



# *Universidad Nacional Autónoma de México*

*Facultad de Ingeniería*

*“Diseño y construcción de un separador de flujos  
para un ciclo de generación geotermoeléctrica”*

TESIS

Para obtener el Título de:

*Ingeniero Mecánico*

Presenta:

*Karina Sierra Doroteo*

*Director de Tesis: M.I Héctor Miguel Aviña Jiménez.*



*Ciudad Universitaria, México D.F. Noviembre 2014*



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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



DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SEPARADOR DE FLUJOS PARA  
UN CICLO DE GENERACIÓN GEOTERMOELÉCTRICA.



---

***Jurado asignado.***

---

*Presidente.*

**M.I. José Esteban Barrios Bonilla.**

*Secretario.*

**Dr. Vicente Borja Ramírez.**

*Vocal.*

**M.I. Héctor Miguel Aviña Jiménez.**

*1er. Suplente.*

**Dr. William Vicente y Rodríguez.**

*2do. Suplente.*

**Dr. Martin Salinas Vázquez.**





DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SEPARADOR DE FLUJOS PARA  
UN CICLO DE GENERACIÓN GEOTERMOELÉCTRICA.



Agradecimientos





DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SEPARADOR DE FLUJOS PARA  
UN CICLO DE GENERACIÓN GEOTERMOELÉCTRICA.



Dedicatoria







---

**Índice**

---

<b>Jurado asignado.....</b>	<b>I</b>
<b>Lista de figuras.....</b>	<b>XIII</b>
<b>Lista de tablas.....</b>	<b>XVII</b>
<b>Nomenclatura.....</b>	<b>XIX</b>
<b>Introducción.....</b>	<b>XXV</b>
<b>Objetivo general.....</b>	<b>XXIX</b>
<b>Capítulo 1. Antecedentes.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Energía geotérmica.....</b>	<b>3</b>
1.1.1 Definición.....	3
1.1.2 Breve historia de la energía geotérmica.....	6
<b>1.2 Recursos geotérmicos.....</b>	<b>8</b>
1.2.1 Clasificación.....	10
1.2.2 Aplicaciones de los recursos geotérmicos.....	12
<b>1.3 Producción de energía eléctrica a partir de energía geotérmica.....</b>	<b>13</b>
1.3.1 Ciclo a contrapresión.....	14
1.3.2 Ciclo binario.....	14
1.3.3 Ciclo a condensación.....	16
<b>1.4 Presencia de la energía geotérmica en México.....</b>	<b>18</b>
1.4.1 Centrales eléctricas geotérmicas presentes en México.....	20
1.4.2 Ventajas e inconvenientes de la energía eléctrica de origen geotérmico.....	24
<b>1.5 Implementación de recursos geotérmicos de baja entalpia para generación eléctrica.....</b>	<b>25</b>
1.5.1 Ciclo CBEI-IIIDEA.....	25
1.5.2 Configuración y elementos del ciclo CBEI.....	27
<b>Capítulo 2. Separadores de vapor y su aplicación.....</b>	<b>29</b>
<b>2.1 Separación.....</b>	<b>30</b>
2.1.1 Definición.....	30
2.1.2 Clasificación.....	31
2.1.3 Principios de operación [18].....	33
<b>2.2 Separadores de vapor y su presencia en la geotermia.....</b>	<b>35</b>
2.2.1 Antecedentes de los separadores y su uso en la generación de electricidad con geotermia.....	36
2.2.2 Aplicación de un separador en el ciclo propuesto.....	40





<b>2.3 Comparación y selección del separador de vapor para el ciclo binario de evaporación instantánea.</b> .....	<b>41</b>
2.3.1 Separador centrífugo.....	41
2.3.2 Separador vertical.....	45
2.3.3 Separador horizontal.....	45
2.3.4 Ventajas y desventajas del separador centrífugo. ....	46
<b>Capítulo 3. Marco conceptual para el diseño del dispositivo.</b> .....	<b>49</b>
<b>3.1. Parámetros considerados para el diseño propuesto.</b> .....	<b>50</b>
<b>3.2 Teoría de separación para mezclas de vapor-liquido.</b> .....	<b>51</b>
3.2.1 Eficiencia centrífuga ( $\eta_m$ ).....	54
3.2.2 Diámetro de gota ( $d_w$ ).....	56
3.2.3 Eficiencia de arrastre ( $\eta_A$ ) . ....	58
3.2.4 Caída de presión.....	59
3.2.5 Correlaciones geométricas para el diseño final del equipo.....	59
<b>Capítulo 4. Memoria de cálculos y análisis de resultados. (Implementación del equipo)</b> .....	<b>63</b>
<b>4.1 Análisis termodinámico del ciclo “CBEI” y especificación del estado de interés.</b> .....	<b>65</b>
<b>4.2 Variables requeridas para el diseño, calculadas a partir del análisis termodinámico.</b> .....	<b>67</b>
<b>4.3 Cálculos para el dimensionamiento del separador.</b> .....	<b>68</b>
<b>4.4 Dimensiones geométricas obtenidas para el separador.</b> .....	<b>72</b>
<b>4.5 Cálculos de rendimiento fluido-dinámico del equipo.</b> .....	<b>74</b>
<b>4.6 Construcción del primer prototipo.</b> .....	<b>87</b>
<b>4.7 Punto de operación y validación del prototipo.</b> .....	<b>90</b>
<b>4.8 Simulación del sistema de generación de vapor.</b> .....	<b>91</b>
<b>4.9. Pruebas del primer prototipo: separador de acrílico.</b> .....	<b>93</b>
<b>4.10 Rediseño del separador centrífugo.</b> .....	<b>94</b>
<b>4.11 Modelo 3D del separador centrífugo rediseñado.</b> .....	<b>95</b>
<b>4.12 Cotización con fabricantes y manufactura del dispositivo.</b> .....	<b>96</b>
<b>4.13 Pruebas del separador centrífugo re-diseñado.</b> .....	<b>98</b>
<b>Capítulo 5. Conclusiones.</b> .....	<b>101</b>
<b>5.1 Conclusiones generales.</b> .....	<b>103</b>
<b>5.2 Aportaciones futuras.</b> .....	<b>104</b>





DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SEPARADOR DE FLUJOS PARA  
UN CICLO DE GENERACIÓN GEOTERMOELÉCTRICA.



<b>Bibliografía .....</b>	<b>105</b>
<b>Apéndice.....</b>	<b>111</b>
Apéndice 1. Análisis térmico del ciclo CBEI.....	113
Apéndice 2. Tablas de selección para diámetros de tubería.....	115
Apéndice 3. Cálculos preliminares y cálculos de diseño fase 1.....	117
Apéndice 4. Parámetros calculados mediante las relaciones presentadas en la tabla 12, para el dimensionamiento del equipo.....	117
Apéndice 5. Parámetros de diseño previos para cálculos de eficiencias.....	119
Apéndice 6. Cálculos para conocer el tipo de régimen de flujo presente en el caso de estudio. ....	119
Apéndice 7. Parámetros y cálculos de eficiencia en el equipo.....	121
Apéndice 8. Planos del separador de acrílico construido como primer prototipo. ....	123
Apéndice 9. Plano de re-diseño, separador centrífugo de acero.....	125





---

## Lista de figuras

Figura 1. Estructura interna de la tierra [3].....	4
Figura 2. Placas litosféricas presentes en el continente; .....	5
Figura 3. Manifestaciones externas del calor interno de la tierra [2].....	6
Figura 4. Primera Instalación de generación eléctrica en Larderello [2]. .....	7
Figura 5. Representación de un sistema geotérmico [4] .....	8
Figura 6. Esquema de un sistema HDR [4]. .....	9
Figura 7. Fuente hidrotermal [32].....	10
Figura 8. Representación de un sistema magmático [6].....	10
Figura 9. Recursos geotérmicos disponibles a nivel mundial [2]. .....	11
Figura 10. Usos relevantes de la geotermia en función de su temperatura [2].....	12
Figura 11. Esquema de un turboalternador [2]. .....	13
Figura 12. Ciclo a contrapresión. ....	14
Figura 13. Ciclo binario. ....	15
Figura 14. Ciclo a condensación.....	16
Figura 15. Esquema de un ciclo de condensación con doble flasheo. ....	17
Figura 16. Potencial mundial geotérmico [9].....	19
Figura 17. Escenario mundial de países con mayor desarrollo en generación geotermoeléctrica [3]. .....	20
Figura 18. Ubicación de campos geotérmicos en explotación y sistemas evaluados con potencial. [3].....	22
Figura 19. Zonas geotérmicas evaluadas para futura explotación [14] .....	23
Figura 20. Comparación de emisiones generadas en la generación eléctrica [2].....	24
Figura 21. Ciclo CBEI propuesto por grupo IIDEA.....	26
Figura 22. Tipos de separadores en función de su forma.....	33
Figura 23. Separación por gravedad [33]. .....	34
Figura 24. Separación por fuerza centrífuga [33].....	35
Figura 25. Separación por choque [33].....	35
Figura 26. Primer dispositivo para separación de flujo geotérmico [21].....	36
Figura 27. Separador tipo “U” [21]. .....	37
Figura 28. Primer diseño de un separador centrífugo con deflectores [21].....	38
Figura 29. Propuestas de diseño para optimización del proceso de separación [21]. .....	40
Figura 30. Configuración de un separador ciclónico [24].....	42
Figura 31. Configuración clásica de un ciclón [26].....	43
Figura 32. Ciclón con configuración entrada y descarga axial [26].....	43
Figura 33. Ciclón entrada tangencial y descarga periférica [26]. .....	44
Figura 34. Ciclón entrada axial descarga periférica [26].....	44
Figura 35. Separador horizontal para separación de petróleo [27].....	46
Figura 36. Diagrama de flujo de las etapas de separación [28]. .....	51
Figura 37. Diagrama esquemático del dimensionamiento geométrico de un separador y un secador [28].....	61







DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SEPARADOR DE FLUJOS PARA  
UN CICLO DE GENERACIÓN GEOTERMOELÉCTRICA.



Figura 38. Disposición de los equipos que conforman el ciclo CBEI. ....	65
Figura 39. Diagrama con relaciones que dimensionarán el separador.....	72
Figura 40. Mapa de régimen de flujo bifásico propuesto por Baker [28].....	78
Figura 41. Representación de los 8 tipos de patrón de flujo presentes en flujos bifásicos [30]......	80
Figura 42. Evaluación de las coordenadas obtenidas para conocer el tipo de régimen de flujo presente.....	82
Figura 43. Modelo 3D del primer prototipo elaborado.....	88
Figura 44. Separador de acrílico.....	89
Figura 45. Espacio libre en el separador. ....	90
Figura 46. Calentador que simula un pozo geotérmico. ....	91
Figura 47. Distribución de los equipos con los que se evaluará el sistema de generación de vapor. ....	92
Figura 48. Instalación de primer prototipo.....	93
Figura 49. Imágenes obtenidas del modelo 3D del separador centrífugo re-diseñado.....	95
Figura 50. Separador de flujos manufacturado en acero inoxidable.....	96
Figura 51. Tubo externo.....	97
Figura 52. Tubo interno y cúpula inferior. ....	97
Figura 53. Cúpula superior. ....	97
Figura 54. Abrazadera tipo clamp.....	97
Figura 55. Empaques de silicón.....	97
Figura 56. Propuesta de instrumentación. ....	98
Figura 57. Estructura final del circuito con sensores digitales. ....	99
Figura 58. Experimentación y obtención de vapor.....	99





DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SEPARADOR DE FLUJOS PARA  
UN CICLO DE GENERACIÓN GEOTERMOELÉCTRICA.



---

**Lista de tablas**

---

Tabla 1. Clasificación de recursos geotérmicos [2].....	11
Tabla 2. Producción y potencia de los diferentes ciclos geotermoeléctricos [13]. .....	20
Tabla 3. Capacidad de generación en los diferentes campos geotérmicos en México [14]. .....	21
Tabla 4. Cantidad de toneladas de vapor empleadas en los campos geotermoeléctricos de México [3]. .....	22
Tabla 5. Generación de electricidad con energía geotérmica desde 1990 [15]. .....	22
Tabla 6. Comparación de potencial generado entre dos ciclos [15]. .....	27
Tabla 7. Métodos físicos empleados en procesos de separación [17]. .....	31
Tabla 8. Tipos comunes de separadores bifásicos líquido-vapor. ....	32
Tabla 9. Rendimiento del separador [29]. .....	52
Tabla 10. Porcentajes de calidad de vapor evaluadas en diferentes campos geotérmicos [28]. .....	53
Tabla 11. Parámetros en función del patrón de flujo [28]. .....	58
Tabla 12. Parámetros recomendados para separadores geotérmicos [28]. .....	61
Tabla 13. Variables requeridas para la metodología de diseño. ....	67
Tabla 14. Dimensionamiento final del separador para dos diferentes materiales de construcción.....	73





---

## Nomenclatura

---

A	Parámetro correspondiente a 66.2898.
$A_e$	Ancho de entrada, m.
$A_0$	Área de entrada en pared del separador ciclónico, m <sup>2</sup> .
a	Parámetro definido en la Tabla 11.
B	Parámetro definido en la Tabla 11.
$B_e$	Alto de entrada, m.
b	Parámetro correspondiente a 0.2250.
C	Parámetro adimensional definido por la ecuación (10).
c	Parámetro correspondiente a 0.5507.
D	Diámetro del separador ciclónico, m.
$D_b$	Diámetro de la tubería de salida del agua, m.
$D_e$	Diámetro de tubería de salida del vapor, m.
$D_T$	Diámetro de la tubería de entrada, m.
$d_w$	Diámetro de gota, m.
e	Parámetro definido en la Tabla 11.
j	Parámetro adimensional definido por la ecuación (24).
K	Parámetro correspondiente a 1357.35.
$K_c$	Parámetro adimensional definido por la ecuación (12).
kPa	kilo Pascal. Unidad de presión con prefijo correspondiente a 10 <sup>3</sup> . Un pascal se define como la presión que ejerce una fuerza correspondiente a 1 Newton sobre una superficie de un metro.
kWh	kilowatt-hora. Unidad de trabajo o energía, equivalente a la energía producida o consumida en una hora.





DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SEPARADOR DE FLUJOS PARA  
UN CICLO DE GENERACIÓN GEOTERMOELÉCTRICA.



MW	Megawatt. Unidad de potencia, equivalente a $10^6$ W.
$n$	Coficiente adimensional de vórtice libre.
$n_1$	Parámetro adimensional definido por la ecuación (6).
$Q_L$	Flujo volumétrico de agua, $m^3/s$ .
$Q_{vs}$	Flujo volumétrico de vapor, $m^3/s$ .
T	Temperatura, °C.
$t_r$	Tiempo de residencia, s. Cantidad de tiempo que el fluido permanece dentro del separador.
$t_{mi}$	Tiempo promedio mínimo de residencia del vapor en el separador ciclónico.
$t_{ma}$	Tiempo máximo adicional del vapor en el separador ciclónico.
TWh	Tera Watts Hora. Unidad de medida de energía.
$u$	Velocidad tangencial de entrada de gota en la pared del ciclón.
$V_{AN}$	Velocidad anular ascendente del vapor, m/s.
$VO_S$	Volumen definido por la ecuación (15), $m^3$ .
$VO_H$	Volumen definido por la ecuación (17), $m^3$ .
$VO_1$	Volumen definido por la ecuación (18), $m^3$ .
$VO_2$	Volumen definido por la ecuación (19), $m^3$ .
$VO_3$	Volumen definido por la ecuación (20), $m^3$ .
$V_T$	Velocidad de vapor a la entrada, m/s.
$V_{AN}$	Velocidad anular del vapor ascendente.
$w_L$	Flujo másico de líquido.
$w_A$	Flujo másico de arrastre
$w_v$	Flujo másico de vapor.
$X_o$	Calidad de vapor a la salida
$z$	Medida definida por la <i>Figura 36</i>







DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SEPARADOR DE FLUJOS PARA  
UN CICLO DE GENERACIÓN GEOTERMOELÉCTRICA.



SÍMBOLOS GRIEGOS

- $\alpha$  Medida definida por la *Figura 37*.
- $\beta$  Medida definida por la *Figura 37*.
- $\eta_{ef}$  Eficiencia de separación.
- $\eta_m$  Eficiencia centrífuga.
- $\eta_A$  Eficiencia de arrastre.
- $\mu_L$  Viscosidad del agua, kg/m\*s y Poise para ecuación (21).
- $\mu_v$  Viscosidad del vapor, kg/m s.
- $\pi$  Constante matemática con valor de 3.1416.
- $\rho_L$  Densidad de líquido, kg/m<sup>3</sup> y g/cm<sup>3</sup> para ecuación (21).
- $\rho_w$  Densidad del agua, kg/m<sup>3</sup>
- $\sigma_L$  Tensión superficial, N/m y dyn/cm para ecuación (21).
- $\Psi$  Parámetro adimensional definido por la ecuación (8).





DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SEPARADOR DE FLUJOS PARA  
UN CICLO DE GENERACIÓN GEOTERMOELÉCTRICA.



---

## Introducción.

---

Los recursos energéticos utilizados y sobreexplotados son del tipo “*no renovable*” conocidos como combustibles fósiles. Debido a un desequilibrio entre la oferta y la demanda, constantemente presentan incrementos en su precio, lo que refleja alto impacto económico y deterioro al medio ambiente.

La irreversibilidad de estos hechos, afecta el sector energético y detonan sus necesidades. Con la finalidad de contribuir y erradicar estas afectaciones, diferentes instituciones desarrollan alternativas que proporcionen soluciones eficientes y permitan el suministro de energía eléctrica mediante la diversificación del portafolio energético, perseverando el medio ambiente y primordialmente aminorar costos de generación.

Una de las múltiples fuentes de energía alterna, por la que se ha apostado es, *la energía geotérmica* que gracias a su abundancia permitiría eliminar la dependencia respecto a los combustibles fósiles. Actualmente, la geotermia le permite a México, enlistarse dentro de los primeros 3 lugares a nivel mundial en generación de electricidad gracias a su adecuada explotación; sin embargo, su potencial disponible sigue siendo basto.

Su aprovechamiento se logra mediante la implementación de ciclos geotermoeléctricos; sistemas que toman como fuente de calor los recursos geotérmicos, que son fluidos de origen meteórico que permiten la extracción de la energía calorífica proveniente desde el interior de la tierra, se conocen 3 diferentes recursos.

El grupo multidisciplinario *IIDEA* (Instituto de ingeniería desalación y energías alternas) propone un nuevo ciclo geotermoeléctrico en el que se aproveche la energía disponible de uno de los tres tipos de recursos geotérmicos, conocido como *recurso de baja entalpia*, nombre relacionado directamente con su bajo nivel energético, no obstante, es uno de los recursos abundantes en México disperso a lo largo del territorio nacional que refleja energía libre y disponible que no se es utilizada.

Dentro de los equipos que se requieren para conjuntar el ciclo propuesto, se enlista un “*separador de flujos*” que como su nombre lo indica, se encargará de separar en dos diferentes corrientes una mezcla que representa el flujo de trabajo, dentro del ciclo. Su uso tiene la finalidad de proporcionar la corriente de vapor necesaria en cantidad y características hacia una turbina, asegurando no arrastrar impurezas, ampliar su vida útil y disminuir costos por mantenimiento.

El presente trabajo tiene como objetivo conocer los equipos de separación existentes en el mercado, con el fin de evaluar y seleccionar el dispositivo adecuado bajo las sollicitaciones que el ciclo propuesto plantea.





DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SEPARADOR DE FLUJOS PARA  
UN CICLO DE GENERACIÓN GEOTERMOELÉCTRICA.



La estructura del presente trabajo se detalla de la siguiente forma:

Marco teórico.

Conformado inicialmente por el capítulo 1, presenta brevemente información general de lo que es la energía geotérmica, describe las herramientas útiles para su adecuado aprovechamiento, ejemplifica su abundante presencia dentro del continente nacional y da a conocer las ventajas del porqué representa una buena alternativa para eliminar la dependencia energética.

Así mismo, dentro del capítulo 2 se presenta información teórica referente al “separadores de flujo”, describiendo el proceso, la clasificación de los diferentes equipos, principios de operación para comprender su funcionamiento y finalmente una amplia investigación del uso de estos equipos en aplicaciones relacionadas con el aprovechamiento de la energía geotérmica.

El capítulo 3 por su parte, enlista los parámetros a considerar para el diseño del equipo, que estarán definidos en función del problema a resolver. De igual manera, presenta la teoría de diseño a seguir para dimensionar separadores de flujo, describiendo teóricamente los parámetros que determinan el rendimiento del equipo diseñado.

Diseño y fabricación de un prototipo funcional.

El capítulo 4, muestra los parámetros extraídos del análisis térmico del ciclo propuesto, que representan las condiciones iniciales, ejemplifica paso a paso los cálculos de la teoría de diseño mediante la cual se obtuvo un primer dimensionamiento geométrico y la construcción de un modelo 3D para mayor apreciación. Menciona las condiciones bajo las cuales se seleccionó un primer material de construcción en el que priorizaba la visualización del fenómeno dentro del dispositivo y muestra el primer prototipo construido.

Validación del equipo diseñado.

Como parte del capítulo 4 (apartado 4.8) se describen las consideraciones bajo las cuales se propuso la simulación del sistema de generación de vapor, que permitió la validación de desempeño del primer prototipo al ponerlo en operación; así mismo enlista las afectaciones que este sufrió y los errores de diseño. Atendiendo dichas afectaciones, se muestra el re-diseño del equipo, su respectivo dimensionamiento, planos 3D mediante los cuales se logró manufacturar el equipo y de igual forma fue sometido a validación con ayuda del sistema de generación de vapor construido.

Conclusiones.

Finalmente, se encuentra un apartado de conclusiones en el que se evalúan a detalle los cumplimientos del trabajo y se enlistan aportaciones futuras. El presente trabajo se concluye mostrando un apartado de anexos, dentro del cual se incluye el análisis térmico, tablas de selección, cálculos y planos de construcción.





DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SEPARADOR DE FLUJOS PARA  
UN CICLO DE GENERACIÓN GEOTERMOELÉCTRICA.



---

### **Objetivo general.**

---

Conocer los diferentes sistemas de separación actualmente desarrollados, con la finalidad de analizar y seleccionar el equipo adecuado para lograr la obtención de vapor saturado; producido mediante la implementación de un innovador sistema de generación de vapor. Sistema que se implementará en un ciclo propuesto geotermoeléctrico para el aprovechamiento de recursos geotérmicos de baja entalpia, que lleva por nombre CBEI (Ciclo Binario de Evaporación Instantánea). Propuesta a cargo del grupo multidisciplinario IIDEA (Instituto de Ingeniería Desalación y Energías Alternas - UNAM).

### Objetivos particulares.

- Mostrar características generales de la energía geotérmica y su presencia en México, de igual manera dar a conocer las herramientas empleadas para la generación de electricidad a partir de su uso.
- Investigación exhaustiva para conocer los diferentes tipos de separadores y sus aplicaciones más comunes. Específicamente corroborar en la literatura la implementación de alguno de ellos para aplicaciones geotérmicas.
- Realizar el análisis termodinámico del ciclo CBEI, para conocer y comprender las condiciones de funcionamiento, así como percatarse de los parámetros empleados.
- Mediante el análisis termodinámico, obtener los rangos de operación requeridos para el separador, que empleados en un metodología de diseño proporcionarán un dimensionamiento geométrico que cumpla con los requerimientos del ciclo CBEI.
- Elaborar el modelo 3D de la geometría propuesta para el separador de flujos.
- Proponer posibles materiales para llevar a cabo la manufactura del separador de flujos diseñado.
- Diseño de un prototipo funcional y validación de desempeño mediante pruebas de laboratorio.







DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SEPARADOR DE FLUJOS PARA  
UN CICLO DE GENERACIÓN GEOTERMOELÉCTRICA.



---

## Capítulo 1. Antecedentes

---

Con la finalidad de comprender a fondo el presente trabajo, esta primer sección muestra una breve introducción respecto a la “energía geotérmica”, incluyendo conceptos básicos como: su definición, localización de los puntos donde se encuentra disponible, así como, los diferentes tipos de yacimientos mediante los cuales se puede hacer uso de dicha energía.





## 1.1 Energía geotérmica.

Es una de las energías alternas que ha cautivado el interés de varios, su origen se relaciona con el calor interno de la tierra.

El planeta tierra no es un cuerpo inerte; desde el punto de vista energético es un sistema activo que de igual forma como recibe comunica energía al medio que lo rodea. Algunos fenómenos como: los volcanes, los terremotos y la formación de cordilleras, muestran la transferencia de calor procedente del interior de la tierra.

En determinadas regiones del planeta con volcanes en erupción, se tiene registro de temperaturas superiores a los 1000°C en el subsuelo, calor que es transmitido hacia la superficie terrestre de forma natural y representa una fuente de energía que lamentablemente no es utilizada [1].

Vale la pena señalar que los fenómenos antes mencionados funcionan como indicadores, generalmente se presentan en lugares geográficos o zonas en las que se encuentran disponibles recursos geotérmicos de mayor calidad.

### 1.1.1 Definición.

Etimológicamente, geotermia es una palabra de origen griego, deriva de “**geos**” que significa tierra y de “**thermos**” que significa calor, por lo que se puede interpretar como: *el calor de la tierra* [1].

Con la finalidad de darle una definición formal, Alemania propuso lo siguiente:

*“Energía Geotérmica es aquella energía almacenada en forma de calor por debajo de la superficie sólida de la tierra”* [2].

Definición aceptada oficialmente en Alemania y a su vez adoptada por el Consejo Europeo de Energía Geotérmica (EGEC). Definición que engloba al calor almacenado en rocas, suelos, agua subterránea a cualquier temperatura, profundidad y procedencia.

Para comprender con claridad la definición antes expuesta y lo que engloba, se presenta una breve explicación referente a la estructura y el comportamiento de la tierra.

- Estructura interna de la tierra.

La figura 1 muestra un modelo de la estructura de la tierra, en la que se contemplan tres capas principales: corteza, manto y núcleo.

El manto es la capa encargada de envolver el núcleo que se encuentra en el centro de la tierra, presenta una textura plástica hacia el centro y cambia su textura hacia la superficie, volviéndose sólida. La parte solida del manto constituye la litosfera que a su vez se fragmenta en varias placas. La corteza corresponde directamente a la envoltura superficial, su temperatura puede variar desde los 1000 °C en contacto con el manto y hasta los 15°C respectivamente con la superficie terrestre.

