selectivas al paso de los iones positivos o negativos. Si se crea un campo eléctrico al que se somete el agua salada, los cationes y los aniones emigran hacia sus respectivos electrodos, pero si en el camino encuentran estas membranas selectivas, los iones pasarán o quedarán retenidos, dejando zonas intermedias y alternativas entre las membranas, donde se concentra el agua (rechazo) y donde se obtiene el agua dulce (producto). Actualmente este proceso se utiliza solamente para para aguas salobres.

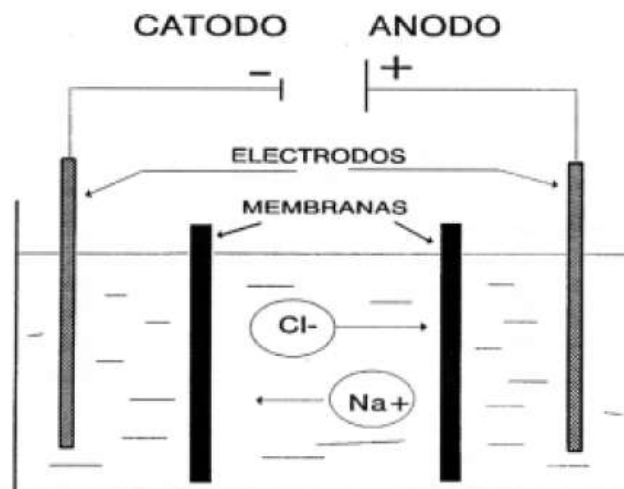


Figura 1.24. Proceso de electrodiálisis. (Moya, 2004)

1.2.1.5 Intercambio iónico

El intercambio iónico también es un proceso que separa sales y se basa en las propiedades que presentan ciertas sustancias sólidas insolubles, que son capaces de intercambiar aniones o cationes cuando se ponen en contacto con un electrolito. Sólo es de aplicación en aguas poco concentradas y como tratamiento de afino en procesos industriales; por su costo no es apropiado para aguas salobres y de mar.

En seguida se muestra una tabla resumen de las características de los principales sistemas de desalación de agua de mar.

Tabla 1.9. Características generales de los principales métodos de desalación. (Santana, 2011)

Características	MSF	MED-TVC	CV	OI	ED
Tipo de energía	Térmica	Térmica	Eléctrica	Eléctrica	Eléctrica
Consumo energético primario [KJ/Kg]	Alto (> 200)	Alto/medio (150-200)	Medio (100-150)	Bajo (< 80)	Bajo (< 30)
Costo Instalaciones	Alto	Alto/medio	Alto	Medio	Medio
Capacidad de producción [m ³ /día]	Alta (> 50,000)	Media (< 20,000)	Baja (< 5,000)	Alta (> 50,000)	Media (< 30,000)
Posibilidad de ampliación	Difícil	Difícil	Difícil	Fácil	Fácil
Fiabilidad de operación	Alta	Media	Baja	Alta	Alta
Desalación agua de mar	Sí	Sí	Sí	Sí	No
Calidad del agua desalada [ppm]	Alta (< 50)	Alta (< 50)	Alta (< 50)	Media (300-500)	Media (< 300)
Superficie de terreno requerida para la instalación	Mucha	Media	Poca	Poca	Poca

1.3 Sistemas de generación de vacío

Introducción

Como se ha mencionado en el capítulo 1.2.2, algunas de las principales tecnologías de desalación de agua de mar emplean sistemas de generación de vacío con la finalidad de maximizar el aprovechamiento de la energía suministrada, es por ello que a continuación se presentan las características generales de algunos de los sistemas de vacío más utilizados en la industria.

Conceptualmente, el *vacío* se define como la ausencia total de materia en un espacio determinado, sin embargo esta condición no es realizable (hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, neón, y argón son ejemplos de gases permanentes); debido a ello, dentro del ambiente técnico, se reconoce como *vacío* al espacio en el cual la presión es inferior a la atmosférica.

En el Sistema Internacional (SI), la unidad de medida de presión es el Pascal [Pa], no obstante, gran cantidad de equipos y textos expresan esta magnitud en unidades pertenecientes a otros sistemas.

Tabla 1.10. Unidades de presión y factores de conversión. (Lazzerio Tecnologie, 2012)

	Pa	mbar	Torr/ mm Hg	psi	lusec	Kgf/cm ²	atm	mm H ₂ O	inch Hg
Pa	1	0,01	7,5 10 ⁻³	0,14 10 ⁻³	7,5	10,2 10 ⁻⁶	9,87 10 ⁻⁶	0,1	0,29 10 ⁻⁶
mbar	100	1	0,75	0.01451	750	10,2 10 ⁻²	9,87 10 ⁻⁴	10	0.029531
Torr/ mmHg	133	1,33	1	0.01934	1000	1,36 10 ⁻³	1,32 10 ⁻³	13,3	3,49 10 ⁻²
psi	6,9 10 ³	68,95	51.715	1		0.07032	0.06806	702	2.041
lusec	0,133	1,3 10 ⁻³	10 ⁻³		1	1,36 10 ⁻⁶	1,32 10 ⁻⁶	1,3 10 ⁻²	3,49 10 ⁻⁵
Kgf/ cm ²	98,1 10 ³	981	736	14.22	7,36 10 ⁶	1	0,968	7,36 10 ³	29
atm	1,013 10 ⁶	1013	760	14.70	7,6 10 ⁶	1,033	1	1 10 ⁴	29,92
mm H ₂ O	10	0,1	7,5 10 ⁻²	27.68	75	10,2 10 ⁻⁵	1 10 ⁻⁴	1	0,29 10 ⁻⁶
inch Hg	3,39 10 ³	33,86	25,4	0.4910	2,54 10 ⁴	34,5 10 ⁻³	33,4 10 ⁻³	3,39 10 ²	1

La presión atmosférica vale aproximadamente un bar absoluto (1013 mbar), un manómetro que señala cero a la presión atmosférica y muestra en cambio una señal negativa en vacío, mide la presión relativa como un alejamiento respecto de la presión atmosférica. En algunos casos, el valor del vacío producido se indica con un porcentaje, considerando 100% el vacío absoluto.

El grado de vacío se clasifica de acuerdo a los siguientes rangos de operación:

Tabla 1.11. Tipos de vacío. (Tecnovac, 2012)

Rango de vacío	Presión [mbar]	Densidad de moléculas/ cm ²
Vacío grueso	1013-1	10 ¹⁹ - 10 ¹⁶
Vacío medio	1 - 10 ⁻³	10 ¹⁶ - 10 ¹³
Alto vacío	10 ⁻³ - 10 ⁻⁷	10 ¹³ - 10 ⁹
Ultra alto vacío	< 10 ⁻⁷	< 10 ⁹

En cuanto a las aplicaciones, se mencionarán solo algunas de las más importantes, aunque cabe señalar su campo es muy extenso.

Procesos industriales:

- i. Empaquetado de alimentos.
- ii. Evacuado y secado de circuitos frigoríficos.
- iii. Secado e impregnación de transformadores.
- iv. Sistema de soldadura por haz de electrones.
- v. Hornos de fusión y tratamientos térmicos.
- vi. Crecimientos de capas finas (óptica, tratamientos duros, etc.)
- vii. Metalización de faros y espejos.
- viii. Industria de semiconductores.
- ix. Sistemas de detección de fugas de Helio.
- x. Fabricantes de criostatos y tanques criogénicos.
- xi. Sistema de análisis por espectrometría de masas.
- xii. Desalación y purificación de agua.

Investigación:

- i. Crecimiento de capas en óptica y electrónica.
- ii. Sistemas de análisis de superficie (XPS, SIMS, etc.)

- iii. Cámaras de simulación espacial.
- iv. Reactores de fusión.
- v. Grandes aceleradores de partículas.

A continuación se presenta una revisión general de los principales sistemas de generación de vacío.

1.3.1 Bombas.

Desde épocas de los egipcios, al inyectar aire a los hornos el vacío era utilizado sin saberlo, sin embargo, formalmente fue en el año 1640 cuando fue inventada la bomba de aire por Otto Von Guericke, quien adaptó a un tonel de madera una bomba de agua, después lo llenó con agua y lo clausuró; con la ayuda de varios hombres procedió a sacar el agua. El bombeo se prolongó después de vaciado el tonel, lo que causó la precipitación del aire a través de los poros de la madera. Este suceso lo motivó a ocuparse en otro experimento: la fabricación de una esfera de cobre a la que se le podía colocar una bomba, omitió el agua y bombeó directamente el aire; cuando había extraído aparentemente todo el aire, la esfera se deformó de manera repentina (sufrió un efecto de compresión) debido a la presión atmosférica.



Figura 1.25. Bomba de aire de Von Guericke usada en la demostración en Berlín y Magdeburgo. (Farías, 1995)

A partir de este suceso se desarrolló la idea de la generación de vacío, tal como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 1.12. Desarrollo histórico de las bombas de vacío. (Farías, 1995)

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

Actualmente, los rangos de trabajo de los distintos tipos de bombas de vacío son los siguientes:

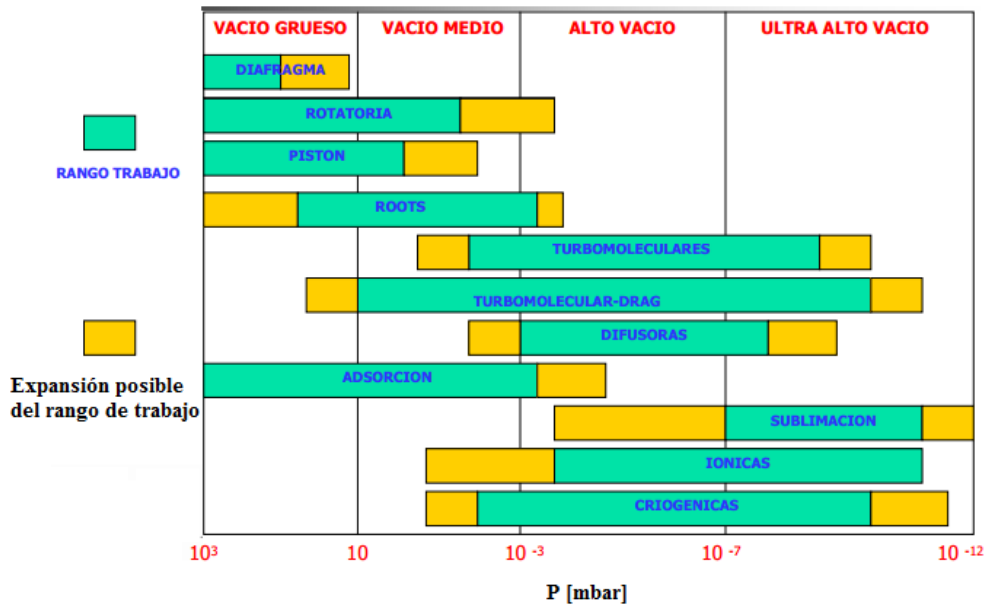


Figura 1.26. Rangos de operación de las bombas de vacío. (Tecnovac, 2012)

1.3.1.1 Bombas de Membrana.

Su principio de operación se basa en el cambio de volumen de una pequeña cámara de bombeo como consecuencia de la expansión y compresión que sufre su membrana. En la etapa de expansión se produce la toma de gas y en la de compresión su expulsión. Suelen tener de tres a cuatro etapas de bombeo y es posible alcanzar vacíos de hasta 2[mbar] aproximadamente, lo cual representa una de sus mayores desventajas, además de que posee una capacidad de bombeo relativamente pequeña.

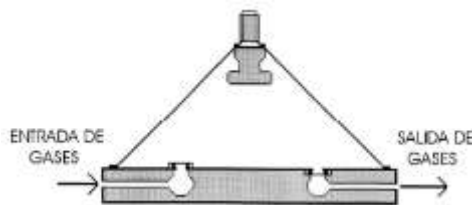


Figura 1.27. Principio de operación de las bombas con membrana. (Tecnovac, 2012)

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.

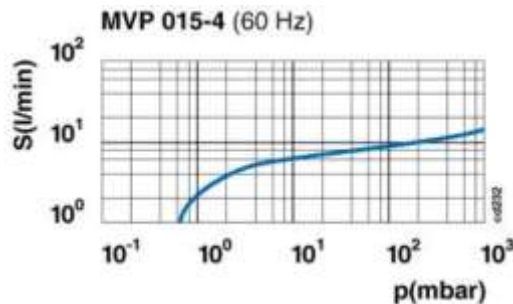


Figura 1.28. Capacidad de bombeo. Bomba de membrana serie MVP 15-4. (Tecnovac, 2012)

1.3.1.2 Bombas Rotativas de Paletas.

Los componentes básicos de este tipo de bombas son el estator, las paletas, el rotor, las válvulas y la carcasa, tal como se muestra en seguida.

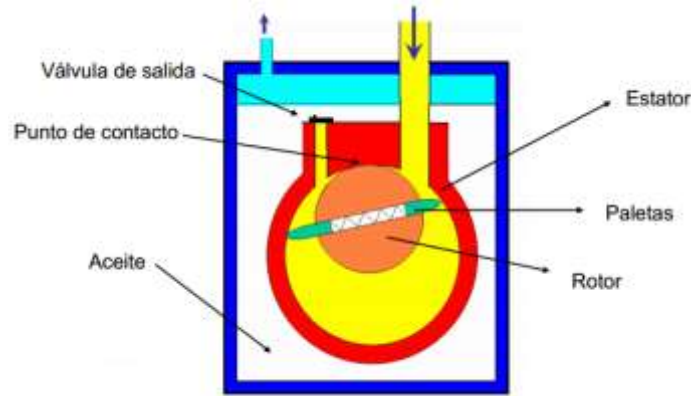


Figura 1.29. Componentes de las bombas rotativas de paletas. (Tecnovac, 2012)

Existen dos tipos de bombas rotativas: de Etapa Simple y de Doble Etapa, con uno o dos cuerpos de bombeo respectivamente. Las presiones de vacío que se alcanzan son de hasta 5×10^{-2} [mbar] para las de un solo cuerpo y de hasta 5×10^{-3} [mbar] para las de doble etapa. El principio de funcionamiento de cada una de ellas y sus velocidades de bombeo se observan en los siguientes esquemas:

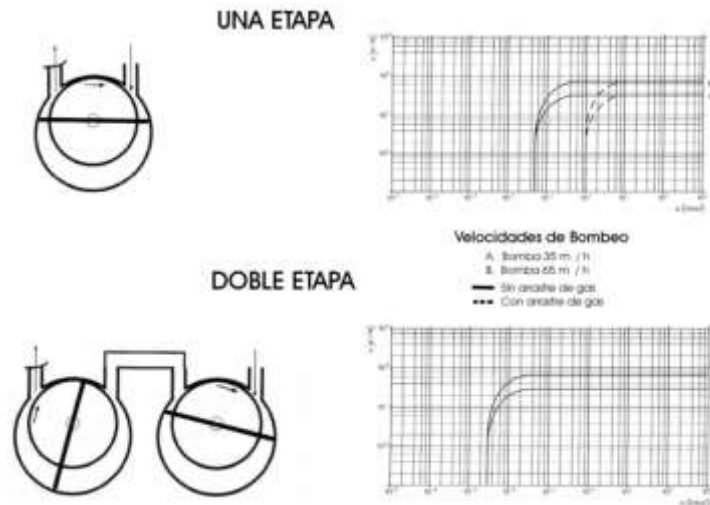


Figura 1.30. Bombas rotativas de una y dos etapas. Velocidades de bombeo. (Tecnovac, 2012)

Las propiedades que deben tener los aceites de lubricación y sellado son principalmente: baja presión de vapor a la temperatura de trabajo, no reactivos y mantener la viscosidad, entre otras; por lo que generalmente se utilizan aceites minerales y sintéticos, dependiendo del fluido de trabajado de la bomba.

El mantenimiento periódico que requieren las bombas rotatorias es el control del nivel del aceite y cambio del mismo antes de su degradación, así como revisión y cambio de los filtros, que protegen a la bomba y evitan la retrodifusión de vapores de aceite a la cámara de vacío.

Las ventajas que representan con respecto a otros tipos de bombas son el alto índice de compresión que manejan, del orden de 10^6 , y el escaso mantenimiento que requieren, aunque

comúnmente presentan retrodifusión de vapores de aceite al sistema y contaminación del fluido bombeado.

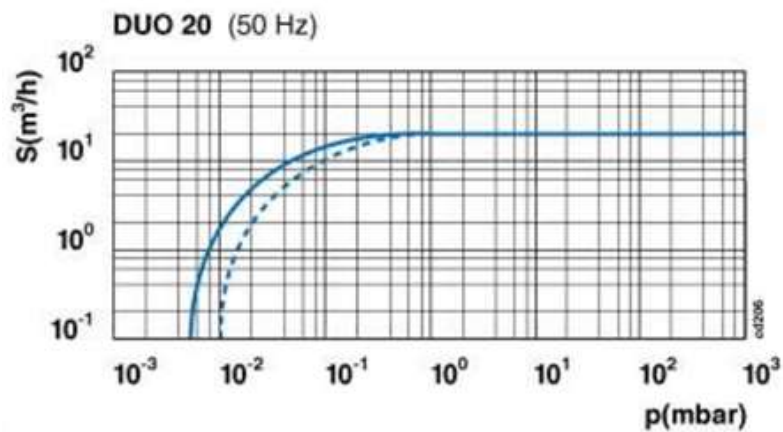


Figura 1.31. Capacidad de bombeo. Bomba rotativa de paletas serie DUO 20. (Tecnovac, 2012)

1.3.1.3 Bombas de Pistón.

Éstas bombas mantienen un mejor desempeño que las bombas rotativas para algunas aplicaciones, ya que no utilizan aceites, lo que permite que el fluido bombeado no se contamine con partículas externas. Por su capacidad de bombeo y bajo mantenimiento, son comúnmente usadas como bombas primarias de bombas turbomoleculares o grupos Roots, aunque el ruido que generan es considerable. Su principio de operación se muestra en el siguiente esquema.

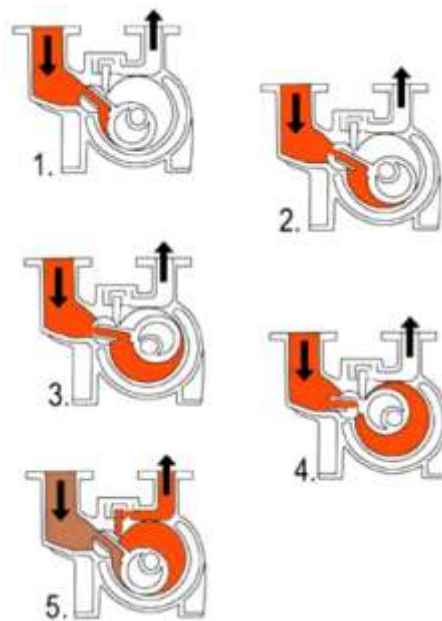


Figura 1.32. Principio de operación de las bombas rotativas de pistón. (Tecnovac, 2012)

Cabe señalar que las velocidades de bombeo varían considerablemente de una serie a otra, por lo que su uso requiere un profundo análisis previo, que asegure el buen funcionamiento de los demás dispositivos del sistema.

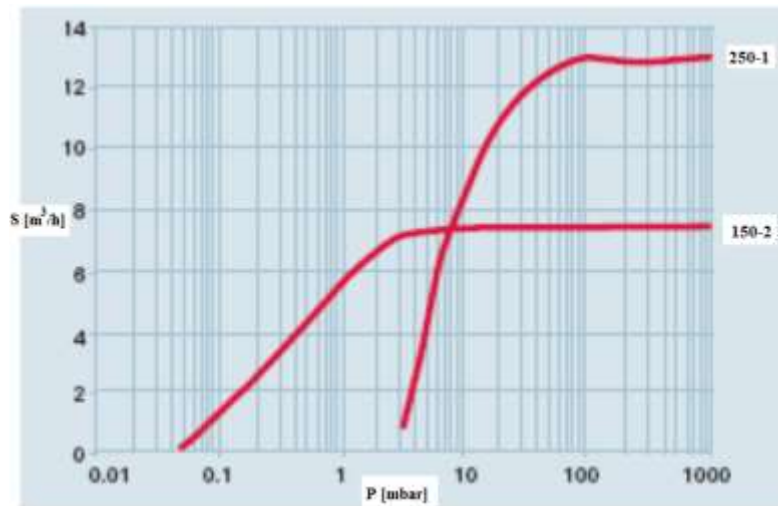


Figura 1.33. Bombas rotativas de pistón serie 250-1 y 150-2. Velocidades de bombeo. (Tecnovac, 2012)

1.3.1.4 Bombas Scroll.

Las bombas Scroll se pueden considerar como la última generación de las bombas rotativas de paletas, donde éstas últimas se han sustituido por un rotor en forma de espiral, excéntrico respecto al árbol motor y que rueda sobre la superficie del estator, que en lugar de ser circular también tiene forma de espiral concéntrica respecto al árbol motor.