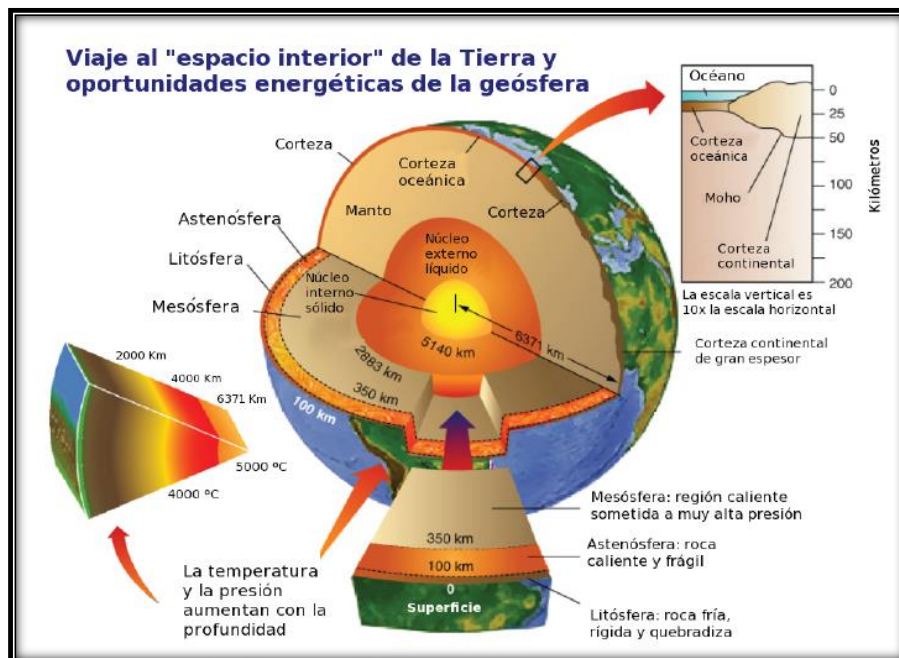


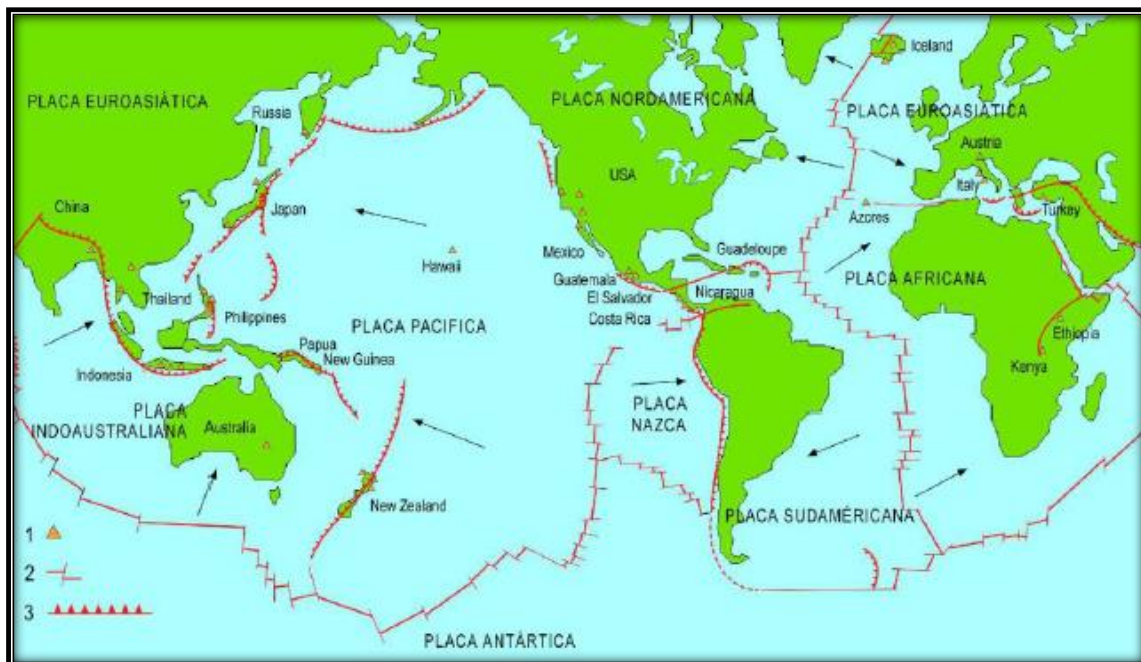
Figura 1. Estructura interna de la tierra [3].

Considerando la formación de la tierra y el orden de sus capas principales, podemos ligar el origen del calor interno de la tierra a los siguientes hechos:

- ✓ Desintegración de isotopos radiactivos presentes en la corteza del manto, como uranio, torio y potasio.
- ✓ Calor inicial liberado durante la formación del planeta.
- ✓ Movimientos (fricción) en las capas, principalmente entre el manto y el núcleo.

- Placas Litosféricas.

Las placas tectónicas o también conocidas como placas litosféricas (*Figura 2*) se encuentran sometidas a grandes tensiones generando gran cantidad de calor y presión. Algunas de ellas ejercen un empuje entre si provocando la ruptura o falla de la superficie terrestre dando lugar a la creación de manifestaciones que reflejan la existencia de la energía calorífica localizada por debajo de la corteza terrestre.



**Figura 2. Placas litosféricas presentes en el continente;**

**1. Campos geotérmicos 2. Dorsales meso-oceánicas 3. Zonas de subducción [4] .**

La presencia de fracturas o fallas se visualiza en la superficie terrestre como aberturas mediante las cuales, ascienden elementos contenidos en el interior de la corteza, incluso algunos elementos son arrastrados desde el núcleo; los más comunes son: magma, rocas incandescentes o materiales volátiles como agua, ácido sulfúrico etc.

Un ejemplo claro son los volcanes; se estima que por debajo de ellos existe magma en un volumen aproximado de 10 veces más que el que contiene en su interior, es por esta razón que la mayoría de los volcanes presentan actividad desde tiempo atrás y hasta nuestros días.

El volumen disponible debajo de los volcanes, sirve como cámara que calienta las rocas localizadas a su alrededor, si presentan características específicas como porosidad se presentará un fenómeno de circulación de agua a través de ellas y hasta la superficie, dando formación a lugares con aguas termales, géiser y fumarolas; que en conjunto con los volcanes conforman el grupo más grande de manifestaciones externas que muestran la existencia de la energía calorífica permanente por debajo de la capa superficial de la corteza terrestre (*figura 3*). Sus características principales son: altas temperaturas y presencia de gases principalmente carbónicos o sulfurosos que son percibidos por el ser humano mediante su olor fétido.



**Figura 3. Manifestaciones externas del calor interno de la tierra [2].**

### **1.1.2 Breve historia de la energía geotérmica.**

Antecedentes que relacionan la existencia y utilización de la energía geotérmica datan de varios siglos atrás. Se sabe que hace más de 10 000 años los paleo- indios de América del Norte hacían uso de aguas termales, pero los griegos y romanos fueron quienes dejaron numerosos ejemplares de las aplicaciones geotérmicas en su civilización, como lo eran las calefacciones urbanas en las tradicionales termas y baños públicos; pero el mérito es de los romanos quienes difundieron el uso de la energía geotérmica en todo el imperio, extendiéndose con el paso del tiempo a Japón, América y Europa [2].

Otras civilizaciones presentes alrededor de 1330, muestran aplicaciones como la distribución de agua caliente en Chaudes – Aigues, Francia, mientras que por la misma época en la región de Volterra, Italia pequeñas lagunas de agua caliente con vapores a más de 100°C eran explotadas para la extracción de ácido sulfúrico concentrado.



DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SEPARADOR DE FLUJOS PARA  
UN CICLO DE GENERACIÓN GEOTERMOELÉCTRICA.



Registros de 1818 en Larderello, Toscana (Italia) marcan el inicio de la utilización de la geotermia para la extracción de sales de boro, siendo este uno de los primeros usos a nivel industrial. Más no fue hasta 1827 que el francés Francois Larderel, desarrolló un sistema que hacía uso del calor de los fluidos involucrados en el proceso de la evaporación en lugar de usar algún combustible.

En 1833 en Paris barrio de Grenelle, se realizó el primer sondeo de un pozo a profundidades de 548 m de forma artesanal tardando aproximadamente 8 años, esto no impidió que sus resultados fueran impresionantes ya que se logró capturar agua potable a 30°C en el acuífero de arenas albigenses de la Cuenca de Paris. Otra aportación con alta importancia, fue la red local de calefacción que se ubicó en Estados Unidos a partir de 1892 en Boise, Idaho.

Sin embargo, la utilización de vapor en la industria del ácido bórico dio lugar a la generación de electricidad a partir del vapor geotérmico, lo que dio origen a la primera instalación de una central con generación de 250kW, (figura 4) que funcionó a partir de 1913. Dicha instalación incentivó la investigación con la finalidad de profundizar en el tema y fue así como se instaló en Beppu, Japón, la primera planta experimental de 1 kW en 1924.



**Figura 4. Primera Instalación de generación eléctrica en Larderello [2].**

Al observar estos avances a nivel mundial, a partir de la década de los setentas se inició en diferentes partes del mundo una intensa actividad de investigación con la finalidad de estudiar, analizar y contribuir en la búsqueda de nueva tecnología para lograr una explotación adecuada de los recursos geotérmicos y la generación de electricidad mediante su uso.

En los noventas se impulsó esta investigación y se desarrolló con mayor interés debido al incremento del precio del petróleo y las exigencias ambientales referentes a la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>. Factores que representan el motivo de la innovación de nueva tecnología que permita seguir contando con electricidad, pero preservando en su producción y utilización el medio ambiente.

## 1.2 Recursos geotérmicos.

Para hacer uso del calor interno de la tierra se requiere que este almacenado en alguna parte, la forma más sencilla de disponer de él es mediante el agua que logra filtrarse por los poros de la sección rocosa que constituye la litosfera. Esta zona actúa como un capacitor de almacenamiento de energía calorífica y ayuda a mantenerla en la superficie de la corteza terrestre.

Es decir, existen partes geológicas permeables con cantidades de agua filtrada, que almacenan porciones de energía proveniente del interior de la tierra; es de suma importancia que en la capa exterior estas secciones geológicas presenten capas con materiales impermeables que funcionen de selladores y eviten la liberación de esta energía calorífica almacenada.

Un sistema geotérmico (*figura 5*), está constituido por tres elementos principalmente:

- I. Fuente de calor activo. Corresponde con el núcleo o intrusiones magmáticas.
- II. Reservorio. Conformado por rocas permeables, por el cual circulan los fluidos y se extrae el calor almacenado en las rocas. Dicho reservorio está cubierto por una capa de rocas impermeables que funcionan como sello.
- III. Fluido geotermal. Agua de origen meteórico que contiene sustancias químicas disueltas y gases como:  $\text{CO}_2$   $\text{H}_2\text{S}$  etc. Se puede presentar en fase líquida o vapor dependiendo de la presión y temperatura en la que se encuentre.

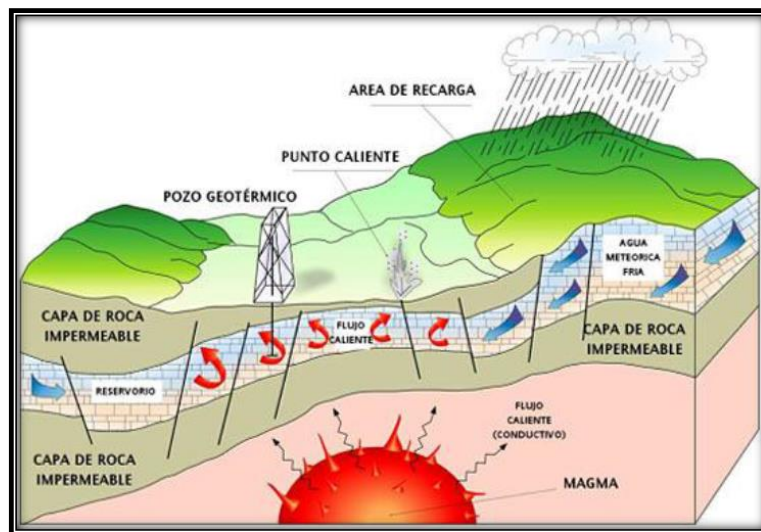


Figura 5. Representación de un sistema geotérmico [4].





Dependiendo de las características geológicas, físicas y químicas, los sistemas geotérmicos se pueden encontrar en la naturaleza de varias formas, dando origen a los diferentes tipos de sistemas:

➤ **Sistemas Hidrotermales.**

Constituidos por las condiciones clásicas que describen a un sistema geotérmico. El agua presente se filtra por medio de las fracturas hasta llegar al reservorio y absorbe la energía calorífica de las rocas, con ayuda de la capa sello se impide la disipación del flujo geotérmico en la superficie. Generalmente se localizan en los límites de las placas tectónicas, particularmente en los límites de tipo convergente donde chocan dos placas entre sí y una placa se introduce debajo de otra, fenómeno conocido como subducción [5].

A su vez estos sistemas se subdividen en tres tipos:

1. Vapor dominante:  
Sistemas con mayor cantidad de vapor como flujo de trabajo.
2. Líquido dominante:  
Sistema con mayor cantidad de líquido a altas temperaturas (200°C - 300°C).
3. Líquido dominante de baja entalpia:  
Sistemas con mezcla de líquido y vapor como flujo de trabajo.

➤ **Sistema de Roca caliente.**

Se caracteriza por ser un sistema rocoso con alto contenido energético y escasos de flujo de trabajo, se conocen como “HDR” (Hot Dry Rock). Para lograr la explotación de esta energía almacenada se perfora un pozo hasta una profundidad tal, que se encuentre disponible la formación de roca caliente, este pozo se somete a un fracturamiento hidráulico, es decir, se crea una fractura mediante la cual se inyecta agua a presión, que circulará a través de la roca caliente absorbiendo su calor disponible. Por otro lado se perfora un segundo pozo a ciertos metros respecto al primero que debe interceptar a la red de fractura creada con la finalidad de lograr extraer el agua que estará caliente debido al contacto que sufrió el agua con las rocas, como se aprecia en la figura 6. Para explotar este tipo de sistemas es necesario crear un yacimiento geotérmico artificial lo que hace sumamente elevado el costo de su implementación.

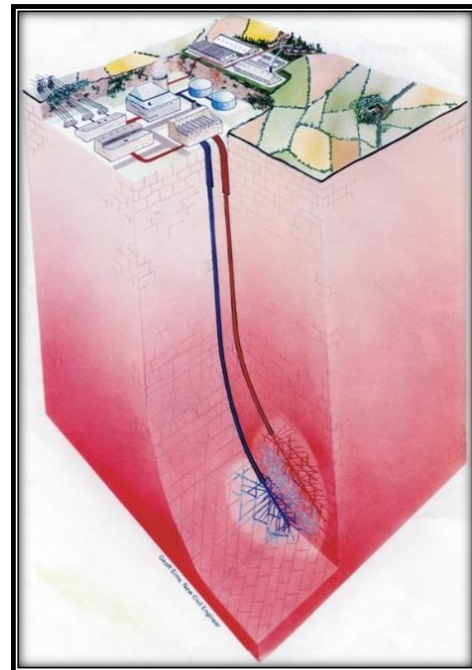
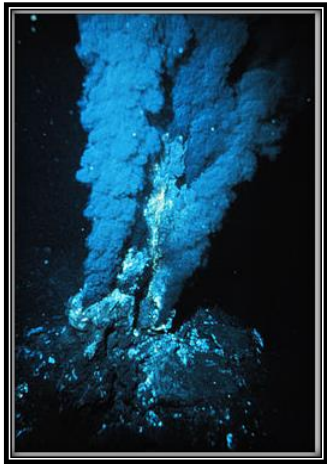


Figura 6. Esquema de un sistema HDR [4].



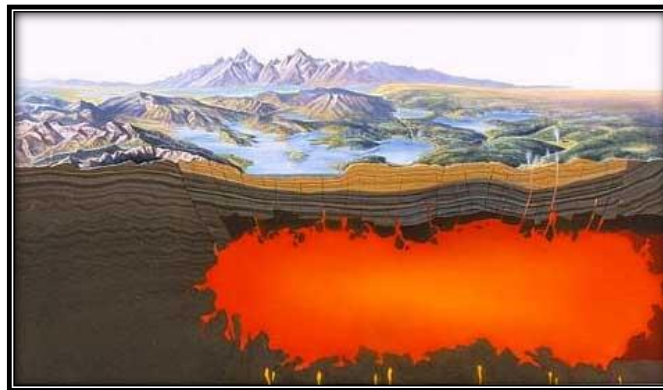
➤ **Sistemas marinos.**

Se encuentran en el fondo del mar y sus manifestaciones se visualizan como descargas hidrotermales, chimeneas o fumarolas (*figura 7*). En su mayoría son sistemas que presentan alta entalpia pero han sido poco estudiados debido a que su localización presenta dificultades para su exploración.

**Figura 7. Fuente hidrotermal [35].**

➤ **Sistemas magmáticos.**

Presentan roca fundida, son sistemas existentes en secciones volcánicas activas a grandes profundidades (*figura 8*). Presentan altas temperaturas pero la limitante para hacer uso de estos sistemas es la escasa tecnología.



**Figura 8. Representación de un sistema magmático [6].**

### 1.2.1 Clasificación

Los recursos geotérmicos se clasifican en función de diferentes criterios como lo son: variación de temperatura, modo de explotación, contexto geológico; debido a que no existe una definición *standard*.

A continuación se presenta una de las clasificaciones más descriptivas con la finalidad de diferenciar los tipos de recursos geotérmicos, que en función de sus características principales revelan la aplicación adecuada que se le debe asignar.



DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SEPARADOR DE FLUJOS PARA  
UN CICLO DE GENERACIÓN GEOTERMOELÉCTRICA.



*I. Valor de entalpia.*

Es uno de los criterios más comunes, se basa en cuantificar la entalpia disponible que presentan los fluidos geotérmicos.

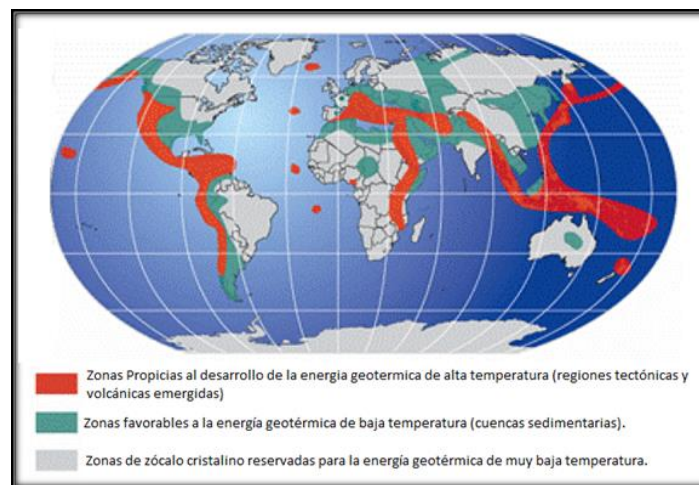
Entiéndase como Entalpia a la cantidad de energía térmica que un fluido puede intercambiar con su entorno, se expresa en kJ/kg o kcal/kg. Por lo que se considera proporcional a la temperatura del fluido geotérmico presente [2].

En general, los recursos geotérmicos se dividen en 3 grupos como se muestra en la tabla 1:

**Tabla 1. Clasificación de recursos geotérmicos [2].**

°C	<i>Muffler y Cataldi (1978)</i>	<i>Benderitter y Cormy (1990)</i>	<i>Hochstein (1990)</i>
Baja entalpía	<90°C	<100°C	<125°C
Media entalpía	90°C - 150°C	100°C - 200°C	125°C - 225°C
Alta entalpía	>150°C	>200°C	>225°C

Estudios muestran que en gran parte del mundo (*figura 9*) es posible encontrar esta variedad de recursos geotérmicos, lo que refleja el gran potencial disponible para explotación de esta energía.



**Figura 9. Recursos geotérmicos disponibles a nivel mundial [2].**



### 1.2.2 Aplicaciones de los recursos geotérmicos.

Las aplicaciones que se asignan a los diferentes recursos geotérmicos dependen del contenido de calor, o mejor dicho, de su entalpia disponible, por lo que, pueden ser explotados para la generación de electricidad o simplemente con fines térmicos. No existen aparatos que determinen directamente la entalpía, sin embargo al ser considerada proporcional a la temperatura, los °C presenten en el fluido determinan su diferenciación y su posible aplicación en la industria.

La figura 10 presenta algunas de las aplicaciones más relevantes de la energía geotérmica, en función de los diferentes tipos de recursos diferenciándolos mediante sus rangos de temperatura y el tipo de industria en el que se emplea.

Es claro que los recursos geotérmicos de altas temperaturas son utilizados específicamente para la producción de electricidad, mientras que los de media y baja entalpía se emplean en diversas aplicaciones que a nivel mundial se denominan “usos directos”, que son las aplicaciones más antiguas y comunes. Se clasifican en dos grandes ámbitos:

- ✓ Sector industrial:  
Involucra procesos de calefacción como: secado, esterilizado, descongelación, extracción de sales, producción de papel, pasteurización, etc.
- ✓ Sector residencial y de servicios.  
Involucra climatización, calefacción y uso de bombas de calor.

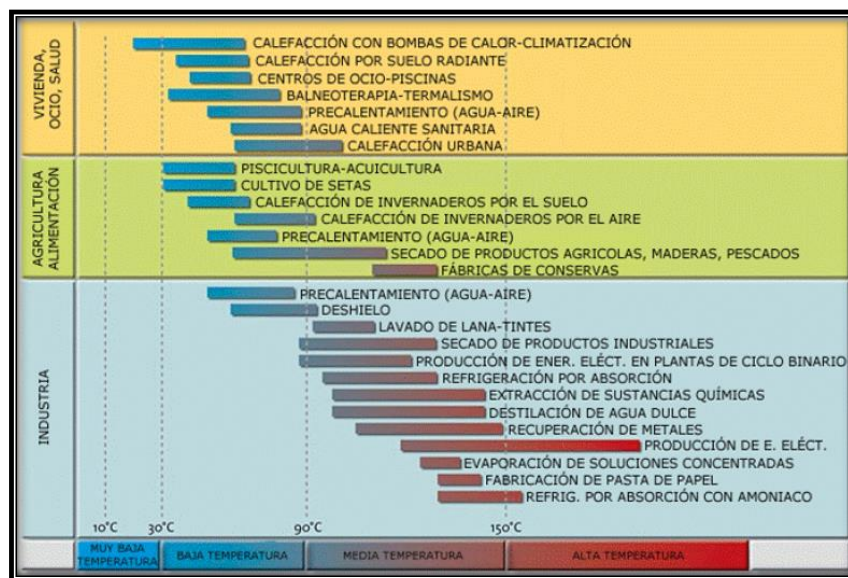


Figura 10. Usos relevantes de la geotermia en función de su temperatura [2].

### 1.3 Producción de energía eléctrica a partir de energía geotérmica.

Para la generación de electricidad se emplean *turboalternadores* apreciados en la figura 11, se conforman por una turbina y un generador eléctrico. La turbina con ayuda de un fluido hace girar a altas velocidades su componente principal conocido como *rotor* produciendo energía mecánica que será transformada a energía eléctrica mediante su acoplamiento con el generador.

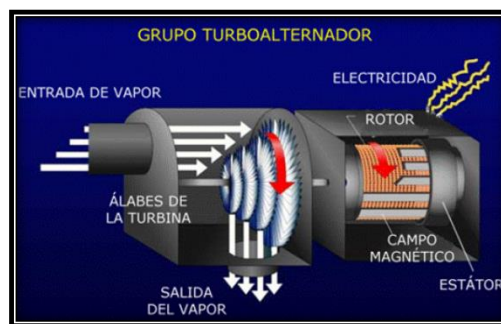


Figura 11. Esquema de un turboalternador [2].

Los fluidos de trabajo empleados en las turbinas deben cumplir principalmente dos características:

- Presentar un caudal aceptable.
- Contar con presión suficiente que garantice su continuidad a lo largo de un lapso de tiempo.

Los recursos geotérmicos al manifestarse como flujos en fase vapor o fase líquida son adecuados; se puede obtener de ellos un caudal de vapor suficiente con características específicas como altas presiones que al ser ingresado en una turbina logre romper la inercia en el rotor.

Para la generación no es suficiente solo el acoplamiento de un turboalternador, se requiere de diversos equipos que con una distribución adecuada conformen un ciclo. Existen tres ciclos geotermoeléctricos que permiten la generación de electricidad, su configuración es similar a los que se utilizan en centrales termoeléctricas, a pesar de eso su diferencia primordial es el empleo de recursos geotérmicos. A continuación se describe cada uno de los ciclos, que actualmente son prácticos en la generación de electricidad geotérmica.

### 1.3.1 Ciclo a contrapresión.

También conocido como circuito abierto, es el ciclo más simple de producción de electricidad y el más barato en cuanto inversión inicial. Su instalación y adquisición es económica, pero son plantas de baja eficiencia, por ello sus aplicaciones más comunes son como plantas piloto y como plantas de reserva para cubrir cargas máximas.

El proceso es el siguiente: el vapor proveniente del pozo (sea directo de pozos secos o después de una separación en el caso de pozos húmedos), se dirige por una turbina y se descarga a la atmósfera. Este tipo de plantas requieren de un flujo de vapor alto casi del doble en comparación con los siguientes ciclos. En el caso de emplear pozos húmedos, se requiere de separadores que captan el líquido presente en la mezcla y mediante pozos de reinyección, permite incorporar el líquido extraído al reservorio, como se muestra en la figura 12.

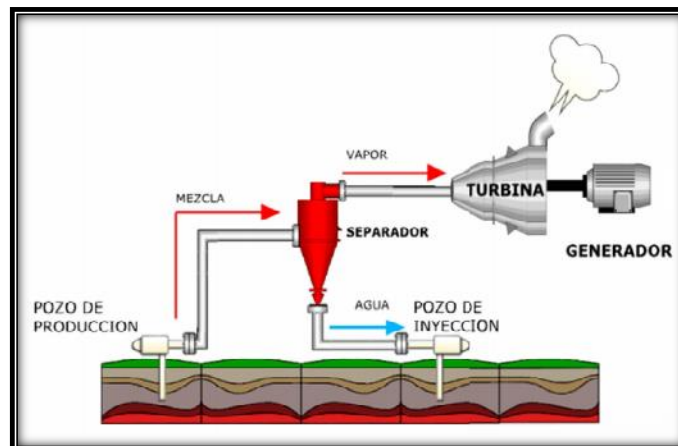


Figura 12. Ciclo a contrapresión.

### 1.3.2 Ciclo binario.

La parte básica para hacer uso de los recurso geotérmicos es contar con un pozo que proporcione vapor o mezcla a la salida, es decir a nivel de piso. Debido a que esta mezcla contiene sales disueltas (provenientes de los estratos geológicos), se considera "impura" y ocasiona daños a los equipos con los que tiene contacto directo. Por lo que se buscó una forma de reducirlos, implementando una configuración en la que no fuera necesario dirigir el vapor de origen geotérmico directo a la turbina, a lo que se le conoce como ciclo binario.

Se caracteriza por hacer uso del recurso geotérmico como medio de transferencia, ya que cede su energía a un nuevo fluido de origen orgánico libre de impurezas y con temperaturas de ebullición reducidas. Se transfiere calor hasta convertir en vapor el flujo orgánico e ingresarlo a la turbina sin ninguna impureza, fenómeno que aumenta considerablemente el rendimiento del ciclo.

Por otro lado, su costo y mantenimiento se incrementan debido a equipos auxiliares como el intercambiador de calor y almacenadores para los nuevos fluidos. Estos fluidos mejor conocidos como “*fluidos de trabajo*” pueden ser mezclas de hidrocarburos altamente volátiles como: propano, n-butano, isobutano o isopentano; funcionan en rangos de 35°C en la fase fría y en los 150°C en la fase caliente, temperatura similar a la que presenta el recurso geotérmico a la salida del pozo.

El esquema de la figura 13 muestra la distribución de los equipos que conforman un ciclo binario; constituido mediante tres circuitos principales: el primero, en el que el fluido geotérmico sale a través del pozo, entra al intercambiador de calor cediendo su energía al fluido de trabajo y a su salida se reinyecta el fluido geotérmico. El segundo, en el que se introduce el fluido de trabajo en el intercambiador donde admite la energía calorífica cedida por el fluido geotérmico y se transporta hacia los componentes restantes: turbina y condensador. Finalmente el tercero, en el que se introduce agua de refrigeración por medio de una torre de enfriamiento, que mantendrá la temperatura mínima en el condensador mediante la circulación del agua a través de la estructura interna de la torre de enfriamiento y el contacto del agua con aire frío del ambiente.