La principal diferencia que se tiene con respecto a las bombas rotativas de paletas es que la espiral móvil del rotor no gira con este último, sino que sólo se traslada con él de manera paralela. Ambas espirales son idénticas y están ensambladas con una diferencia de fase de 180°. El hecho de que el perfil de las dos espirales sea de evolvente, permite a la espiral móvil rodar sin deslizamiento sobre la espiral fija, cumpliéndose en todo momento la alineación de los centros de las dos espirales y el punto de contacto entre ambas.

Debido a su diseño, el dispositivo de involución en espiral presenta por sí mismo la capacidad de reducir el volumen y generar así una relación de compresión determinada. A medida que el volumen interno de la cámara de compresión se reduce, aumenta la presión del gas para posteriormente expulsarlo y así generar el vacío requerido.

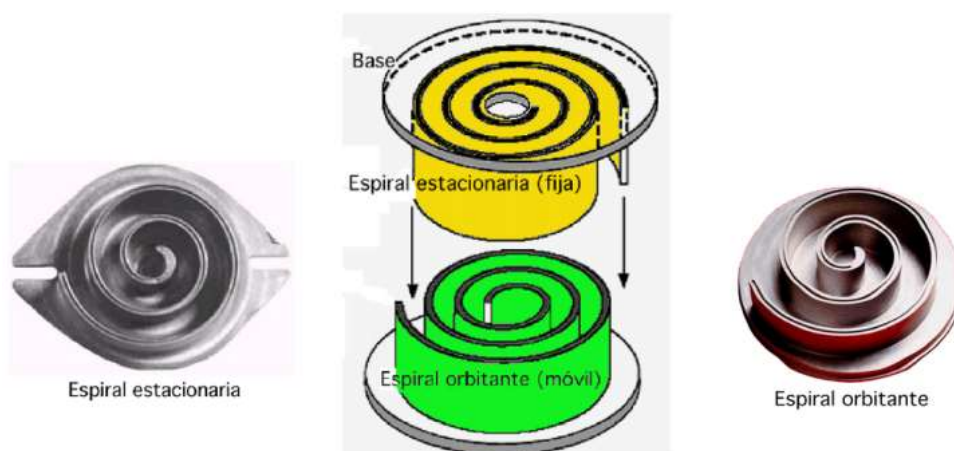


Figura 1.34. Espirales de las Bombas Scroll, invertidas y con un defase de 180°. (Estébanez, 2011)

1.3.1.5 Bombas Roots.

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 a continuación.

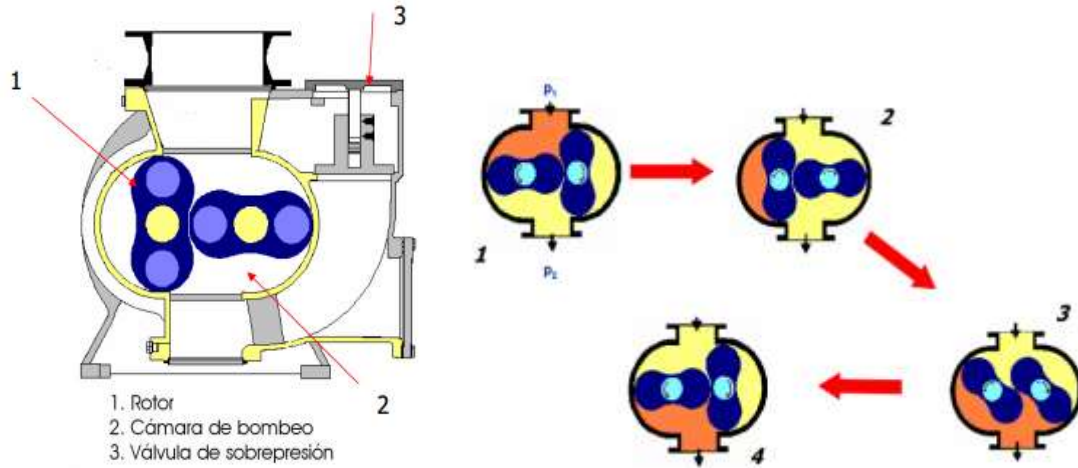


Figura 1.35. Constitución de las bombas roots y principio de operación. (Tecnovac, 2012)

Las Bombas Roots presentan una alta capacidad de bombeo a un costo relativamente bajo, además de que no se requieren equipos adicionales de lubricación, puesto que están exentas del uso de aceites. Sin embargo, casi siempre necesitan una bomba de apoyo y su nivel sonoro es bastante elevado, lo que puede afectar algunos otros dispositivos del sistema.

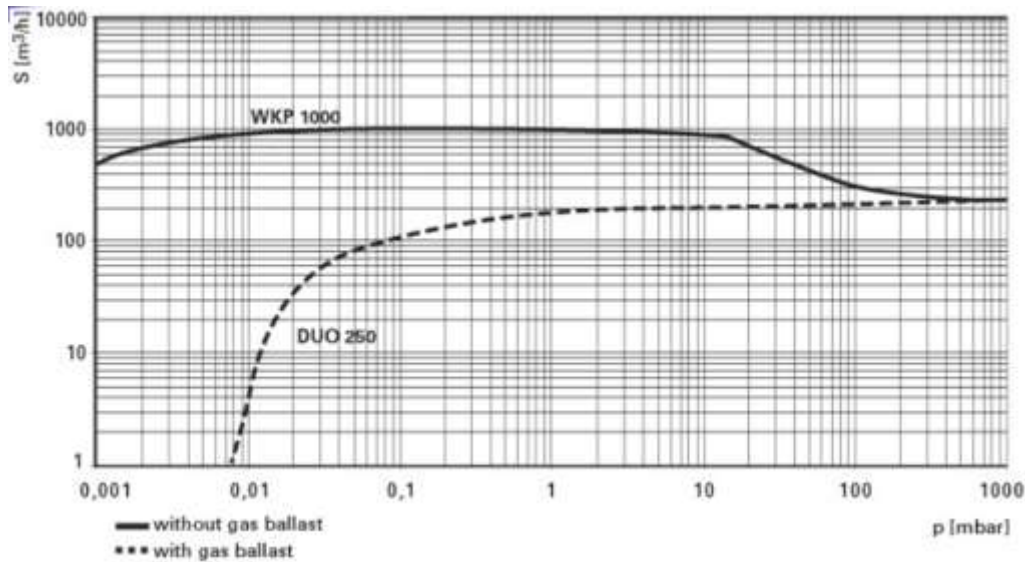


Figura 1.36. Velocidad de bombeo de las bombas roots, con y sin *gas ballast*. (Tecnovac, 2012)

El *gas ballast* (lastre de aire) sirve para evitar que haya condensaciones en el cuerpo de la bomba, en procesos en los que se tiene que bombear gran cantidad de vapor de agua. A través de la válvula de *gas ballast* se admite una cantidad controlada de aire en la etapa de compresión de la bomba y de esta forma se consigue que la nueva mezcla gas-vapor alcance la presión de expulsión antes de producirse condensación.

1.3.1.6 Bombas Difusoras.

Las bombas difusoras o de difusión son bombas propulsoras de vapor que trabajan bajo el principio de la transferencia de momento de moléculas de vapor a altas velocidades, formadas calentando un fluido condensable adecuado, a moléculas de gas provocando su movimiento a través de la bomba.

Una placa calefactora produce vapor calentando el fluido de la bomba (normalmente aceite) hasta su punto de ebullición, a una presión habitualmente de 10^{-1} [torr] obtenida a partir de una bomba de vacío de respaldo. Cuando el líquido entra en ebullición el vapor es forzado a entrar en las columnas centrales de la bomba y sale por las toberas en forma de chorro a gran velocidad, chocando contra las paredes de la bomba que están refrigeradas por agua fría, de manera que condensa y cae hacia el fondo de la chimenea donde vuelve a calentarse. Este ciclo se mantiene mientras duren las condiciones de calentamiento y presión adecuadas.

A medida que las moléculas de gas del sistema entran en la bomba de manera aleatoria (condiciones de flujo molecular) chocan contra el chorro de vapor; algunas de ellas son entonces correctamente impactadas, siendo dirigidas hacia el siguiente chorro y subsiguientemente hacia el escape de la bomba, donde son expulsadas hacia la atmósfera por la bomba de respaldo.

Mediante este tipo de bombas es posible alcanzar altas velocidades de bombeo y por lo tanto desplazar grandes cargas de gas, sin embargo tienen la desventaja de ser equipos robustos que consumen gran cantidad energía, además de que a menudo se presenta contaminación en la cámara de aspiración.

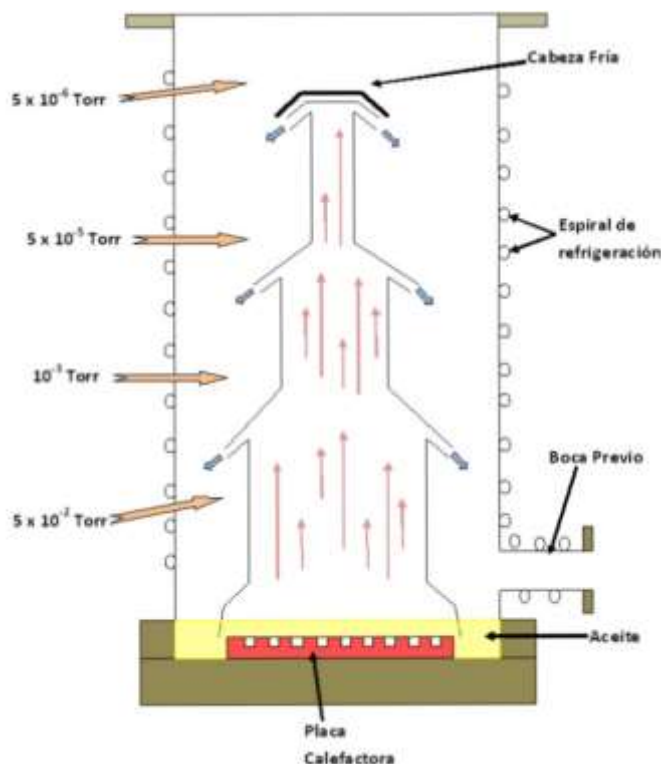


Figura 1.37. Corte esquemático de una bomba difusora y vacíos finales por etapa. (Marpa vacuum , 2012)

1.3.1.7 Bombas Turbomoleculares - Drag.

La operación de este tipo de bombas se basa en la dirección y velocidad que adquieren las moléculas de gas al chocar con una superficie móvil a gran velocidad. El nombre se le da debido

a que es la combinación de dos tipos de bombas: termomolecular y drag, y está compuesta por unos álabes en movimiento (rotor) y otros en estado estacionario (estator), con las etapas orientadas en forma inversa. Cada canal rotor-estator corresponde a una etapa de bombeo; las etapas mayores tienen como función succionar el mayor número de moléculas posibles, y las etapas menores tienen la misión de comprimir las moléculas hasta su descarga.

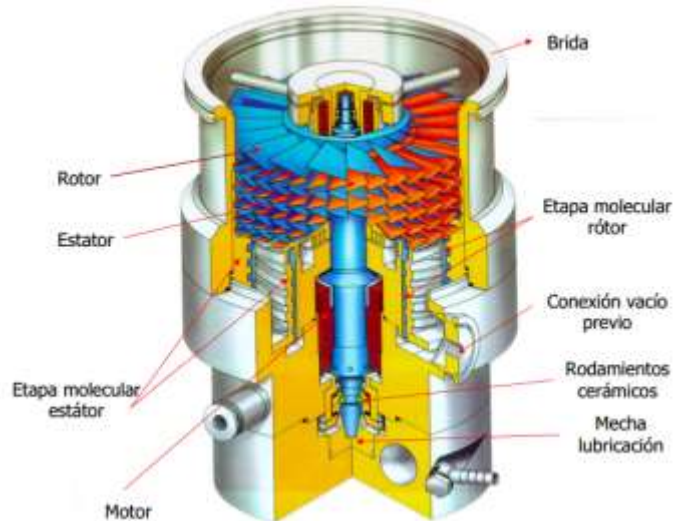


Figura 1.38. Componentes de la bomba Turbomolecular - Drag. (Tecnovac, 2012)

La gran ventaja de estas bombas es que permiten usar como bomba primaria las de membrana (vacío limpio), lográndose eficiencias similares a las de bombas rotativas. El mantenimiento necesario para lograr un buen funcionamiento del sistema consiste principalmente en el cambio de los rodamientos cada dos años y la mecha de lubricación cada año.

1.3.1.8 Bombas de Sublimación de Titanio.

Se basan en las propiedades de efecto *getter* que tiene el titanio cuando sublima. Un filamento de Titanio se calienta debido al paso de una corriente muy elevada, generalmente 30 [A], este se evapora y se dirige hacia las paredes frías, que suelen estar normalmente refrigeradas con agua o nitrógeno, formando una capa. Las partículas del gas al llegar a la capa de Titanio, quedan quimiadsorbidas, formando compuestos de Titanio estables, con muy baja presión de vapor. Las bombas de sublimación de Titanio se usan como complemento a las bombas iónicas o turbomoleculares.

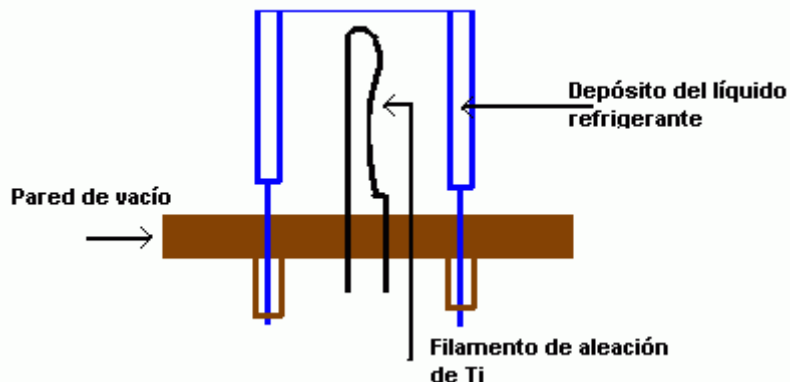


Figura 1.39. Esquema de la bomba de sublimación del titanio. (Nuevas Tecnologías y Contaminación de Atmósferas, 2012)

1.3.1.9 Bombas Iónicas.

Existen de dos tipos: Bombas tipo diodo y bombas tipo tríodo. Las del primer tipo están compuestas de dos cátodos y un ánodo con varios cilindros en posición intermedia, además cuentan con un imán permanente rodeando el cuerpo de la bomba. Cuando se produce la descarga, los electrones se dirigen hacia el ánodo y tienen un movimiento helicoidal alrededor de las líneas del campo magnético. Los electrones ionizan moléculas de gas que aparecen en su trayectoria, de esta manera, los iones positivos producidos bombardean los cátodos y arrancan las moléculas de titanio que posteriormente forman las películas *getter* sobre las superficies del ánodo. Cabe mencionar que estas bombas tienen muy poca capacidad de bombeo para gases nobles.

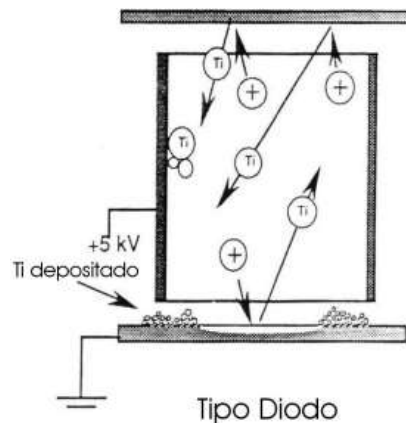


Figura 1.40. Bomba iónica tipo diodo. (Tecnovac, 2012)

Por otro lado, en las bombas iónicas de tipo tríodo se añaden dos electrodos auxiliares, con lo que además de solucionar el problema de bombeo de gases nobles, se aumenta la capacidad de bombeo.

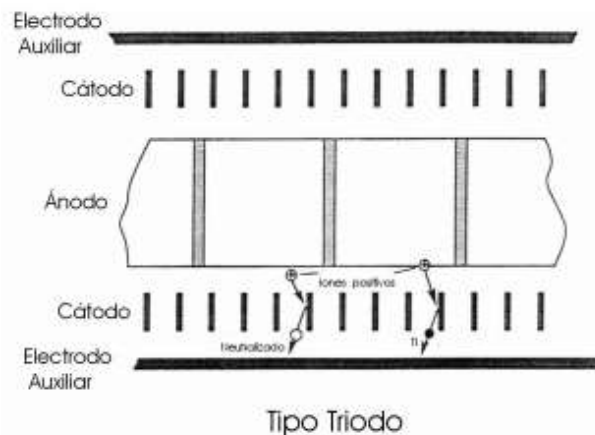


Figura 1.41. Bomba iónica tipo tríodo. (Tecnovac, 2012)

Algunas de las ventajas de estas bombas son su baja producción de ruido, el vacío que logran sin apoyo de alguna bomba primaria y la limpieza del mismo, aunque su capacidad de bombeo varía con la presión y tipo de gas. La vida media de los cátodos varía dependiendo de la presión de trabajo.

1.3.1.10 Bombas Criogénicas.

Se basan en la condensación que sufren los gases y vapores al expandirse el nitrógeno o helio líquido sobre una superficie. La bomba está compuesta por una cabeza fría de dos etapas y un compresor que hace circular el helio en un circuito cerrado. Para evitar sobrecargas por radiación, estas bombas van equipadas con una pantalla y un deflector acoplado a un sistema de refrigeración; en esta zona se alcanza una temperatura de aproximadamente 80 [K] y se produce la condensación del vapor de agua, mientras que en la superficie fría de la cabeza se alcanzan entre 10 y 20 [K], con lo que se consigue la condensación de algunos gases como O₂, Ar y N₂, entre otros. Para absorber gases como el hidrógeno, el neón y el helio, la superficie fría está recubierta interiormente de una capa de carbón activo.

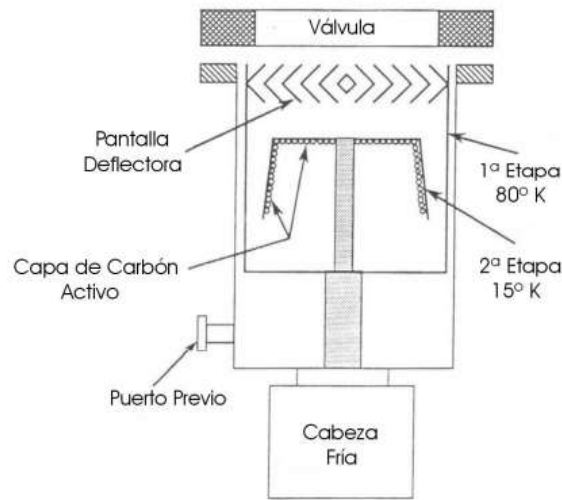


Figura 1.42. Principales componentes de una bomba criogénica. (Tecnovac, 2012)

Algunas ventajas que tienen estas bombas con respecto a las anteriores son su alta capacidad de bombeo, la gran cantidad de gas desplazado y la limpieza del vacío que producen, aunque su tiempo de estabilización al arranque es largo y genera vibraciones considerables, además de su costoso mantenimiento.

1.3.1.11 Bombas de anillo líquido.

Las bombas de anillo líquido constan de una carcasa cilíndrica, en la cual el rotor se encuentra dispuesto excéntricamente. La carcasa se llena parcialmente de líquido (denominado líquido de servicio) y con el giro del rotor se transforma en un anillo hidráulico que se adhiere a la carcasa. Las bombas de vacío de anillo líquido poseen capacidades de succión de 10 [m³/h] hasta 30,000 [m³/h], generando un vacío hasta por debajo de los 30 mbar absolutos. (Lozano, 2011)

Las bombas de vacío de anillo líquido tienen una construcción simple pero son de trabajo pesado, no requieren lubricación de aceite y son capaces de manejar la mayoría de gases y sólidos, incluso corrosivos. Su desventaja es que tienen alto poder de absorción y, en el proceso, pueden contaminar el fluido de trabajo.

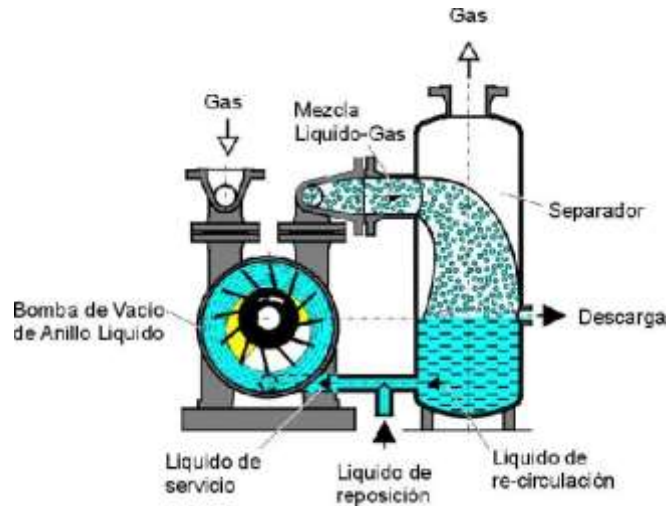


Figura 1.43. Componentes de una bomba de anillo líquido. (Sihi Perú, 2012)

1.3.1.12 Bombas de canal lateral.

Este tipo de bombas funcionan tanto en aspiración como compresión y están diseñadas para trabajar de manera continua durante largos intervalos de tiempo. Mediante un rodete especial, el aire aspirado está obligado a seguir un recorrido en espiral y asimismo sometido a reiteradas aceleraciones, incrementando así la presión diferencial del fluido transportado a través de la bomba. El rodete está montado directamente sobre el eje del motor y todas las partes giratorias están dinámicamente equilibradas, obteniéndose así una ausencia prácticamente total de vibraciones. Las bombas de canal lateral están normalmente construidas totalmente en aluminio moldeado a presión.

Algunas de sus ventajas son la elevada capacidad de bombeo con un bajo nivel sonoro generado, alrededor de 70 [dB], y la poca contaminación del fluido de trabajo, además de que estos equipos pueden ser montados tanto en forma vertical como horizontal, dando así aún más flexibilidad de diseño al sistema en el cual se lo incorpora. Las bombas de canal lateral son generalmente usadas en sistemas de: transporte neumático, plantas purificadoras de agua, industria textil, equipamientos de limpieza industrial y otras aplicaciones donde existe la necesidad de aire o gas limpio. (Envasar al vacío, 2011)

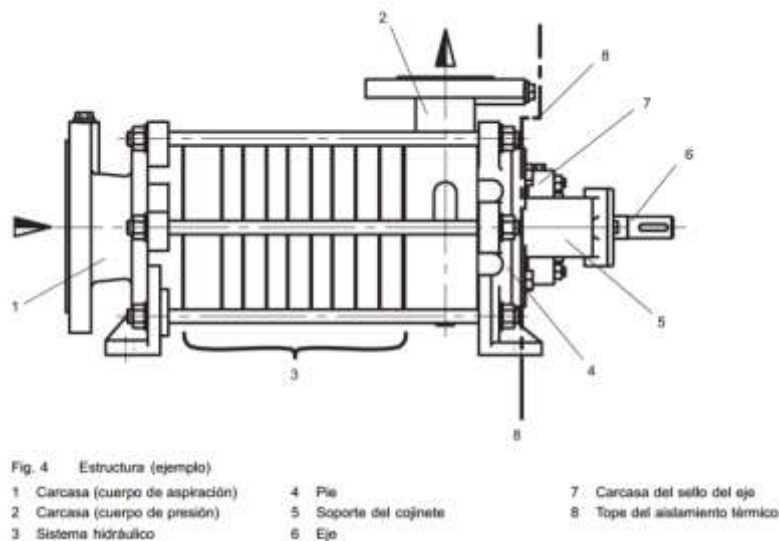


Figura 1.44. Bomba de canal lateral. (Certificado CE, 2010)

1.3.2 Eyectores y eductores.

Son dispositivos usados para inducir un fluido secundario a partir de un fluido primario a alta velocidad, con base en la transferencia de momento y energía. Estos sistemas pueden operar con fluidos incompresibles (líquidos), en donde se denominan *jet pumps* o *eductores*, y con fluidos compresibles (gases y vapor o mezclas) en donde se denominan *eyectores*, *inyectores* o *termocompresores*. En las siguientes figuras se muestran las geometrías típicas de los dispositivos mencionados:

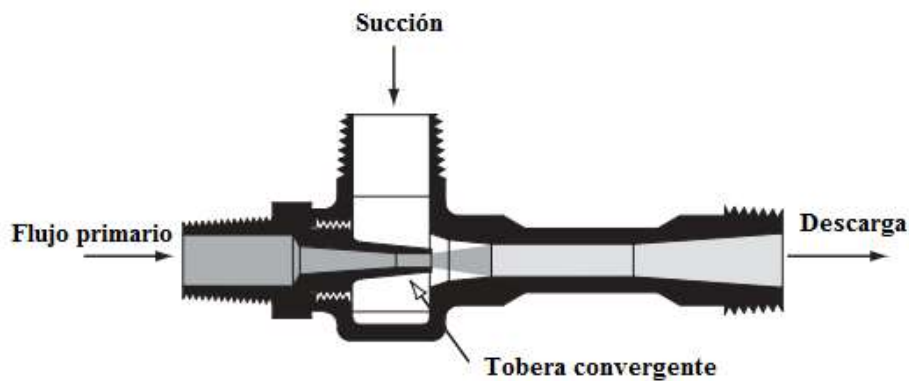


Figura 1.45. Sección transversal de un eductor. (schutte & koerting, 2011)

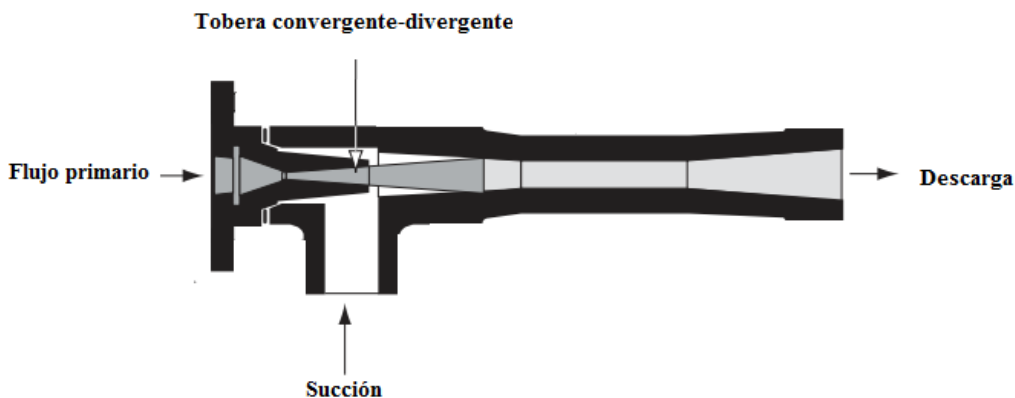


Figura 1.46. Sección transversal de un eyector. (schutte & koerting, 2011)

El proceso de trabajo de ambos es prácticamente el mismo, un fluido de alta presión y muy baja velocidad (corriente primaria) se ingresa al equipo para ser acelerado en la tobera. A la salida de esta zona, parte de la energía del fluido primario se intercambia al fluido secundario. La alta velocidad y la baja presión estática inducen al fluido secundario desde la sección de entrada y lo acelera hasta la cámara de mezclado, en donde posteriormente ambas corrientes se mezclan y salen del equipo completando el proceso.

Una ventaja de estos dispositivos, con respecto a las bombas de vacío, es su geometría relativamente simple y el hecho de que no tiene partes móviles, lo que aumenta considerablemente la confiabilidad y reduce sus dimensiones. Por otra parte, son equipos estáticos sin ninguna pieza rotativa, por lo que su mantenimiento es mínimo y su funcionamiento y utilización son simples. Pueden fabricarse en cualquier tamaño y material disponible en el mercado, y pueden ser empleados en ambientes agresivos y en zonas contaminadas o inaccesibles. Sin embargo, las eficiencias alcanzadas son bajas, entre 17 y 34% dependiendo del equipo en función de las presiones requeridas y los fluidos de trabajo.

1.4 Conclusiones

La energía geotérmica es una buena alternativa para disminuir el uso de fuentes tradicionales, como lo son los hidrocarburos, y no solo por los aspectos presentados, sino también porque es una energía limpia, relativamente económica, eficiente y continua, con lo que además de satisfacer las necesidades energéticas de la sociedad, se contribuye a la conservación del medio ambiente. Sin embargo, su uso tiene la desventaja de ser local, es decir, solamente en las regiones en donde se presenta potencialmente es económicamente aprovechable, ya que transportarla hacia otras zonas representaría grandes costos de inversión.

No obstante, como se mostró a lo largo de este primer capítulo, la energía geotérmica se manifiesta en gran parte del territorio mundial, debido a ello es necesario que se apoyen e impulsen los proyectos de exploración y aprovechamiento, que permitan el desarrollo de nuevas tecnologías de utilización. Aunado a esto, también es indispensable que se promueva la información suficiente para que otras personas e investigadores de distintas disciplinas se interesen en el tema.

Por otro lado, dado el potencial geotérmico de México, la explotación de estos recursos energéticos puede presentar una gran oportunidad para tener un desarrollo económico y social importante, ya que desafortunadamente los combustibles fósiles se agotan rápidamente y sus precios aumentan de manera significativa en tiempos cada vez más cortos. Tomando en cuenta esto, se puede lograr un equilibrio permanente entre la sociedad, el medio ambiente y los recursos energéticos, con lo que se podrían erradicar algunos de los problemas que nos afectan directamente.

En cuanto a la desalación de agua de mar, ya se ha mostrado su importancia y situación actual a nivel mundial, sin embargo hace falta ligar el tema con alternativas energéticas como lo es la geotermia. Esta combinación representa, por un lado, el aprovechamiento de una fuente de energía alterna y, por otro lado, la obtención de un recurso vital escaso. Por estas razones, en el presente trabajo profundiza sobre ello, y se analiza una parte importante de los procesos de desalación, correspondiente a los sistemas de generación de vacío, dedicados a mejorar el aprovechamiento de la energía que se le suministra al equipo.

Capítulo 2. Generalidades sobre eyectores.

2.1 Introducción

En el capítulo anterior (1.3.1.13) se mostraron las características generales y el principio de operación de los eyectores y eductores, y las ventajas que presentan estos dispositivos con respecto a los demás sistemas de vacío; sin embargo, entre ambos equipos existen diferencias significativas, además del fluido motriz empleado, referentes a sus geometrías, capacidades y eficiencias alcanzadas.

Los eyectores presentan un mejor rendimiento global con respecto a los eductores, ya que logran mayores capacidades de vacío con eficiencias más altas, actualmente se alcanzan valores de hasta un 34% (Banasiak, 2012); por otro lado, fácilmente pueden ser accionados por salidas de vapor residual de industrias o a través de fuentes energéticas de baja potencia. Por tales razones, a lo largo del presente capítulo se muestran los fundamentos teóricos necesarios para realizar el análisis de un eyector, involucrando tanto aspectos termodinámicos como geométricos.

Un eyector está formado por varios componentes que pueden analizarse individualmente y se muestran en el siguiente esquema:

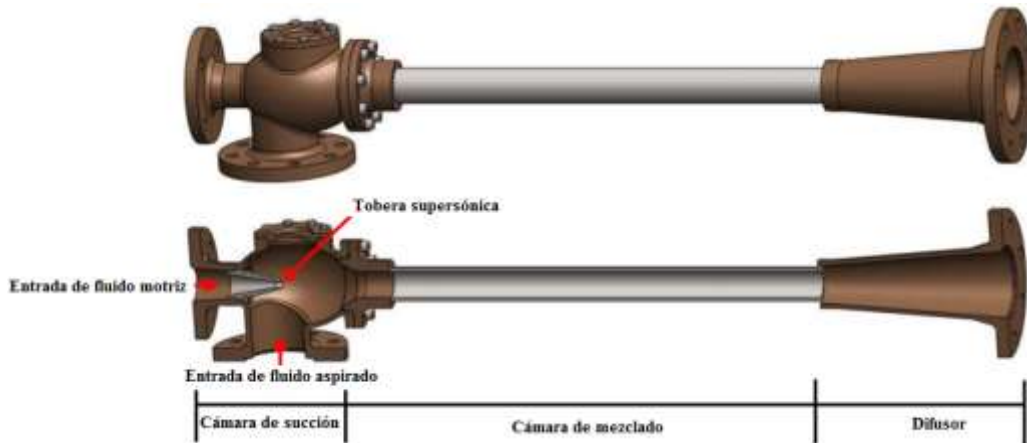


Figura 47. Componentes principales de un eyector de vacío. (O. ELLEHAMER A/S, 2012)

Como se observa, un eyector tiene dos entradas: una para admitir el fluido motriz, generalmente vapor de agua, y la otra para admitir el fluido que se desea evacuar o bombear. La corriente motora de alta presión y baja velocidad entra en el equipo y sale de la boquilla de la tobera convergente-divergente a la presión de diseño de aspiración y velocidad supersónica, causada por el estrangulamiento del flujo en la garganta, por lo que arrastra a la segunda corriente a la cámara de aspiración y mezclado. El diámetro de la garganta de la tobera supersónica controla la cantidad de fluido motor que entra al sistema, a la presión y temperatura dadas. Después de mezclarse ambos flujos, la corriente avanza hasta el difusor en donde aumenta su presión y disminuye su velocidad hasta niveles subsónicos debido al choque de onda generado. (NASH , 2012)

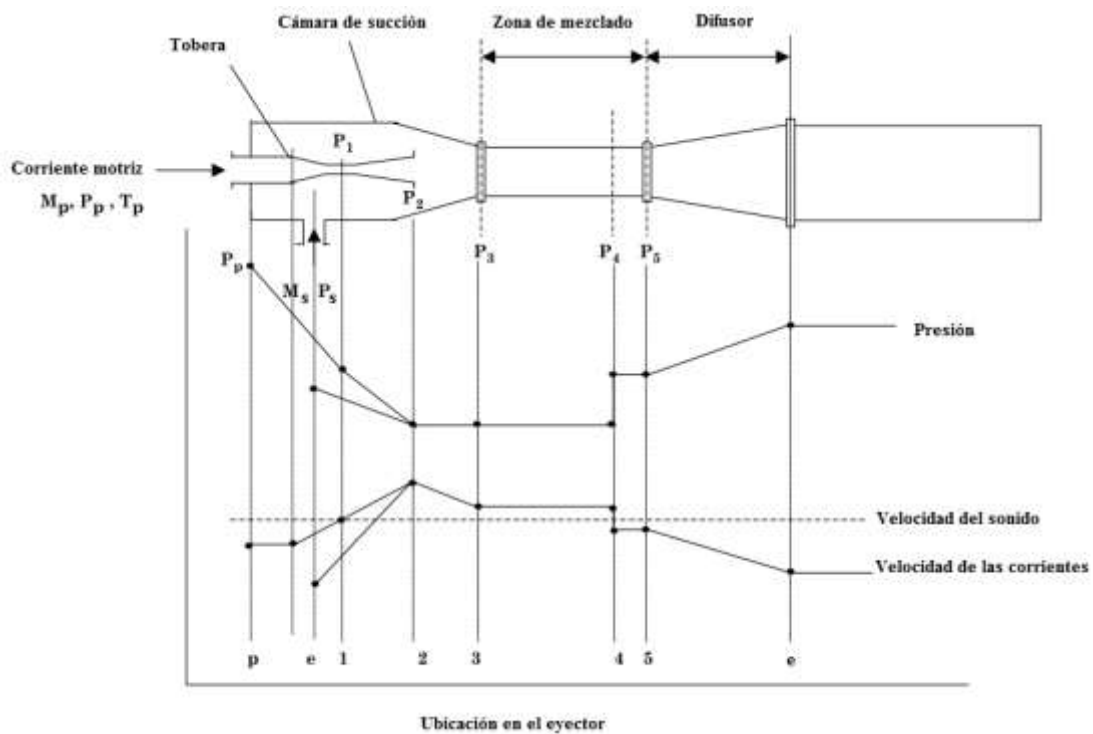


Figura 48. Variación de velocidad y presión de las corrientes (primaria y secundaria) a lo largo del eyector. (Chemical Engineering and Processing, 2001)

Se utilizan ampliamente para mantener presiones inferiores a la atmosférica en procesos de destilación, evaporación y refrigeración para industrias químicas, metalúrgicas, farmacéuticas, alimentarias, eléctricas, textiles, papeleras y aeroespaciales, entre otras. Dependiendo de la aplicación, para seleccionar correctamente un eyector es necesario considerar algunos factores como los que se muestran a continuación:

- i. Presión y temperatura de succión en la brida de aspiración del eyector.
- ii. Presión de descarga requerida.
- iii. Naturaleza de la carga (composición, vapores corrosivos, etc.)
- iv. Capacidad requerida.
- v. Mínima presión de fluido disponible para accionar el sistema.
- vi. En el caso de que exista un sistema de condensadores, es necesario conocer el tipo (barométrico o de superficie) y la temperatura máxima del fluido de entrada.

Cuando los requerimientos de vacío son altos, se recurre al uso de eyectores en varias etapas que se pueden acoplar en diversos arreglos, y de acuerdo con las características del sistema, pueden o no llevar condensadores intermedios para optimizar la eficiencia global y reducir el número de etapas.

Tabla 13. Selección del número de etapas de eyectores por vacío requerido. (Inmateinsa, 2012)

Presión de succión [mbar]	Nº de etapas de eyectores requeridas
> 100	1
15 - 100	2
1 - 15	3
0.3 - 1	4
0.05 - 0.3	5
$8 \cdot 10^{-3}$ - 0.05	6
$< 1 \cdot 10^{-3}$	7

Cabe señalar que la tabla anterior es orientativa y considera que la descarga de la mezcla se hace a presión atmosférica, por lo que para condiciones de operación distintas es necesario realizar un análisis más profundo.

Actualmente, los materiales empleados en eyectores son muy variados y su uso depende directamente de las características del proceso, algunos de los más comunes son: aceros al carbono, aceros inoxidables (304L, 16, 321), Inoxyda 90 ($\text{CuAl}_9\text{Ni}_5\text{Fe}_3$) ó 3p (Cu-Al), cobre, níquel, monel (Cu-Ni), titanio, PVC (policloruro de vinilo), resina, nylon, polipropileno, vidrio, cerámico, PTFE (teflón), polietileno y grafito. (Inmateinsa, 2012)

2.2 Marco teórico

Como se ha mencionado, el desempeño de un eyector puede ser analizado mediante el estudio individual de sus componentes, por tal razón en este apartado se presentan las ecuaciones generales necesarias para ello.

2.2.1 Leyes de conservación y Ley del gas ideal

Las ecuaciones de conservación y la ley de gas ideal para un flujo unidimensional compresible que pasa por un volumen de control arbitrario de sección transversal variable se muestran en seguida. La terminología empleada se define en el apartado referente a la nomenclatura.

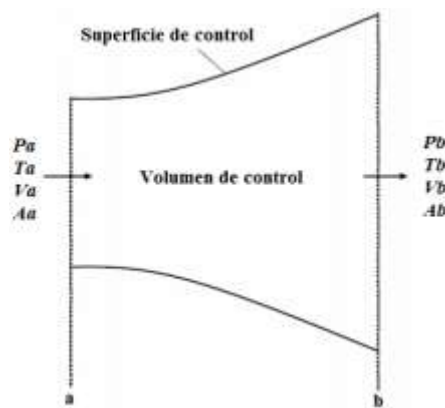


Figura 49. Volumen de control definido para flujo unidimensional. (Liao, 2008)

2.2.1.1 Ecuación de continuidad

$$m = \rho_a V_a A_a = \rho_b V_b A_b \quad (2.1)$$

2.2.1.2 Ecuación de momento o momentum

$$P_a A_a + m_a V_a + \int_{A_b}^{A_a} P dA = P_b A_b + m_b V_b \quad (2.2)$$

2.2.1.3 Ecuación de energía

$$h_a + \frac{V_a^2}{2} = h_b + \frac{V_b^2}{2} \quad (2.3)$$

2.2.1.4 Ley del gas ideal

$$\frac{P}{\rho} = RT \quad (2.4)$$

Donde R es la constante del gas estudiado con unidades de $[J/(Kg \cdot K)]$. La relación de R con el peso de molecular está dada por la siguiente expresión:

$$R = \frac{\bar{R}}{W} \quad (2.5)$$

\bar{R} se define como la constante universal de los gases, cuyas unidades en el sistema internacional son $[J/(Kmol \cdot K)]$ y W corresponde al peso molecular con unidades de $[Kg/Kmol]$.

2.2.2 Número de Mach

El número de Mach (M) es un parámetro adimensional definido como el cociente entre la velocidad del fluido (V) y la velocidad local del sonido (c).

$$M = \frac{V}{c} \quad (2.6)$$

La velocidad local del sonido c en un medio con temperatura T está dada por la expresión:

$$c = \sqrt{\gamma RT} \quad (2.7)$$

El parámetro γ representa es la razón de capacidades térmicas específicas:

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v} \quad (2.8)$$

Generalmente se clasifican los flujos en subsónicos ($M < 1$), sónicos ($M = 1$) y supersónicos ($M > 1$), sin embargo, en seguida se muestra una clasificación más completa:

Tabla 14. Clasificación de flujos por número de Mach. (Calle, 2009)

Flujo incompresible:	$M < 0.3$
Flujo subsónico:	$0.3 < M < 0.8$
Flujo transónico:	$0.8 < M < 1.2$
Flujo supersónico:	$1.2 < M < 3$
Flujo hipersónico:	$M > 3$

Cuando $M < 0.3$, las variaciones de densidad son relativamente pequeñas, menores del 5%, por lo que aunque el fluido sea un gas puede considerarse como incompresible; cuando $M < 0.8$, en ninguna zona del flujo se producen ondas de choque, descritas más adelante, y en el caso en que $M > 0.8$, se pueden producir ondas de choque de intensidad creciente a medida que aumenta el número de Mach.