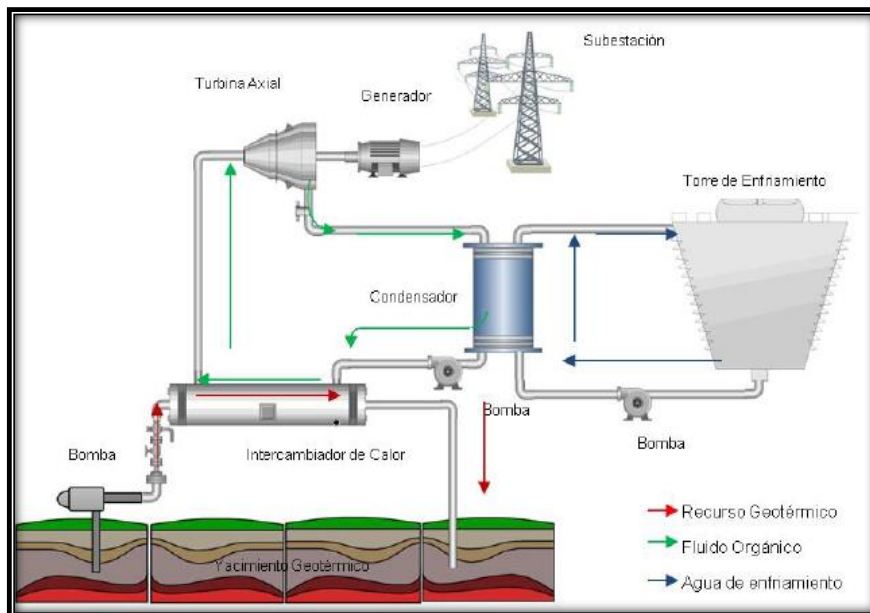


Figura 13. Ciclo binario.

### 1.3.3 Ciclo a condensación.

Es uno de los ciclos que presenta alta potencia, pero económicamente sus precios son elevados debido al tamaño y mantenimiento de los componentes adicionales que lo conforman. Su funcionamiento es similar al anterior, a excepción del uso del intercambiador, como se aprecia en la figura 14.

En este ciclo la mezcla o vapor proveniente del pozo se dirige a un separador de flujos para lograr la separación de la mezcla a la entrada, retirar la humedad y mandar únicamente vapor seco a la turbina. Con ayuda del condensador, se buscará captar la mayor cantidad de vapor proveniente del escape de la turbina y cambiar su fase, es decir, de vapor a líquido con la finalidad de reutilizar el líquido. Se adiciona, una torre de enfriamiento que mantendrá la temperatura mínima en el condensador mediante la circulación de agua.

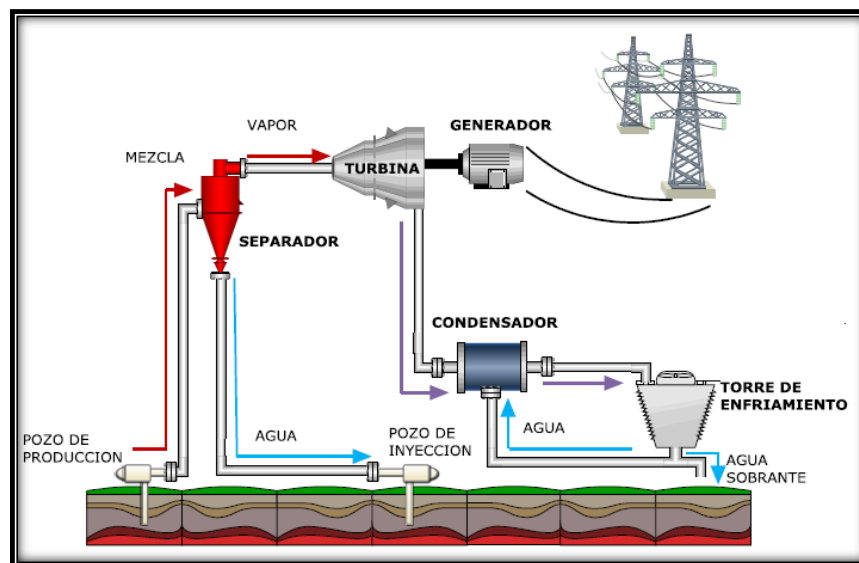


Figura 14. Ciclo a condensación.

Uno de los procesos más importantes en este ciclo es proporcionar vapor seco a la turbina eliminando la humedad de la mezcla proveniente del pozo con ayuda del separador de flujos; si esto no se logra, representa un gran inconveniente ya que es posible dañar la turbina con presencia de gotas de agua que impactan en los alabes, causando deformación, desgaste y por tanto baja eficiencia.

Para evitar problemáticas, es habitual colocar a la salida del pozo un separador centrífugo, que eliminará la mayor cantidad de agua posible que contiene la mezcla a la salida de boca de pozo. En ocasiones para asegurar el secado del vapor se colocan dos separadores centrífugos en serie, con la finalidad de mejorar la calidad del vapor que activará la turbina, elevando así su rendimiento y alargando su vida útil.



Principalmente los separadores se emplean para lograr la extracción de vapor que contiene la mezcla proveniente del pozo; adicional a ello, también logran la eliminación de partículas sólidas presentes debido al arrastre del fluido geotérmico desde el subsuelo hasta la superficie.

Su instalación se requiere también, cuando el fluido geotérmico presenta una disminución de presión, ya que propicia la ebullición formando en él, mayor cantidad de líquido. Con presencia en el fluido de dos fases, será necesario efectuar un proceso de separación en el que se extraiga el vapor y se recolecte el líquido; si éste último manifiesta alta temperatura, será posible realizar un segundo proceso de separación; dicho de otra forma se asignarán una o dos etapas.

A lo anterior se le conoce como efecto o proceso *flash*, consiste en conducir el fluido geotérmico aun primer separador en el que se extraiga la mayor fracción de vapor presente en la mezcla, el vapor separado será conducido a la turbina, mientras que a su vez se recolecta el agua de esta primera etapa. El agua recolectada se conduce a un segundo separador, conocido como separador de baja presión actúa como un vaporizador volviendo a separar el vapor restante del agua recolectada. Si de los dos separadores o etapas se recolecta la fracción de vapor obtenida y se conduce a la turbina, esta tendrá dos entrada. En la primer entrada se dirige la extracción de vapor adquirida a alta presión es decir la del separador inicial, mientras que en la segunda entrada se admite el vapor de baja presión.

Proceso que da como resultado la configuración de plantas o ciclos de “doble flasheo” (figura 15).

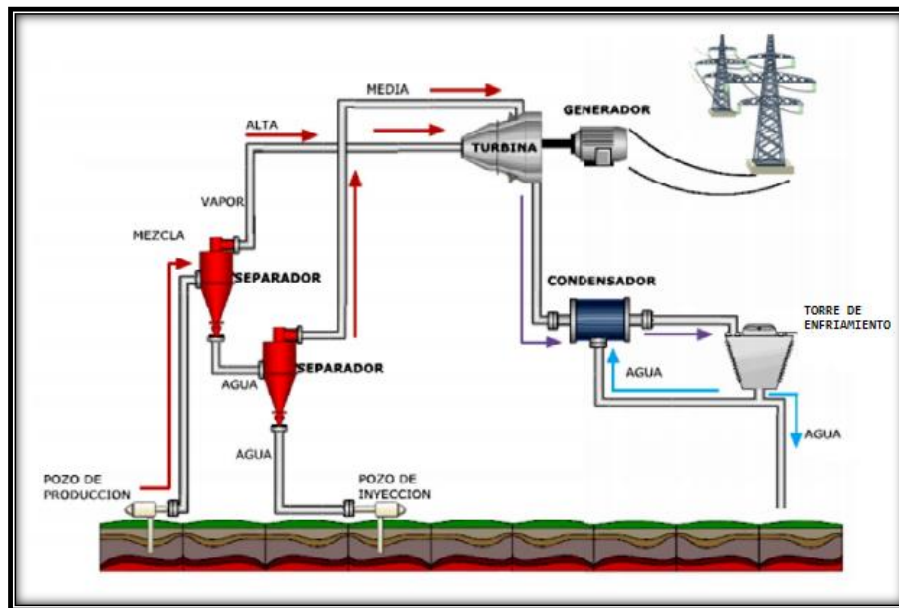


Figura 15. Esquema de un ciclo de condensación con doble flasheo.



Sus principales ventajas son [7]:

- Producen entre 15% y 20% más de energía mediante el mismo suministro geotérmico, ya que incluye dos conjuntos de turbina-generator.
- Aunque el costo de inversión se incrementa en un ~5%, el costo neto por kWh es alrededor de 10% a 15% más bajo.
- Se logra una presión óptima a la entrada de la turbina, un 30% más alta. Por lo que es rentable usar tubería y válvulas más pequeñas.

Existen otras configuraciones por ejemplo, las centrales de ciclo combinado flash-binario; que fusiona dos tecnologías para aprovechar mejor los beneficios que cada una brinda. Su mecanismo de funcionamiento es similar, el vapor separado mediante un proceso flash se envía a la turbina y debido al acoplamiento con el generador se obtiene electricidad; sin embargo, el vapor que desecha la turbina a baja presión se condensa mediante un sistema binario y así extraer la mayor cantidad posible de energía. Este proceso unificado, logra un mejor aprovechamiento del recurso así como de equipos por ejemplo, el uso de una torre de enfriamiento por aire para los dos procesos.

Estas centrales con ciclo combinado, alcanzan su máxima eficiencia en yacimientos que presentan vapor con altas presiones, sin embargo si se usan yacimientos de alta entalpia con flujos de líquido dominante; la configuración más eficiente es colocar una planta de ciclo combinado para el vapor que se extraiga de la mezcla mediante el separador centrifugo y una planta de ciclo binario convencional donde se emplee la salmuera residual del proceso de separación. Cabe mencionar, que estas plantas de ciclos combinados, requieren de un estricto control de temperatura del agua de inyección ya que un descenso de la misma, representaría un recorte de producción.

La única planta con esta tecnología disponible se encuentra en *Hawái* denominada “*Puna Geothermal Venture*” que se encuentra en funcionamiento desde 1991 y genera el 20% del consumo de energía eléctrica de la mayor isla de este archipiélago [8].

#### **1.4 Presencia de la energía geotérmica en México.**

La energía geotérmica a nivel mundial, es una de las energías alternas presente en varios países con un gran potencial de explotación como se aprecia en la figura 16.

La geotermia, es uno de los campos disciplinarios en el que se ha manifestado interés debido a que es una energía libre y disponible; representa una oportunidad de desarrollo e innovación tecnológica ya que se deben crear técnicas para su aprovechamiento adecuado y eficiente.

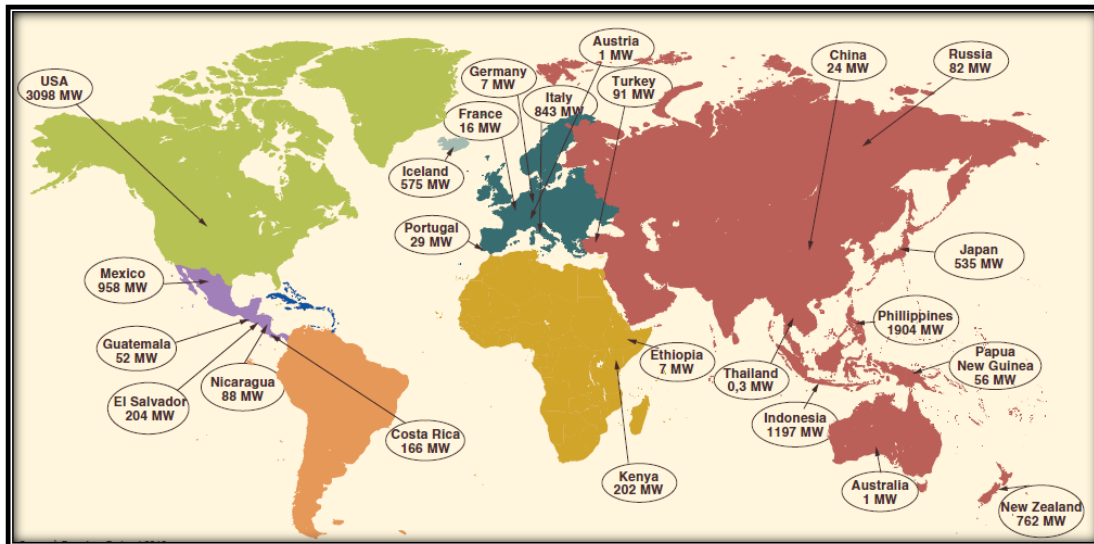


Figura 16. Potencial mundial geotérmico [9].

Diversos factores han impulsado su investigación y progreso, sin embargo, la mitigación de los problemas ocasionados por la alteración del cambio climático han sido los más importantes, al igual que la búsqueda de alternativas debido al agotamiento y sobre explotación de hidrocarburos principalmente, del petróleo.

Registros indican que la generación eléctrica mediante energía geotérmica alcanzó un mínimo de 72 TWh en 2012, se estima que la capacidad de generación creció ~ 300 MW durante este año [10].

Algunos de los países a nivel mundial con mayor capacidad de generación eléctrica mediante energía geotérmica son [11] :

- Estados Unidos con 2851 MW.
- Filipinas con 1.980 MW
- México con 958 MW
- Indonesia con 797 MW
- Italia con 790 MW
- Japón con 535 MW
- Nueva Zelanda con 450 MW

La figura 17, muestra el incremento que los países han tenido referente a su capacidad instalada para la generación de electricidad mediante energía geotérmica desde 1995; es apreciable un comportamiento ascendente debido a su continuo aprovechamiento y explotación.

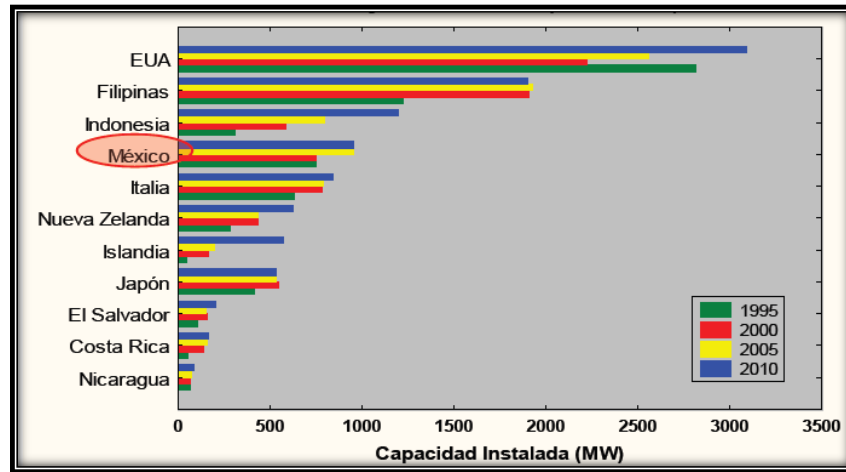


Figura 17. Escenario mundial de países con mayor desarrollo en generación geotermoeléctrica [3].

México actualmente ocupa el 3 lugar a nivel mundial en aprovechamiento de este recurso [12]. Se cree que la energía geotérmica al encontrarse disponible en la superficie del planeta tierra y México en particular al presentar un panorama favorable para su explotación debido a su ubicación geográfica representa una gran oportunidad para erradicar la dependencia que actualmente se vive con los hidrocarburos.

La tabla 2, muestra las unidades instaladas y en operación que permiten cuantificar la producción total.

Tabla 2. Producción y potencia de los diferentes ciclos geotermoeléctricos [13].

Tipo	N° unidades	Total (MWe)	Media (MWe/unid)
Contrapresión	25	145	6
Ciclo binario	236	1.178	5
Flash	141	4.421	31
Doble flash	61	2.092	34
Vapor seco	62	2.878	46

### 1.4.1 Centrales eléctricas geotérmicas presentes en México.

México, cuenta con cuatro campos geotérmicos que gracias a su adecuada explotación le permiten enlistarse dentro de los primeros tres lugares a nivel mundial de generación geotermoeléctrica. Sus 37 unidades instaladas y diversificadas permiten la generación en cada campo geotérmico aproximadamente en los rangos que enlista la tabla 3 a continuación:



**Tabla 3. Capacidad de generación en los diferentes campos geotérmicos en México [14].**

<i>Ubicación</i>	<i>Capacidad [Mwe]</i>
Cerro Prieto, Baja California.	720
Los Azufres, Michoacán.	188
Los Humeros, Puebla.	40
Tres Virgenes, Baja California.	10

A continuación se describe brevemente cada uno de los 4 campos geotérmicos, auxiliése de la figura 18 para localizarlos dentro del territorio nacional [13] :

- Cerro prieto, es el campo más grande y más antiguo en operación. Se encuentra ubicado en la parte norte de México, sus primeras unidades de energía se registran alrededor de 1973. Actualmente cuenta con 13 centrales en operación del tipo a condensación, de las cuales 4 son de doble flash con una generación de 110 MW cada una, se tienen 4 centrales más con ciclo sencillo flash con generación de 37.5 MW cada una, otras 4 con generación de 25 MW cada una y una última de 30 MW.
- Los azufres es el segundo campo que opera en México, se ubica en la parte central del país a 250 km de la Ciudad de México. Sus primeras unidades de energía generadas se registran alrededor de 1982, actualmente cuenta con 12 centrales en funcionamiento, de las cuales una es a condensación generando 50 MW, cuatro más son del tipo a condensación generando 25 MW cada una, siete a contrapresión generando en cada una 5 MW.
- Los Humeros, es un campo de tipo volcánico ubicado en la parte centro – oriente de México, en el extremo oriente del cinturón volcánico mexicano. Sus primeras dos unidades operaron comercialmente en 1990, en la actualidad tiene 8 centrales a contrapresión de 5 MW cada una. Cabe señalar que la unidad 8 es la más reciente y comenzó a operar en abril de 2008.
- Las Tres Virgenes, es el campo en funcionamiento más reciente en México, se encuentra ubicado en el centro – norte de Baja California, solo cuenta con dos centrales a condensación que generan 5 MW cada una.

La producción anual de electricidad en estos campos geotérmicos es estable y simboliza un papel importante en la distribución energética a pesar de que solo cubre el 3% de la demandada energética a nivel nacional. Cada uno de los 4 campos, es operado por Comisión Federal de Electricidad (CFE), empresa encargada de prestar el servicio público de energía eléctrica al país.



**Figura 18. Ubicación de campos geotérmicos en explotación y sistemas evaluados con potencial. [3].**

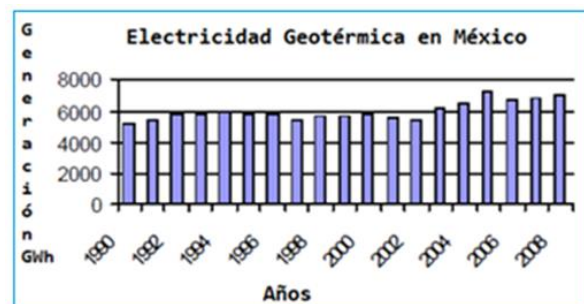
Datos proporcionados por CFE indican que para lograr la producción actual, se ha requerido de la perforación de 556 pozos y la producción de 65.9 toneladas de vapor al año (~7,504 t/h) de las cuales, las cantidades de vapor empleadas en cada campo son [3]:

**Tabla 4. Cantidad de toneladas de vapor empleadas en los campos geotermoeléctricos de México [3].**

Ubicación	% toneladas de vapor
Cerro Prieto	66.40%
Los Azufres	15.30%
Los Humeros	7.70%
Tres Virgenes	1.80%

Estudios indican que la capacidad de estos campos podría incrementarse mediante la implementación de nuevas centrales, como se ha efectuado desde 1990 (tabla 5). Otras evaluaciones han estudiado la posibilidad de explotar diferentes zonas en las que sea posible seguir explotando la energía geotérmica para generación dentro del territorio nacional y así, aumentar el porcentaje con el que esta energía ayuda a cubrir la demanda energética. En la figura 19 se pueden apreciar las zonas evaluadas [14].

**Tabla 5. Generación de electricidad con energía geotérmica desde 1990 [15].**





DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SEPARADOR DE FLUJOS PARA  
UN CICLO DE GENERACIÓN GEOTERMOELÉCTRICA.

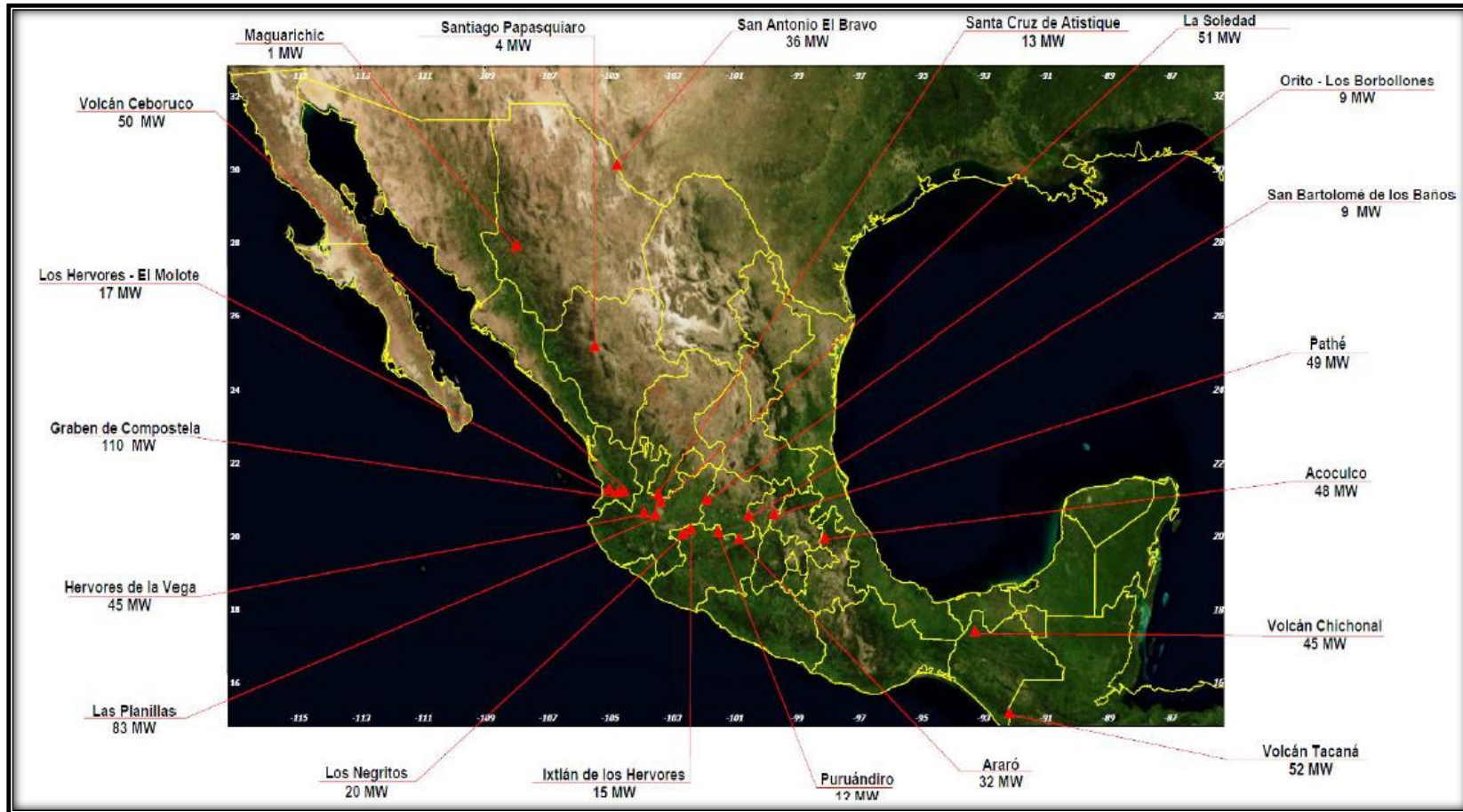


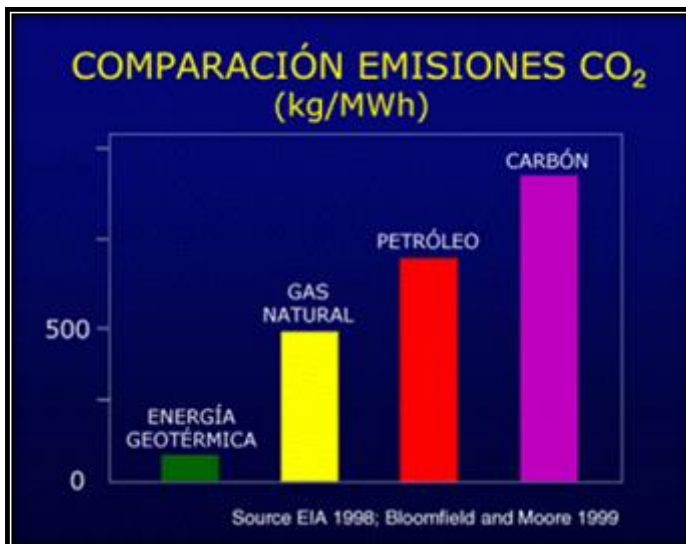
Figura 19. Zonas geotérmicas evaluadas para futura explotación [14]



#### 1.4.2 Ventajas e inconvenientes de la energía eléctrica de origen geotérmico.

A nivel macro podemos decir que la energía geotérmica es uno de los recursos más grandes que existe, ya que la tierra sufre un enfriamiento de 130°C cada mil millones de años. El calor de la tierra es ilimitado en escala de tiempo humano y estará disponible por bastante tiempo siempre y cuando su explotación sea de forma racional.

El uso de la energía geotérmica para generación de electricidad no se relaciona con quema de ninguna materia prima o de ningún recurso, por lo que sus emisiones pueden llegar a ser casi nulas, reinyectando las aguas geotérmicas a sus acuíferos de origen. Pero como se mencionó, el fluido geotérmico contiene gases disueltos, sales y arena en suspensión que se puede contemplan como contaminantes lo que representaría comparadas con otros recursos, las cantidades de CO<sub>2</sub> emitidas a la atmosfera.



La cantidad de CO<sub>2</sub> emitida por las centrales geotérmicas en el mundo es de 55 g/kWh, relativamente menor comparada con las emisiones de una central de gas que emite 10 veces este valor (figura 20).

Otra ventaja se refleja en la distribución de los equipos presentes en los ciclos de generación eléctrica mediante geotermia, ya que su espacio de trabajo es reducido.

Figura 20. Comparación de emisiones generadas en la generación eléctrica [2].

Al usar como fuente de trabajo un fluido proveniente de la faz de la tierra, no requiere de contenedores o almacenes para el combustible como es el caso de centrales térmicas convencionales. Cabe aclarar que se requieren ductos que permitan conducir el vapor desde el pozo hasta la turbina, los que generalmente son de poliuretano lo que hace posible y fácil buscar un adecuado camuflaje acorde con el paisaje de sus alrededores y proteger la flora y la fauna.

La energía geotérmica no depende del clima, por lo que es una fuente disponible las 24 horas del día durante los 365 días del año; simbolizando de este modo, una excelente respuesta para reducir la dependencia de los recursos fósiles por ejemplo.