2.2.3 Expansión isentrópica de un gas ideal

El flujo adiabático sin fricción o isentrópico es una idealización que no puede ser alcanzada físicamente, sin embargo cuando el proceso es lo suficientemente rápido o las distancias recorridas son muy pequeñas estos efectos son despreciables, por lo que el análisis isentrópico arroja resultados que describen adecuadamente el comportamiento real del fluido. El proceso de expansión isentrópica de un gas ideal se representa por medio de la siguiente expresión:

$$\frac{P}{\rho^\gamma} = \text{constante} \quad (2.8)$$

Para el caso de estudio de flujos unidimensionales a través de conductos convergentes-divergentes se emplea el modelo matemático que se muestra en seguida, que a su vez se deriva de la combinación y manipulación de las ecuaciones de conservación antes reportadas:

$$\frac{dA}{dV} = \frac{A}{V} \left(\frac{V^2}{c^2} - 1 \right) = \frac{A}{V} (M^2 - 1) \quad (2.9)$$

Se observa que para flujo subsónico el factor $\frac{dA}{dV}$ es siempre negativo, por lo que es necesario que el área transversal del conducto disminuya para que la velocidad del flujo aumente; cuando $\frac{dA}{dV}$ es igual a cero, la velocidad se incrementa hasta alcanzar la sección mínima o garganta, en donde es posible obtener una velocidad de flujo sónica cuando se presenta el fenómeno de asfixia o estrangulamiento del fluido; en el caso en que $\frac{dA}{dV}$ es positivo, se requiere que el área transversal aumente para lograr un incremento en la velocidad, con lo que se obtienen números de Mach superiores a la unidad. De lo anterior se concluye que para conseguir un flujo supersónico, partiendo de un fluido en reposo, dicho fluido deberá pasar primero por un conducto convergente y luego por uno divergente.

Las propiedades del fluido a lo largo de un proceso de expansión isentrópica pueden relacionarse con sus propiedades de estancamiento o reposo, denotadas por un subíndice 0, por medio de las siguientes expresiones:

Presión:

$$\frac{P_0}{P} = \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (2.10)$$

Temperatura:

$$\frac{T_0}{T} = 1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2 \quad (2.11)$$

Densidad:

$$\frac{\rho_0}{\rho} = \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2\right)^{\frac{1}{\gamma-1}} \quad (2.12)$$

2.2.4 Fenómeno de estrangulamiento o de asfixia (*choking phenomena*)

Como se ha mencionado, el fenómeno de estrangulamiento se presenta cuando un flujo en un conducto divergente alcanza la velocidad sónica ($M=1$) en la sección de área transversal mínima, comúnmente llamada garganta; sin embargo, éste fenómeno también puede explicarse por medio del perfil de presiones generado a lo largo del proceso, tal como se observa en el siguiente esquema:

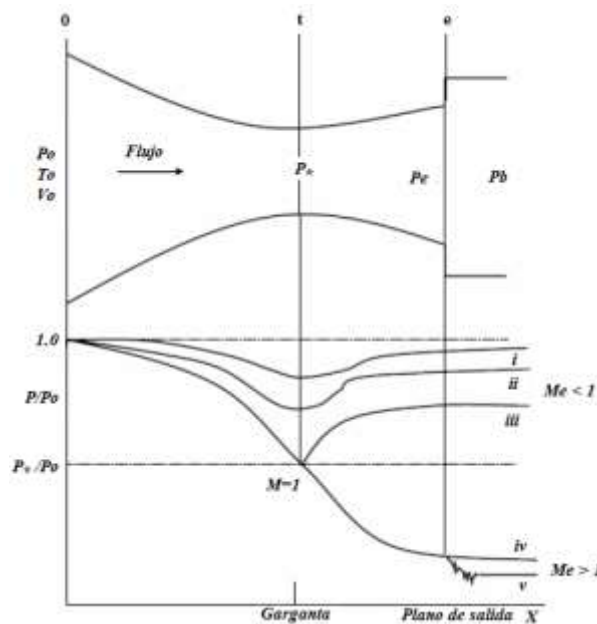


Figura 50. Perfil de presiones de un flujo isentrópico que pasa por un conducto convergente-divergente. (Liao, 2008)

La geometría anterior corresponde a una tobera supersónica, en donde P_e y P_b representan la presión estática a la salida y la contrapresión respectivamente. En el esquema se ilustra el efecto que tiene la variación de P_b en el perfil de presiones del flujo; el flujo másico es bajo cuando P_b es ligeramente menor que P_0 (curva i), por lo que será un flujo subsónico e incompresible. A medida que P_b disminuye, el flujo másico aumenta y, aunque aún es subsónico, los efectos de compresibilidad comienzan a ser importantes (curva ii).

Como se observa, si P_b es lo suficientemente bajo en la garganta de la tobera se logra generar un flujo sónico (curva iii), bajo esta condición se dice que la tobera asfixia al fluido. En estas circunstancias se presentan las condiciones críticas (*) que corresponden al flujo másico máximo posible para la tobera y condiciones de estancamiento dadas. Las expresiones empleadas para calcular tales condiciones son las siguientes:

$$\frac{P_*}{P_0} = \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (2.13)$$

$$\frac{T_*}{T_0} = \frac{2}{\gamma+1} \quad (2.14)$$

$$\frac{\rho_*}{\rho_0} = \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{1}{\gamma-1}} \quad (2.15)$$

$$V_* = c_* = \sqrt{\left(\frac{2\gamma}{\gamma+1}\right)RT_0} \quad (2.16)$$

$$m_* = \frac{A_*P_0}{\sqrt{T_0}} \sqrt{\frac{\gamma}{R} \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \quad (2.17)$$

$$\frac{A_e}{A_*} = \frac{1}{M} \left\{ \frac{1 + [(\gamma-1)/2]M^2}{(\gamma+1)/2} \right\}^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}} \quad (2.18)$$

Cuando P_b se encuentra por debajo de P_* (curvas iv y v), se observa que las condiciones del flujo en la sección divergente de la tobera no influyen en las condiciones correspondientes a la parte convergente de la misma, debido a ello, a partir de este punto los valores de P_e y flujo másico no se ven afectados por la disminución en el valor de P_b . Cuando $P_b=P_{iv}$ se dice que la tobera opera bajo condiciones de diseño; y en el caso en que se tengan valores inferiores, el proceso aguas arriba se mantiene, pero la probabilidad de que se generen ondas de choque aguas abajo aumentan (curva v).

2.2.5 Ondas de choque

Anteriormente se ha hecho referencia al concepto de *onda de choque*, sin embargo, no se ha explicado a detalle el fenómeno; cuando se tiene un flujo supersónico, en función de la geometría del sistema y las condiciones aguas abajo, se pueden producir zonas de cambio abrupto irreversible en las propiedades del fluido, como presión, temperatura y densidad, a estas perturbaciones se les denomina *ondas de choque*; las ondas de choque se propagan a través de un gas, y pueden estar orientadas normalmente al flujo o en ángulos oblicuos. Los cambios de propiedad que suceden a través de una onda de choque ocurren a una distancia extremadamente corta, comúnmente del orden de 10^{-4} [mm], por lo que para su estudio se consideran como discontinuidades de espesor cero en el flujo.

En un flujo unidimensional el único tipo de onda que puede generarse es el de compresión normal; si se desea estudiar con profundidad el flujo convergente-divergente en los límites de presiones corriente abajo es necesario considerar las ondas de choque oblicuas que se desarrollan a la salida (Streeter, 1988). Cabe mencionar que en las ondas de choque oblicuas, aunque la velocidad se reduce drásticamente, no se alcanza un régimen subsónico, mientras que

después en una onda de compresión normal siempre se tiene una velocidad subsónica. (Gunt Hamburg, 2012)

Para fines del presente trabajo, se profundiza sobre el estudio de las ondas de choque normales, y se analizan mediante un volumen de control como el que se muestra en la figura:

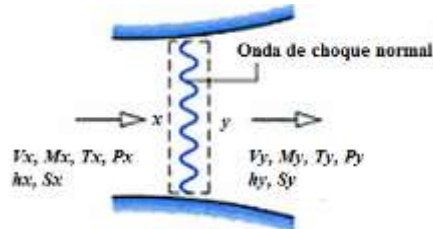


Figura 51. Volumen de control para el estudio de una onda de choque normal. (Moran, 2004)

Las condiciones aguas arriba se representan por el estado x y las condiciones aguas abajo por el estado y ; en el esquema se muestran las propiedades de interés para este estudio. Se considera que el volumen de control opera en régimen estacionario y sin cambios de energía potencial, además de que no existe cambio en el área de flujo por el espesor tan pequeño de la onda. Los estados x y y se relacionan de la siguiente manera:

$$\text{Masa:} \quad \rho_x V_x = \rho_y V_y \quad (2.19)$$

$$\text{Energía:} \quad h_x + \frac{V_x^2}{2} = h_y + \frac{V_y^2}{2} \quad (2.20)$$

$$\text{Momento:} \quad P_x - P_y = \rho_y V_y^2 - \rho_x V_x^2 \quad (2.21)$$

Las ecuaciones de masa y energía se pueden combinar con las relaciones de un fluido particular, dando como resultado un ecuación que representada en un diagrama h - S se llama *curva de Fanno*. De forma similar, las ecuaciones de masa y momento se combinan para obtener otra ecuación, que representada en un diagrama h - S da origen a la llamada *curva de Rayleigh*.

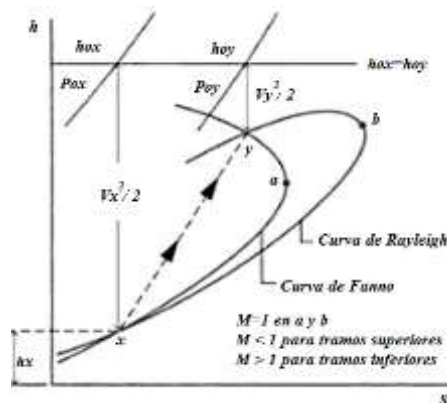


Figura 52. Intersección de las curvas de Fanno y Rayleigh como una solución de las ecuaciones de la onda de choque normal. (Moran, 2004)

Se observa que los puntos de máxima entropía en cada curva, a y b , corresponden a $M=1$; y que los tramos superior e inferior de cada una de las curvas corresponden a velocidades subsónicas y supersónicas respectivamente. El estado aguas abajo y debe satisfacer las ecuaciones de masa, energía y momento, por lo que dicho estado se fija por la intersección de ambas curvas que pasan por el estado x . Por otro lado, puesto que $S_y > S_x$, se concluye que el flujo a través de la

onda de choque solamente puede pasar de x a y , provocando que la velocidad cambie del estado supersónico a subsónico. En la figura 2.6 también se pueden apreciar los estados de remanso o condiciones de estancamiento antes y después de la onda de choque; la entalpía en estos estados no cambia, pero existe un importante descenso de la presión de remanso, asociado con el proceso irreversible que ocurre en la región de la onda de choque normal.

2.3 Conclusiones

A pesar de que las ecuaciones presentadas a lo largo de este capítulo se basan en procesos isentrópicos, se ha demostrado experimentalmente que funcionan para el estudio de situaciones reales, siempre y cuando se hagan las consideraciones adecuadas. Por lo que estas ecuaciones serán las bases para el siguiente capítulo.

Capítulo 3. Cálculos.

3.1 Introducción

Uno de los objetivos del equipo de trabajo iiDEA, antes IMPULSA IV, del Instituto de Ingeniería UNAM es el diseño e implementación de sistemas de desalación de agua de mar con energías alternas; dentro este rubro se encuentra el sistema propuesto MED-LE con alimentación en paralelo, que opera bajo el mismo principio que los sistemas MED convencionales, pero se agrega la terminación LE (Low Enthalpy), haciendo referencia al tipo de recurso energético empleado.

El modelo se diseñó para ser instalado en la Península de Baja California, tanto por la disponibilidad del recurso energético y del agua de mar, como por la necesidad de agua desalada para consumo y aprovechamiento; sirviendo de base para el análisis de los parámetros que afectan en mayor grado el funcionamiento de estos sistemas de desalación, por medio de lo cual se pretende maximizar el aprovechamiento de este tipo de energía en plantas de desalación con mayor. En la figura 3.1 se muestra el esquema correspondiente al prototipo antes mencionado.

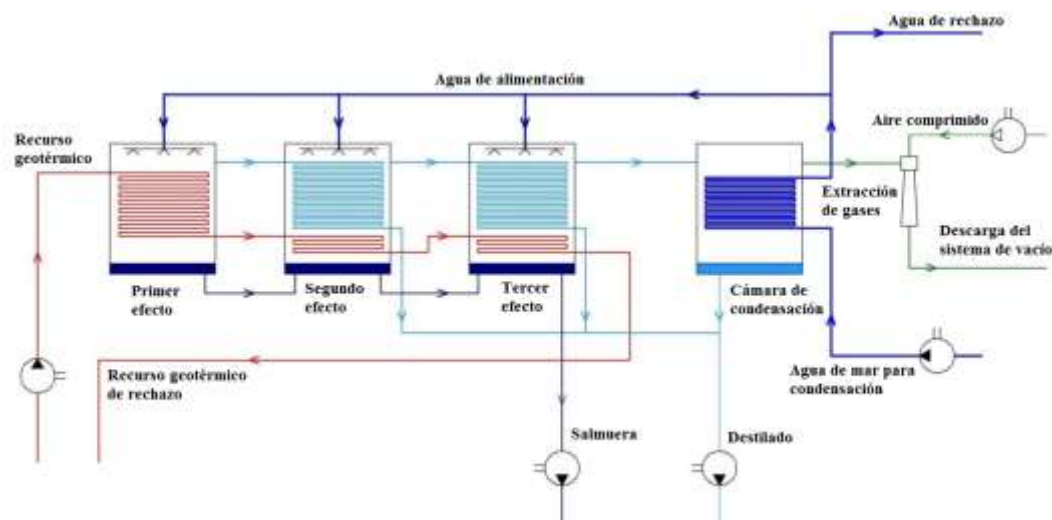


Figura 53. Configuración del sistema MED-LE propuesto. (Salmerón, 2012)

Se considera que el recurso geotérmico entra al sistema como líquido y, como se observa en el diagrama anterior, después de ser empleado en el primer efecto se ingresa a las cámaras de evaporación al vacío subsecuentes, que mantienen presiones escalonadas inferiores, en donde se continua aprovechando la energía restante por medio de intercambiadores de calor, con lo que se logra incrementar la eficiencia global.

Cabe señalar que el establecimiento de los parámetros de operación se realizó por medio del dimensionamiento de sistemas convencionales. La capacidad total de producción por los tres efectos del sistema, para la cual está diseñado este prototipo, corresponde a 6.6 [m³/día] (6600 [lts/día]), suficiente para cubrir las necesidades de entre 33 y 66 personas en su totalidad (70% aseo corporal, 15% desagüe y servicios, 10% higiene, 5% alimentación), con un consumo en el rango de 100 a 200 [l/día] (CONAGUA, 2007); a partir de los porcentajes anteriores y suponiendo que la producción se destine para fines alimenticios únicamente, se puede establecer que con el proceso se cubrirían las necesidades básicas de aproximadamente 1000 personas.

Por lo anterior se considera que la producción del prototipo funcional MED-LE es suficiente y adecuada para realizar el estudio de factibilidad técnica y económica de la tecnología; esto es sin considerar pérdidas y realizando las idealizaciones correspondientes para el diseño de las cámaras de evaporación. Otras características de los fluidos de trabajo y algunos parámetros operativos del sistema se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 15. Características de los fluidos de trabajo y parámetros operativos del sistema MED-LE propuesto. (Salmerón, 2012)

Recurso geotérmico de baja entalpía	
Temperatura	85 [°C]
Gasto másico	0.56 [Kg/s]
Estado	Líquido saturado
Agua de mar a desalar	
Temperatura	25 [°C]
Concentración	35000 [ppm]
Estado	Líquido subenfriado
Gases no condensables	
Nitrógeno (N ₂)	12.5 [ppm]
Oxígeno (O ₂)	7 [ppm]
Dióxido de carbono (CO ₂)	90 [ppm]
Argón (Ar)	0.4 [ppm]
Prototipo funcional MED-LE	
Número de efectos	3
Presión vacuométrica (primer efecto)	0.1 [bara]
Porcentaje de desalación	23 %
Energía empleada para evaporar	1080 [KJ/Kg]
Caída de presión entre cámaras	0.03 [bara]

Los gases *no condensables* son aquellos que se producen cuando se lleva a cabo el proceso de evaporación del agua de mar dentro de las cámaras, y que no logran condensarse bajo las condiciones de operación del sistema; en grandes producciones estos gases afectan el

coeficiente de transferencia de calor para la condensación, generando pérdidas energéticas dentro del equipo; además promueven los problemas de corrosión, por tal motivo su remoción en cada una de las etapas es de suma importancia para la eficiencia del ciclo.

Para prevenir la acumulación de estos gases se recurre a sistemas de extracción, generalmente eyectores de vapor, que además sirven para generar el vacío requerido al retirar una fracción de la mezcla vapor-gases existente dentro de las cámaras; es por ello que en el presente trabajo se realiza el análisis del eyector para generar el vacío necesario para el primer efecto del prototipo antes descrito, tomando como base los parámetros operativos reportados en la tabla 3.1.

3.2 Desarrollo matemático

El estudio que se desarrolla en seguida se encuentra reportado en la tesis doctoral de título “*Gas Ejector Modeling for Design and Analysis*”, que para obtener el título de Doctor en Investigación presenta Chaqing Liao ante la Oficina de Estudios Superiores de la Universidad de Texas A&M.

Se realizaron dos casos de estudio, el primero con aire como fluido motriz y el segundo con vapor de agua; para ambos se emplea vapor como fluido secundario y se desprecia el efecto de los gases no condensables, ya que por la baja capacidad de producción del sistema, se considera que su masa con respecto a la del vapor total dentro de la cámara es insignificante.

A pesar de que en el documento de referencia se establece una metodología de cálculo, para el presente trabajo, la misma se realizó con base en los datos disponibles y buscando disminuir en lo posible el número de parámetros operacionales proporcionados. Las propiedades termodinámicas de cada estado se calcularon por medio de la herramienta computacional en Excel, REFPROP, siguiendo las relaciones termodinámicas y suposiciones correspondientes.

Para fines de comprensión, se utiliza un código de colores que identifica cada caso de estudio, tal como se muestra en seguida:

Tabla 16. Código de colores empleado para el cálculo.

Vapor de agua	
Aire	
Fluido secundario	
Datos de entrada	Texto

Por disponibilidad y conveniencia de este estudio, se eligieron los siguientes datos de partida para el cálculo, aunque cabe mencionar que también es posible realizar el estudio partiendo de algunos otros datos disponibles, siempre y cuando sean los suficientes para las ecuaciones que se muestran más adelante:

Tabla 17. Datos necesarios para el análisis del eyector.

Datos	Unidades
P_{p1s}	[Mpa]
M_{p1}	[]
D_*	[m]

T_{po}	[°C]
η_n	[]
η_d	[]
P_{so}	[MPa]
T_{so}	[°C]
M_{s1}	[]
A_{m3}	[m ²]

3.2.1 Cálculo de la tobera supersónica.

La configuración general de la tobera supersónica empleada se muestra en seguida, en donde el plano de entrada, la garganta y el plano de salida se encuentran representadas por 0, t y 1, respectivamente.

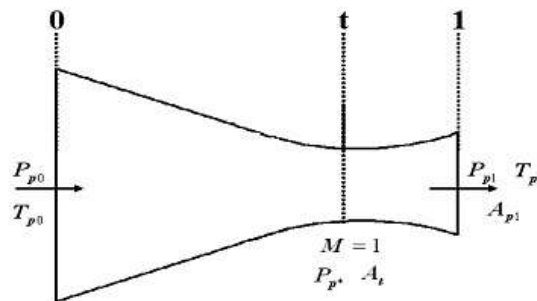


Figura 54. Tobera supersónica. (Liao, 2008)

Las ecuaciones planteadas en el apartado 2.2.4 se utilizan para el análisis isentrópico de la tobera, sin embargo en la realidad no se alcanza esta condición, por lo cual se utiliza un coeficiente teórico de desempeño o eficiencia isentrópica, denotado como η_n , para el estudio del flujo compresible en la zona divergente, que considera la operación de la tobera fuera de los valores de presión de diseño, en donde se pueden presentar ondas de choque. Cabe señalar que para el estudio se consideran calores específicos constantes. En seguida se muestra el procedimiento de cálculo seguido, en donde la nomenclatura empleada se detalla en el apartado correspondiente a la misma.

El primer paso corresponde al cálculo de la densidad del fluido motriz (ρ_{po}) bajo las condiciones de estancamiento proporcionadas (T_{po} y P_{po}) o algunas otras disponibles, como las condiciones ambiente por ejemplo, por medio del software REFPROP. Siguiendo el mismo procedimiento es posible obtener los calores específicos, tanto a presión como a volumen constantes, para con ello obtener la razón de calores específicos del fluido primario γ_p . Posteriormente, se calculan las propiedades críticas del flujo P_* , T_* , ρ_* , V_* y m_* , mediante las ecuaciones (2.13), (2.14), (2.15), (2.16), y (2.17) respectivamente.

Por otro lado, puesto que dentro de los datos de entrada se propone el diámetro de la garganta, es posible calcular el área de dicha sección.

$$A_* = \frac{\pi D_*^2}{4} \quad (3.1)$$

Partiendo de las características y propiedades obtenidas anteriormente, y del número de Mach deseado, para determinar la presión necesaria del fluido motriz a la entrada de la tobera para producir el vacío requerido a la salida de la misma, se emplea la siguiente ecuación:

$$P_{p0} = P_{ps1} \left(1 + \frac{\gamma_p - 1}{2} M_{p1}^2 \right)^{\frac{\gamma_p}{\gamma_p - 1}} \quad (3.2)$$

De igual forma, para obtener el valor del área de salida (A_{p1s}), se utiliza la expresión:

$$A_{p1s} = \frac{A_*}{M_{p1}} \left(\frac{1 + \frac{\gamma_p - 1}{2} M_{p1}^2}{1 + \frac{\gamma_p - 1}{2}} \right)^{\frac{\gamma_p + 1}{2(\gamma_p - 1)}} \quad (3.3)$$

Con lo que es posible determinar el diámetro de la sección de salida de la tobera:

$$D_{p1s} = \sqrt{\frac{4A_{p1s}}{\pi}} \quad (3.4)$$

En cuanto a las temperaturas de entrada y salida del sistema, se relacionan de la siguiente manera:

$$T_{p1s} = \frac{T_{p0}}{1 + \frac{\gamma_p - 1}{2} M_{p1}^2} \quad (3.5)$$

Y de manera similar, la variación de la densidad se representa como:

$$\rho_{p1s} = \frac{\rho_{p0}}{\left(1 + \frac{\gamma_p - 1}{2} M_{p1}^2 \right)^{\frac{1}{\gamma_p - 1}}} \quad (3.6)$$

Para las ecuaciones presentadas anteriormente el subíndice “S”, cuando se encuentra al final del término, indica que el cálculo se realizó bajo la suposición de un proceso isentrópico, tal como se establece en el apartado correspondiente a la nomenclatura, sin embargo en las expresiones que se muestran a continuación se involucra la eficiencia de la tobera, con lo que se realiza una corrección a los parámetros operacionales en la parte divergente del sistema.

Tal eficiencia isentrópica se define como el cambio de entalpía real de un proceso entre el cambio de entalpía ideal del mismo:

$$\eta_n = \frac{h_{p0} - h_{p1}}{h_{p0} - h_{p1s}} \quad (3.7)$$

En donde por medio de la herramienta computacional REFPROP y con las condiciones de estancamiento P_{p0} y T_{p0} es posible calcular h_{p0} , al igual que con P_{p1s} y T_{p1s} se calcula h_{p1s} . Por lo tanto se puede obtener el valor de la entalpía real a la salida de la tobera (h_{p1}), para con ello calcular la velocidad real en la misma zona (V_{p1}) por medio de la expresión:

$$V_{p1} = \sqrt{2(h_{p0} - h_{p1})} \quad (3.8)$$

La relación entre la temperatura real de salida y la temperatura de estancamiento del fluido está dada por:

$$T_{p1} = T_{p0} \left[1 - \left(1 - \frac{T_{p1s}}{T_{p0}} \right) \eta_n \right] \quad (3.9)$$

Por otro lado, para determinar la presión real al final del proceso (P_{p1}) se sigue la siguiente ecuación:

$$P_{p1} = P_{p0} \left[1 - \frac{1}{\eta_n} + \frac{1}{\eta_n \left(1 + \frac{\gamma_p - 1}{2} M_{p1}^2 \right)} \right]^{\frac{\gamma_p}{\gamma_p - 1}} \quad (3.10)$$

Posteriormente, partiendo de los valores reales de presión y temperatura, es posible calcular la densidad real del fluido (ρ_{p1}) en dicha sección.

Por último, se calcula el área de salida (A_{p1}) corregida

$$A_{p1} = \frac{A_*}{M_{p1}} \left(\frac{2}{\gamma_p - 1} \right)^{\frac{\gamma_p + 1}{2(\gamma_p - 1)}} \left[1 - \frac{1}{\eta_n} + \frac{1}{\eta_n \left(1 + \frac{\gamma_p - 1}{2} M_{p1}^2 \right)} \right]^{\frac{-(\gamma_p + 1)}{2(\gamma_p - 1)}} \quad (3.11)$$

Para obtener finalmente el diámetro real de la misma:

$$D_{p1} = \sqrt{\frac{4A_{p1}}{\pi}} \quad (3.12)$$

3.2.2 Cálculo de la zona de mezclado

Existen dos modelos matemáticos utilizados para el análisis de la zona de mezclado de un eyector, *de área constante* y *de presión constante*, que brindan elementos suficientes para el estudio del sistema, sin embargo es necesario mencionar que el primero de ellos es el más utilizado en la práctica por sus características geométricas, mientras que el segundo se enfoca principalmente en el análisis del comportamiento de los flujos; ambos modelos se detallan a continuación.

3.2.2.1 Modelo de área constante

En la figura 3.3 se muestra el esquema de un eyector diseñado, usando el modelo de área constante en la sección de mezclado. La sección comprendida entre 1 y 2 corresponde a la formación de una garganta aerodinámica que estrangula al fluido secundario cuando el número de Mach alcanzado por la corriente primaria es muy elevado, provocando una expansión del mismo en contra del fluido secundario; sin embargo, por los parámetros de diseño empleados referentes a las velocidades supersónicas, en el presente estudio no se considera la presencia de dicho fenómeno.

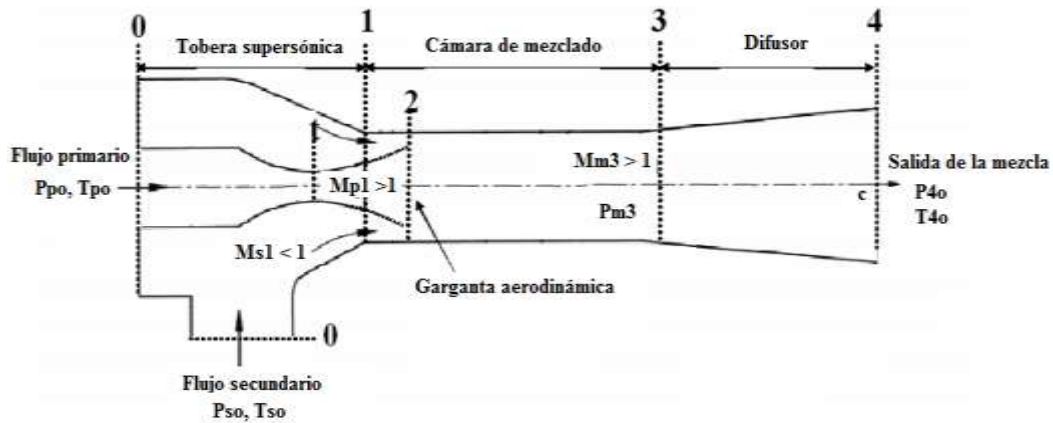


Figura 55. Esquema de un eyector de área constante en la zona de mezclado. (Liao, 2008)

Las consideraciones hechas para el análisis del sistema son las siguientes:

- 1) Las corrientes primaria y secundaria se encuentran en estado estable.
- 2) Ambas corrientes son uniformes en la sección 1 y se encuentran completamente mezcladas en la sección 3.
- 3) Ambas corrientes pueden ser consideradas como gases perfectos.
- 4) La pared interna entre 1 y 3 es adiabática.

Puesto que no se analizará el fenómeno de asfixia de la corriente secundaria en la zona de mezclado, el volumen de control utilizado para el estudio es el siguiente.

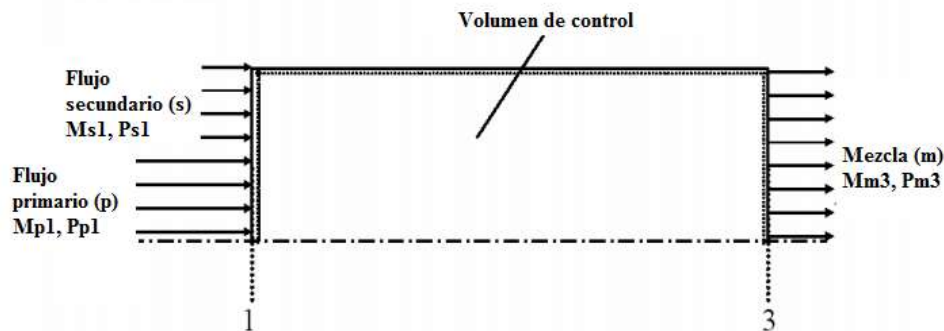


Figura 56. Volumen de control empleado para el modelo de área constante en la zona de mezclado. (Liao, 2008)

El primer paso es establecer la naturaleza del fluido secundario de trabajo, vapor de agua para este caso. Posteriormente, al igual que para el análisis de la tobera supersónica, se buscó la manera de reducir el número de variables proporcionadas, llegando a la conclusión de que los parámetros suficientes y necesarios son los siguientes: P_{so} , T_{so} , M_{s1} y A_{m3} ; siempre y cuando el valor de A_{m3} sea mayor al de A_{p1} calculado en el apartado anterior, tal como se muestra en el esquema general del eyector.

A partir de los parámetros P_{so} y T_{so} proporcionados, y con ayuda de REFPROP es posible calcular la constante particular del gas siguiendo la ecuación (2.5), así como la razón de calores específicos mediante la ecuación (2.8). Por otro lado, sabiendo que $A_{s1} = A_{m3} - A_{p1}$, con el valor corregido de A_{p1} y el valor propuesto de A_{m3} , se obtiene el valor de A_{s1} .

Uno de los factores más importantes en el análisis de eyectores es el coeficiente de arrastre ω , definido como la razón entre la masa de entrada del fluido secundario y la masa de entrada del fluido primario. Con los datos disponibles y los parámetros calculados, es posible obtener su valor numérico mediante la siguiente expresión:

$$\omega = \frac{P_{s0}M_{s1}}{P_{p0}M_{p1}} \sqrt{\frac{T_{p0}R_p\gamma_s}{T_{s0}R_s\gamma_p}} \left(\frac{A_{m3}}{A_*} \frac{1}{f_1(\gamma_p, M_{p1}, \eta_n)} - 1 \right) \frac{\left(1 + \frac{\gamma_s - 1}{2} M_{s1}^2\right)^{\frac{-(\gamma_s + 1)}{2(\gamma_s - 1)}}}{\left(1 + \frac{\gamma_p - 1}{2} M_{p1}^2\right)^{\frac{-(\gamma_p + 1)}{2(\gamma_p - 1)}}} \left[\left(\frac{\eta_n - 1}{\eta_n}\right) \frac{\gamma_p - 1}{2} M_{p1}^2 + 1 \right]^{\frac{-\gamma_p}{\gamma_p - 1}} \quad (3.13)$$

En donde la función f_1 está dada por:

$$f_1(\gamma_p, M_{p1}, \eta_n) = \frac{1}{M_{p1}} \left(\frac{2}{\gamma_p + 1}\right)^{\frac{\gamma_p + 1}{2(\gamma_p - 1)}} \left[1 - \frac{1}{\eta_n} + \frac{1}{\eta_n \left(1 + \frac{\gamma_p - 1}{2} M_{p1}^2\right)} \right]^{\frac{-(\gamma_p + 1)}{2(\gamma_p - 1)}} \quad (3.14)$$

Por lo tanto, la masa de fluido secundario que entra al sistema es:

$$m_{s1} = \omega m_{p1} \quad (3.15)$$

Para el cálculo de la presión de entrada a la cámara de mezclado del flujo secundario es necesario conocer el valor de la presión de entrada del flujo primario (P_{p1}), que será igual al calculado en la parte correspondiente al análisis de la tobera supersónica. Por lo que se emplea la siguiente expresión:

$$P_{s1} = P_{p1} \sqrt{\frac{T_{s0}R_s}{T_{p0}R_p}} \frac{A_{p1}}{A_{s1}} \frac{f_2(\gamma_p, M_{p1})}{f_2(\gamma_s, M_{s1})} \omega \quad (3.16)$$

En donde la función f_2 se define como:

$$f_2(\gamma, M) = M \left[\gamma \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2 \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.17)$$

Por otro lado, del balance masa entre 1 y 3, se sabe que:

$$m_{p1} + m_{s1} = m_{m3} \quad (3.18)$$

Para la obtención de la temperatura de la mezcla en condiciones de estancamiento se sigue la relación:

$$T_{m0} = T_{p0} \frac{\frac{\gamma_p}{\gamma_p - 1} + \frac{\gamma_s}{\gamma_s - 1} \frac{R_s T_{s0}}{R_p T_{p0}} \omega}{\frac{\gamma_p}{\gamma_p - 1} + \frac{\gamma_s}{\gamma_s - 1} \frac{R_s}{R_p} \omega} \quad (3.19)$$

Posteriormente se determina el número de Mach que se tendrá en la sección 3 por medio de la siguiente expresión:

$$M_{m3} = \sqrt{\frac{-(\alpha^2 - 1) \pm \sqrt{(\alpha^2 - 2)^2 + 2 \left(\frac{\gamma_m - 1}{\gamma_m}\right) \left(\alpha^2 - \frac{2\gamma_m}{\gamma_m - 1}\right)}}{(\gamma_m - 1) \left(\alpha^2 - \frac{2\gamma_m}{\gamma_m - 1}\right)}} \quad (3.20)$$

En donde el parámetro α está dado por:

$$\alpha = \frac{\sqrt{\frac{T_{s0}R_s}{T_{p0}R_p}} f_3(\gamma_s, M_{s1}) \omega + f_3(\gamma_p, M_{p1})}{\sqrt{\frac{T_{m0}R_m}{T_{p0}R_p} (1+\omega)}} \quad (3.21)$$

Y a su vez f_3 es:

$$f_3(\gamma, M) = \frac{1+\gamma M^2}{M} \left[\gamma \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2 \right) \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (3.22)$$

Y tanto la razón de calores específicos de la mezcla como su constante particular se calculan siguiendo las ecuaciones (3.23) y (3.24) respectivamente:

$$\gamma_m = \frac{\frac{\gamma_p}{\gamma_p-1} + \frac{\gamma_s}{\gamma_s-1} \frac{R_s \omega}{R_p}}{\frac{1}{\gamma_p-1} + \frac{1}{\gamma_s-1} \frac{R_s \omega}{R_p}} \quad (3.23)$$

$$R_m = \frac{R_p + \omega R_s}{1+\omega} \quad (3.24)$$

La ecuación (3.20) proporciona dos resultados, uno mayor y uno menor a la unidad, sin embargo, de acuerdo con el esquema empleado para el modelo de área constante, la velocidad de la mezcla es supersónica por lo que el resultado de interés para este análisis es aquel en el cual $M_{m3} > 1$. Aunque cabe señalar que será conveniente utilizar el resultado inferior a 1 cuando se considere una onda de choque dentro de la zona analizada.

Por último, con el valor de M_{m3} y los demás valores de interés, se calcula la presión en la sección 3 por medio de la expresión:

$$P_{m3} = \frac{P_{p1} A_{p1}}{A_{m3}} \frac{1}{(1+\gamma_m M_{m3}^2)} \left[\frac{P_{s1} A_{s1}}{P_{p1} A_{p1}} (1 + \gamma_s M_{s1}^2) + (1 + \gamma_p M_{p1}^2) \right] \quad (3.25)$$

3.2.2.2 Modelo de presión constante

En este modelo se asume que la mezcla de las corrientes primaria y secundaria ocurre dentro de una cámara con presión constante y uniforme, tal como se muestra en la figura de abajo. Si la velocidad de la mezcla a la salida de dicha cámara es supersónica ($M_{m2} > 1$), ocurrirá una onda de choque normal en la cámara de área constante comprendida entre las secciones 2 y 3, por lo que la velocidad de la mezcla será subsónica a la entrada del difusor en donde la presión estática aumentará aún más.

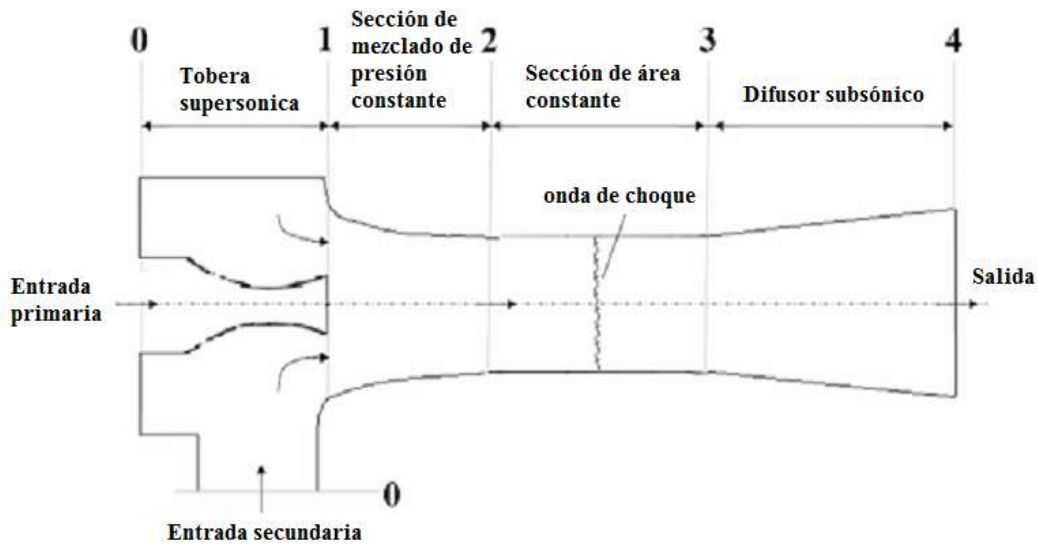


Figura 57. Esquema de un inyector diseñado con sección de mezclado a presión constante. (Liao, 2008)

Las consideraciones establecidas para la derivación del modelo de presión constante son las siguientes:

- 1) Tanto en la entrada como en la salida, las corrientes se encuentran bajo condiciones de estancamiento.
- 2) Las velocidades de los flujos son uniformes en todas las secciones.
- 3) La mezcla de las corrientes primaria y secundaria ocurre a presión constante entre las secciones 1 y 2, por lo que $P_{p1} = P_{s1} = P_{m2} = P_1$.
- 4) Si la mezcla mantiene una velocidad supersónica en 2, ocurrirá una onda de choque normal entre las secciones 2 y 3, por lo que el flujo será subsónico en 3.

Tanto las ecuaciones de conservación de continuidad, energía y momento, como las relaciones de gas perfecto, aunadas a las suposiciones mencionadas, son utilizadas para analizar los flujos dentro del volumen de control mostrado en la figura 3.6:

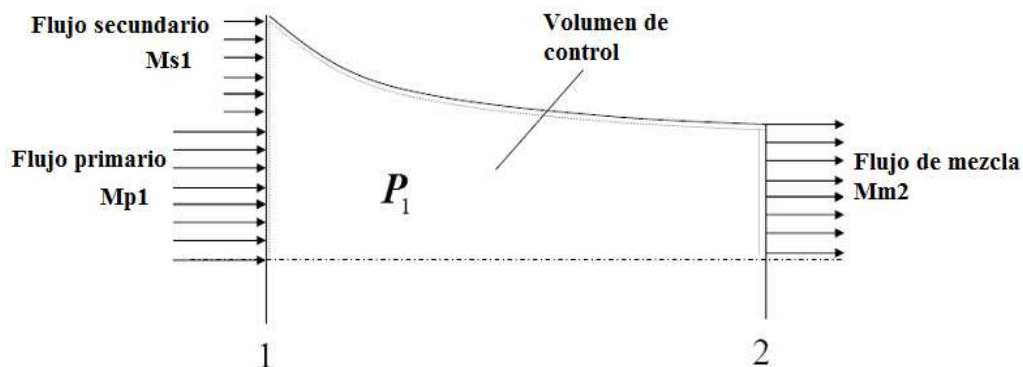


Figura 58. Volumen de control empleado para el análisis de la zona de mezclado a presión constante. (Liao, 2008)

Al igual que para el modelo de área constante, a partir de los datos conocidos de P_{so} , T_{so} , M_{s1} y A_{m3} , es posible realizar el cálculo de los demás parámetros que intervienen en el estudio. Dado que en el presente trabajo se analiza el mismo sistema, es conveniente tomar el valor de P_{s1}

calculado con el modelo de área constante como el valor de referencia P_1 , por lo cual no se establece como dato para el análisis; de igual manera, los valores de T_{p1} , A_{s1} y A_{p1} se pueden considerar como conocidos, ya que se calcularon en el apartado 3.2.2.1; en caso de que no se cuente con tales parámetros se deben suponer.