Uno de sus beneficios que se le asigna a este tipo de energías son sus costos de generación, los cuales son competitivos a nivel mundial oscilando entre 2 y 10 US¢/kWh, mientras que sus costos de retorno de inversión fluctúan entre 800 y 3000 US\$/kW. Se espera que en un futuro estos costos puedan reducirse entre 1 y 8 US¢/kWh. Los costos promedio de generación en México han sido variables: Cerro Prieto (3.46 US¢/kWh); Los Azufres (3.29 US¢/kWh); Los Humeros (3.45 US¢/kWh); Tres Vírgenes (3.45 US¢/kWh). [3]

Mientras que una desventaja no característica de la generación de electricidad si no de las manifestaciones que se presentan en sus alrededores, es la contaminación del aire; por ejemplo, la presencia de los geiser que desprenden ciertas cantidades de emisiones contaminantes como sulfuro de hidrogeno, arsénico y otros minerales. Anteriormente mencionamos que la contaminación que esta energía genera es reducida, sin embargo el costo ambiental puede llegar a ser elevado si las zonas en las que se encuentra disponible esta energía, se localizan en bosques. Una de las afectaciones más directas en el ecosistema es el ruido que se produce debido a la transportación y descarga de vapor en la planta, es decir el ruido de operación ya que es muy elevado.

### **1.5 Implementación de recursos geotérmicos de baja entalpia para generación eléctrica.**

En el apartado 1.4.1 se muestra un mapa en el que se puede apreciar que el potencial en México es muy alto y que aún puede hacerse uso de esta energía en diferentes zonas que hasta la actualidad no se han explotado, por lo que la búsqueda y no solo en México es lograr un mejor uso de los recursos disponibles.

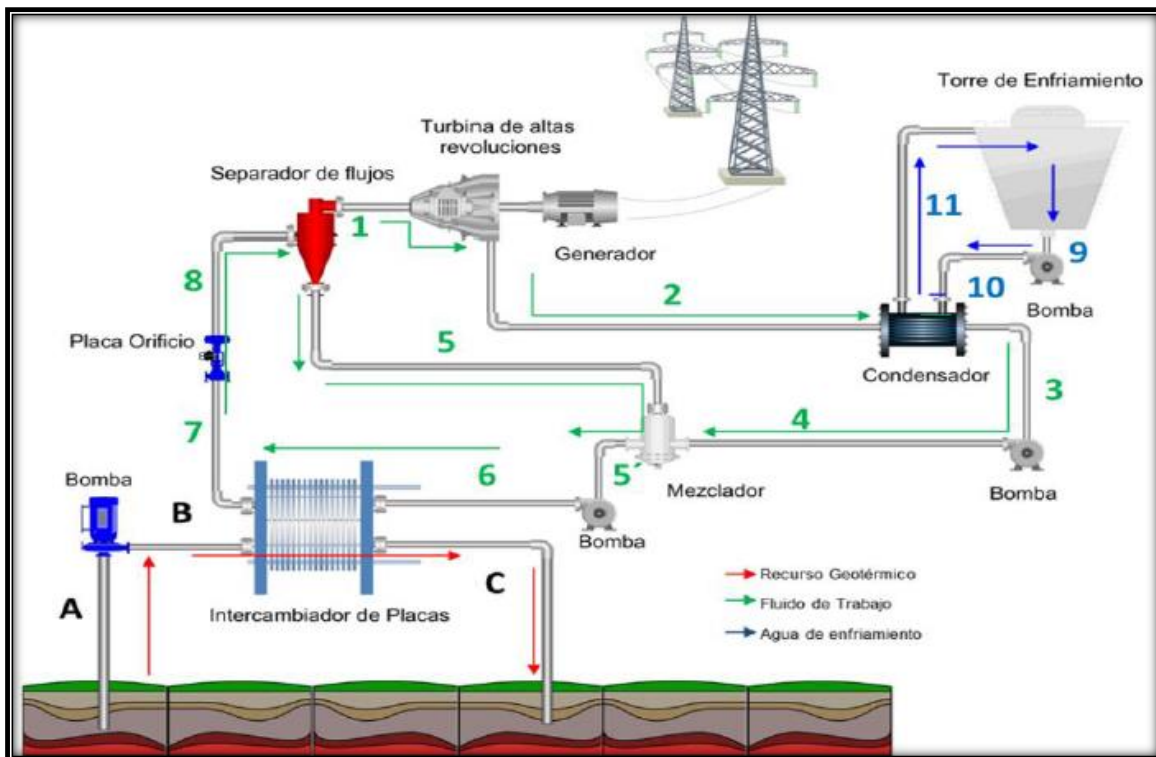
México es uno de los países que gracias a su cinturón volcánico, cuenta con más recursos geotérmicos de media temperatura y ha sido uno de los países pioneros en el uso de recursos geotérmicos. Debido a la presencia y experiencia que se tiene respecto a la energía geotérmica, se han planteado metas a largo plazo, en lo que respecta a su buen aprovechamiento. Es por ello que se han puesto en marcha investigaciones que desarrollen tecnología para poder hacer uso de este recurso de fácil accesibilidad y buscar un campo de aplicación mucho más amplio, en este trabajo se muestra un poco de esa tecnología que se desarrolla en el Instituto de Ingeniería de la UNAM en el grupo de trabajo *IIDEA*.

#### **1.5.1 Ciclo CBEI-IIDEA.**

Anteriormente se enlistaron los ciclos con los que es posible generar electricidad en la mayor parte del mundo, los más utilizados son los ciclos binarios, se cuentan alrededor de 236 plantas instaladas en el mundo. Aunque se presentan serios inconvenientes en su uso, como los altos costos de reparación para accesorios que sufren corrosión, como lo es y en gran forma el intercambiador de tubo y coraza que utiliza este ciclo, elemento que se encuentra en contacto directo con el flujo geotérmico, proveniente del subsuelo.

Al tener presente este inconveniente y el gran potencial con el que cuenta México, el grupo IIDEA trabaja en el desarrollo de nuevas tecnologías que hagan posible la utilización de los diversos recursos geotérmicos, evitando en su implementación para generación eléctrica el desgaste en equipos por motivos de corrosión.

El grupo IIDEA desarrolló una propuesta que consiste en la modificación de un ciclo binario convencional, en el que el fluido de trabajo sea agua. Dicha propuesta lleva por nombre CBEI (Ciclo Binario de Evaporación Instantánea), el nombre refiere a su principio básico de operación donde se requiere presurización de agua para lograr llevar a cabo la funcionalidad del ciclo. Concretamente, consta en cambiar el intercambiador de tubo y coraza por un intercambiador de placas, añadir un sistema de evaporación conformado por dos dispositivos: una placa orificio y un separador de flujos. El objetivo es mitigar la problemática de corrosión, riesgos de operación, disminución de tiempos de mantenimiento y costos.



**Figura 21. Ciclo CBEI propuesto por grupo IIDEA.**

Cálculos en los que se compara la potencia generada entre el ciclo propuesto y los ciclos binarios convencionales, reportan que la potencia que se puede lograr mediante el ciclo que el grupo IIDEA propone, es mayor que la que se reporta actualmente en ciclos binarios en funcionamiento. Lo anterior refleja que la propuesta presentada es viable y a su vez, un mejor aprovechamiento de los recursos geotérmicos; tal como se puede apreciar en la tabla 6.

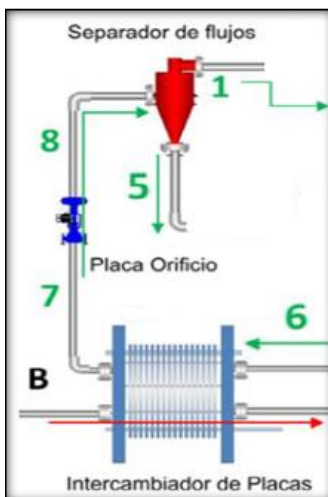
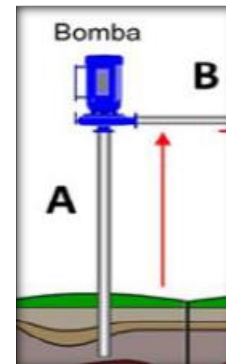
**Tabla 6. Comparación de potencial generado entre dos ciclos [16].**

Agua Geotérmica . kg/s	Potencia Generada en kW	
	Ciclo Binario Convencional.	CBEI
15	171	199
20	229	266
25	286	332
30	343	399
35	400	465
40	457	531
45	514	598

### 1.5.2 Configuración y elementos del ciclo CBEI.

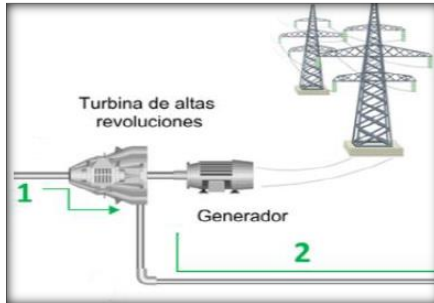
A continuación se presenta la descripción de la propuesta presentada, que consta de cinco secciones:

- 1) Suministro de calor. Consta de pozo geotérmico, que se encuentra a nivel de piso, seguido de una bomba, que ayudará a circular el fluido geotérmico elevando su presión y transportándolo hasta la entrada del intercambiador, donde el fluido geotérmico deberá ceder su energía calorífica al fluido de trabajo con el que ha de operar el ciclo.



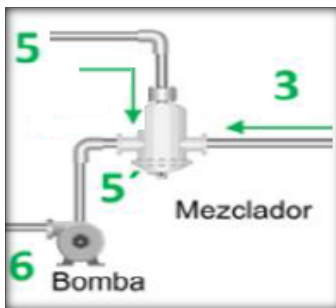
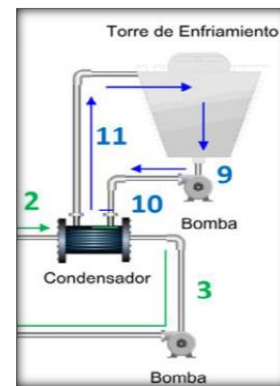
- 2) Sistema de evaporación flash: Se concentra en dos elementos que hacen posible, llevar a la turbina únicamente vapor seco. En el intercambiador de placas se lleva a cabo la transferencia de calor del fluido geotérmico hacia el fluido de trabajo obteniendo condiciones de líquido saturado en el fluido de trabajo; al haberse hecho la transferencia de calor el agua sale del intercambiador y se dirige a la placa orificio, que es una válvula de estrangulamiento encargada de disminuir la presión provocando un efecto flash es decir cambia el estado termodinámico del agua provocando una mezcla de agua y vapor.

Esta mezcla se hace pasar a través de un separador de flujos con el fin de separar la máxima fracción de vapor lograda por el efecto flash, el cual será conducido a la turbina, mientras que el agua será recolectada en un mezclador.



3) Sistema de generación. El vapor disponible se conduce a la turbina, aquí se expande debido a que la presión y la temperatura disminuyen; se acciona el movimiento de los alabes de la turbina y mediante el acoplamiento de un turboalternador se genera electricidad.

4) Sistema de enfriamiento. Se compone de elementos que ayudan a mantener la temperatura mínima en el condensador; mediante la refrigeración de agua que circula por una torre de enfriamiento. Además se lleva a cabo la condensación del fluido remanente proveniente de la turbina y se adiciona una bomba que ayudara a conducir el líquido saturado hasta un mezclador.



5) Sistema de recolección. Este consta de un mezclador en el que se concentrará el fluido que no ha sido utilizado durante el ciclo, como el líquido saturado proveniente de la salida del condensador así como el flujo que logro extraer el separador de flujos. Adicionado con una bomba que elevará la presión del flujo para reutilizarlo en el ciclo, introduciéndolo de nuevo en el intercambiador de placas.

Se ha mostrado una breve explicación física y funcional del ciclo propuesto, con la finalidad de que sea claro su funcionamiento de operación diferenciando cada uno de los sistemas presentes de los que depende.

Este trabajo se enfoca, específicamente a la evaluación, diseño y selección del separador de flujos que requiere el ciclo CBEI, ya que representa una parte fundamental para proporcionar el vapor requerido en la turbina para la generación de electricidad. El separador de vapor es un elemento que debe ser estudiado con detenimiento ya que de él depende la optimización y el mantenimiento preventivo que se le brinda a la turbina para evitar problemas a largo plazo en su operación.



---

## Capítulo 2. Separadores de vapor y su aplicación.

---

El siguiente apartado presenta una investigación referente a los separadores, enlistando su clasificación, su disposición y su funcionamiento; con el fin de tener las herramientas y la justificación adecuada para seleccionar el equipo que cumpla con las solicitudes requeridas por el ciclo propuesto.



## 2.1 Separación.

El proceso de separación se realiza mediante equipos encargados de desprender de una mezcla sus componentes principales, sin importar su tipo. Las mezclas pueden ser del tipo: líquido - gas, sólido – líquido, sólido – gas. Estos dispositivos son utilizados frecuentemente en diversas industrias como: la petroquímica, la farmacéutica, la alimenticia, la metalúrgica, entre otras.

Una de las razones primordiales de implementar estos dispositivos es lograr disponer de una sustancia extraída a partir de una mezcla y darle uso como materia prima o como fluido de trabajo en algún proceso industrial. Tal es el caso del petróleo, que es sometido a un proceso de separación para extraer el aceite puro de los componentes restantes presentes en la mezcla como gas y agua, logrando así su uso como combustible.

Para llevar a cabo la separación de una mezcla homogénea, generalmente se aprovechan las diferencias que existen en las propiedades de sus componentes; éstas se deben analizar y comparar con el fin de evaluar en qué componente existe la mayor diferencia ya que entre mayor sea, más fácil y económico resulta el proceso.

Es evidente que además de la factibilidad de separación en la mezcla se deben considerar otros factores involucrados en el proceso con el fin de proporcionar las características más relevantes para la selección del equipo como: costos, disponibilidad de materiales de construcción, la interacción de la sustancia en el proceso industrial de interés así como la extracción y desecho del resto de los componentes, localización y orientación del equipo, espacio disponible para su asentamiento, etc.

### 2.1.1 Definición.

La separación se define como el *proceso físico mediante el cual será posible disponer de la o las fases que componen una mezcla, considerando su presión y temperatura presente* [17].

El proceso se efectúa mediante separadores que son dispositivos mecánicos encargados de disgregar<sup>1</sup> mezclas y obtener las fases que la conforman a presiones específicas; se debe procurar que las fases sean inmiscibles y manifiesten diferentes valores de densidades. Al presentarse estas características al menos en uno de los componentes, éste mostrará mayor posibilidad de ser extraído mediante uno o varios métodos físicos empleados y dejar de formar parte de la mezcla. Una mezcla puede estar compuesta por dos o más fases, las mezclas que se presentan en procesos típicos de separación comúnmente son del tipo: vapor-líquido, vapor-sólido o dos fases líquidas inmiscibles<sup>2</sup>.

---

<sup>1</sup> Separar, desunir, apartar lo que estaba unido.

<sup>2</sup> Nombre que se le da a sustancia que no se pueden mezclar como el agua y el aceite.



Los métodos físicos mediante los cuales se logra un proceso de separación son:

**Tabla 7. Métodos físicos empleados en procesos de separación [18].**

Precipitación	Fuerza Centrífuga
Adeherencia	Gravedad
Choque	Filtración
Difusión	Absorción

### 2.1.2 Clasificación.

Los separadores se clasifican en función de múltiples criterios, entre los cuales se encuentran:

1. Principio de operación.

- \* Producción. Reciben los fluidos provenientes de las líneas generales de producción y separan las sustancias de interés.
- \* Prueba. Reciben la mezcla de una sola línea con el objetivo de medirla y analizarla.

2. Fases a separar [18].

- \* Bifásicos. Se emplean en la separación de mezclas compuestas por dos fases principales. Se subdividen en:
  - a) *Separadores líquido-vapor*. Separan mezclas compuestas por una fase vapor y una fase líquida. Algunos de los más comunes se muestran en la tabla 8.
  - b) *Separadores líquido – líquido*. La mezcla a separar está conformada por dos fases líquidas inmiscibles. Son equipos semejantes a los descritos anteriormente a excepción de que las velocidades son bajas y el proceso es más complejo.



Tabla 8. Tipos comunes de separadores bifásicos líquido-vapor.

Nombre	Características
<b>Depurador o Scrubber</b>	Remueven pequeñas cantidades de líquido de una gran cantidad de vapor, generalmente son de tipo vertical.
<b>Slug Catcher</b>	Diseñado para recibir grandes volúmenes de líquido en intervalos irregulares.
<b>Line Drip</b>	Ideal para altas relaciones de vapor-líquido, en las que se desea obtener únicamente vapor a la salida.
<b>Tanques Flash</b>	Utilizados para separar vapor producido debido a una expansión de líquido.
<b>Knock Out Drums (KOD) o trampas.</b>	Diseñados para disgregar mezclas con cantidades de vapor altas con poca retención de líquido.
<b>Ciclónicos</b>	Emplean como fuerza motriz de separación la fuerza centrífuga en lugar de la fuerza de gravedad.
<b>Filtros Separadores</b>	Separadores con elementos filtrantes en su interior, diseñados para retener partículas de determinados tamaños.

- \* Trifásicos. Se utilizan con frecuencia para separar mezclas que presentan dos fases líquidas inmiscibles de diferentes densidades y una fase de vapor; por ejemplo: agua, petróleo y gas.

### 3. Forma

- Cilíndricos. Separadores conformados por cilindros, los cuales se subdividen de acuerdo a su orientación:
  - a) Verticales. Adecuados para manejar mezclas en las que hay presencia de sustancias sólidas; son utilizados frecuentemente en operaciones de campo. En general se usan para servicios donde se presenta mayor cantidad de vapor con variaciones en el flujo.



- b) Horizontales. Presentan un área de superficie de contacto mayor que los de tipo vertical por lo que son ideales para servicios que presentan mayor cantidad de líquido y manejan de forma eficiente mezclas con tendencia a formar espumas y emulsiones.
- Esféricos. Se utilizan en servicios en los que se tienen presentes gases a alta presión y volúmenes de líquido pequeños. No son muy eficientes y presentan dificultades en su fabricación, en general no son muy utilizados.

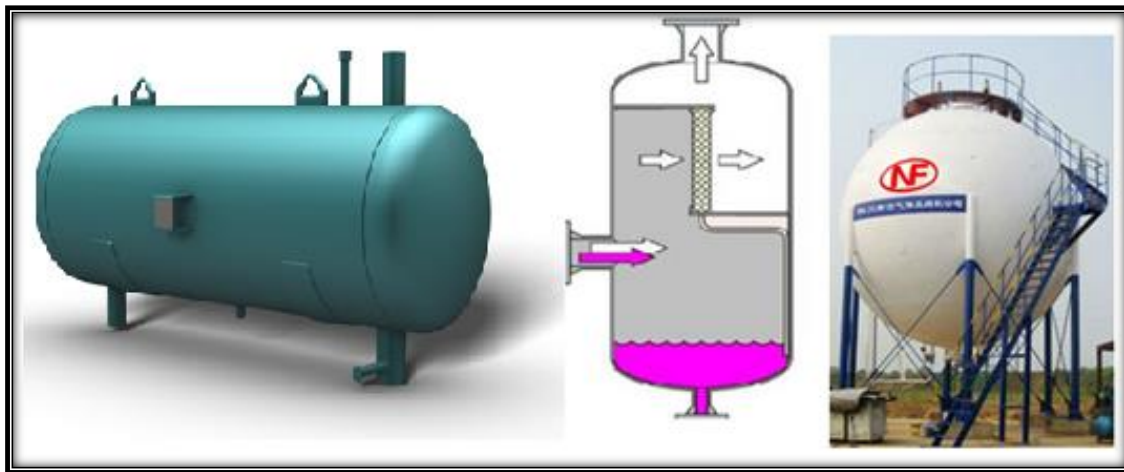


Figura 22. Tipos de separadores en función de su forma.

### 2.1.3 Principios de operación [19].

Estos principios u operaciones unitarias<sup>3</sup> relacionan los métodos mediante los cuales se lleva a cabo un proceso de separación; los métodos se pueden clasificar en mecánicos o químicos.

Un proceso de separación se basa en las diferencias que existen en las fases que conforman la mezcla como: su composición y sus propiedades físicas. Al poner en contacto dos fases con diferente composición ocurre la transferencia de alguno de los componentes presentes de una fase hacia otra y viceversa; si se permite que las fases permanezcan en contacto durante un tiempo suficiente, alcanzarán una condición de equilibrio. La mayoría de las fases presentan una miscibilidad<sup>4</sup> limitada, de tal forma que a pesar de estar en equilibrio, las fases se podrán separar una de la otra.

<sup>3</sup> Descomposición de procesos complejos en etapas físicas individuales.

<sup>4</sup> Término empleado para referirse a la solubilidad de un líquido en otro, formando una solución.

La acción de poner repetidamente las fases en contacto y posteriormente separarlas, han conducido a obtener separaciones casi completas, algunos tipos de procesos de separación que involucran esta operación son: la destilación, el secado, la evaporación, la cristalización, etc. Cabe señalar que estas separaciones se basan en operaciones de transferencia simultánea de calor y masa, lo que constituye el principio de las operaciones de transferencia de masa.

Referente a las mezclas multi-fases, estas pueden ser separadas en dos o más fracciones pero se debe asegurar que sean heterogéneas, es decir, debe ser posible distinguir sus fases. Por ejemplo, las mezclas de diferentes partículas sólidas pueden separarse por tamaños mediante procesos como: tamizado, elutriación<sup>5</sup>, criba, por mencionar algunos; mientras que las partículas sólidas inmersas en un líquido pueden separarse por: filtración, centrifugación o sedimentación; en tanto, las fases líquidas inmiscibles pueden separarse por centrifugado. Estos métodos de separación operan mediante el uso de operaciones unitarias mecánicas.

En general, los procesos que involucran el uso de operaciones de transferencia de masa no se pueden incluir dentro de la clasificación de los métodos mecánicos de separación, ya que se caracterizan por transferir una sustancia a través de otra a escala molar; un ejemplo característico es cuando el agua por evaporación se transfiere de una alberca a una corriente de aire, aquí las moléculas de vapor de agua se difunden a través de las moléculas del aire, es decir, se efectúa un cambio a escala molar. Estas operaciones evalúan la transferencia de masa como resultado de la diferencia de concentraciones o de gradiente en donde las sustancias se difunden y abandonan un lugar de alta concentración para dirigirse a lugares con baja concentración [20].

Lograr la implementación de un proceso de separación que involucra mezclas requiere del empleo de diversos métodos mecánicos que al combinarse de forma adecuada permitirán obtener una separación exitosa y atractiva debido a sus bajos costos de operación siempre y cuando no se pierdan de vista los diferentes estados que presenten las fases de las mezclas y sus efectos que puedan provocar durante el proceso. Algunos de los tipos de separación empleados son:

a. Separación por gravedad.

Especial para mezclas que por disposición se presentan en forma vertical. La mezcla al ingresar, debido a su orientación provoca que las partículas líquidas caigan a contraflujo del vapor gracias a la fuerza de gravedad involucrada, acelerándolas hasta que la fuerza de arrastre sea igual a la fuerza de gravedad. La velocidad con la que las partículas descienden se conoce como *velocidad de asentamiento*, que indica a su vez la máxima velocidad que alcanzará el vapor para lograr la separación de ciertas partículas líquidas con un diámetro específico.

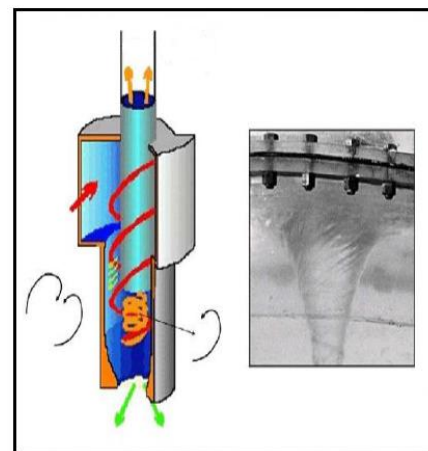


Figura 23. Separación por gravedad [36].

<sup>5</sup> Proceso de separación de partículas sólidas por medio de una corriente dirigida.

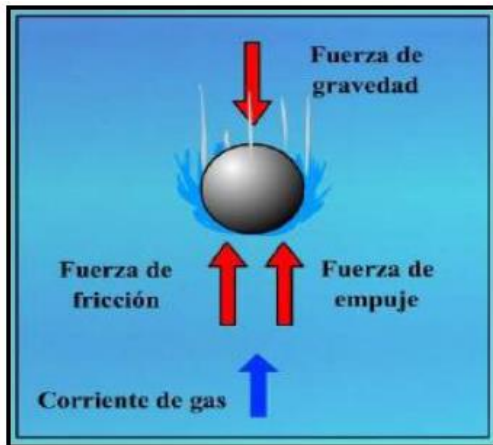


Figura 24. Separación por fuerza centrífuga [36].

b. Separación por fuerza centrífuga.

Para lograr este tipo de separación se requiere inducirle a las partículas liquidas inmersas en la mezcla una fuerza centrífuga que sea mayor que la fuerza de gravedad. Al ser una fuerza inducida, será indistinta la posición en la que se disponga la mezcla a la entrada, este principio mecánico se utiliza en el diseño de separadores y en extractores de niebla.

c. Separación por choque.

Método más utilizado en la separación de partículas (sólidas o liquidas) inmersas en alguna corriente. La mezcla de entrada deberá impactar con obstrucciones localizadas dentro del equipo como baffles o placas, las partículas al chocar se adhieren provocando su detención y así lograr la extracción de la fase de interés.

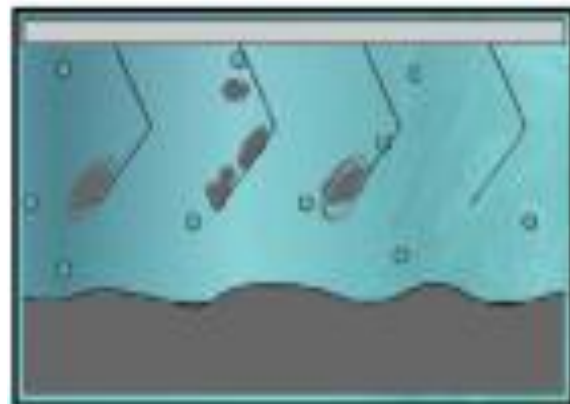


Figura 25. Separación por choque [36].

## 2.2 Separadores de vapor y su presencia en la geotermia.

El uso de los separadores se registra desde 1800 a nivel industrial para la eliminación de polvos o partículas sólidas en las corrientes de gas industrial. Su desarrollo se incrementó con el interés de ampliar la gama de aplicaciones, ya que su uso refleja que es uno de los dispositivos con un diseño sencillo, sus costos de mantenimiento son bajos y sobre todo, presenta cierta adaptabilidad en las condiciones de funcionamiento. Ampliar su gama, específicamente se fundamentó buscando la implementación de los separadores en procesos con condiciones de trabajo (presión, temperatura) en un rango elevado, lo que actualmente se ve reflejado en el uso de estos dispositivos en tecnologías de combustión que son usadas en centrales eléctricas conocida como FBC<sup>6</sup> por sus siglas en inglés (*Fluidized Bed Combustion*) [21].

<sup>6</sup> Tecnología utilizada para quemar combustibles sólidos, mediante la admisión de oxígeno para provocar la combustión.



En diversas industrias se hace uso de los separadores, sin embargo a lo largo del tiempo se han transformado con la finalidad de aumentar las características que los hacen rentables. Los separadores tipo trifásico son de los más empleados en la industria petrolera y existen varios trabajos de investigación basados en modificar su estructura con el fin de caracterizarlos y aumentar su eficiencia para su uso específico. Así como existen trabajos para este tipo de separadores también, se encuentra disponible en la literatura investigaciones referentes a los separadores tipo ciclónicos ya que su uso es frecuente. Este último tipo de separadores se ha desarrollado bajo experimentación, es decir, ensayo y error. Sin embargo, no se debe perder de vista la finalidad con la que se modifican los diseños, que es superar en cada uno de ellos las dificultades de funcionamiento que presentan diseños anteriores.