En primera instancia se calcula el número de Mach real que se tendrá a la salida de la tobera supersónica, que a su vez será igual al de entrada del flujo motriz a la cámara de mezclado, por medio de la siguiente expresión:

$$M_{p1} = \frac{2}{\sqrt{\frac{\gamma_p - 1}{1 - \eta_n} \left[1 - \left(\frac{P_1}{P_{p0}} \right)^{\frac{\gamma_p - 1}{\gamma_p}} \right]}} \eta_n \left[1 - \left(\frac{P_1}{P_{p0}} \right)^{\frac{\gamma_p - 1}{\gamma_p}} \right] \quad (3.26)$$

Y de igual forma, se calcula el número de Mach real de entrada a la cámara de mezclado del fluido secundario:

$$M_{s1} = \sqrt{\frac{2}{\gamma_s - 1} \left[\left(\frac{P_1}{P_{s0}} \right)^{-\frac{\gamma_s - 1}{\gamma_s}} - 1 \right]} \quad (3.26)$$

Posteriormente se obtiene el valor numérico el coeficiente de arrastre:

$$\omega = \frac{A_{s1}}{A_{p1}} \sqrt{\frac{T_{p0} R_p}{T_{s0} R_s}} \frac{f_2(\gamma_s, M_{s1})}{f_2(\gamma_p, M_{p1})} \quad (3.27)$$

En donde las funciones $f_2(\gamma_s, M_{s1})$ y $f_2(\gamma_p, M_{p1})$ se obtienen siguiendo la expresión (3.17).

Por medio de la siguiente expresión se determina la temperatura de entrada a la cámara del flujo secundario:

$$T_{s1} = \frac{T_{p1} T_{s0}}{T_{p0}} \left(\frac{P_{p0}}{P_1} \right)^{\frac{\gamma_p - 1}{\gamma_p}} \left(\frac{P_{s0}}{P_1} \right)^{-\frac{\gamma_s - 1}{\gamma_s}} \quad (3.28)$$

En seguida se calcula el número de Mach en la sección 2 mediante la ecuación:

$$M_{m2} = \frac{\xi}{\psi} \sqrt{1 - \frac{\gamma_m - 1}{2} \left(\frac{\xi}{\psi} \right)^2} \quad (3.29)$$

En donde ξ y ψ son funciones definidas por las ecuaciones (3.30) y (3.31) respectivamente:

$$\xi = M_{p1} + \omega M_{s1} \sqrt{\frac{\gamma_s R_s T_{s1}}{\gamma_p R_p T_{p1}}} \quad (3.30)$$

$$\psi = (1 + \omega) \sqrt{\frac{\gamma_m R_m T_{m0}}{\gamma_p R_p T_{p0}} \left(\frac{P_{p0}}{P_1} \right)^{\frac{\gamma_p - 1}{2\gamma_p}}} \quad (3.31)$$

Como ya se ha mencionado, los valores de γ_m y R_m se calculan por medio de las expresiones (3.23) y (3.24), al igual que T_{m0} con la expresión (3.19).

Para obtener el área de la sección 2 se recurre a la siguiente ecuación, en donde se emplea la definición de f_2 mencionada anteriormente:

$$A_{m2} = A_{p1} \sqrt{\frac{T_{m0} R_m}{T_{p0} R_p} \frac{f_2(\gamma_p, M_{p1})}{f_2(\gamma_m, M_{m2})}} (1 + \omega) \quad (3.32)$$

La presión de estancamiento de la mezcla se relaciona con la presión de la cámara de mezclado de la siguiente manera:

$$P_{m0} = P_1 \left(1 + \frac{\gamma_m - 1}{2} M_{m2}^2 \right)^{\frac{\gamma_m}{\gamma_m - 1}} \quad (3.33)$$

Con los resultados anteriores es posible determinar la temperatura de la mezcla en la sección 2:

$$T_{m2} = \frac{T_{p1} T_{m0}}{T_{p0}} \left(\frac{P_{p0}}{P_1} \right)^{\frac{\gamma_p - 1}{\gamma_p}} \left(\frac{P_{m0}}{P_1} \right)^{-\frac{\gamma_m - 1}{\gamma_m}} \quad (3.34)$$

Finalmente, las condiciones de presión, temperatura y número de Mach de la mezcla a la entrada del difusor, después de haber ocurrido la onda de choque normal, están dadas por las siguientes expresiones:

$$P_{m3} = P_{m2} \left(\frac{2\gamma_m}{\gamma_m + 1} M_{m2}^2 - \frac{\gamma_m - 1}{\gamma_m + 1} \right) \quad (3.35)$$

$$T_{m3} = T_{m2} \left(\frac{\gamma_m - 1}{\gamma_m + 1} \right)^2 \left(\frac{2\gamma_m}{\gamma_m - 1} M_{m2}^2 - 1 \right) \left[\frac{2}{(\gamma_m + 1) M_{m2}^2} + 1 \right] \quad (3.36)$$

$$M_{m3} = \frac{M_{m2}^2 + \frac{2}{\gamma_m - 1}}{\frac{2\gamma_m}{\gamma_m - 1} M_{m2}^2 - 1} \quad (3.37)$$

3.2.3 Cálculo del difusor subsónico

El cálculo de difusor, al igual que el cálculo de la tobera supersónica, no se ve afectado por el método de análisis de la zona de mezclado, ya que de ambos es posible obtener los valores de las variables necesarias para ello.

Usando la eficiencia del difusor η_d , similar a la definida para la tobera supersónica, la razón de presiones de la salida con respecto a la entrada se puede obtener mediante la siguiente expresión:

$$P_{40} = P_{m3} \left[1 + \eta_d \frac{\gamma_m - 1}{2} M_{m3}^2 \right]^{\frac{\gamma_m}{\gamma_m - 1}} \quad (3.38)$$

Por otro lado, cabe mencionar que la temperatura no sufre cambios bruscos en esta sección por lo que en algunos casos se considera constante, siempre y cuando no exista posibilidad de la generación de una onda de choque dentro del sistema.

La compresión total del equipo se define como:

$$C = \frac{P_{40}}{P_{s0}} \quad (3.39)$$

3.2.4 Cálculo de la potencia necesaria para impulsar el fluido motriz

Independientemente del análisis del eyector antes mostrado, es conveniente realizar el cálculo de la potencia necesaria para impulsar el fluido motriz de trabajo. Para el estudio que se presenta se emplean fluidos compresibles, por lo cual se debe realizar el cálculo correspondiente para un compresor. Las expresiones utilizadas para ello son las siguientes:

$$\dot{W}_{compresor} = \frac{\dot{m}W}{\eta} \text{ [KW]} \quad (3.40)$$

En donde el factor W se define como:

$$W = \frac{\gamma_p}{\gamma_p - 1} P_{succión} v_{succión} \left[\left(\frac{P_{descarga}}{P_{succión}} \right)^{\frac{\gamma_p - 1}{\gamma_p}} - 1 \right] \quad (3.41)$$

Cuidando que el volumen específico (v) y el gasto másico (\dot{m}) tengan unidades de $[\text{m}^3/\text{Kg}]$ y $[\text{Kg/s}]$ respectivamente, así como $[\text{KPa}]$ para ambas presiones. El factor η representa la eficiencia del equipo.

3.3 Conclusiones

El estudio anterior brinda una metodología adecuada para obtener los principales parámetros de operación de un eyector, y aunque ambos análisis de la cámara de mezclado suponen geometrías distintas, los dos resultan útiles para analizar termodinámicamente un mismo sistema, ya que bajo las mismas condiciones, se pueden considerar como complementarios.

Capítulo 4. Discusión y Resultados.

4.1 Establecimiento de los parámetros operativos

El análisis planteado en el presente trabajo se basa en el manejo de las expresiones utilizadas para el estudio de procesos con gases ideales, por lo que es aplicable para los fluidos de trabajo seleccionados (aire y vapor).

Como se ha mencionado, el prototipo MED-LE está diseñado para ser instalado en la Península de Baja California, es por ello que las condiciones de presión y temperatura iniciales del aire corresponden a las atmosféricas ($P_{amb} = 0.1 \text{ [MPa]}$, $T_{amb} = 30 \text{ [}^\circ\text{C]}$). Por otro lado, con respecto al vapor de agua como flujo motriz, la temperatura (T_{p0}) se estableció pensando en que tal recurso podría obtenerse a partir del calor residual de algunas industrias o del mismo fluido geotérmico.

Puesto que se considera que los calores específicos de las sustancias son constantes, el parámetro γ_p se calculó para las condiciones de temperatura de estancamiento y presión ambiente de cada uno de los flujos, y aunque esto produce errores en los resultados permite obtener una buena aproximación al comportamiento real de las corrientes que intervienen en el proceso.

Para el cálculo de la tobera supersónica se estableció un valor arbitrario del diámetro de garganta, dentro de un rango congruente con las hojas de especificaciones de algunos equipos comerciales con capacidades similares, así como del número de Mach deseado a la salida del sistema, cuidando que dicho número se encontrara en el rango establecido para flujo supersónico sin llegar a convertirse en flujo hipersónico, según se indica en la tabla 2.2.

Las eficiencias isentrópicas de las toberas convergentes, divergentes y convergentes-divergentes, oscilan en un rango de entre 90 y 99%, cuyo aumento o decremento es proporcional al tamaño de la misma; esto se debe a que los efectos viscosos que producen pérdidas se minimizan conforme aumentan las dimensiones del sistema (Potter, Mecánica de Fluidos, 2002). Debido a ello y por el tamaño propuesto, se establece un valor de $\eta_n = 90\%$ y de $\eta_d = 90\%$, con lo que se asegura que los resultados obtenidos muestren el panorama más ineficiente del desempeño de las mismas.

El punto de interés del estudio es el vacío generado en la cámara de evaporación del sistema MED-LE, cuyo valor requerido se estableció en la tabla 3.1 al igual que el valor de la temperatura T_{s0} , por lo que a la salida de la tobera supersónica debe existir una presión menor o igual a la misma para que se logre el transporte del fluido secundario, por tal motivo se eligió la presión isentrópica P_{p1s} que se muestra en la tabla 4.1, a partir de la cual se obtiene el valor corregido de P_{p1} como se observa más adelante.

Por otro lado, se estableció un valor conveniente de M_{s1} , que de acuerdo con los modelos matemáticos de presión y área constante en la zona de mezclado se encuentra en el rango subsónico, es decir, $M_{s1} < 1$. Una vez calculada el área de salida de la tobera supersónica y siguiendo lo indicado en los volúmenes de control empleados para dichos modelos, se propone un valor de A_{m3} superior a A_{p1} .

Por último, con respecto a las eficiencias de los compresores, se fijaron ambas en 85% puesto que es el valor que comúnmente se tiene en estos sistemas. (Acosta, 2012)

4.2 Resultados para la tobera supersónica

De lo anterior se desprende la siguiente tabla que muestra los valores numéricos de los parámetros establecidos para el análisis del eyector de acuerdo con los flujos de trabajo:

Tabla 18. Parámetros iniciales del cálculo.

P_{p1s}	0.009	0.009	[MPa]
M_{p1}	2.50	2.50	[]
D^*	0.010	0.010	[m]
T_{p0}	303.15	393.15	[K]
η_n	0.90	0.90	[]
η_d	0.90	0.90	[]
γ_p	1.40	1.33	[]

Con lo cual se obtiene la presión necesaria del fluido motriz a la entrada del sistema para generar el vacío requerido, además de algunas de las principales propiedades de estancamiento de las corrientes motrices:

Tabla 19. Condiciones de estancamiento del fluido primario.

P_{p0}	0.154	0.157	[MPa]
ρ_{p0}	1.767	0.879	[Kg/m ³]
h_{p0}	303.36	2710.64	[KJ/Kg]

Se observa que para lograr el mismo número de Mach a la salida de la tobera y la misma presión vacuométrica, con geometrías de garganta iguales, la presión mínima requerida proporcionada por el compresor corresponde al aire, aunque no existe gran diferencia para el vapor. Con respecto a la entalpía de estancamiento de los flujos, se aprecia que la correspondiente al vapor de agua es mucho mayor que la del aire, es decir, la energía disponible que puede intercambiar con el sistema es mayor; lo cual es lógico puesto que la temperatura del recurso motriz para este caso también es notablemente superior.

Por otro lado, las condiciones críticas calculadas para cada uno de los flujos son las siguientes:

Tabla 20. Condiciones críticas de la tobera supersónica.

m_*	0.089	0.035	[Kg/s]
A_*	0.00008	0.00008	[m ²]
P_*	0.0812	0.0845	[MPa]
T_*	252.6	337.4	[K]
ρ_*	1.12	0.55	[Kg/m ³]
V_*	318.6	455.1	[m/s]

El hecho de tener la misma geometría de garganta permite realizar comparaciones adecuadas entre los casos de estudio. Aunque se requiere menor presión de entrada cuando el fluido motriz es aire, se observa que el gasto másico necesario es notablemente mayor al del vapor. Cabe señalar que las corrientes sufren un enfriamiento súbito que conlleva a una caída en la densidad, esto es debido a la variación en la presión que se tiene.

Es conveniente aclarar que las variaciones en la velocidad entre los casos de estudio se deben a los cambios de densidad que sufren los flujos, sin embargo el número de Mach de salida no se ve afectado por tal situación.

Con base en los valores anteriores se realiza el cálculo isentrópico, obteniéndose los siguientes resultados:

Tabla 21. Características isentrópicas de la tobera supersónica.

A_{p1s}	0.00021	0.00022	[m ²]
D_{p1s}	0.0162	0.0168	[m]
T_{p1s}	134.7	193.5	[K]
ρ_{p1s}	0.232	0.102	[Kg/m ³]

En donde se observa que el área de salida de la tobera cambia ligeramente entre los casos analizados, que para fines prácticos se pueden considerar como iguales. El enfriamiento sigue al

igual que la disminución en la densidad, esto debido también a las transformaciones de energía sufridas.

Involucrando la eficiencia isentrópica de la parte divergente de la tobera supersónica se realiza la corrección sobre los parámetros ideales anteriormente mostrados:

Tabla 22. Características reales de la tobera supersónica.

A_{pl}	0.00032	0.00034	[m ²]
D_{pl}	0.02032	0.02092	[m]
T_{pl}	151.5	213.5	[K]
P_{pl}	0.00533	0.00551	[MPa]

Dado lo anterior se puede concluir que el factor de corrección (η_n) afecta significativamente tanto los parámetros termodinámicos como los parámetros geométricos, siendo la presión vacuométrica a la salida de la tobera el elemento más afectado en ambos casos, ya que presenta un notable decremento de alrededor del 40% con respecto al valor inicial; Para los demás parámetros se mantiene la tendencia mostrada en el cálculo ideal, sin embargo se debe tener en cuenta que para los resultados reportados se considera un valor de eficiencia bajo.

En seguida se muestran los resultados obtenidos para cada uno de los distintos modelos de análisis de la cámara de mezclado utilizados, para los cuales se establecieron las siguientes condiciones operativas del fluido secundario, justificadas anteriormente:

Tabla 23. Condiciones iniciales del fluido secundario.

P_{so}	0.01	0.01	[MPa]
T_{so}	358.15	358.15	[K]
M_{s1}	0.60	0.60	[]
A_{m3}	0.004	0.004	[m ²]

Se repiten los valores en ambas columnas para hacer énfasis en que se emplea el mismo flujo secundario para los dos casos de estudio. Cabe señalar que la temperatura T_{so} mostrada corresponde a la propuesta para el recurso geotérmico del sistema MED-LE, ya que por las dimensiones del mismo y suposiciones realizadas no se consideran pérdidas de calor significativas dentro de las cámaras de evaporación, teniendo un equilibrio térmico perfecto entre ambas caras de los tubos de los intercambiadores de calor.

4.3 Resultados para la cámara de mezclado usando el método de área constante

Para el modelo de área constante, partiendo de los elementos disponibles y de los resultados anteriormente reportados, se obtienen los siguientes parámetros operativos:

Tabla 24. Resultados obtenidos con el modelo de área constante.

R_s	461.52	461.52	[J/(Kg*K)]
γ_s	1.32	1.32	[]

A_{s1}	0.00367	0.00365	[m ²]
ω	1.959	2.775	[]
m_s	0.174	0.097	[Kg/s]
P_{s1}	0.00793	0.00793	[MPa]
A_{m3}	0.004	0.004	[m ²]
D_{m3}	0.0713	0.0713	[m]
m_{m3}	0.263	0.132	[Kg/s]
T_{mo}	346.3	367.3	[K]
R_m	402.5	461.5	[J/(Kg*K)]
γ_m	1.34	1.32	[]
M_{m3}	2.724	1.997	[]
P_{m3}	0.0013	0.0024	[Mpa]

Para el flujo secundario se observa que el área requerida para satisfacer las condiciones dadas de velocidad prácticamente no cambia entre los distintos casos, sin embargo el coeficiente de arrastre varía ampliamente, siendo para los dos fluidos superior a la unidad, lo cual implica que de acuerdo con las condiciones operativas proporcionadas el gasto másico motriz será menor que el gasto másico secundario arrastrado. Como se muestra, el vapor de agua genera el mejor arrastre debido a que posee la misma naturaleza que el fluido secundario a lo largo de todo el proceso, además de que su entalpía inicial es mayor.

Por último, es conveniente mencionar que tal como se establece en la figura 3.3, a la salida del volumen de control se tiene una velocidad supersónica, como lo indican los valores de M_{m3} que para los dos casos resultan superiores a la unidad, siendo el aire el flujo con mayor velocidad; por otro lado, con respecto a la presión se observa que el decremento en la misma se mantiene, y cuya recuperación se lleva a cabo dentro de la siguiente sección de análisis correspondiente al difusor, tal como se muestra más adelante.

4.4 Resultados para la cámara de mezclado usando el método de presión constante

En seguida se reportan los resultados obtenidos del análisis de la cámara de mezclado por el método de presión constante, cuyos parámetros operativos iniciales corresponden a los calculados y establecidos anteriormente para las corrientes primaria y secundaria.

Tabla 25. Resultados obtenidos para la cámara de mezclado mediante el método de presión constante.

M_{p1}	2.30	2.32	[]
M_{s1}	0.6	0.6	[]
ω	1.496	2.154	[]
T_{s1}	394.6	385.09	[K]
R_m	391.6	461.5	[J/(Kg*K)]
γ_m	1.34	1.32	[]
T_{mo}	343.6	369.1	[K]
M_{m2}	0.8189	0.8517	[]
A_{m2}	0.00392	0.00372	[m ²]

P_{m0}	0.0121	0.0124	[Mpa]
T_{m2}	359.3	375.6	[K]
A_{m2}	0.00322	0.00307	[m ²]
P_{m3}	0.00493	0.00544	[Mpa]
T_{m3}	317.2	341.9	[K]
M_{m3}	1.23	1.18	[]

A pesar de que ambos estudios, de área constante y presión constante, fueron utilizados para analizar el mismo sistema, la geometría correspondiente a cada uno de ellos y los parámetros que permiten obtener, así como las suposiciones y consideraciones hechas para su desarrollo matemático, impiden realizar comparaciones totales entre sus resultados, por lo cual en el presente trabajo se consideran como complementarios, haciendo algunas comparaciones parciales convenientes.

Aunque inicialmente se propone un número de Mach deseado a la salida de la tobera supersónica (M_{p1}), en el estudio de presión constante se realiza la corrección correspondiente causada por la eficiencia isentrópica η_n considerada, obteniéndose un resultado ligeramente menor al propuesto, cuyo error no supera el 8% del valor de partida que es de 2.5.

Por otro lado, con respecto al coeficiente de arrastre calculado, se observa que para los dos casos de estudio se mantiene la misma tendencia que se obtuvo por el método de área constante, es decir, para todos los flujos de trabajo ω toma valores superiores a la unidad, sin embargo para éste segundo cálculo la magnitud de los mismos es inferior, teniendo como valor máximo $\omega=2.154$ para el vapor de agua.

De acuerdo con los números de Mach " M_{m2} " reportados, la mezcla en la sección 2 de la figura 3.5 corresponde a un flujo subsónico tanto para el caso en el cual el flujo motriz es aire como para el cual es vapor; esto se debe a que la combinación de las dos corrientes en regímenes distintos, subsónico para la secundaria y supersónico para la primaria, no posee la suficiente energía para lograr una mezcla permanentemente supersónica, además de que entre las secciones 1 y 2 de la misma figura el área decrece a medida que avanzan las corrientes, lo cual implica un decremento en la velocidad de la corriente motriz y un incremento en la velocidad de la corriente secundaria, alcanzándose el equilibrio cuando M_{m2} es igual al valor mostrado.

De lo anterior se puede concluir que para ambos casos, de acuerdo con el estudio de presión constante, no existe la posibilidad de la generación de una onda de choque en la sección de área constante, comprendida entre las secciones 2 y 3, por lo que la corriente de mezcla puede incrementar su velocidad en dicha sección hasta llegar al difusor, tal como lo indica el factor M_{m3} obtenido, que implica el cambio a régimen supersónico; es por ello que para estos casos se considera que la recuperación de presión y el frenado de la corriente se logra por medio de una onda de choque a la entrada del difusor.