En lo que respecta a la industria generadora de electricidad mediante energía geotérmica, se mencionó en el capítulo anterior (sección 1.3) que comúnmente para algunos ciclos de generación, se hace uso de una mezcla compuesta de vapor – agua proveniente de los pozos geotérmicos. Esta mezcla manifiesta cierta energía disponible y con el fin de incrementar su energía ha sido indispensable someterla a un proceso de separación, el que se lleva a cabo en separadores de vapor tipo ciclónicos, con el fin de proporcionar únicamente vapor con las mejores condiciones para ser ingresado a una turbina.

Es importante señalar que desde hace tiempo los separadores de vapor se han usado para la generación de electricidad mediante energía geotérmica y a lo largo de su implementación han sufrido modificaciones; en seguida se presenta una breve historia de los diferentes diseños de los que se tiene registro.

### 2.2.1 Antecedentes de los separadores y su uso en la generación de electricidad con geotermia.

Estudiado el hecho de que era necesario efectuar una separación en el flujo geotérmico, la primera idea de separar el agua y el vapor surge de considerar que al hacer fluir la mezcla en un recipiente de geometría específica, el vapor deberá dirigirse hacia arriba y el agua que es pesada caer al fondo, logrando así disponer del vapor específicamente.

Con base en esto, se construyó el primer dispositivo conocido como “knock out drum” (figura 26). Dispositivo no muy eficiente, presentaba problemas para separar la salmuera del vapor por lo que se trabajó en las modificaciones posibles que lo volvieran eficiente.

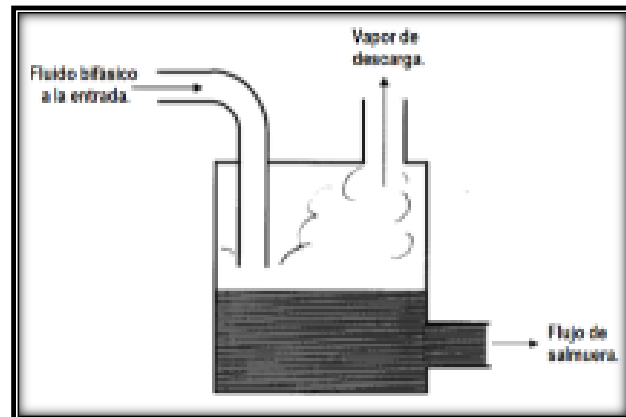


Figura 26. Primer dispositivo para separación de flujo geotérmico [22].

Los diseñadores consideraron utilizar los efectos centrífugos que el líquido presentaría si se hacía circular mediante una superficie curva y así separar las fases que presentaban diferente densidad (salmuera y vapor) y posterior usar la gravedad para lograr extraer el más pesado, es decir, la salmuera; lo que permitió construir el siguiente separador denominado de tipo U o curva en “U” en 1951 [22].

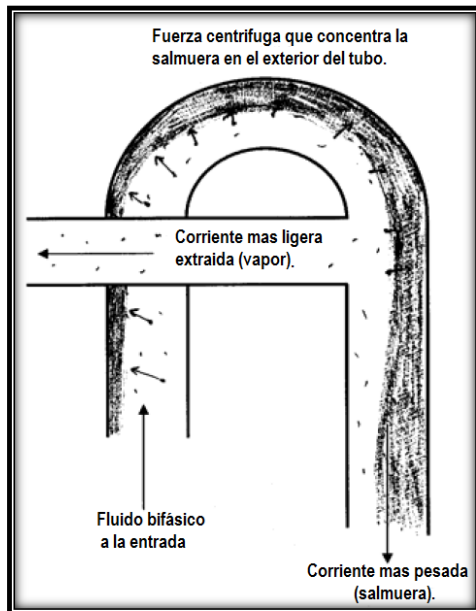


Figura 27. Separador tipo “U” [22].

El diseño tipo “U” fue elaborado mediante tubería doblada a 180° con un tubo de extracción de vapor que sale desde la pared interior del tubo descendente de descarga de la salmuera, este dispositivo permite que al ingresar la mezcla mediante un tubo vertical se someta a intensas fuerzas centrífugas al dirigirse por la curva en “U” concentrando la salmuera en la pared exterior, permitiendo extraer vapor seco proveniente de la pared interior del tubo, ya que la gravedad acelerará a la salmuera hacia abajo

Registros reportan que este dispositivo logró una eficiencia de un rango de 80 a 90%. Algunos de los pozos en los que se probó se localizaban en la planta de Wairakei y producían mezclas aproximadamente con 8 partes de agua por una de vapor, por lo que al hacer pasar una mezcla por este tipo de separadores suponiendo una eficiencia del 85% al final presentaría a la salida del tubo de vapor un flujo de vapor con más del 50% de factor de humedad, cifra que resultaba inaceptable para la puesta en marcha de una turbina, lo que refleja que no era lo suficientemente eficiente. Aun así su implementación ayudó a demostrar que el efecto centrífugo podría ser de mucha ayuda.

Lo anterior dio lugar al desarrollo de diversos diseños con el fin de disminuir el factor de humedad en la corriente de vapor, desarrollando así el primer separador centrífugo que presenta un diseño prematuro pero acertado. Este dispositivo consistía en un recipiente vertical que descargaba el vapor por la parte superior y la extracción de salmuera se conseguía en el fondo del recipiente, se sabe mediante notas personales de Bangma, que este diseño contenía deflectores en la parte interna [23].

Los deflectores se localizaban en tres zonas estratégicas: uno en la sección media, que mediante el choque de la mezcla giraba a altas velocidades provocando una primera separación por impacto; el segundo en la sección superior que prolongaba el giro inducido evitando que el vapor se concentre en el centro y eliminaba las gotas de líquido presentes en el vapor por arrastre haciéndolas chocar por debajo del deflector y finalmente, el tercer deflector colocado en la sección inferior del recipiente el cual únicamente era una placa anti vórtice.

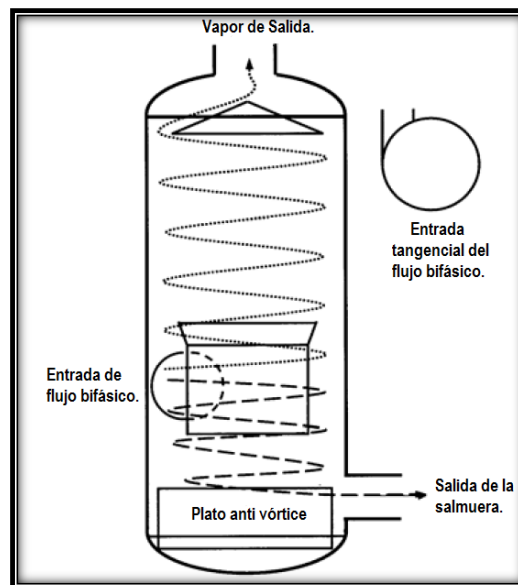


Figura 28. Primer diseño de un separador centrífugo con deflectores [22].

Tiempo después el diseño se modificó dando progreso al separador tipo Webre en el que se extrae vapor mediante un tubo que se encuentra concéntrico en el interior del recipiente y termina en la parte inferior y admite la mezcla en forma de espiral. Este diseño es uno de los mejores elaborados y presenta rangos elevados de eficiencia aproximadamente correspondientes a 99.9% siempre y cuando no se sobrepasen los límites del diseño en cuanto a velocidad.

Actualmente su diseño es la base para el desarrollo de separadores que se utilizan en diversas partes del mundo para separar el vapor de la salmuera en plantas geotermoeléctricas. Está respaldado mediante una serie de experimentos publicados por Bangma en 1961, donde se evaluaron diferentes tipos de separadores y reportó que al aumentar progresivamente la velocidad de entrada en un separador con entrada tipo en espiral se logra una mayor eficiencia que los separadores con una entrada tangencial; así mismo muestra que la eficiencia de separación aumentará siempre y cuando no se alcance la velocidad de degradación ya que si se sobrepasa, la eficiencia desciende rápidamente.



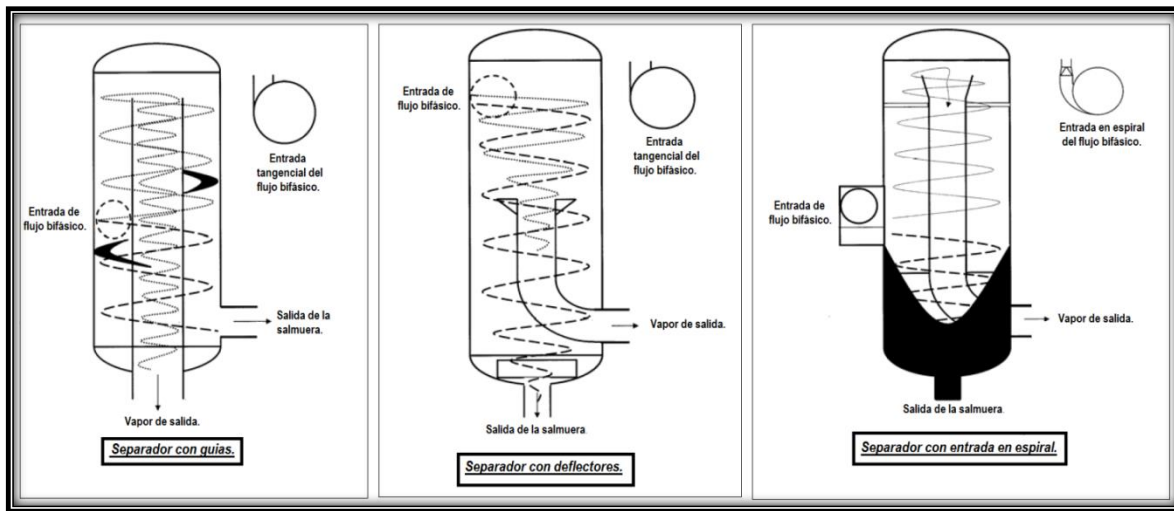
También, demostró que los separadores con admisión en forma de espiral manejan una velocidad de degradación más alta que la que manejan los separadores con entrada tangencial (aproximadamente 60%), por lo que se concluye que los separadores en espiral consiguen la mayor eficiencia con velocidades de entrada en un rango de 30 a 40 m/s, y su velocidad de degradación oscila en los 45 m/s [22].

El diseño se dimensionó para su uso en diversos campos húmedos de la central de Wairakei resultando exitosa su implementación, sin embargo, al probarse en pozos de Cerro Prieto, México no se obtuvieron los mismos resultados, presentó dificultades, ya que, el vapor presentaba aun después de su separación una cantidad importante de agua con sílice provocando incrustaciones en los alabes de las turbinas, lo que se vio reflejado en una reducción de la producción en un rango del 5% - 6% y por supuesto un deterioro en el equipo. Este inconveniente era sencillo de resolver colocando tuberías lo suficientemente largas para que se presentara un fenómeno conocido como lavado de vapor, pero no fue posible debido a que los pozos se localizaban muy cerca del cuarto de máquinas, por lo que se optó en elevar la tubería de toma de vapor en los separadores una distancia correspondiente a una correlación de  $D/4$  donde  $D$  corresponde al diámetro de la tapa del separador, fue así como se resolvió el problema, aunque es importante señalar que con este cambio geométrico se incrementa la caída de presión a través del separador [24].

Debido a estas dificultades se hicieron tres propuestas de diseño, de las que se conocen tres (*figura 29*):

- i. Separador con guías. Implementación de dos placas dentro del separador, con el fin de dirigir el flujo hacia abajo y únicamente permitir el paso del vapor.
- ii. Separador con deflectores: Entrada de la mezcla en la parte superior, tubo de extracción de vapor en la parte media del cuerpo con una placa deflectora al inicio del tubo y en la parte inferior el tubo de salida de la mezcla.
- iii. Separador con entrada en espiral: Entrada en espiral con una curvatura constante y un ángulo de inclinación negativo con el fin de manipular la mezcla hacia abajo.

A pesar de sus diversas modificaciones, el diseño del separador tipo Webre aún presentaba dificultades importantes como el desequilibrio de fuerzas por lo que el desarrollo no frenó aquí, tiempo después apareció otro diseño de separador conocido como tipo Peerless en el que se evita este desequilibrio. En él se eleva la mezcla de forma vertical y axial, incidiendo sobre una placa en forma de domo con el objetivo de desviar hacia abajo la mayor cantidad de agua presente en la mezcla, contiene aditamentos como extractores de niebla de tipo laberinto colocados antes de la tubería de descarga de vapor que ayudan a eliminar gotas de agua presentes en la corriente de vapor debido a fenómenos de arrastre; su eficiencia se reporta aproximadamente del mismo rango que el separador tipo Webre.



**Figura 29. Propuestas de diseño para optimización del proceso de separación [22].**

Existen otros separadores conocidos como tipo seco; se utilizan en campos geotérmicos donde el vapor presenta arenillas o polvos inmersos en él, son de tipo coaxial de remolino y se encuentran instalados en la tubería de toma del vapor, trabajan descargando el polvo contenido en la corriente de vapor a través de orificios de aproximadamente 6 o 7 mm que se encuentran abiertos a la atmosfera, eliminan partículas cuyo tamaño sobrepase los 10  $\mu\text{m}$ ; las pérdidas de vapor por el orificio de escape se consideran nulas [24].

### 2.2.2 Aplicación de un separador en el ciclo propuesto.

Para lograr un diseño óptimo se recomienda conocer a fondo la funcionalidad del dispositivo que se desea crear, por lo que primero se deberá verificar el servicio para el que se está diseñando y el lugar donde se implementará.

En la geotermia se requiere de ciclos mediante los cuales se genere electricidad, es por ellos que en el capítulo anterior (sección 1.5.2) se plantea el funcionamiento y las etapas por las que está compuesto el ciclo propuesto. Para el caso de estudio del presente trabajo, la sección más relevante será la encargada de la “generación de vapor”, por lo que es importante diseñar un separador de vapor capaz de separar la fracción de líquido y la fracción de vapor que se encuentran presentes en la mezcla.

Para este caso en particular, la mezcla a separar no proviene del pozo geotérmico, ya que al hacer uso de un pozo de baja entalpia el recurso que este tipo de pozos manifiesta, no conjunta las características necesarias, ya que está conformado por una cantidad menor de vapor y una cantidad mayor de agua. Es por ello que la propuesta manifiesta el uso de un fluido de trabajo que presente las características necesarias o sean manejables para proporcionar al ciclo las condiciones requeridas.





El fluido a emplear es agua, que mediante el uso de un intercambiador será calentada por el recurso geotérmico, con el fin de elevar su temperatura y obtener vapor. Con la finalidad de incrementar la posible corriente de vapor, se somete al agua caliente a una expansión, haciéndola pasar por una placa orificio en la que se disminuye la presión logrando un efecto conocido como efecto flash.

Las cantidades y características del vapor generado serán importantes para la selección, diseño y caracterización de los equipos en los que interactúa directamente. Mediante la implementación de un separador de flujos se deberá asegurar que a la entrada de la turbina únicamente se ingrese una corriente de vapor con las mejores condiciones y no una corriente impura o sucia, que se caracterizan por contener pequeñas gotas de agua, a su vez se incrementará la vida útil de la turbina evitando daños por choque de gotas de agua que provocan: deformación en los alabes, vibraciones y desbalanceo.

### **2.3 Comparación y selección del separador de vapor para el ciclo binario de evaporación instantánea.**

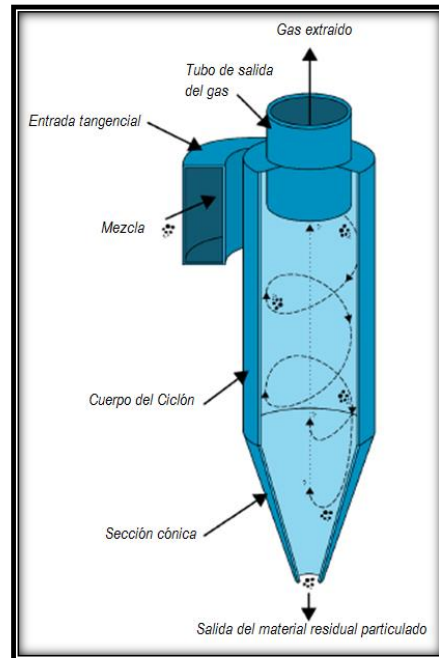
Para una adecuada selección se deben tomar en cuenta todos los aspectos que involucren la configuración ideal del separador, por lo que se debe fundamentar la optimización del diseño y la factibilidad económica de su implementación; de igual forma se debe tener claro el servicio para el cual se está diseñando el equipo y las variables que pueden manipularse para disminuir sus costos. De los antecedentes presentados se puede comprobar que para usos geotermoeléctricos, desde hace mucho tiempo los separadores de tipo centrífugo o ciclónico han presentado una adecuada implementación y reportado altos rangos de eficiencia. A continuación se enlista una serie de ventajas y desventajas de diferentes tipos de separadores con la finalidad de evidenciar que en efecto, los separadores ciclónicos cubren de forma eficiente lo requerido para el ciclo propuesto.

#### **2.3.1 Separador centrífugo.**

Dentro de los separadores tipo centrífugo se enlistan los ciclones de gas, que se definen como un dispositivo mecánico estacionario que utiliza la fuerza centrífuga para separar partículas sólidas o líquidas de un gas portador [25].

La configuración típica de un separador de este tipo se muestra en la figura 30, su principio básico de funcionamiento involucra la creación de vórtices dobles. Se hace pasar el flujo de entrada por la parte superior mediante una entrada tangencial, forzando a la mezcla a seguir un movimiento en espiral que hará que descienda axialmente por el cuerpo del separador, mientras que un campo de fuerzas centrífugas provocará que las partículas sólidas o líquidas (dependiendo la aplicación) sean lanzadas a la pared del ciclón y se vayan al fondo logrando extraerlas en la parte baja mediante un tubo inferior, entretanto la fase gaseosa logra invertir su dirección axial saliendo a través de un tubo superior.

Lo anterior se logra debido a que la velocidad de espiral supera la velocidad de entrada y los patrones de flujo mediante las velocidades radiales direccionan las partículas a las paredes haciendo que choquen entre si y al aumentar su peso caigan más rápido.



**Figura 30. Configuración de un separador ciclónico [25].**

Las aplicaciones de estos dispositivos a nivel industrial son comunes y se ocupan de un solo ciclón o de múltiples ciclones. Los de uno solo crean un doble vórtice para separar las partículas del gas, el vórtice principal forma un espiral hacia abajo y conduce a las partículas de mayor peso al fondo; mientras que el vórtice secundario o interior creado cerca de la parte inferior del ciclón forma otra espiral hacia arriba llevando únicamente la corriente de vapor.

Los separadores múltiples o multiclón consisten en varios números de ciclones de pequeño diámetro que funcionan en paralelo y tienen una sola entrada y salidas comunes y opera con el mismo principio, creación de vórtices [26]. Existen otros equipos similares conocidos como hidrociclones que permiten la separación de líquidos de distintas densidades o de sólidos inmersos en corrientes de líquido.

En función de su configuración geométrica los separadores ciclónicos se distinguen en diferentes tipos [27]:

- a) Entrada tangencial y descarga axial. Representan la configuración clásica de un ciclón (figura 31), son diseñados frecuentemente en diámetros entre los 600 y 915 mm mas no están limitados a construirse más grandes.

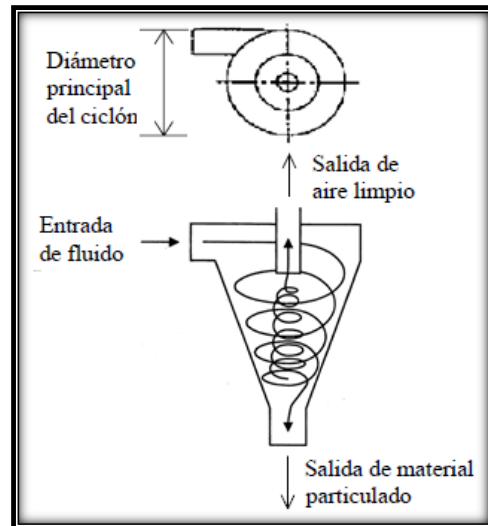


Figura 31. Configuración clásica de un ciclón [27].

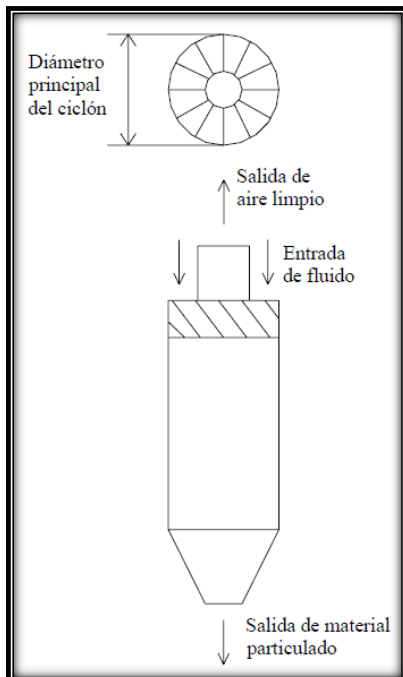
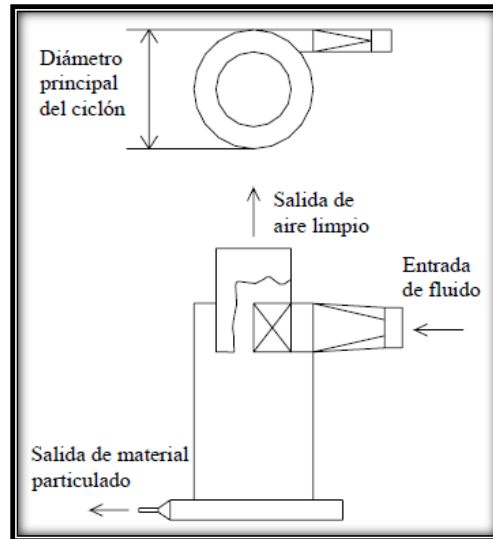


Figura 32. Ciclón con configuración entrada y descarga axial [27].

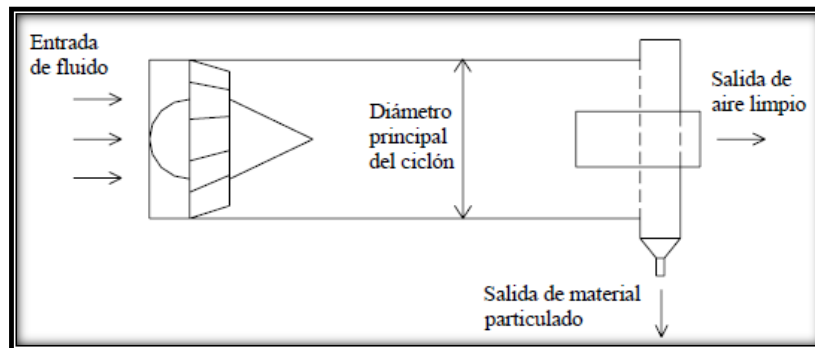
- b) Entrada y descarga axial. Funciona similar al tangencial la diferencia es que presentan a la entrada de la mezcla unos alabes fijos que inciden un movimiento en espiral apreciables en la figura 32. Se diseñan en diámetros menores aproximadamente de 25 a 305 mm por lo que presentan mayor eficiencia pero menor capacidad.

- c) Entrada tangencial y descarga periférica.  
Su configuración se muestra en la figura 33. Sin embargo, en este tipo de dispositivos la mezcla a separar presenta un retroceso en el interior del equipo lo que provoca que las partículas o sustancia a separar no se eliminen en su totalidad de la corriente de gas.



**Figura 33. Ciclón entrada tangencial y descarga periférica [27].**

- d) Entrada axial y descarga periférica. Estos se caracterizan por proporcionar un flujo directo por lo que son adecuados para conectarlos a fuentes de gran volumen donde los cambios de dirección de gas representen un inconveniente. Configuración apreciable en la figura 34.



**Figura 34. Ciclón entrada axial descarga periférica [27].**

Fabricantes reportan que este tipo de separadores presentan altas eficiencias conforme aumenta la velocidad pero rápidamente tienden a decaer si la velocidad disminuye, su uso es preferible cuando el proceso de separación es complicado, así como cuando se busca la separación entre un gas de alta densidad y un líquido de baja densidad y cuando las caídas de presión altas son tolerables durante el proceso.

Este tipo de dispositivos definen una nueva tecnología en cuestión de separación mecánica por lo que se encuentra en desarrollo continuo, basado en que son capaces de manejar rangos de velocidades más elevadas. Se distinguen de los separadores convencionales por hacer uso de la fuerza centrífuga generada por la acción giratoria de la corriente de alimentación, produciendo la disgregación de la mezcla y sus dimensiones menores implican mayor facilidad de construcción e instalación.



### 2.3.2 Separador vertical

Se encuentran dentro de la clasificación de separadores convencionales y presentan las siguientes características:

- Frecuentemente se usan cuando la mezcla a separar involucra relaciones vapor-líquido con mayor cantidad de vapor que de líquido, capaces de manejar grandes variaciones de flujo de vapor.
- Perfectos para mezclas que involucran partículas sólidas como arena, ya que, debido a su orientación la remoción resulta más fácilmente.
- Ideales para espacios con poca disposición, facilitan la instalación de instrumentación y accesorios de seguridad.
- Presentan facilidad para controlar los niveles de sustancias extraídas.
- Ofrecen menores formaciones de *slugs*<sup>7</sup>.
- Lamentablemente contienen en su interior elementos adicionales como eliminadores de neblina.
- Son más costosos que los separadores con configuración horizontal.

### 2.3.3 Separador horizontal

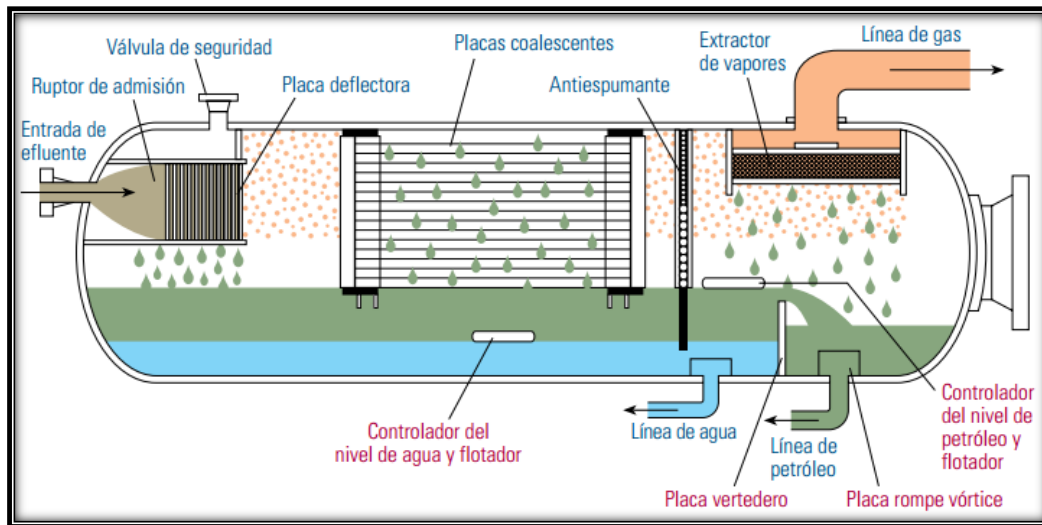
De igual forma se clasifican dentro de los separadores convencionales y se caracterizan por:

- Su uso frecuente en mezclas con bajas relaciones de vapor-líquido; es decir existe mayor cantidad de líquido en la mezcla.
- Adecuados para separaciones trifásicas (dos fases líquidas, una de vapor) o tetrafásicas en las que hay formación de espuma.
- Ideales para espacios reducidos verticalmente.
- Presentan mayor área superficial por lo que se puede llevar a cabo desgasificación.<sup>8</sup>
- Presentan facilidad para ejecutar rutinas de mantenimiento y supervisiones del equipo.
- Mayor factibilidad a formación de slugs.
- Al caer las partículas líquidas en forma perpendicular al flujo de vapor, la separación en la zona de asentamiento resulta más fácil.
- Preferibles para rangos de flujo altos ya que evitan problemas de vibración.
- Frecuentemente su uso se ve reflejado en la industria petrolera; una configuración para este tipo de separaciones se muestra en la figura 35.