Sin embargo, en el capítulo 2 se estableció que la generación de ondas de choque moderadas comienza a partir de que el número de Mach local alcanza valores superiores a 0.8, tal como los correspondientes a M_{m2} calculados, por lo que los resultados obtenidos para la sección 3 no necesariamente corresponden al comportamiento real de la corriente de mezcla.

A pesar de las diferencias existentes entre los métodos de estudio de la cámara de mezclado, se observa que la presión al final de la sección de análisis es similar para ambos, mostrando un ligero aumento pero manteniendo la misma tendencia para éste último, concluyéndose que para el vapor de agua se tiene la presión más alta a la salida de la cámara de mezclado, así como una temperatura también superior a la del otro caso.

4.5 Resultados obtenidos para el difusor

Después de haber analizado los resultados obtenidos para la sección de mezclado se presentan los correspondientes al cálculo del difusor, para el cual se toman en cuenta, entre otros factores, la presión de entrada P_{m3} y el número de Mach de la corriente M_{m3} , así como la eficiencia propuesta η_d .

Puesto que se emplearon dos métodos para el estudio de la cámara de mezclado, se tienen dos valores distintos para cada uno de los parámetros antes mencionados, por lo cual se calcularon las presiones de salida del eyector P_{40} correspondientes a cada uno de ellos y la compresión total del equipo definida por la ecuación 3.39.

Tabla 26. Resultados del difusor de acuerdo con los métodos de análisis utilizados.

P_{40} (Área constante)	0.0272	0.0156	[Mpa]
P_{40} (Presión constante)	0.0113	0.0116	[Mpa]
C (Área constante)	2.720	1.564	[]
C (Presión constante)	1.132	1.164	[]

Se observa que para cálculo por el método de área constante se tiene una mayor recuperación de presión a la salida del eyector, así como un mayor índice de compresión (C), mostrándose la mayor diferencia entre ambos estudios para el caso en el cual se trabaja con aire como fluido motriz, en donde tanto P_{40} como C superan los valores correspondientes al otro método casi en un 150%.

A pesar de que, como se aprecia en la tabla 4.9, la presión a la salida del sistema analizado sigue siendo vacuométrica, comparando la presión de salida del difusor con respecto a la presión de entrada del mismo, se puede establecer que el índice de recuperación (P_{40}/P_{m3}) se encuentra en un rango aceptable ya que para todos los casos analizados se sitúa por encima de la unidad, alcanzando el mayor valor cuando se emplea aire como fluido motriz para el método de área constante en la zona de mezclado, en donde $P_{40}/P_{m3}=19.89$; por lo que se puede concluir que el valor de P_{40} queda limitado por las condiciones operativas de todo el sistema y no solo por el difusor.

4.6 Potencia requerida para accionar el sistema.

Tomando como condiciones de succión la presión ambiente (P_{amb}) y la temperatura T_{p0} de los flujos, y como condiciones de descarga las correspondientes al estado de estancamiento de los mismos, en la siguiente tabla se muestra la potencia necesaria para impulsar el fluido motriz según el caso de estudio, con la cual se cubren los requerimientos de vacío establecidos:

Tabla 27. Potencia necesaria para impulsar el fluido motriz.

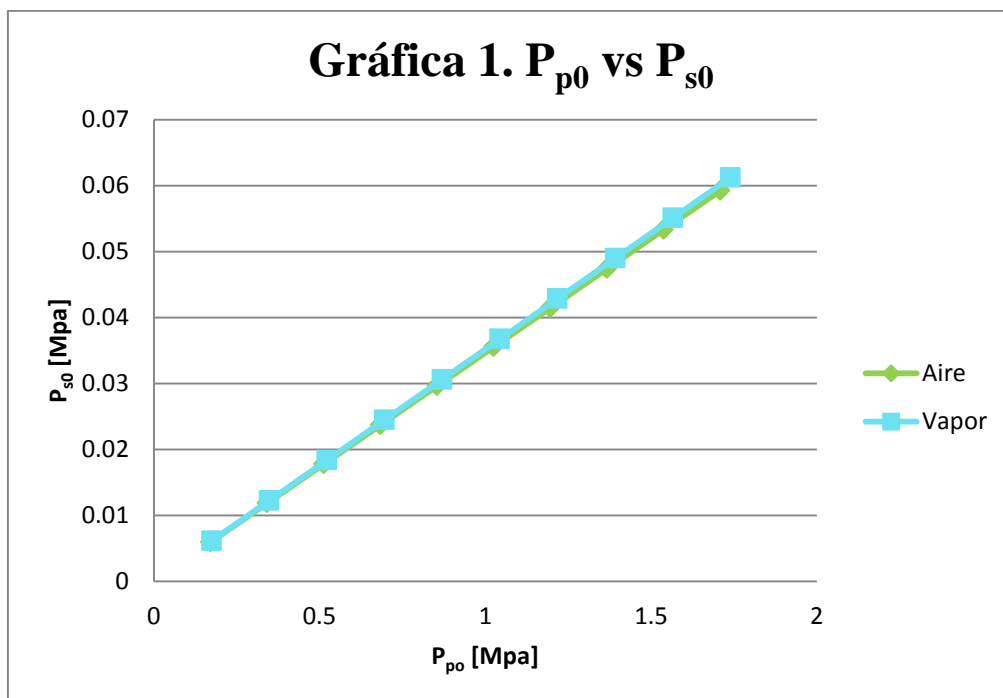
	Compresor	Compresor	Unidades
\dot{W}	4.176	3.513	[KW]
\dot{W}	5.601	4.712	[hp]

Como se observa en la tabla, los resultados de la potencia requerida por el compresor para impulsar el flujo motriz del sistema se expresan en dos unidades distintas ([KW] y [hp]) con la finalidad de identificar fácilmente las capacidades de los equipos mencionados. De los valores reportados se observa que la potencia requerida para impulsar el vapor es menor a la correspondiente al aire, lo cual se considera como un factor decisivo al elegir el flujo motriz, sin embargo, se debe tener en cuenta el costo de instalación y operativo de éstos sistemas auxiliares.

4.7 Gráficas.

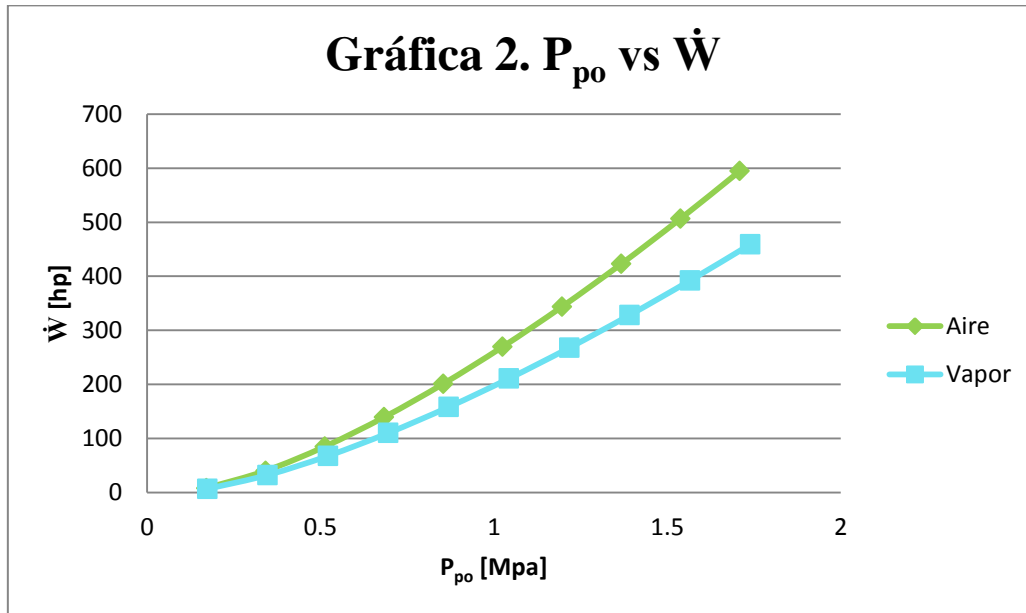
Algunos de los factores más importantes en el análisis de eyectores son los siguientes: la presión vacuométrica obtenida en la entrada del flujo secundario, la presión del fluido motriz necesaria para generar tal vacío, la potencia requerida para impulsar el flujo primario, el coeficiente de arrastre y la presión de salida del equipo, debido a ello a continuación se muestran algunas gráficas que relacionan tales parámetros operativos. Cabe señalar que para analizar las relaciones entre dichos factores se deben mantener los demás, correspondientes a temperaturas, geometrías y gastos máscicos iniciales, fijos.

En primer lugar se establece la relación existente entre la presión P_{p0} y la presión P_{p1} , que como se indicó en el apartado 4.1, la presión de vacío generada por el eyector en la entrada del flujo secundario puede ser igual o menor a la que se genera a la salida de la tobera supersónica, por tal motivo para este primer gráfico se considera $P_{p1} = P_{s0}$, pudiendo con ello obtener la presión mínima del fluido motriz necesaria para generar cierto nivel de vacío requerido.



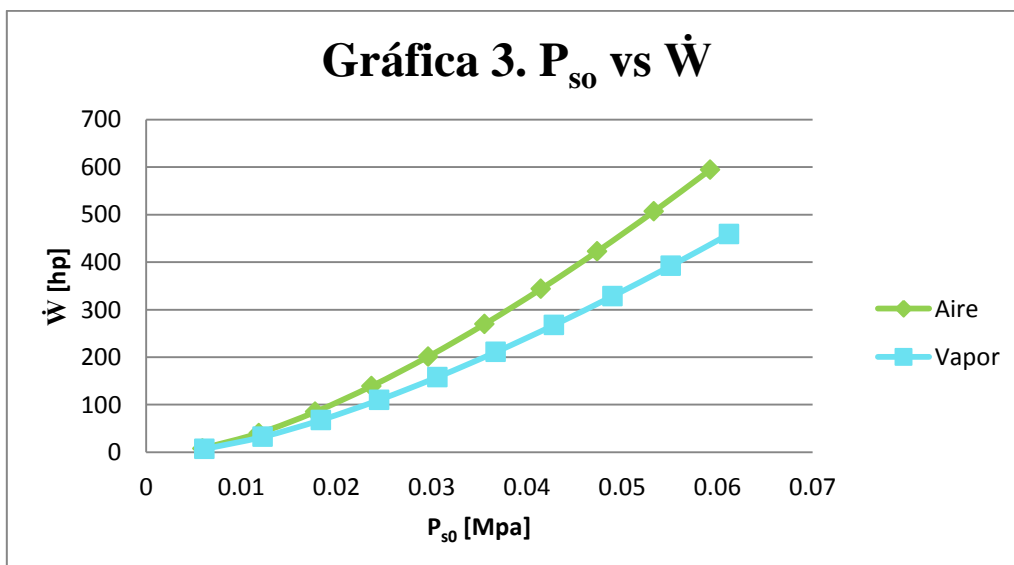
La tendencia seguida por los dos casos de estudio es lineal, cuya única diferencia se encuentra en el nivel de vacío alcanzado por las corrientes, teniendo el mayor para cuando se emplea vapor de agua.

Para el rango de presiones correspondientes a P_{p0} , la potencia requerida se muestra en la siguiente gráfica:



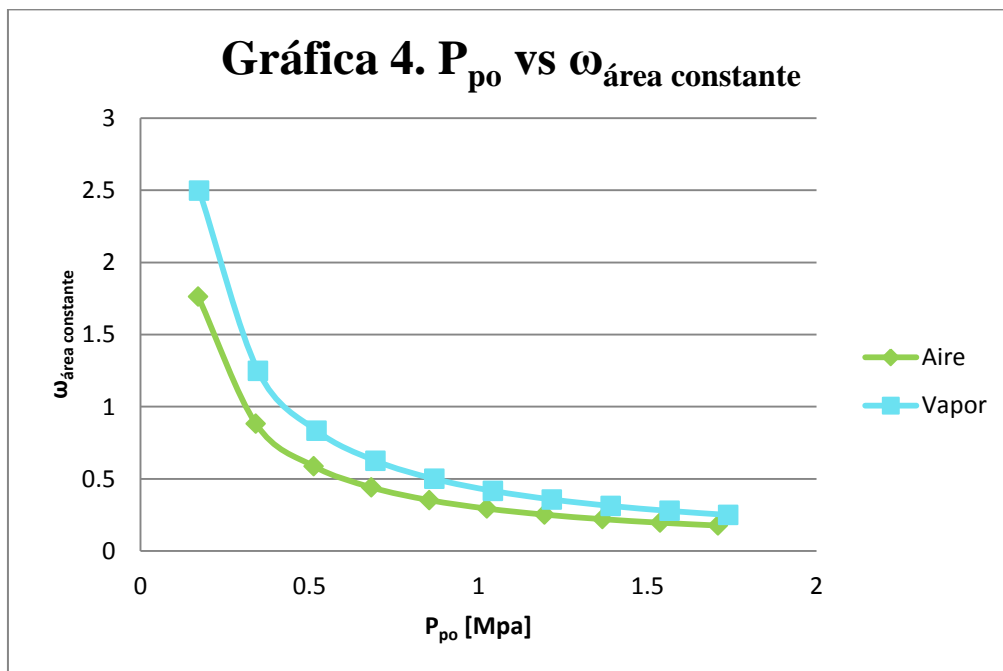
En donde se observa que, tal como se obtuvo para el caso particular analizado anteriormente, la potencia requerida para accionar el sistema con aire es mayor a la necesaria para impulsar vapor de agua, teniendo los mismos resultados en el nivel de vacío alcanzado. Se puede apreciar que cuando la presión de entrada del fluido motriz es muy alta, la potencia necesaria crece exponencialmente, por lo que un equipo auxiliar como un compresor no podría satisfacer dichos requerimientos, es por ello que se recurre a sistemas de vacío en varias etapas, cada una con su propio sistema de presión.

De manera similar, resulta conveniente mostrar la relación entre el vacío generado por el eyector y la potencia consumida para ello:



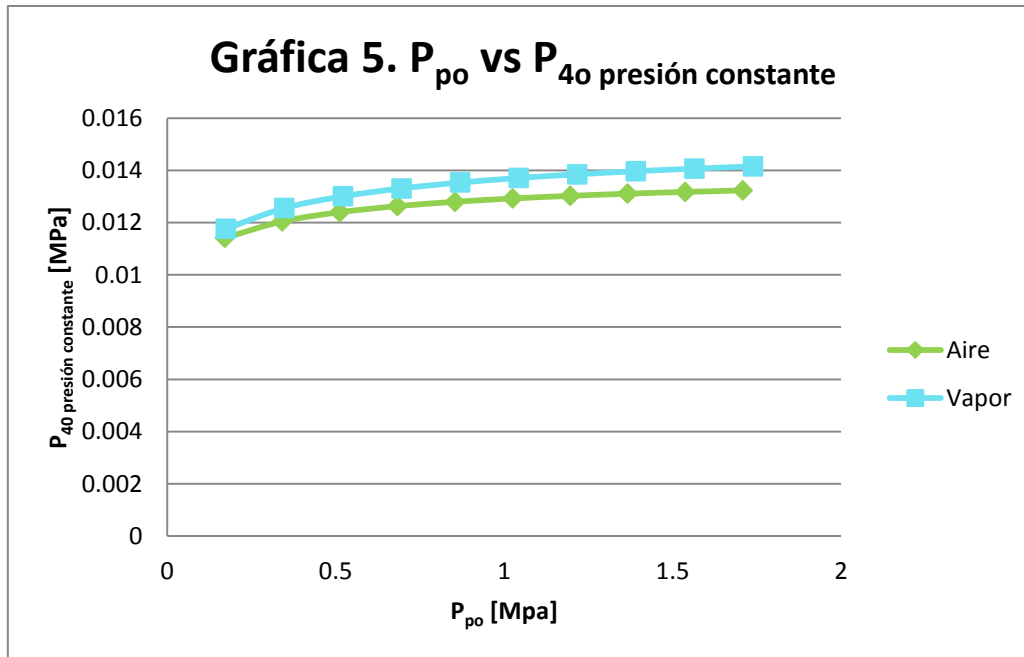
En la gráfica anterior se muestra el máximo vacío generado por un determinado valor de potencia, para las características geométricas del eyector propuesto, de lo cual se concluye que para analizar equipos con diferentes requerimientos es necesario modificar los valores correspondientes a flujos másicos y áreas de las distintas secciones mencionadas, puesto que el estudio presentado en el presente trabajo se enfoca en un caso particular, y no puede ser extrapolado tal cual a otras situaciones con características y propiedades diferentes.

Con respecto al coeficiente de arrastre, anteriormente se explicó que aunque éste resulta mayor para cuando se emplea el modelo de área constante en el análisis de la zona de mezclado, la tendencia de ambos modelos es similar; debido a ello solamente se presenta el gráfico correspondiente al primer estudio:



Se observa que a medida que aumenta el valor de P_{p0} el coeficiente de arrastre disminuye, esto se debe a que la velocidad a la que se lleva a cabo el proceso aumenta, por lo que el tiempo disponible para que se lleve a cabo la transferencia de energía entre las corrientes es muy corto, debido a ello no se logra el transporte del fluido secundario con la misma eficiencia que para presiones inferiores.

Por otro lado, con respecto a la presión de salida del equipo (P_{40}), en la siguiente gráfica se muestra la relación que tiene con la presión P_{p0} , considerando los valores de P_{m3} obtenidos mediante el análisis por el método de presión constante; es conveniente mencionar que, al igual que para el caso del coeficiente de arrastre, si se emplean los resultados del método de área constante se obtiene un comportamiento similar pero con pequeñas variaciones en las magnitudes mostradas:



Aunque el comportamiento de la presión de salida con respecto a la presión de entrada no es lineal, se observa que la recuperación de la misma al final del proceso no incrementa significativamente para grandes cambios en la presión del fluido motriz, lo cual muestra que éste tipo de gráficos no resultan convenientes para el análisis de sistemas cuyos requerimientos de vacío sean muy distintos, sin embargo se muestran para hacer énfasis en ello.

4.8 Conclusiones

Tanto la tobera supersónica como el difusor de salida del eyector son independientes del método de análisis de la cámara de mezclado (de área constante o de presión constante), sin embargo antes de elegir alguno de ellos y seleccionar la configuración geométrica más adecuada para cubrir ciertas necesidades, es importante establecer la prioridad de los factores que intervienen en el estudio, ya que dependiendo de ello es posible identificar el método más conveniente.

Capítulo 5. Conclusiones.

5.1 Conclusiones

Las fuentes de energía tradicionales, como lo es el petróleo y sus derivados, se encuentran en un proceso de agotamiento continuo, razón por la cual su escasez y costo aumentan a gran velocidad; esta situación se relaciona directamente con el rápido aumento de la población mundial, que propicia un incremento en la demanda de servicios para cubrir sus necesidades personales y cuyas empresas proveedoras requieren cada vez mayores cantidades de combustibles para satisfacerlas. Por tales razones es conveniente impulsar el desarrollo de tecnologías para el aprovechamiento de nuevas fuentes energéticas como lo es la geotermia, que además de ser una energía continua, también es limpia.

El potencial energético aprovechable de la tierra es muy grande y se manifiesta de distintas maneras, sin embargo no se encuentra distribuido uniformemente en todo el planeta, es decir, existen regiones con mayor actividad geotérmica y algunas otras con muy poca o nula. Afortunadamente en México, debido a sus condiciones geográficas, se cuenta con una gran cantidad de zonas geotérmicas tanto de alta, como de media y baja entalpía. A pesar de ello, el nivel de aprovechamiento de tal recurso es bajo, y se encuentra limitado a usos directos, como balneología por ejemplo, e industriales, como generación de energía eléctrica y bombas de calor.

Por otro lado, un problema existente en el país es la escasez de agua para consumo y utilización de sus habitantes, esto se debe a las pocas fuentes de agua dulce disponibles para su explotación directa y la dificultad que representa el traslado del líquido a zonas alejadas; sin embargo, se cuenta con un recurso ilimitado y abundante a lo largo de la zona costera, referente al agua de mar. Tal recurso puede ser aprovechado por medio de distintas tecnologías de desalación, de entre las cuales la tecnología MED, basada en la evaporación de múltiple etapa, representa la segunda más usada a nivel mundial por su capacidad y eficiencia.

Con la finalidad de solucionar o disminuir localmente ambos problemas se plantea la utilización de energía geotérmica de baja entalpía en un prototipo funcional de desalación de agua de mar tipo MED, que servirá como base para el análisis de los parámetros que afectan en mayor grado el proceso; la característica por la cual se plantea el aprovechamiento de la geotermia de baja entalpía se debe a su abundancia y al poco interés que actualmente se tiene sobre la misma. Una de las zonas adecuadas para su instalación por la disponibilidad de los recursos necesarios, geotermia y agua de mar, es la Península de Baja California. El prototipo mencionado recibe el nombre de MED-LE, cuyas iniciales finales corresponden a *Low Enthalpy*, haciendo referencia al tipo de recurso geotérmico empleado.

Ya que el potencial energético de las fuentes de baja entalpía es limitado se desea maximizar su aprovechamiento, por lo que en estos sistemas de desalación se recurre a equipos de generación de vacío en las cámaras de evaporación, cuyo objetivo es disminuir la temperatura de saturación del agua de mar a desalar. De lo anterior, se puede decir que el sistema de vacío está directamente relacionado con el nivel de aprovechamiento de la energía, por lo que su análisis y diseño representa un factor muy importante que se debe considerar en la planeación de la planta.

Generalmente las plantas de desalación tipo MED, incluyendo las instaladas en México, emplean el vapor de extracciones de la turbina de sistemas de generación de energía eléctrica, tanto para accionar los eyectores de vacío como para evaporar el agua de mar en los intercambiadores de calor dentro de las cámaras, sin embargo, debido a que en el prototipo funcional se plantea la utilización de geotermia de baja entalpía, el recurso geotérmico es prácticamente líquido en su totalidad, por lo que no se cuenta con una cantidad considerable de vapor, a menos que se instale una planta geotérmica de generación eléctrica cerca del mar.

Con base en lo anterior se realizó el estudio general de los principales sistemas de vacío, comparando los distintos tipos de bombas vacuométricas, los eductores y los eyectores, concluyéndose que éstos últimos representan la mejor opción para la unidad de desalación en cuestión y sus parámetros operacionales, por su ausencia de partes móviles, dimensiones, fácil mantenimiento, costo y capacidad operacional, entre otras características. Es por ello que el presente trabajo se enfoca en el análisis de un eyector como sistema de generación de vacío del sistema MED-LE.

El diseño del prototipo funcional de desalación se realizó con base en las características locales del agua de mar, las condiciones ambiente del lugar y las propiedades del recurso geotérmico, por lo que el eyector se analizó a partir de los resultados obtenidos, específicamente los correspondientes a la cámara de evaporación.

Del funcionamiento del eyector se sabe que en el proceso intervienen dos corrientes, la primaria de alta presión o motriz, y la secundaria que corresponde al fluido aspirado; en este trabajo se analizaron dos fluidos motrices diferentes comúnmente usados en la industria (aire y vapor de agua), manteniendo para ambos un mismo fluido secundario (vapor).

Para el análisis y funcionamiento de un eyector existen parámetros con mayor relevancia, los cuales proporcionan una idea clara sobre las características del equipo y permiten seleccionar el fluido motriz que presenta un mejor desempeño del mismo, entre estos parámetros se encuentran los siguientes: el nivel de vacío generado en la cámara de succión (P_{so}), la presión del fluido motriz (P_{p0}), la potencia requerida por el sistema auxiliar para impulsar el flujo primario (\dot{W}), el flujo másico de fluido motriz necesario para accionar el sistema (m^*), y el coeficiente de arrastre (ω).

Cabe mencionar que los demás parámetros, tanto termodinámicos como geométricos, que se presentan a lo largo de este estudio se encuentran definidos por los anteriormente mencionados, razón por la cual no se establecen como prioritarios. Por otro lado, dado que para el desarrollo matemático planteado se consideran calores específicos constantes, pequeñas variaciones en los valores de temperaturas proporcionadas no afectan significativamente los resultados obtenidos, por lo que se le brinda mayor importancia a los rangos de presiones manejados en el equipo.

Con base en lo anterior y para el caso particular del prototipo MED-LE analizado, en seguida se muestra una tabla resumen, por medio de la cual se pueden realizar las conclusiones correspondientes reportadas más adelante:

Tabla 28. Principales parámetros operativos del eyector analizado.

P_{so}	0.01	0.01	[MPa]
P_{p0}	0.154	0.157	[MPa]
\dot{W}	5.601	4.712	[hp]
m^*	0.089	0.035	[Kg/s]
ω	1.959	2.775	[]

Como se observa, para la tabla anterior se mantiene el código de colores establecido, y para ambos casos de estudio el coeficiente de arrastre, definido como la razón de la masa del fluido secundario con respecto a la masa del fluido primario, corresponde al obtenido mediante el método de análisis de área constante en la zona de mezclado, puesto que éste método permite obtener mayor información sobre el funcionamiento global del equipo, a diferencia el modelo de presión constante, que se enfoca en el estudio del comportamiento de los flujos que intervienen en el proceso.

De los valores reportados en la tabla 5.1 se concluye que, para el eyector analizado, el vapor de agua como flujo motriz representa el mejor fluido de trabajo, puesto que con una presión inicial ligeramente superior a la calculada para el caso en el cual se trabaja con aire, se cubren totalmente los requerimientos de vacío del sistema MED-LE con un flujo másico del recurso

mucho menor, lo que deriva en una disminución en la potencia necesaria del compresor, cuya diferencia con respecto al primer caso de estudio es de casi 0.9 [hp]. Por otro lado, el coeficiente de arrastre aumenta notablemente por lo que el tiempo de aspiración del fluido secundario sería menor para este caso, lo cual se debe a que la naturaleza de ambas corrientes que intervienen en el proceso es la misma.

Dado que el análisis presentado a lo largo de este trabajo se enfoca en la solución de un problema real, independientemente de que el vapor de agua como flujo motriz represente la mejor opción para el funcionamiento del eyector, antes de decidir el tipo de fluido primario que se empleará en el sistema es necesario evaluar algunos otros parámetros convenientes, como lo son la disponibilidad del recurso para la zona de instalación, y las ventajas y desventajas que su uso representa.

Dentro de este tema, es conveniente mencionar que para la operación del prototipo MED-LE se tienen limitantes fundamentales, específicamente con respecto a la disponibilidad de la energía geotérmica de baja entalpía y del agua de mar, por lo que si se emplea vapor de agua para accionar el sistema de vacío, es necesario tomar en cuenta que si no se tiene una fuente constante de suministro del fluido, como una extracción de vapor de alguna planta industrial por ejemplo, se deben instalar los equipos secundarios necesarios para producirlo, como caldera, bombas y demás, lo cual conlleva un costo extra tanto de instalación como de mantenimiento.

Por otro lado, si se piensa en el aire como fluido primario del sistema de generación de vacío, no se tendrían los problemas anteriormente mencionados, puesto que es un recurso abundante en cualquier zona y sin limitantes temporales para su uso, por lo que el único inconveniente que representa su utilización recae en el incremento de la potencia necesaria del compresor, tal como se muestra en la tabla 5.1.

Dado lo anterior y considerando la capacidad de producción del sistema de desalación en cuestión, se concluye que para la zona de instalación resulta más conveniente el uso de aire como fluido motriz en el eyector del prototipo de laboratorio; y el análisis presentado deja las bases para definir la factibilidad técnica para un sistema de mayor tamaño.

5.2 Trabajo futuro

Los parámetros operacionales obtenidos mediante el desarrollo mostrado en el presente trabajo permiten realizar una buena selección del mejor fluido primario, con base en las características y datos disponibles del sistema analizado, además de algunas características geométricas del equipo, sin embargo, si lo que se desea es llevar a cabo el diseño completo del eyector, partiendo de los resultados obtenidos, se deben realizar las simulaciones correspondientes del proceso con ayuda de algún(os) software de análisis de flujos y diseño mecánico del dispositivo.

En cambio, si el estudio realizado es suficiente para los fines que se persiguen, una vez seleccionados los parámetros operativos del eyector propuesto se puede llevar a cabo su adquisición e instalación física dentro del prototipo MED-LE, para con ello realizar las mediciones correspondientes, referentes a propiedades termodinámicas y demás convenientes, que permitan obtener el grado de aproximación que se tiene con los métodos de análisis presentados al funcionamiento real del equipo.

Bibliografía

- Apuntes de aprovechamiento de energía geotérmica FI.* (2012). Obtenido de Héctor Aviña "Temas selectos de Termofluidos".
- Acosta, L. G. (2012). *Clasificación de las bombas hidráulicas*. Recuperado el 27 de Marzo de 2013, de http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/articulos/maquinashidraulicas/clasificacionbombas_hidraulicas/clasificaciondelasbombashidraulicas.html
- aitormateos. (6 de Marzo de 2012). *Energía Geotérmica*. Recuperado el 25 de Diciembre de 2012, de Sobre el calor de la Tierra y sus aplicaciones: <http://grupo02termo.wordpress.com/2012/03/06/3-aplicaciones-y-usos-frecuentes-de-la-energia-geotermica-4/>
- Alonso, D. I. (30 de Noviembre de 2009). *Antecedentes y Potencial de la Energía Geotérmica*. Recuperado el 27 de Diciembre de 2012, de Gobierno del principado de Asturias. Consejería de Industria y Empleo: <http://www.unioviado.es/catedrahunosa/archivos/Isaac%20Pola.pdf>
- Armstead, H. C. (1983). *Geothermal Energy*. London: E. & F.N. Spon.
- Armstead, H. C. (1989). *Energía Geotérmica*. México: Limusa Noriega.
- Aviña, J. H. (2012). *Energía geotérmica "Generación eléctrica y usos directos"*. México, D.F.
- Banasiak, K. (Septiembre de 2012). *Experimental and numerical investigation of the influence of the two-phase ejector geometry on the performance of the R744 heat pump*. Recuperado el 6 de Febrero de 2013, de International Journal of Refrigeration: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S014070071200093X>
- Calle, J. M. (2009). *Apuntes de Mecánica de Fluidos: 2ª parte. Flujo compresible*. Recuperado el 31 de Enero de 2013, de Universidad de Oviedo. Escuela Politécnica Superior de Ingeniería de Gijón.: http://www.unioviado.es/Areas/Mecanica.Fluidos/docencia/_asignaturas/mecanica_de_fluidos/08_09/II.4.%20FLUJO%20COMPRESIBLE%200809.pdf
- Certificado CE. (2010). *Bomba de canal lateral*. Recuperado el 15 de Enero de 2013, de Fabricantes de bombas: http://www.seroweb.de/techdoc/english/SERO_BA-2011.09_S_es.pdf
- CFE. (2010). *Geotermia*. Recuperado el 16 de Enero de 2013, de CFE: http://www.cfe.gob.mx/ConoceCFE/Desarrollo_Sustentable/energiarenovable/Paginas/Geoteremia.aspx
- Chemical Engineering and Processing. (04 de Abril de 2001). *Evaluation of steam jet ejectors*. Recuperado el 25 de Enero de 2013, de <http://ecaaser5.ecaa.ntu.edu.tw/weifang/eBook/heat%20pump/HP%20for%20desalinati on/Evaluation%20of%20steam%20jet%20ejectors.pdf>

- CK TECHNOLOGIES, INC. (2012). *Series ZL112-212*. Recuperado el 24 de Enero de 2013, de Multi stage ejector: http://stevenengineering.com/tech_support/PDFs/70VZL.pdf
- CONAGUA. (Diciembre de 2007). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento*. Recuperado el 12 de Febrero de 2013, de Proyectos Electromecánicos Tipo Para Plantas de Bombeo de Agua Potable en Poblaciones Rurales: <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/Libros/41ProyectoElectromecanicosTipoParaPlantasDeBombeoDeAguaPotableEnPoblacionesRurales.pdf>
- CONAGUA. (2011). *CONAGUA*. Recuperado el 8 de Enero de 2013, de http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/SINA/Capitulo_8.pdf
- Corral, M. T. (2006). *LA DESALACIÓN DE AGUA DE MAR, ¿RECURSO HÍDRICO ALTERNATIVO?* Recuperado el 10 de Enero de 2013, de CEDEX: [http://www.dipalme.org/Servicios/Anexos/anexosiea.nsf/VAnexos/IEA-PGA-c11/\\$File/PGA-c11.pdf](http://www.dipalme.org/Servicios/Anexos/anexosiea.nsf/VAnexos/IEA-PGA-c11/$File/PGA-c11.pdf)
- Definición.org.* (s.f.). Recuperado el 04 de Diciembre de 2012, de <http://www.definicion.org/energia>
- DesalData. (2012). *DesalData*. Recuperado el 9 de Enero de 2013, de Global Water Intelligence and Water Desalination Report: <http://desaldata.com/>
- Díaz, M. F. (Octubre de 2004). DESALACIÓN DEL AGUA, UNA ALTERNATIVA PARA RESOLVER LA DEMANDA DE AGUA POTABLE EN EL SUR DE LA REPÚBLICA MEXICANA. *XXVIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental*, (pág. 8). Cancún, México.
- Envasar al vacío. (2 de Abril de 2011). *Máquinas extractoras de canal lateral*. Recuperado el 15 de Enero de 2013, de <http://www.envasaralvacio.cc/2011/04/maquinas-extractoras-de-canal-lateral.html>
- Estébanez, C. R. (2011). *Introducción al compresor frigorífico rotativo scroll*. Recuperado el 14 de Enero de 2013, de <http://libros.redsauce.net/Compresores/PDFs/7Compresores.pdf>
- Farías, M. (1995). *Biblioteca Digital*. Recuperado el 14 de Enero de 2013, de Fondo de cultura económica: http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/131/htm/sec_2.htm
- Geopro-Design. (2009). *Principios Básicos de Geotermia*. Recuperado el 26 de Diciembre de 2012, de <http://www.geoprodesign.com/es/Page/residential-geothermal-basics>
- Geotermia.org.mx. (2012). *Recursos Geotérmicos*. Recuperado el 16 de Enero de 2013, de Asociación Geotérmica mexicana: http://www.geotermia.org.mx/geotermia/?page_id=688
- geotérmica, P. e. (14 de Marzo de 2010). *Energía Geotérmica*. Recuperado el 28 de Diciembre de 2012, de <http://geothermgeek.wordpress.com/historia/>

- Guillermo Llopis Trillo y Vicente Rodrigo Angulo. (s.f.). *Guía de la energía geotérmica*. Recuperado el 29 de Diciembre de 2012, de http://www.uclm.es/cr/EUP-ALMADEN/aaaeupa/boletin_informativo/pdf/boletines/17/9.pdf
- Gunt Hamburg. (2012). *Flujo estacionario de flujos compresibles*. Recuperado el 5 de Febrero de 2013, de Mecánica Técnica de Fluidos. : http://www.gunt.de/download/intro_steady%20flow%20compressible%20fluids_spanish.pdf
- Hougen, O. A. (2005). *Chemical Process Principles. Part II. Thermodynamics*. España: Reverté.
- Inmateinsa. (2012). *Equipos de vacío, eyectores*. Recuperado el 23 de Enero de 2013, de www.inmateinsa.com
- Instituto Nacional de Electrificación- División de Desarrollo Geotérmico. (2007). *Energía Geotérmica*. Guatemala.
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) y el Instituto Geológico y Minero de España (IGME). (2008). *Manual de Geotermia*. Madrid, España: Fondo Editorial IDAE.
- Jaimes, O. G. (2008). *Los recursos geotérmicos de baja entalpía: una opción en la generación eléctrica y en la desalación de agua de mar*. México, D.F.: UNAM.
- Lazzerio Technologie. (2012). *Termodinámica y vacío*. Recuperado el 14 de Enero de 2013, de www.lazzerio.com/index.php?option=com_content&view=article&id=109&Itemid=114&lang=es
- León, J. L. (2007). *Manual de Geotermia. Ciencias de la Tierra e Ingeniería de Reservorios*.
- Liao, C. (Diciembre de 2008). *Gas Ejector Modeling for Design and Analysis* . Recuperado el 30 de Enero de 2013, de Office of Graduate Studies of Texas A&M University : <http://repository.tamu.edu/bitstream/handle/1969.1/ETD-TAMU-3206/LIAO-DISSERTATION.pdf?sequence=1>
- Lozano, M. H. (28 de Julio de 2011). *Operar instrumentos y equipos de laboratorio*. Recuperado el 15 de Enero de 2013, de <http://cbtis165equiposlabquim.blogspot.mx/2011/07/texto-tipos-de-bombas-de-vacios.html>
- Marpa vacuum . (2012). *Bombas difosoras*. Recuperado el 15 de Enero de 2013, de <http://www.marpavacuum.com/es/bombas/difusion.html>
- Mary H. Dickson & Mario Fanelli . (s.f.). *International Geothermal Association*. Recuperado el 04 de Diciembre de 2012, de Istituto di Geoscienze e Georisorse, CNR, Pisa, Italia: http://www.geothermal-energy.org/317,spanish_translation.html
- Mary H. Dickson & Mario Fanelli. (2012). *International Geothermal Association*. Recuperado el 04 de Diciembre de 2012, de Istituto di Geoscienze e Georisorse, CNR, Pisa, Italia: http://www.geothermal-energy.org/317,spanish_translation.html

- Miguel Torres. CEDEX. (Agosto de 2004). *La desalación de agua de mar y el vertido de la salmuera*. Recuperado el 9 de Enero de 2013, de http://www.fcca.es/static_media/file_uploads/ArticuloMiguelTorres.pdf
- Moran, M. J. (2004). *Fundamentos de termodinámica técnica*. Barcelona: Reverté.
- Moya, E. Z. (2004). *Desalinización de agua del mar mediante energías renovables*. México, D.F.
- NASH . (2012). *Operating Principle of Steam Jet Ejectors*. Recuperado el 25 de Enero de 2013, de A gardner denver product: <http://www.gdnash.com/sjeoperation.aspx>
- Nuevas Tecnologías y Contaminación de Atmósferas. (2012). *Bombas de sublimación de titanio*. Recuperado el 15 de Enero de 2013, de <http://www.um.es/LEQ/Atmosferas/Ch-V-2/F52s9p1.htm>
- O. ELLEHAMER A/S. (2012). Ejectors. Dinamarca.
- Payo, M. D. (1998). *Destilación en membranas de disoluciones acuosas de alcoholes*. Universidad Complutense de Madrid, Departamento de Física Aplicada I. Facultad de Ciencias Físicas , Madrid.
- Piensa en grande. Piensa en geotérmica. (14 de Marzo de 2010). *Energía Geotérmica*. Recuperado el 28 de Diciembre de 2012, de <http://geothermgeek.wordpress.com/historia/>
- Potter, M. C. (2002). *Mecánica de Fluidos*. México: Cengage Learning Editores.
- Potter, M. C. (2002). *Mecánica de Fluidos*. México: International Thompson Editores.
- Ramilo, L. B. (2007). Tecnologías de proceso para la desalinización de aguas. *Comisión Nacional de Energía Atómica*, 27.
- Rolle, K. C. (2006). *Termodinámica*. Pearson.
- Salmerón, J. A. (2012). *Análisis y diseño de una desaladora de agua de mar de múltiple efecto con recurso geotérmico de baja entalpía MED LE*. México.
- Santana, u. F. (2011). *La desalinización del agua de mar y su tendencia actual*. Recuperado el 10 de Enero de 2013, de <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia32/HTML/articulo04.htm>
- schutte & koerting. (2011). Water jet eductors. *Bulletin 2M*.
- Sihiperú. (2012). *Bombas*. Recuperado el 15 de Enero de 2013, de <http://www.sihiperu.com.pe/equipos.asp?id=cv03>
- Soliclima-Energía Solar. (20 de Abril de 2009). *El mercado mundial de la desalación*. Recuperado el 9 de Enero de 2013, de News Soliclima: <http://news.soliclima.com/noticias/recursos-hidricos/el-mercado-mundial-de-la-desalacion>
- Streeter, V. L. (1988). *Mecánica de los Fluidos* (Octava ed.). México: McGraw-hill.

- Tecnovac. (2012). *Curso de vacío*. Recuperado el 14 de Enero de 2013, de Tecnología de vacío:
<http://www.uhv.es/sites/milka/doc/Curso%20de%20vacio%20Tecnovac.pdf>
- Trillo, G. L. (2011). *Guía de la energía geotérmica*. Recuperado el 29 de Diciembre de 2012, de
http://www.uclm.es/cr/EUP-ALMADEN/aaaepa/boletin_informativo/pdf/boletines/17/9.pdf
- UNAM, I. d. (2005). *Zonas con actividad geotérmica de poca profundidad de la Península de Baja California*. México.
- Urcelay, A. A. (2007). *Tecnologías Sostenibles sobre la gestión del agua: La desalación. Estudio del caso en la zona costera del Mediterráneo*. Escuela Universitaria de Ingeniería, Ingeniería Técnica Electrónica, México, D.F.
- webdelprofesor.ula.ve. (2012). *Diseño de plantas I*. Recuperado el 24 de Enero de 2013, de Eyectores:
<http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/leonardo/MatApoyo/Dise%F1oI/EYECTORES.pdf>
- Wikispaces. (2010). *Energía Geotérmica*. Recuperado el 26 de Diciembre de 2012, de
<http://gienuevasenergias.wikispaces.com/Geot%C3%A9rmica>
- Yapıcı, R. (26 de Noviembre de 2006). *Experimental study on ejector refrigeration system powered by low grade heat*. Recuperado el 15 de Febrero de 2013, de
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890406003645>