---

<sup>7</sup> Formación de tapones en la tubería debido a burbujas de gas.

<sup>8</sup> Operación de extracción de los gases contenidos en algún líquido.



**Figura 35. Separador horizontal para separación de petróleo [28].**

### 2.3.4 Ventajas y desventajas del separador centrífugo.

Anteriormente se ha mencionado que este tipo de separadores presentan una eficiencia alta respecto a otros equipos (separadores horizontales o verticales), de igual forma se enlistó que los separadores tipo horizontal son recomendados para rangos de flujo alto y uno de sus usos más comunes se presenta en la separación de hidrocarburos.

En el caso particular de este trabajo, la separación a realizar es de vapor en una corriente de agua, la cual es una mezcla de flujo bajo por lo que no es adecuado pensar en la selección de un separador horizontal; al ser el vapor una fase inmersa en el líquido se deberá asegurar con la separación la eliminación de las pequeñas gotas de líquido que pueda contener la corriente de vapor debido a efectos de arrastre; por lo que el proceso manifiesta cierta similitud a una eliminación de partículas en una corriente, sin embargo, seleccionar un separador vertical no es lo más idóneo, ya que estos manejan flujos en los que la corriente de vapor es mayor y no es lo que presenta en el caso de estudio.

Por otro lado, con base en los antecedentes exhibidos en los se aprecia que a lo largo del desarrollo de las plantas geotermoeléctricas los separadores centrífugos han presentado un buen desempeño y a sus múltiples ventajas, fue seleccionado un separador centrífugo con configuración entrada tangencial y descarga axial, el cual se dimensionó y evaluó respecto a las condiciones de trabajo del ciclo propuesto, con la finalidad de evaluar su eficiencia; los cálculos se presentarán en el siguiente capítulo.



DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SEPARADOR DE FLUJOS PARA  
UN CICLO DE GENERACIÓN GEOTERMOELÉCTRICA.



A continuación se enlistan las ventajas y desventajas del equipo seleccionado:

*Ventajas:*

- ✓ Principio de operación sencillo, (empleo de fuerza centrífuga).
- ✓ Son considerados robustos y compactos al no poseer partes móviles en su interior.
- ✓ Presentan facilidad para llevar a cabo mantenimientos en el equipo.
- ✓ Su inversión es baja al igual que sus costos de mantenimiento.
- ✓ Son ideales para espacios reducidos.
- ✓ Son operables a condiciones extremas de presión y temperatura, característica que a su vez está en función del material de construcción. Por ejemplo, dispositivos de este tipo construidos con acero al carbono permiten temperatura máximas de operación aproximadamente a 800°C.
- ✓ Variabilidad en la selección de materiales para su construcción, es importante conocer el servicio para el que se requiere el equipo: acero, aleaciones, aluminio, plástico, etc.
- ✓ En comparación con otros tipos de separadores, son capaces de disgregar de una mezcla partículas sólidas o líquidas.
- ✓ Los productos recolectados comúnmente son útiles y reutilizables.

*Desventajas:*

- ~ Son poco versátiles, ya que no se adaptan a cambios en las condiciones de operación.
- ~ Presentan desgaste en sus paredes internas debido a fricción por partículas sólidas, por lo que se equipan para disminuir deterioros; frecuentemente se colocan mallas tipo hexagonal recubiertas con cemento, teflón como repelentes de partículas o son sometidos a electro pulido que además de evitar incrustaciones aumenta la resistencia a la corrosión y evita desgaste por erosión.
- ~ Los rangos de pérdidas de presión en el equipo son mayores respecto a otros dispositivos de separación convencionales.
- ~ No son recomendados para grandes producciones debido a que son sensibles a cambios de razón de flujo.







---

### **Capítulo 3. Marco conceptual para el diseño del dispositivo.**

---

En este capítulo, se presenta la teoría empleada para diseñar el separador centrífugo, así como los parámetros mediante los cuales se llevó a cabo su construcción final, cabe señalar que se enlistan aquellos que fundamentan el diseño y respaldan su factibilidad económica.



### 3.1. Parámetros considerados para el diseño propuesto.

Para lograr el diseño adecuado de un separador existen varios parámetros que deben ser evaluados, algunos de los más relevantes son:

- ✓ La calidad de vapor que ofrece el separador a la salida.
- ✓ La caída de presión que induce el dispositivo a la corriente.
- ✓ La facilidad de operación y limpieza.
- ✓ El espacio requerido para su disposición.
- ✓ Sus costos de construcción.

Como se especificó en el apartado anterior, el tipo de servicio para el cual se diseñará este dispositivo es la generación de electricidad mediante fluido geotérmico; servicio que sale de las aplicaciones comunes. Por lo tanto, es necesario tomar en cuenta las siguientes variables con las que se conjuntan todos los parámetros importantes involucrados en su diseño:

- La energía disponible que posee el fluido al entrar al recipiente deberá ser controlada.
- Los flujos de las fases deberán estar comprendidos dentro de los límites adecuados que permitan su separación a través de las fuerzas gravitacionales que actúan sobre la sustancia y que establezcan el equilibrio entre las fases gas-líquido.
- La turbulencia que se genere en la sección ocupada por el vapor, deberá ser minimizada.
- Las fases ya separadas no deberán estar en contacto.
- Las regiones del separador donde se pueda acumular líquido, deberán estar previstas de accesorios adecuados para efectuar su remoción.
- El dispositivo deberá contar con la instrumentación adecuada para su funcionamiento eficiente y seguro.

Para el diseño de equipos, en general se diferencian los parámetros requeridos en dos tipos de variables [29]:

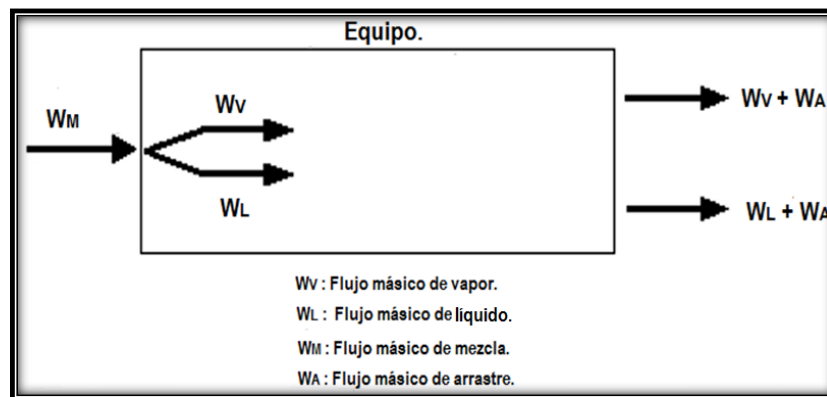
- I. Variables de operación: Relativo a las propiedades, relaciones y estados de las fases. Generalmente, la presión y la temperatura del separador son fijadas por la presión de entrada a la turbina, es importante señalar que la turbina entre más alejada se encuentre del pozo mayor será el rango de la presión de separación. La mezcla puede ser considerada dentro del separador en equilibrio, por lo que todas sus propiedades (presión, temperatura, densidad, viscosidad, etc.) son constantes.

- II. Variables de diseño: Relativo al tipo y dimensiones del ciclón.  
 En ciertos campos geotérmicos, se pueden encontrar pozos con gran producción de mezcla teniendo una muy alta relación vapor-líquido y producciones pequeñas con bajas relaciones vapor-líquido; por lo tanto el diseño debe hacer frente al problema de normalización del tamaño del separador a cabeza de pozo o diseñar dos o tres diferentes tamaños.

### 3.2 Teoría de separación para mezclas de vapor-líquido.

La teoría enlista los aspectos involucrados en el diseño que permiten llevar a cabo el proceso de separación independientemente de su aplicación. Algunas de las variables que se deben considerar indistintamente en el diseño son [29]:

- ❖ Eficiencia de separación ( $\eta_{ef}$ ) definida como: la relación del flujo másico de líquido separado respecto al flujo másico de arrastre.
- ❖ Calidad de vapor a la salida ( $X_o$ ) definida como: la relación del flujo másico de vapor de salida respecto al flujo másico de arrastre.



**Figura 36. Diagrama de flujo de las etapas de separación [29].**

Los términos anteriores, pueden ser definidos de la siguiente forma:

$$\eta_{ef} = \frac{w_L - w_A}{w_L} = \frac{\text{flujo másico de líquido} - \text{flujo másico de arrastre}}{\text{flujo másico de líquido}} \quad \{1\}$$



$$X_0 = \frac{w_v}{w_v + w_A} = \frac{\text{flujo másico de vapor}}{\text{flujo másico de vapor} + \text{flujo másico de arrastre}} \quad \{2\}$$

}

Sustituyendo la ecuación {1} en la ecuación {2}, es posible definir la calidad de vapor a la salida del proceso relacionada directamente con la eficiencia; es decir:

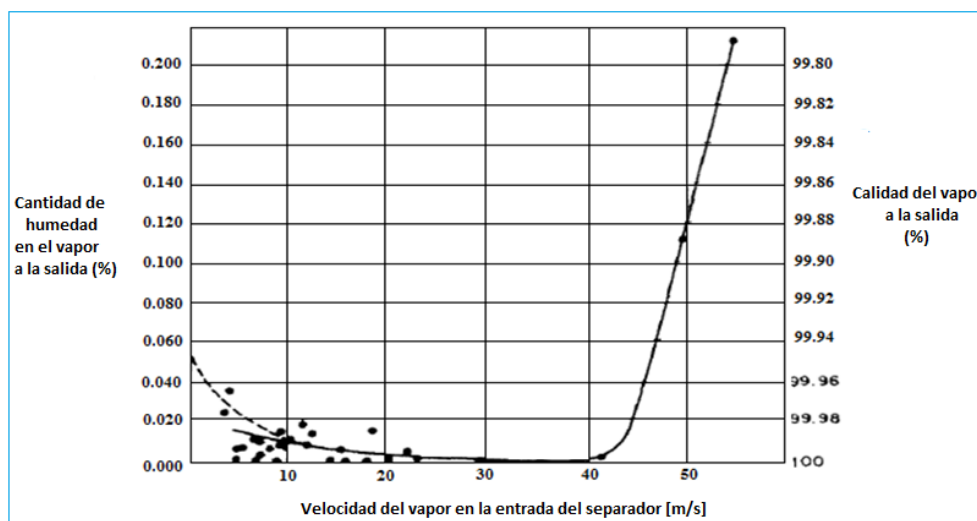
$$X_0 = \frac{w_V/w_L}{1 - \eta_{ef} + w_V/w_L} \quad \{3\}$$

Logrando de esta forma especificar que:

- i. Si  $\eta_{ef} = 0$  entonces  $X_0$  es la calidad de vapor de la entrada.
- ii. Si  $\eta_{ef} = 1$  entonces  $X_0 = \eta_{ef} = 1$  (único caso donde  $X_0 = \eta_{ef}$ )

Por otra parte, en la tabla 9 se puede observar que la calidad del vapor a la salida de un dispositivo donde se lleva a cabo un proceso de separación, será baja cuando la velocidad del vapor a la entrada y la velocidad del vapor ascendente (velocidad anular del vapor dentro del separador) sean bajas. Mientras que, al incrementarse ambas velocidades la calidad del vapor de salida, decrece drásticamente tendiendo a un estado conocido como “breakdown point”.

**Tabla 9. Rendimiento del separador [30].**



El rendimiento del separador se mide por la calidad del vapor a la salida (%) y la cantidad de humedad presente en el vapor a la salida (%) contra la velocidad del vapor en la entrada del separador [m/s].



DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SEPARADOR DE FLUJOS PARA  
UN CICLO DE GENERACIÓN GEOTERMOELÉCTRICA.



El “*breakdown point*” o punto de ruptura, es un concepto que se define mediante la velocidad de entrada del vapor y se presenta cuando la corriente ya separada se humedece en un rango del 0.5%. La máxima humedad aceptada en líneas de vapor que se dirigen a la casa de máquinas es de 1%, razón por la que el rango establecido para evaluar el punto de ruptura corresponde únicamente a la mitad, valor que fue propuesto por Merz y McLellan [23].

Con el fin de evaluar los errores experimentales que se pueden presentar en función de la definición propuesta, se realizaron un sinnúmero de pruebas en diferentes campos geotérmicos en las que se evaluaron cifras inferiores a la propuesta, con lo que se demostró que, sin importar el valor seleccionado (cifras inferiores al 0.5%) no existía gran diferencia, ya que la degradación del vapor se acelera rápidamente después de haber alcanzado el punto de ruptura y la humedad se incrementa.

Bangma aproximadamente en 1961 mediante diversas pruebas de campo, evaluó el rendimiento de los separadores demostrando lo antes mencionado. Los datos obtenidos de dicha experimentación se aprecian en la tabla 10 [23].

El rendimiento de separación en un equipo de tipo centrífugo, puede ser definido como el flujo másico máximo que el dispositivo separará y con el que producirá vapor seco. Es importante mencionar, que la proporción de vapor inmerso en la mezcla de entrada así como la presión de entrada, son parámetros que afectan directamente el rendimiento del equipo, por lo que deberán ser fijadas para llevar a cabo el diseño de un dispositivo de este tipo [23].

**Tabla 10. Porcentajes de calidad de vapor evaluadas en diferentes campos geotérmicos [29].**

<i>Ciudad donde se localizó el campo.</i>	<i>Localización del separador</i>	<i>Flujo másico de mezcla de entrada (kg/s)</i>	<i>Presión de separación (kPa abs)</i>	<i>Diámetro del separador (m)</i>	<i>Velocidad del vapor de entrada (m/s)</i>	<i>Calidad del vapor a la salida (%)</i>
Wairakei - Nueva Zelanda	44 Separador primario	87	1550	0.76	72	99.5
Otake - Japón	Separador secundario	22	~	~	55	99.925
Cerro Prieto - México	M-50 separador primario	72	853	1.37	37	99.991
Cerro Prieto - México	U-5 separador terciario	367	255	2.14	24	99.997
Cerro Prieto - México	U-5 separador secundario	377	441	2.14	16	99.999
Cerro Prieto - México	U-5 separador terciario	146	245	2.14	8	99.986



En el modelo que se presenta para definir la eficiencia de separación se asume que existen dos fenómenos independientes con influencia sobre ella, conocidos como eficiencia centrífuga ( $\eta_m$ ) y eficiencia de arrastre ( $\eta_A$ ), conceptos que se relacionan de la siguiente manera:

$$\eta_{ef} = \eta_m * \eta_A \quad \{4\}$$

Estos conceptos fueron utilizados en diversas experimentaciones encabezadas por Bangma [31], de las que reporto lo siguiente: la eficiencia centrífuga incrementará cuando la velocidad del vapor a la entrada aumente.

$$\eta_m \rightarrow 1 ; V_T \rightarrow \infty$$

Mientras que, la eficiencia de arrastre aumentará cuando la velocidad anular del vapor tienda a decrecer.

$$\eta_A \rightarrow 1 ; V_{AN} \rightarrow 0$$

A continuación se describen algunos de los parámetros y conceptos presentes en el proceso de separación mediante los cuales se evalúa la eficiencia de un dispositivo diseñado. Cabe señalar que son de suma importancia ya que la optimización del diseño estará en función de la alta calidad que el vapor presente a la salida del separador; característica que permite asegurar que después del proceso de separación únicamente se dirige vapor seco a la turbina.

### 3.2.1 Eficiencia centrífuga ( $\eta_m$ ).

Usando el mismo método de Leith y Licht (1972), la eficiencia centrífuga se define mediante la ecuación {5}

$$\eta_m = 1 - \text{EXP} \left[ -2(\Psi C) \frac{1}{2n+2} \right] \quad \{5\}$$

$$n_1 = 0.6689 * D_c^{0.14} \quad \{6\}$$

$$\frac{1 - n_1}{1 - n} = \left( \frac{294.3}{Tep \text{ separación} + 273.2} \right)^{0.3} \quad \{7\}$$



DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SEPARADOR DE FLUJOS PARA  
UN CICLO DE GENERACIÓN GEOTERMOELÉCTRICA.



$$\Psi = \frac{\rho_{\text{liq.Fluj}} * d_w^2 * (n + 1) * u}{18 * \mu_{\text{vap}} * D_c} \quad \{8\}$$

$$u = \frac{^{\circ}Q_{\text{mez}}}{A_o} \quad \{9\}$$

El parámetro “Ψ” está relacionado con el impacto centrífugo inercial, que refleja las condiciones de operación dentro del ciclón. La ecuación {8} muestra que “Ψ” es muy “sensible” a “d<sub>w</sub>” (diámetro de gota), por lo tanto, los cálculos de “d<sub>w</sub>” son necesarios para obtener resultados satisfactorios de “Ψ”.

Mientras tanto, el parámetro C es un número de diseño del ciclón, respecto a la forma física del ciclón definida por la ecuación {10}. Las demás variables se definen de la siguiente forma:

$$C = \frac{8 * K_c * D_c^2}{A_o} \quad \{10\}$$

$$A_o \approx A_e B_e \quad \text{Separador} \quad \{11\}$$

$$A_o = \frac{\pi D_T^2}{4} \quad \text{Secador} \quad \{11.1\}$$

$$K_c = \frac{t_r * ^{\circ}Q_{\text{mez}}}{D_c^3} \quad \{12\}$$

$$t_r = t_{mi} + t_{ma}/2 \quad \{13\}$$

$$t_{mi} = \frac{VO_s}{^{\circ}Q_{\text{vap}}} \quad \{14\}$$



$$VO_s = \frac{\pi}{4} (D_c^2 - D_e^2) * z \quad \{15\}$$

$$t_{ma} = \frac{V_{OH}}{Q_{Vap}} \quad \{16\}$$

$$VO_H \cong VO_1 + VO_2 - VO_3 \quad \{17\}$$

$$VO_1 = \frac{\pi * D_c^2}{4} * \alpha \quad \{18\}$$

$$VO_2 = 0.081 * D_c^3 \quad \{19\}$$

$$VO_3 = \frac{\pi * D_e^2}{4} (\alpha + 0.169 * D_c) \quad \{20\}$$

### 3.2.2 Diámetro de gota ( $d_w$ ).

Anteriormente se mencionó que el parámetro  $\Psi$  está definido de tal forma que depende de varios parámetros, entre los más relevantes se encuentra: el diámetro de gota ( $d_w$ ) y la velocidad tangencial de entrada de gota en la pared del ciclón ( $u$ ). Por simplicidad, para el modelo que aquí se presenta, se asume que ( $u$ ) puede considerarse como el promedio de la velocidad del vapor en la entrada; mientras que ( $d_w$ ) se puede valorar como el diámetro de gota promedio dentro del ciclón.

El diámetro de gota, es uno de los parámetros que impacta directamente con la eficiencia del separador, ya que si la gota sufre variaciones en su dimensionamiento, el valor de la eficiencia decrecerá rápidamente; por lo tanto es importante saber las causas que ocasionan dicha variación.

En el presente trabajo se consideró que el tamaño de la gota dentro del separador está determinado por el diámetro que la gota presenta en la tubería empleada para la entrada de la mezcla; este último a su vez está determinado por el equilibrio entre la fuerza inercial y las fuerzas de superficie, así como por el equilibrio entre gotas que salen y las que llegan a la pared del separador, la caída de presión, el tipo de patrón de flujo bifásico que se maneja durante el proceso y la configuración de las líneas de tubería.





DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SEPARADOR DE FLUJOS PARA  
UN CICLO DE GENERACIÓN GEOTERMOELÉCTRICA.



Se evaluaron numerosas configuraciones en las que se considerarán todos los factores antes mencionados, sin embargo los resultados obtenidos fueron desfavorables. Fue hasta que Nukiyama – Tanasawa (1938) formuló una ecuación que al ser evaluada, los resultados obtenidos presentaban una tendencia favorable, probablemente al hecho de que su ecuación considera el mecanismo de ruptura de garganta de un venturi que se asimila al mecanismo de ruptura presente en un sistema de tubería con líquido - vapor [29].

Tomando ésta ecuación como la relación básica para la evaluación del tamaño de gota, se modificó agregándole diferentes términos en los que se consideran los efectos característicos del proceso. Los datos empleados fueron obtenidos del banco experimental de los separadores a cabeza de pozo que en ese entonces se empleaban, entre los más importantes se encuentra:

- El 100% ó 99.99% de calidad de vapor a la salida ( $\eta_A = 1$ )

Considerando la calidad de vapor a la salida y las ecuaciones definidas anteriormente {3-20} en las que todos los parámetros son conocidos excepto “ $d_w$ ” se logró obtener la siguiente ecuación:

$$d_w = \frac{A}{V_T^a} \sqrt{\frac{\sigma_{\text{flujo}}}{\rho_{\text{liq.Flujo}}}} + BK \left[ \frac{\mu_{\text{liq}}^2}{\sigma_{\text{flujo}} * \rho_{\text{liq.Flujo}}} \right]^b \left[ \frac{Q_{\text{liq}}}{Q_{\text{mez}}} \right]^c V_T^e \quad \{21\}$$

Dónde:

$$V_T = \frac{4 * Q_{\text{mez}}}{\pi * D_{\text{tr}}^2} \quad \{22\}$$

Considerando los siguientes valores:

$$\begin{aligned} A &= 66.2898 & K &= 1357.35 \\ b &= 0.2250 & c &= 0.5507 \end{aligned}$$



Mientras que las variables:  $a$ ,  $e$ , y  $B$  dependen del tipo de patrón de flujo bifásico que se esté empleando a la entrada del proceso. De acuerdo al mapa de Baker los patrones posibles que se pueden presentar son los que se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 11. Parámetros en función del patrón de flujo [29].**

<i>Tipo de patrón en flujo de dos fases.</i>	<b>a</b>	<b>B</b>	<b>e</b>
Estratificado y ondulado	0.5436	$94.9042 * (XS)^{-0.4538}$	0.0253
Anular	0.8069	$98.7749 * (XS)^{0.2628}$	-0.2188
Disperso y de burbujas	0.8069	$140.8346 * (XS)^{0.5747}$	-0.2188
Tapon y estancamiento	0.5436	$37.3618 * (XS)^{-6.88*10^{-5}}$	0.0253

Cabe aclarar que la ecuación {21} con todos los parámetros de los que depende requiere se cambien ciertas unidades para ser dimensionalmente coherente, por lo tanto, deberá ser usada con las siguientes dimensiones;  $\rho_{liq.Fluj0}$  en  $[g/cm^3]$ ,  $V_T$  en  $[m/s]$ ,  $\sigma_{fluj0}$  en  $[dina/cm]$ ,  $\mu_{liq}$  en poises  $[P]$  y  $Q_{liq}$  y  $Q_{mez}$  en  $[m^3/s]$ , obteniendo así, el resultando del diámetro de gota en micras.

### 3.2.3 Eficiencia de arrastre ( $\eta_A$ ) .

El término descrito anteriormente referente a la eficiencia centrífuga no es suficiente para abarcar en su totalidad los términos involucrados que predicen la calidad de vapor a la salida, debido a que ( $\eta_m$ ) siempre incrementa a razón de que incrementa la velocidad de vapor a la entrada ( $V_T$ ) . Sin embargo, se sabe que en algún punto determinado el arrastre que la corriente sufre se incrementa drásticamente debido a las altas velocidades que alcanza la mezcla dentro del dispositivo, es por ello que se debe incluir el término que relacione lo anterior. Definido como eficiencia de arrastre ( $\eta_A$ ) se define mediante la siguiente ecuación:

$$\eta_A = 10^j \quad \{23\}$$

$$j = -3.384 (10^{-14})(V_{AN})^{13.9241} \quad \{24\}$$



$$V_{AN} = \frac{4 * \text{°}Q_{mez}}{\pi (D_c^2 - D_e^2)} \quad \{25\}$$

$$0 \leq \eta_A \leq 1 \quad \{26\}$$

Con la finalidad de evaluar la ecuación anteriormente planteada, se realizaron mediciones experimentales con separadores que se empleaban, obteniendo una diferencia absoluta entre la calidad de vapor de salida experimental medida y la predicha por la ecuación sugerida, aproximadamente del 0.005%.

### 3.2.4 Caída de presión.

Mediante la consulta de diversas ecuaciones que relacionan la caída de presión en equipos generales de separación, Lazalde propone finalmente que en un separador diseñado específicamente para aplicaciones geotérmicas la caída de presión puede ser evaluada mediante la siguiente ecuación [29]:

$$\Delta P = \frac{(NH) (u^2)(\rho_{vap.Fluj})}{2} \quad \{27\}$$

Donde "NH" se calcula de la siguiente manera:

$$NH = 16 \frac{A_e B_e}{D_e^2} \quad \{28\}$$

### 3.2.5 Correlaciones geométricas para el diseño final del equipo.

Mediante las ecuaciones planteadas a lo largo de este capítulo y los parámetros enlistados en la tabla 12, se pueden obtener ciertas correlaciones que definen la geometría del equipo y su desempeño; la figura 37 muestra la nomenclatura de los parámetros involucrados para finalizar el diseño del dispositivo.



Es importante recordar que el procedimiento de diseño presentado en este capítulo, se utiliza para dos equipos similares: los separadores de agua-vapor y los secadores de vapor, que se utilizan ampliamente en la industria de generación eléctrica mediante recursos geotérmicos; es por ello que la figura 37 señala la nomenclatura para los dos equipos.

Estos dos equipos se diferencian particularmente en que el separador tiene una entrada en espiral con un cambio en la sección transversal de forma cilíndrica a forma rectangular en la entrada; mientras que el secador tiene una entrada tangencial de sección transversal constante y no tiene una salida de líquido.

#### Recomendaciones Generales.

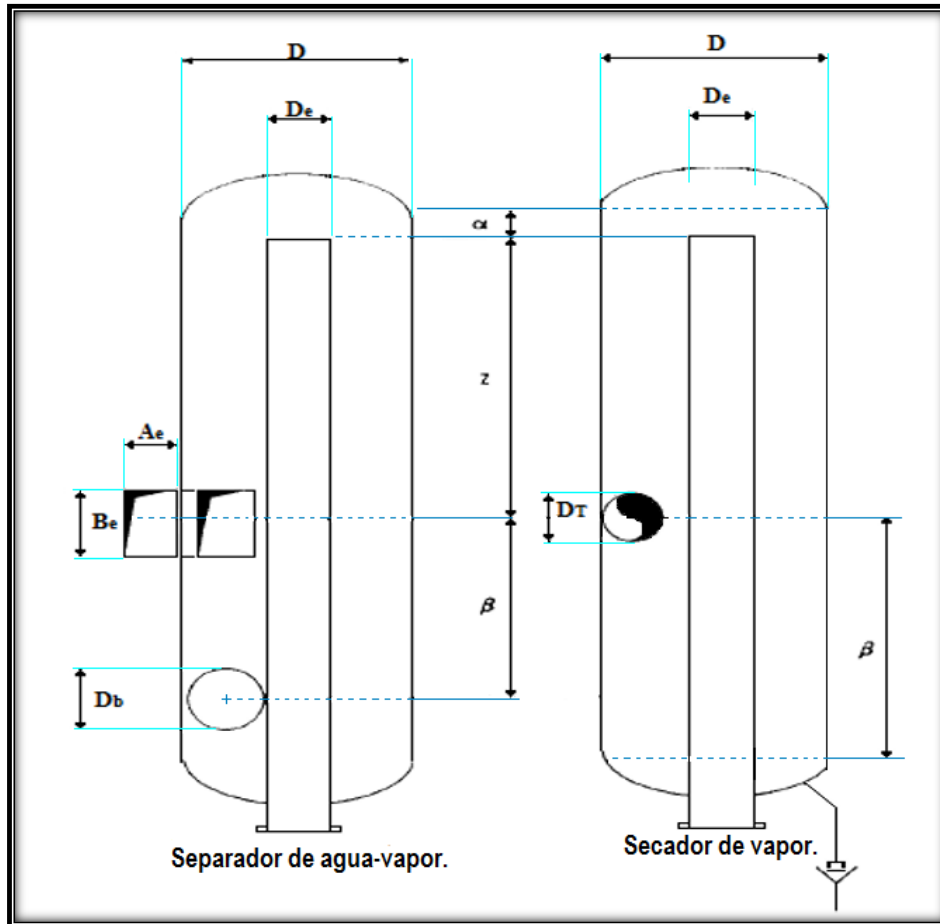
- i. Para separadores, la entrada debe ser del tipo espiral rectangular, y el piso de la espiral deberá tener un ligero descenso justo a la entrada del ciclón, para promover que el agua fluya hacia abajo más rápidamente la inclinación debe ser aproximadamente de  $4^\circ$  [23].
- ii. El tubo de salida de vapor deberá ser tan largo como sea posible, aun dentro de la parte superior del equipo. La única limitación es que el área entre el fin de este tubo (borde) y la pared de la parte superior deberá ser mínimo igual al área transversal de este tubo. Se recomienda 1.25 veces el área transversal. Esta es una práctica común en México (desarrollado por el staff de Cerro Prieto) y ha dado resultados excepcionales porque el tiempo de residencia es incrementado y la posibilidad de que el agua transite hacia el tubo de salida de vapor, es disminuida.
- iii. El diámetro de la tubería de salida de vapor ( $D_e$ ) deberá ser igual al diámetro de la tubería de entrada de la mezcla ( $D_t$ ).
- iv. El diámetro de la tubería de salida del agua ( $D_b$ ) deberá ser igual al diámetro de la tubería de entrada de la mezcla ( $D_t$ ).

#### Recomendaciones para parámetros de diseño.

El autor Hugo Lazalde [29], al final de su investigación reporta una serie de parámetros recomendados para la construcción de separadores con aplicación específica en la geotermia; los rangos de estas recomendaciones se muestran en la tabla 12.

**Tabla 12. Parámetros recomendados para separadores geotérmicos [29].**

<i>Parámetro</i>	<i>Separador</i>
Velocidad máxima de vapor en la tubería de entrada de la mezcla.	45 [m/s]
Rango recomendado de velocidad de vapor en la tubería de entrada de la mezcla.	25 - 40 [m/s]
Máxima velocidad anular ascendente de vapor en el interior del separador.	4.5 [m/s]
Velocidad anular ascendente de vapor recomendada en el interior del separador.	2.5 - 4.0 [m/s]
$R1 = D_c / D_t$	3.3
$R2 = D_e / D_t$	1
$R3 = D_b / D_t$	1
$R4 = \alpha / D_t$	-0.15
$R5 = \beta / D_t$	3.5
$R6 = z / D_t$	5.5



**Figura 37. Diagrama esquemático del dimensionamiento geométrico de un separador y un secador [29].**





---

#### **Capítulo 4. Memoria de cálculos y análisis de resultados. (Implementación del equipo)**

---

En el presente capítulo se muestra el análisis térmico realizado para el ciclo propuesto, con el fin de conocer las solicitaciones bajo las cuales se dimensionará el equipo en el que se especializa este trabajo, es decir un separador de flujos tipo centrífugo. Se presenta paso a paso, la metodología empleada con sus respectivos cálculos mediante los cuales fue posible obtener: el dimensionamiento final del equipo, valores de eficiencia y modelos 3D, a través de los que se obtendrán planos para la construcción del dispositivo.





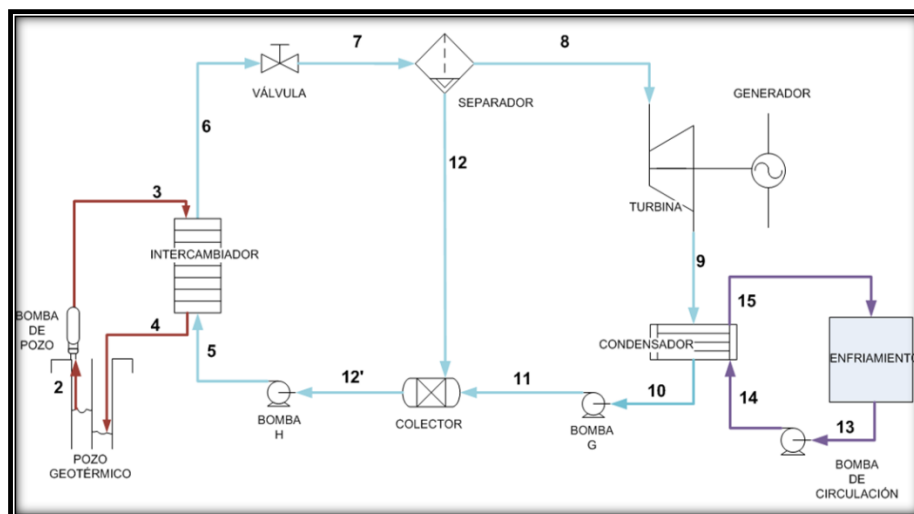
#### 4.1 Análisis termodinámico del ciclo “CBEI” y especificación del estado de interés.

Como se mencionó en el capítulo 2, el ciclo propuesto que lleva por nombre CBEI, se caracteriza por evitar el contacto directo del fluido geotérmico con los equipos adicionales al intercambiador de calor que conforman el ciclo. Su modificación consiste en la adición de los equipos que conforman el “sistema de generación de vapor” y la sustitución de un intercambiador de tubo y coraza por uno de placas.

El sistema de generación de vapor, se conforma por dos elementos principales en los que se debe prestar suma atención para su caracterización termodinámica, ya que la generación se realiza sin ningún suministro adicional de energía. Uno de ellos es la placa orificio que provoca una caída de presión en la corriente de flujo formando así burbujas de vapor, dando origen a la evaporación como consecuencia de la disminución de temperatura respecto a la presión; mientras que el separador con un sencillo funcionamiento mecánico dispone únicamente del vapor formado por la estrangulación realizada en la placa.

Para lograr entender físicamente y termodinámicamente el proceso de la generación de vapor se requiere realizar un análisis del ciclo, en el que se obtengan rangos de los estados termodinámicos teóricos y conocer las solicitaciones requeridas para el dimensionamiento del separador.

En la figura 38, se muestra la disposición que presentan los equipos dentro del ciclo, con la finalidad de visualizar los procesos que lo conforman y en específico identificar el estado en el que se localiza el separador.



**Figura 38. Disposición de los equipos que conforman el ciclo CBEI.**



DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SEPARADOR DE FLUJOS PARA  
UN CICLO DE GENERACIÓN GEOTERMOELÉCTRICA.



Mientras que las solicitaciones requeridas que se deben obtener del análisis térmico del ciclo son:

- Temperatura de separación.
- Presión de separación.
- Flujo de mezcla.

El análisis termodinámico del ciclo, se elaboró creando una hoja de cálculo con el apoyo de una base de datos conocido como *REFPROP*. Programa desarrollado por el Instituto Nacional de Estándares y Tecnologías (NIST), que ofrece tablas y gráficos con las propiedades termodinámicas de los fluidos industrialmente más importantes, así como también las de algunas mezclas de refrigerantes. Su funcionamiento se basa en la creación de macros que mediante modelos de fluidos y mezclas, permiten ejecutar rutinas de forma fácil y rápida para la obtención de valores numéricos de diferentes propiedades termodinámicas de uno o varios estados, especificando alguna propiedad involucrada como puede ser presión o temperatura [32].

Razón, por la que fue posible la obtención de propiedades teóricas de mezcla involucradas en la placa orificio y en el separador de flujos, así como los valores de cada uno de los estados presentes en el ciclo. El análisis del ciclo se encuentra adjunto en el apéndice 1 para una mejor apreciación de los datos obtenidos.

Vale la pena señalar que para realizar dicho análisis, se especificó la potencia que generará el ciclo ya que ésta, es la que rige las dimensiones de los equipos; es decir, entre mayor potencia se solicite en el ciclo mayores serán las dimensiones de los equipos que lo conforman.

La potencia bruta a generar, especificada en la hoja de cálculo del ciclo corresponde a 3.00 kW; se plantea reducida con la finalidad de obtener rangos de las propiedades termodinámicas que puedan ser reproducidas fácilmente. Lo anterior, con la finalidad de crear un modelo experimental por medio de la construcción de un ciclo piloto, en el que se pruebe el rendimiento y dimensionamiento de los equipos que conforman el sistema de generación de vapor respecto a los datos obtenidos teóricamente.

Las solicitaciones obtenidas mediante el análisis térmico, específicamente para el estado en el que se localiza el separador correspondiente al estado térmico 7 de la hoja de cálculo (apéndice 1) son:

- Temperatura de separación: 100.43°C.
- Presión de Separación: 103 kPa.
- Flujo de mezcla total: 0.139 kg/s.
- Entalpía de mezcla: 576.30 kJ/kg.



## 4.2 Variables requeridas para el diseño, calculadas a partir del análisis termodinámico.

Con el valor de la presión de separación y con ayuda de la base de datos (REFPROP), se calcularon los valores de: temperatura de separación, entalpías para cada una de las fases que conforman la mezcla y sus volúmenes específicos correspondientes. Mientras que con el valor de la temperatura de separación se obtuvieron los datos correspondientes de: densidad y viscosidad para cada fase, tensión superficial del flujo o mezcla. Conjunto de variables adicionales requeridas para efectuar la metodología presentada en el capítulo 3, los valores obtenidos se enlistan dentro de la hoja de cálculo, reportándose lo siguiente para cada uno:

**Tabla 13. Variables requeridas para la metodología de diseño.**

<i>Datos del flujo</i>		
h mez	Entalpia de mezcla [kJ/kg]	576.3047
Psep	Presión de separación [kPa]	103
°m mez	flujo de mezcla o total [Kg/s]	0.1393
Vtp	Velocidad de entrada de vapor [m/s]	35

<i>Variables definidas</i>		
ρ aire	Densidad del Aire [kg/m <sup>3</sup> ]	1.23
ρ agua	Densidad del Agua [kg/m <sup>3</sup> ]	1000
σ agua	Tensión Superficial del Agua [N/m]	0.07275
μ agua	Viscosidad del Agua [Pa*s]	0.001002

<i>Calculos obtenidos mediante REFPROP</i>		
Tem Sep	Temperatura de separación [°C]	100.4343
h vap	Entalpía de Vapor [kJ/kg]	2676.2546
h liq	Entalpía de Líquido [kJ/kg]	420.9983
μ vap	Viscosidad de vapor [kg/m*s]	0.000012247
μ liq	Viscosidad de liquido [kg/m*s]	0.0002803
σ flujo	Tensión Superficial flujo [N/m]	0.05883
Vvap	Volumen especifico de vapor [m <sup>3</sup> /kg]	1.64774
Vliq	Volumen especifico de liquido [m <sup>3</sup> /kg]	0.0010438
ρ vap. Flujo	Densidad de Vapor Flujo [kg/m <sup>3</sup> ]	0.60689
ρ líq. Flujo	Densidad de Líquido Flujo [kg/m <sup>3</sup> ]	958.0369
Vmezcla	Volumen especifico de la mezcla [m <sup>3</sup> /kg]	0.11444
ρ mezcla	Densidad de mezcla [kg/m <sup>3</sup> ]	8.73804

Nota: La velocidad de entrada de vapor se especificó en un rango de 35 m/s, considerando las recomendaciones presentadas en el capítulo anterior. (Sección 3.3 - tabla 12.).



### 4.3 Cálculos para el dimensionamiento del separador.

A continuación se presenta el procedimiento para el diseño de un separador de flujo, basado en las ecuaciones presentadas en el apartado anterior (cap. 3). Para abordar dichas ecuaciones primeramente se requiere calcular una serie de variables preliminares. Por otra parte, debe tenerse en cuenta que el diseño de separadores con aplicaciones geotérmicas, toma como base fundamental que la calidad de vapor a la salida debe ser aproximadamente 99.95%.

#### Cálculos Preliminares:

- Calidad de la mezcla a la entrada.

$$X_{mez} = \frac{h_{mez} - h_{liq}}{h_{vap} - h_{liq}} \quad \{29\}$$

$$X_{mez} = \frac{576.3047 - 420.9983}{2676.2546 - 420.9983} = 0.0688 = 7\%$$

- Flujo volumétrico de vapor.

$${}^{\circ}Q_{vap} = {}^{\circ}m_{Mez} * X_{mez} * V_{vap} \quad \{30\}$$

$${}^{\circ}Q_{vap} = 0.1393 * 0.0688 * 1.64774 = 0.0158 [m^3/s]$$

- Flujo volumétrico de líquido.

$${}^{\circ}Q_{liq} = {}^{\circ}m_{Mez} * (1 - X_{mez}) * V_{liq} \quad \{31\}$$

$${}^{\circ}Q_{liq} = 0.1393 * (1 - 0.0688) * 0.0010438 = 0.00014 [m^3/s]$$

- Flujo volumétrico de mezcla.

$${}^{\circ}Q_{mez} = {}^{\circ}m_{Mez} * V_{mezcla} \quad \{32\}$$

$${}^{\circ}Q_{mez} = 0.139 * 0.11444 = 0.01594 [m^3/s]$$



Cálculos de diseño fase 1:

- Área de entrada.

$$A_e = \frac{Q_{mez}}{V_{tp}} \quad \{33\}$$

$$A_e = \frac{0.01594}{35} = 0.00046 [m^2]$$

- Diámetro de tubería aproximado.

$$D_{tub} = \left[ \frac{4A_e}{\pi} \right]^{0.5} \quad \{34\}$$

$$D_{tub} = \left[ \frac{4 * (0.00046)}{\pi} \right]^{0.5} = 0.0241 [m]$$

El objetivo del presente trabajo es proporcionar dimensiones adecuadas para la construcción del equipo, por lo que fue necesario escalar las medidas calculadas a diámetros de tubería estándar. El escalamiento se efectuó mediante la creación de una tabla de selección que forma parte de la hoja de cálculo en Excel, esta tabla contiene los valores estándar para tubería de acrílico y de cobre (apéndice 2). Las medidas de diámetros nominales internos de tubería de cobre correspondientes al tipo “M” y los pertinentes para tubería de acrílico son comparados con el valor proporcionado en milímetros de la ecuación {34}; la comparación se efectúa automáticamente en las 2 tablas y al final se reporta el valor nominal más aproximado encontrado en la tabla.

El cálculo de la ecuación {34} reporta un diámetro de tubería aproximado de  $D_{tub} = 24.08 [mm]$  valor que al ser comparado con los presentados en las tablas, reporta al final que los valores más cercanos a medidas nominales de tubería son respectivamente los siguientes:

- Tubería de cobre tipo “M” de 3/4”.
- Tubería de acrílico de 1”.

Considerando estos dos materiales como posibles opciones de construcción, los cálculos siguientes para obtener dimensiones geométricas del equipo y cálculos de rendimiento se realizaron para ambos materiales, con el fin de comparar cual brinda los mejores resultados en cuanto a eficiencia primordialmente y así seleccionar el material de construcción.



- Diámetro de tubería real.  
Obtenido de los datos referidos en las tablas correspondientes al valor de diámetro interior de cada tubería.

$$D_{tr \text{ Cobre}} = 0.0206 [m]$$

$$D_{tr \text{ Acrílico}} = 0.0194 [m]$$

- Área de entrada real.  
De la ecuación {34} despejando el área se obtiene:

$$A_r = \frac{\pi * D_{tr}^2}{4} \quad \{35\}$$

Sustituyendo los valores correspondientes a diámetros de tubería real se obtiene:

$$A_{r \text{ Cobre}} = \frac{\pi * (0.0206)^2}{4} = 0.0003 [m^2]$$

$$A_{r \text{ Acrílico}} = \frac{\pi * (0.0194)^2}{4} = 0.000296 [m^2]$$

- Velocidad de entrada real.  
De la ecuación {33}, despejando la velocidad se obtiene la siguiente ecuación:

$$V_{tr} = \frac{Q_{mez}}{A_r} \quad \{36\}$$

Sustituyendo valores de área real se calculó la velocidad de entrada real obteniéndose para cada caso:

$$V_{tr \text{ Cobre}} = \frac{0.01594}{0.0003} = 47.8297 [m/s]$$

$$V_{tr \text{ Acrílico}} = \frac{0.01594}{0.000296} = 53.9246 [m/s]$$

Los datos anteriores, enlistados en una tabla se pueden apreciar en el apéndice 3 y forman parte de la hoja de cálculo.



DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SEPARADOR DE FLUJOS PARA  
UN CICLO DE GENERACIÓN GEOTERMOELÉCTRICA.



Con el diámetro de tubería real y mediante las relaciones enlistadas al final de la tabla 12; se pueden calcular los diámetros y parámetros principales que definirán la geometría del equipo según la nomenclatura que se muestra en la figura 37 únicamente para equipos separadores vapor-agua geotérmicos. Obteniendo:

Diámetro del separador:

$$R1 = D_c/D_{tr} = 3.3 \quad \therefore D_c = 3.3 * D_{tr}$$

$$D_{c \text{ Cobre}} = 0.068 [m] \quad y \quad D_{c \text{ Acrílico}} = 0.064 [m]$$

Diámetro de la tubería de salida de vapor:

$$R2 = D_e/D_{tr} = 1.0 \quad \therefore D_e = 1.0 * D_{tr}$$

$$D_{e \text{ Cobre}} = 0.021 [m] \quad y \quad D_{e \text{ Acrílico}} = 0.019 [m]$$

Diámetro de la tubería de salida del agua:

$$R3 = D_b/D_{tr} = 1.0 \quad \therefore D_b = 1.0 * D_{tr}$$

$$D_{b \text{ Cobre}} = 0.021 [m] \quad y \quad D_{b \text{ Acrílico}} = 0.019 [m]$$

Parámetro  $\alpha$ :

$$R4 = \alpha / D_{tr} = -0.15 \quad \therefore \alpha = (-0.15) * D_{tr}$$

Es importante señalar que esta relación es negativa debido a la nomenclatura, como se aprecia en la figura 37 " $\alpha$ " está designado dentro del tubo que constituye al equipo y denota la distancia que debe tener el tubo interno del equipo respecto a donde termina la sección recta del tubo inferior.

$$\alpha_{\text{Cobre}} = -0.003 [m] \quad y \quad \alpha_{\text{Acrílico}} = -0.003 [m]$$

Parámetro  $\beta$ :

$$R5 = \beta / D_{tr} = 3.5 \quad \therefore \beta = 3.5 * D_{tr}$$

$$\beta_{\text{Cobre}} = 0.072 [m] \quad y \quad \beta_{\text{Acrílico}} = 0.068 [m]$$

Parámetro  $z$ :

$$R6 = z / D_{tr} = 5.5 \quad \therefore z = 5.5 * D_{tr}$$

$$z_{\text{Cobre}} = 0.113 [m] \quad y \quad z_{\text{Acrílico}} = 0.107 [m]$$

Los valores calculados de estas seis relaciones, forman parte de la hoja de cálculo, por lo que se presentan en una tabla apreciable en el apéndice 4.

#### 4.4 Dimensiones geométricas obtenidas para el separador.

Mediante las seis relaciones que se calcularon en la sección anterior, es posible reportar datos referentes al dimensionamiento del equipo; sin embargo solo especifican algunas de las secciones que se visualizan en la figura 37 presentadas por Lazalde en su trabajo [29].

Observando con detenimiento, se puede percibir que hay secciones del equipo que no están dimensionadas y que son relevantes. Debido a lo anterior y recordando que el objetivo de este trabajo es presentar un dimensionamiento completo del equipo; se propusieron analíticamente parámetros que en función de  $\alpha$  y  $\beta$  cubrieran las secciones restantes. Razón por la que el equipo final se evaluó con las relaciones que se presentan a continuación.

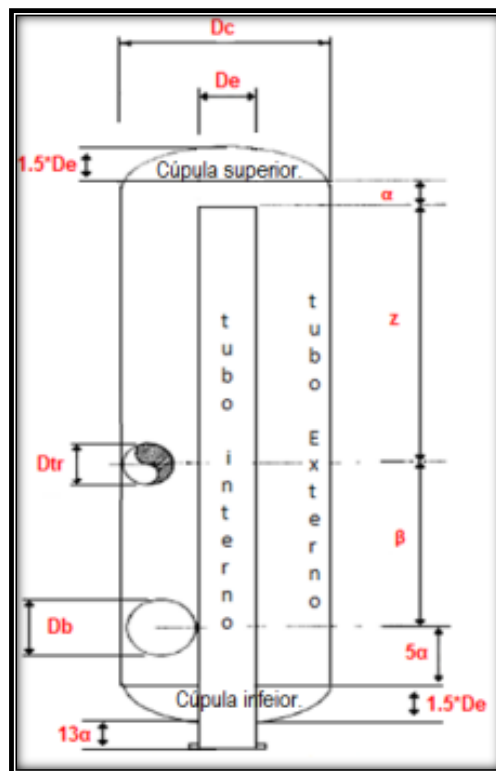


Figura 39. Diagrama con relaciones que dimensionarán el separador.





Dentro de la figura 40 se distinguen, los componentes del equipo:

- i. Tubo interno.
- ii. Tubo externo.
- iii. Dos cúpulas: una inferior y otra superior;

Estos componentes al ser evaluados con los datos obtenidos de las seis relaciones especificadas al final de la sección anterior y respetando la nomenclatura presentada en la figura 40 reportan los siguientes valores de dimensionamiento, logrando proporcionar la altura final aproximada del equipo.

**Tabla 14. Dimensionamiento final del separador para dos diferentes materiales de construcción.**

<i>Dimensionamiento de los componentes [m]</i>		
<i>Material de construcción</i>	<i>Cobre</i>	<i>Acrilico</i>
Tubo interno	0.2719	0.256
Tubo externo	0.204	0.192
Cúpula Superior.	0.031	0.029
Cúpula Inferior.	0.031	0.029
Altura del equipo	0.266	0.25

Finalmente las tuberías seleccionadas, siguiendo las recomendaciones mostradas en el apartado (3.2.5) serán para cada caso:

Cobre:

Diámetro del tubo de salida de Vapor = Diámetro de tubería real de entrada de la mezcla

$$D_e = D_{tr}$$

$$20.6 [mm] = 20.6 [mm]$$

Diámetro del tubo de salida del agua = Diámetro de tubería real de entrada de la mezcla

$$D_b = D_{tr}$$

$$20.6 [mm] = 20.6 [mm]$$

Diámetro del separador

$$D_c = 68 [mm]$$



Acrílico:

Diámetro del tubo de salida de Vapor = Diámetro de tubería real de entrada de la mezcla

$$D_e = D_{tr}$$

$$19.4 [mm] = 19.4 [mm]$$

Diámetro del tubo de salida del agua = Diámetro de tubería real de entrada de la mezcla

$$D_b = D_{tr}$$

$$19.4 [mm] = 19.4 [mm]$$

Diámetro del separador

$$D_c = 64 [mm]$$

#### 4.5 Cálculos de rendimiento fluido-dinámico del equipo.

Con la finalidad de evaluar todos los puntos presentados en la teoría y que a su vez sean parámetros numéricos mediante los cuales se pueda validar el dispositivo; a continuación se presentan los cálculos faltantes que cuantifican diferentes aspectos dentro del separador como: volúmenes, tiempos de la mezcla dentro del equipo, áreas y patrones de flujo presente. Finalmente se calculará la eficiencia del equipo dimensionado, así como la caída de presión teórica del dispositivo.

- Área transversal de entrada en la pared del separador.

La figura 37 muestra que para separadores de vapor-agua, la entrada debe ser en espiral con una sección transversal que corresponde al área de pared del separador, calculo definido por la ecuación {11}, que a su vez puede ser expresada de la siguiente manera:

$$A_o = A_e * B_e \approx (D_{tr})^2$$

$$A_{o \text{ Cobre}} \approx 0.0004243 [m^2] \quad y \quad A_{o \text{ Acrílico}} \approx 0.0003764 [m^2]$$



- Velocidad de gota tangencial.

Mediante el área, se puede calcular la velocidad tangencial de entrada que tendrá el flujo al estar en contacto con la pared del separador. Definida por la ecuación {9} anteriormente planteada, se obtienen los siguientes valores para velocidad tangencial de entrada:

$$u_{Cobre} = 37.565 [m/s] \quad y \quad u_{Acrílico} = 42.352 [m/s]$$

Parámetros requeridos para evaluar la eficiencia centrífuga.

Para calcular el valor de la eficiencia centrífuga, se deben obtener parámetros preliminares los cuales se enlistarán a continuación:

- Parámetro  $n_1$ .

Definido por la ecuación {6} que calculado reporta:

$$n_{1\ Cobre} = 0.459 [m] \quad y \quad n_{1\ Acrílico} = 0.455 [m]$$

- Coeficiente de vórtice libre.

Se obtiene despejando “n” de la ecuación {7} obteniendo los siguientes valores:

$$n_{Cobre} = 0.424 \quad y \quad n_{Acrílico} = 0.420$$

- Volumen del separador, definido por el parámetro de diseño “z”.

Definido por la ecuación {15}, que evaluada entrega los siguientes datos:

$$VO_{s\ Cobre} = 0.000373 [m^3] \quad y \quad VO_{s\ Acrílico} = 0.000312 [m^3]$$

- Tiempo promedio de residencia del vapor dentro del separador:

Definido por la ecuación {14} se obtiene:

$$t_{mi\ Cobre} = 0.024 [s] \quad y \quad t_{mi\ Acrílico} = 0.020 [s]$$



DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SEPARADOR DE FLUJOS PARA  
UN CICLO DE GENERACIÓN GEOTERMOELÉCTRICA.



- Volumen definido por el parámetro de diseño “ $\alpha$ ”.

Definido por la ecuación {18} que evaluado da a conocer un valor negativo, esto debido al uso del parámetro  $\alpha$  que es negativo:

$$VO_1_{Cobre} = -0.0000112 [m^3] \quad y \quad VO_1_{Acrílico} = -0.0000094 [m^3]$$

- Volumen definido por la ecuación {19}.

Evaluando la ecuación correspondiente notifica valores de:

$$VO_2_{Cobre} = 0.0000254 [m^3] \quad y \quad VO_2_{Acrílico} = 0.0000213 [m^3]$$

- Volumen definido por la ecuación {20}.

$$VO_3_{Cobre} = 0.00000280 [m^3] \quad y \quad VO_3_{Acrílico} = 0.00000234 [m^3]$$

- Volumen total, definido por la ecuación {17}.

$$VO_H_{Cobre} = 0.0000114 [m^3] \quad y \quad VO_H_{Acrílico} = 0.0000095 [m^3]$$

- Tiempo máximo adicional del vapor en el separador:

Definido por la ecuación {16} que evaluada entrega los valores de:

$$t_{ma_{Cobre}} = 0.000723 [s] \quad y \quad t_{ma_{Acrílico}} = 0.000604 [s]$$

- Tiempo de residencia:

Definido por la ecuación {13} se obtienen los siguientes valores:

$$t_r_{Cobre} = 0.024 [s] \quad y \quad t_r_{Acrílico} = 0.020 [s]$$



- Parámetro adimensional, definido por la ecuación {12}.

$$K_{C \text{ Cobre}} = 1.217 \quad \text{y} \quad K_{C \text{ Acrílico}} = 1.217$$

- Parámetro adimensional, definido por la ecuación {10}.

$$C_{\text{Cobre}} = 106.054 \quad \text{y} \quad C_{\text{Acrílico}} = 106.054$$

Los parámetros calculados anteriormente se encuentran dentro de la hoja de cálculo, reportando sus valores dentro de una tabla que puede observarse en el apéndice 5.

- Diámetro de gota.

En el apartado 3.2.2 se especificó que el diámetro de gota está vinculado con varios factores que se relacionan entre sí, además su valor afecta finalmente en el cálculo de la eficiencia del equipo. Algunos de los factores involucrados se especifican en función del patrón de flujo que se presente en la tubería, es por ellos que a continuación se presenta una breve descripción del mapa de régimen de patrón que se empleó y sus características, con la finalidad de entender el origen y la selección de algunos de estos parámetros.

La presencia de una corriente compuesta por dos fases, mejor conocida como mezcla dentro de una tubería, manifiesta dificultades para realizar cálculos precisos respecto a su comportamiento dentro de ella. Las primeras deducciones de su comportamiento fueron meramente experimentales, mas no fue hasta 1954 cuando Baker creo uno de los primeros mapas de regímenes de flujo (figura 40) que ayudaría a efectuar cálculos teóricos. Este mapa es uno de los más empleados sin embargo, para hacer uso de él es necesario conocer las posibles distribuciones que las dos fases presenten dentro de la tubería también referenciadas como sistemas de transporte.

En general, los mapas son utilizados con frecuencia tanto en la industria como en la investigación y se clasifican en función de la orientación en la que se desee o se requiera la instalación de los sistemas de transporte, es decir: horizontales, verticales o con ciertos grados de inclinación según su implementación.

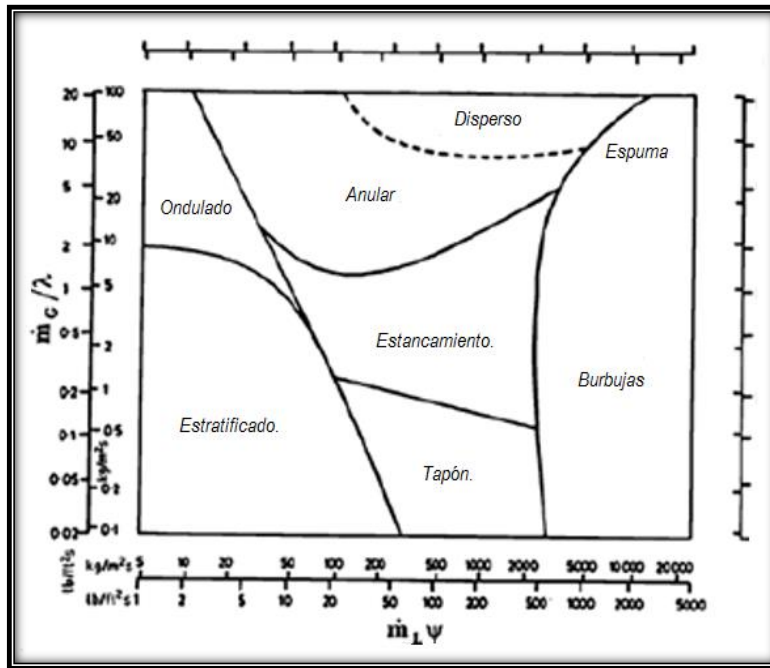


Figura 40. Mapa de régimen de flujo bifásico propuesto por Baker [29].

En el presente trabajo se utilizó el mapa de Baker para determinar los patrones de flujo presentes en el caso de estudio, ya que la orientación de los sistemas de transporte a utilizar es horizontal. El mapa está definido por los flujos máscicos de líquido y gas, así como por dos parámetros adimensionales correspondientes para cada fase, declarados de la siguiente forma:

$$\text{Parámetro de la fase gaseosa} \rightarrow \lambda = \left( \frac{\rho_{\text{vap.Flujo}} * \rho_{\text{liq.Flujo}}}{\rho_{\text{aire}} * \rho_{\text{agua}}} \right)^{1/2} \quad \{37\}$$

$$\text{Parámetro de la fase líquida} \rightarrow \Psi = \left( \frac{\sigma_{\text{agua}}}{\sigma_{\text{flujo}}} \right) \left[ \left( \frac{\mu_{\text{liq}}}{\mu_{\text{agua}}} \right) \left( \frac{\rho_{\text{agua}}}{\rho_{\text{liq.Flujo}}} \right)^2 \right]^{1/3} \quad \{38\}$$

Las relaciones requeridas para hacer uso del mapa de Baker son:  $\dot{m}_{\text{vap}}/\lambda$  y  $\dot{m}_{\text{Liq}}\Psi$  que pueden ser calculadas en unidades del sistema internacional SI y en unidades inglesas.



El diagrama describe 8 categorías de los posibles patrones presentes en flujos bifásicos, a continuación se muestra una pequeña descripción de cada uno de ellos para entender su comportamiento.

1. Flujo en burbujas (*Bubbly*).

En este tipo, burbujas se distribuyen en el flujo continuo de líquido que se concentran en la parte superior y conforme el vapor aumenta, la distribución de las burbujas es menos uniforme.

2. Flujo tapón (*Plug*).

Tipo “tapones” se crean por las burbujas de gran tamaño que tienden a ocupar cierta sección del tubo, mientras que en las secciones restantes se ocupa por líquido.

3. Flujo estratificado (*Stratified*).

En este tipo de flujo, el líquido fluye por la parte inferior del tubo, mientras que el gas circula por la parte superior.

4. Flujo ondulado (*Wavy*).

Se puede presentar en diferentes tipos de flujo como el estratificado y el anular. Se caracteriza por la formación de “olas” que viajan en la dirección del sentido del flujo, provocando una alteración entre ambas fases; fenómeno presente únicamente a altas velocidades.

5. Flujo de estancamiento (*Slug*).

El líquido dentro de la tubería, se distribuye de forma que crea una corriente de líquido “pegajosa”, que obstruye el tubo y se crean olas de gas en forma de burbujas alargadas.

6. Flujo anular (*Annular*).

Se presenta cuando se incrementa la velocidad del vapor, formando en el centro del tubo un núcleo de gas que estará rodeado de una capa de líquido en la periferia del tubo.

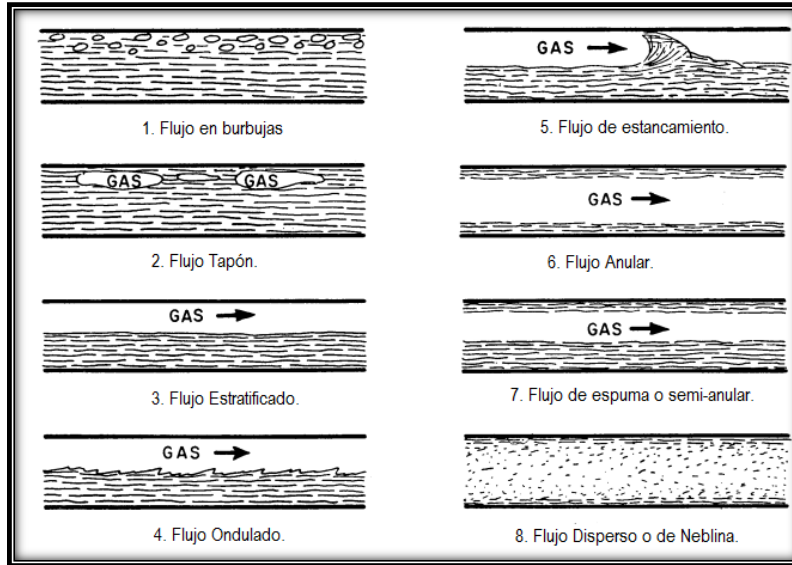
7. Flujo de espuma o semi-anular (*Froth*).

Este tipo es una variable del tipo anular y se presenta cuando se comienzan a formar los núcleos en el interior del tubo, por lo que se puede observar una formación de espuma en el flujo.

8. Flujo disperso o de neblina (*Dispersed*).

Se presenta cuando la fase de vapor es mayor que la fase líquida, ocupando el gas la mayor sección el tubo mientras que el líquido se transporta en forma de gotas distribuidas a lo largo de la tubería.

En seguida, se muestra una representación de cada uno de los flujos descritos anteriormente con el fin de visualizar el comportamiento de cada uno de ellos.



**Figura 41. Representación de los 8 tipos de patrón de flujo presentes en flujos bifásicos [33].**

Para conocer el tipo de flujo presente en el caso de estudio, primero se deben considerar las variables requeridas para calcular las relaciones con las que se ingresa al mapa de Baker. Los datos para evaluar los parámetros  $\lambda$  y  $\psi$  se enlistan dentro de la tabla 13, sustituyendo los valores correspondientes en las ecuaciones {37} y {38} se obtuvieron los siguientes valores:

$$\lambda = \left( \frac{0.60689 * 958.0369}{1.23 * 1000} \right)^{1/2} = 0.68753$$

$$\psi = \left( \frac{0.07275}{0.05883} \right) \left[ \left( \frac{0.0002803}{0.001002} \right) \left( \frac{1000}{958.0369} \right)^2 \right]^{1/3} = 0.83224$$

Las relaciones que nos proporcionarán las coordenadas para conocer el tipo de flujo especificado dentro del diagrama, se deben dividir entre el área transversal de entrada de la pared del separador, sin embargo primero se deben conocer los valores de los flujos correspondientes a cada fase, definidos mediante las siguientes ecuaciones:





DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SEPARADOR DE FLUJOS PARA  
UN CICLO DE GENERACIÓN GEOTERMOELÉCTRICA.



$$\dot{m}_{vap} = X_{mez} * \dot{m}_{mez} \quad \{39\}$$

$$\dot{m}_{liq} = \dot{m}_{mez} - \dot{m}_{vap} \quad \{40\}$$

Sustituyendo en cada ecuación los datos requeridos, se obtienen los siguientes valores de flujo en cada fase:

$$\dot{m}_{vap} = 0.06886 * 0.1393 = 0.00959 \text{ [kg/s]}$$

$$\dot{m}_{liq} = 0.1393 - 0.00959 = 0.12969 \text{ [kg/s]}$$

Para obtener las coordenadas, se evalúan las siguientes relaciones que ya han sido descritas anteriormente.

$$\frac{\dot{m}_{vap}}{\lambda} \quad \{41\}$$

$$\dot{m}_{liq} * \Psi \quad \{42\}$$

Obteniendo:

$$\frac{\dot{m}_{vap}}{\lambda} = \frac{0.00959}{0.68753} = 0.01395 \text{ [kg/s]}$$

$$\dot{m}_{liq} * \Psi = 0.12969 * 0.83224 = 0.10793 \text{ [kg/s]}$$

Como se mencionó anteriormente, estos valores deben ser divididos entre el área transversal, sin embargo, es importante aclarar que el área varía en función del material seleccionado para la manufacturar el equipo. Razón por la que al tener dos propuestas diferentes de material de construcción, al efectuar la división entre el área correspondiente de cada uno, se obtendrán dos coordenadas para cada material. Reportando los siguientes valores:

Coordenadas para Cobre.

$$coordenada \ x = \frac{\dot{m}_{liq} * \Psi}{A_{o \ Cobre}} = \frac{0.10793}{0.0004243} = 254 \text{ [kg/m}^2 * s\text{]}$$

$$Coordenada \ y = \frac{\dot{m}_{vap} / \lambda}{A_{o \ Cobre}} = \frac{0.01395}{0.0004243} = 33 \text{ [kg/m}^2 * s\text{]}$$



Coordenadas para Acrílico.

$$\text{coordenada } x = \frac{\rho_{\text{liq}} * \Psi}{A_{\text{O Acrílico}}} = \frac{0.10793}{0.0003764} = 287 \text{ [kg/m}^2 * \text{s]}$$

$$\text{Coordenada } y = \frac{\rho_{\text{vap}}/\lambda}{A_{\text{O Acrílico}}} = \frac{0.01395}{0.0003764} = 37 \text{ [kg/m}^2 * \text{s]}$$

Con los valores de las coordenadas respectivamente, se buscó dentro del mapa el tipo de régimen de flujo que se presenta. Se puede observar en la figura 43 que de acuerdo a lo estipulado por el mapa de Baker, el patrón de flujo bifásico presente en el caso de estudio corresponde al régimen de flujo tipo Anular, mismo para los dos casos evaluados.

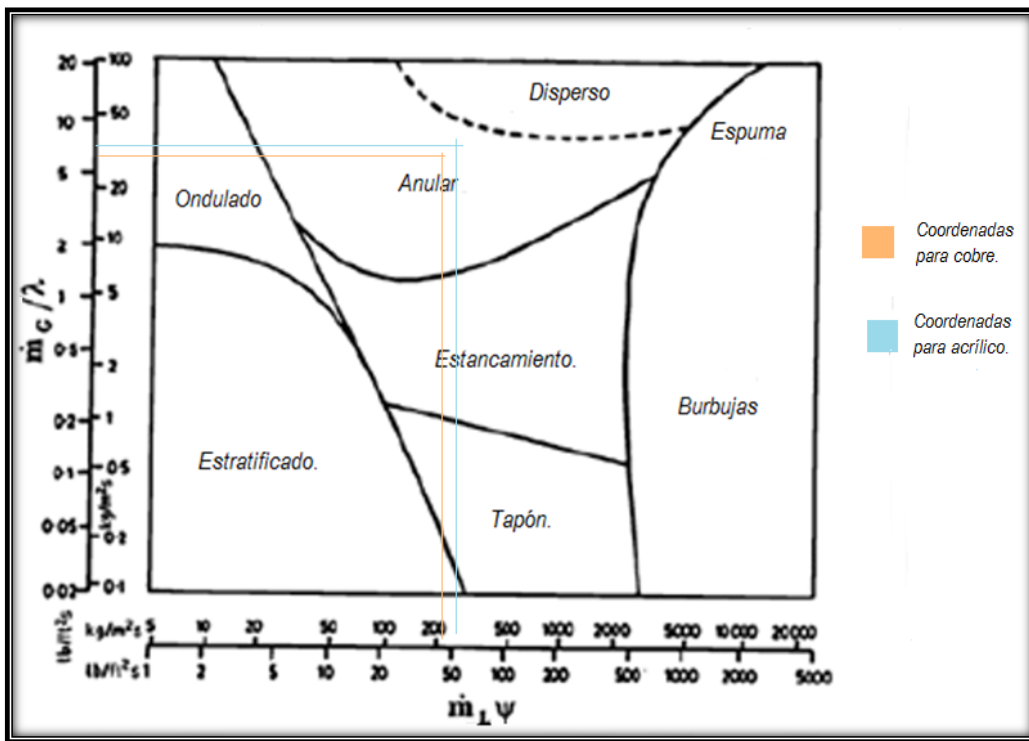


Figura 42. Evaluación de las coordenadas obtenidas para conocer el tipo de régimen de flujo presente.

Los cálculos presentados anteriormente, se reportan en una tabla dentro de la hoja de cálculo, apreciable en el apéndice 6.



DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SEPARADOR DE FLUJOS PARA  
UN CICLO DE GENERACIÓN GEOTERMOELÉCTRICA.



Conociendo el tipo de patrón de flujo, se pueden tomar de la tabla 11, los valores correspondientes para los coeficientes mediante los cuales se evaluará la ecuación que define el diámetro de gota. Siendo del tipo anular el comportamiento presente, los valores a considerar son:

Tipo de patrón de flujo	a	B	e
Anular	0.8069	98.7749*(XS) ^0.2628	-0.2188

Usando los valores anteriores, se puede calcular el diámetro de gota mediante la ecuación {21}, sin embargo se debe calcular primeramente el valor de la velocidad final definida por la ecuación {22}.

$$V_{T \text{ Cobre}} = \frac{4 * 0.01594}{\pi * (0.0206^2)} = 47.82974 \text{ [m/s]}$$

$$V_{T \text{ Acrílico}} = \frac{4 * 0.01594}{\pi * (0.0194^2)} = 53.92459 \text{ [m/s]}$$

Conociendo el valor de la velocidad y calculando mediante la base de datos (REFPROP) los valores de tensión superficial para el flujo así como la viscosidad y la densidad del líquido en el flujo, (valores que se pueden corroborar en el apéndice 7), se puede calcular finalmente el diámetro de gota, obteniéndose:

$$d_{W \text{ Cobre}} = \frac{66.2898}{(47.82974^{0.8069})} \sqrt{\frac{58.82812}{0.95804}} + (98.397 * 1357.35) \left[ \frac{0.002803^2}{58.82812 * 0.95804} \right]^{0.2250} \left[ \frac{0.00014}{0.01594} \right]^{0.5507} (47.82974^{-0.2188})$$

$$d_{W \text{ Cobre}} = 141.81074 \text{ [}\mu\text{m]}$$

$$d_{W \text{ Acrílico}} = \frac{66.2898}{(53.92459^{0.8069})} \sqrt{\frac{58.82812}{0.95804}} + (98.397 * 1357.35) \left[ \frac{0.002803^2}{58.82812 * 0.95804} \right]^{0.2250} \left[ \frac{0.00014}{0.01594} \right]^{0.5507} (53.92459^{-0.2188})$$

$$d_{W \text{ Acrílico}} = 136.61716 \text{ [}\mu\text{m]}$$



- Parámetro  $\Psi$ .

Parámetro calculado empleando el diámetro de gota. Sustituyendo en la ecuación {8} resulta:

$$\Psi_{Cobre} = \frac{958.0369 * (141.81074^2) * (0.424 + 1) * (37.565)}{18 * (1.225 \times 10^{-5}) * 0.068} = 6.87775 \times 10^{13}$$

$$\Psi_{Acrílico} = \frac{958.0369 * (136.61716^2) * (0.420 + 1) * (42.352)}{18 * (1.225 \times 10^{-5}) * 0.064} = 7.61925 \times 10^{13}$$

- Eficiencia Centrífuga.

Con los parámetros  $\Psi$  y C calculados anteriormente; se procede a evaluar la eficiencia centrífuga sustituyendo valores en la ecuación {5}, notifica el siguiente valor:

$$\eta_{m\ Cobre} = 1 - \text{EXP} \left[ -2 \left( (6.87775 \times 10^{13}) * (923.576) \right)^{\frac{1}{2(0.424)+2}} \right] = 1$$

$$\eta_{m\ Cobre} = 100\%$$

$$\eta_{m\ Acrílico} = 1 - \text{EXP} \left[ -2 \left( (7.61925 \times 10^{13}) * (980.558) \right)^{\frac{1}{2(0.420)+2}} \right] = 1$$

$$\eta_{m\ Acrílico} = 100\%$$

- Velocidad anular ascendente del vapor.

Calculada mediante la ecuación {25} entrega el siguiente resultado:

$$V_{AN\ Cobre} = \frac{4 * 0.01594}{\pi(0.068^2 - 0.021^2)} = 4.83617 \text{ [m/s]}$$

$$V_{AN\ Acrílico} = \frac{4 * 0.01594}{\pi(0.064^2 - 0.019^2)} = 5.45244 \text{ [m/s]}$$



- Parámetro “j”

Variable adimensional estimada mediante la sustitución de valores en la ecuación {24}.

$$j_{Cobre} = -3.384(10^{-14})(4.83617)^{13.9241} = -0.0001149$$

$$j_{Acrílico} = -3.384(10^{-14})(5.45244)^{13.9241} = -0.00061065$$

- Eficiencia de arrastre.

Determinada mediante la ecuación {23}, se obtiene un valor de:

$$\eta_{A\ Cobre} = 10^{-0.0001149} = .99974$$

$$\eta_{A\ Cobre} = 100\%$$

$$\eta_{A\ Acrílico} = 10^{-0.00061065} = .99859$$

$$\eta_{A\ Acrílico} = 100\%$$

- Eficiencia del separador

Calculada por la sustitución correspondiente de valores en la ecuación {4}, se obtiene una eficiencia del equipo de:

$$\eta_{ef\ Cobre} = \eta_m \eta_A = 0.99974$$

$$\eta_{ef\ Cobre} = 100\%$$

$$\eta_{ef\ Acrílico} = \eta_m \eta_A = 0.99859$$

$$\eta_{ef\ Acrílico} = 100\%$$

- Flujo másico de vapor.

Se consideró la siguiente ecuación para su cálculo.

$$W_v = \rho_m \text{mez} * X_{\text{mez}} \quad \{43\}$$

$$W_v = 0.1393 * 0.06886 = 0.00959 \text{ [kg/s]}$$



- Flujo másico de líquido.

Variable determinada por la siguiente ecuación:

$$W_L = \rho_m \text{mez} * (1 - X_{\text{mez}}) \quad \{44\}$$

$$W_L = 0.1393 * (1 - 0.06886) = 0.12969 \text{ [kg/s]}$$

- Calidad del vapor a la salida.

Estimada con ayuda de los dos parámetros anteriores; sustituyendo en la ecuación {3} se obtiene una calidad de vapor a la salida correspondiente a:

$$X_{0 \text{ Cobre}} = \frac{0.00959 / 0.12969}{(1 - 0.99974) + (0.00959/0.12969)} = 0.99643$$

$$X_{0 \text{ Cobre}} = 100\%$$

$$X_{0 \text{ Acrílico}} = \frac{0.00959 / 0.12969}{(1 - 0.99859) + (0.00959/0.12969)} = 0.98136$$

$$X_{0 \text{ Acrílico}} = 98\%$$

- Parámetro NH.

Definido por la ecuación {28}, el parámetro adimensional “NH” nos servirá para calcular la caída de presión, sin embargo un par de variables que lo determinan ( $A_e B_e$ ) se pueden calcular de forma distinta. En el apartado 4.5 se especificó para la velocidad tangencial a la entrada, que la ecuación {11} pueden estimarse mediante la siguiente aproximación:  $A_e B_e = D_{tr}^2$ . Razón por la que la ecuación {28} considerando esta relación se definirá de la siguiente forma:

$$NH = 16 \frac{D_{tr}^2}{D_e^2}$$

Evaluando de esta forma el parámetro “NH” se reporta el siguiente valor:

$$NH_{\text{ Cobre}} = 16 * \frac{0.0206^2}{0.021^2} = 16$$

$$NH_{\text{ Acrílico}} = 16 * \frac{0.0194^2}{0.019^2} = 16$$



- Caída de presión.

Determinada mediante la ecuación {27} se notifica:

$$\Delta P_{\text{Cobre}} = \frac{(16) (37.656^2) (0.60689)}{2} = 6.85137 \text{ [KPa]}$$

$$\Delta P_{\text{Acrílico}} = \frac{(16) (42.352^2) (0.60689)}{2} = 8.70874 \text{ [KPa]}$$

Los cálculos anteriores respecto a la velocidad final y hasta la caída de presión, se presentan enlistados dentro de una tabla que forma parte de la hoja de cálculo, apreciable en el apéndice 7.

#### 4.6 Construcción del primer prototipo.

Como se aprecia a lo largo de los apartados anteriores, los cálculos se desarrollaron considerando dos materiales como posibles opciones de construcción. Sin embargo, al analizar los datos obtenidos, se aprecia que el rendimiento del equipo evaluado respecto a la calidad del vapor a la salida, varía con una diferencia significativa del 1% respecto al tipo de material empleado. Razón por la que el cobre protagoniza el material de construcción más fidedigno, además de ser uno de los materiales con amplia facilidad de adquisición y proporcionar amplia adaptabilidad respecto a las medidas nominales de tubería requeridas, a pesar de las características favorables es el material más costoso y con propiedades térmicas que podrían afectar el comportamiento del equipo, motivo por el cual se decidió realizar un primer prototipo con acrílico.

El acrílico se consideró como una opción en función de las características que presenta, entre las más relevantes se encuentran las siguientes:

Se clasifica dentro de los plásticos de ingeniería, es un polímero termoplástico conocido como polimetilmetacrilato o por sus siglas como "PMMA". Los tubos de acrílico conforman una de sus tantas presentaciones y se obtienen mediante procesos de extrusión; se caracteriza por ser un material rígido, transparente, inerte a sustancias corrosivas y con una alta resistencia a agentes agresivos del medio ambiente lo que lo coloca como un material idóneo para aplicaciones al aire libre. Algunas de las características técnicas consideradas para su selección fueron:

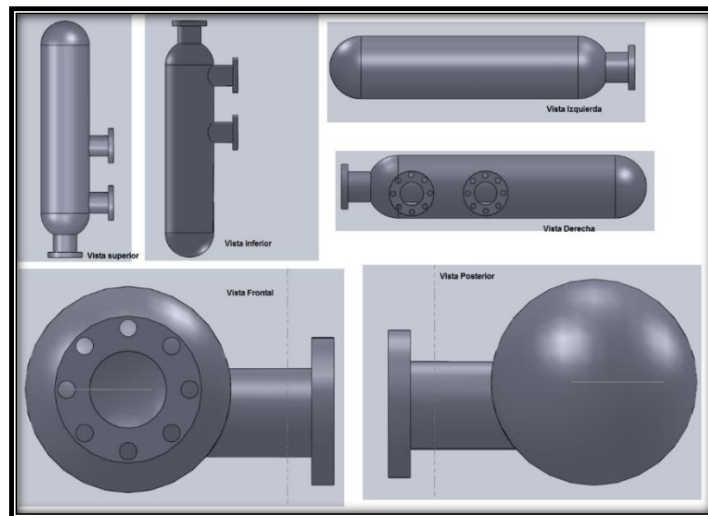
- Temperatura de formado: 170°C – 190°C.
- Temperatura máxima recomendadas 82 °C.
- Temperatura de auto-ignición 420°C – 490°C.

Es importante aclarar que la temperatura máxima recomendada enlistada anteriormente corresponde al rango especificado para placas, por lo que no es posible suponer el comportamiento del material en tubos de acrílico respecto a la temperatura a emplear. Suponiendo que la temperatura recomendada fuera la misma para tubería y teniendo presente el valor de la temperatura de separación ( $100.43^{\circ}\text{C}$ ) se tendrá una diferencia de  $18^{\circ}\text{C}$  aproximadamente, lo cual no represento en su momento una gran problemática ya que empleando este material se logró la construcción del primer prototipo de forma rápida y económica, además, gracias a sus características permitió visualizar el comportamiento del fluido dentro del equipo y evaluar empíricamente el desempeño del mismo.

Respecto a las consideraciones antes mencionadas, se procedió a realizar la aproximación de las dimensiones para tubería calculadas descritas en la sección 4.4, referente a medidas nominales proporcionadas por proveedores al mercado, logrando obtener los siguientes acercamientos:

- Para la tubería correspondiente a:  $D_e = D_b = D_{tr} = 19.4 [mm]$  la medida más cercana es de  $3/4" = 19.050 [mm]$  o  $49/64" = 19.447 [mm]$ , sin embargo en la industria del plástico y en específico la distribuidora donde se cotizo la obtención de material, la medida nominal de tubería de acrílico más aproximada únicamente fue tubería de 1", por lo que se tomó esta medida.
- Mientras que la tubería correspondiente al tubo exterior, que conformará el cuerpo del separador con una dimensión especificada de:  $D_c = 64 [mm]$ , la medida más aproximada en tubería de acrílico fue de  $2\ 1/2" = 63.50 [mm]$ .

Con estas medidas seleccionadas, se realizó la simulación geométrica del modelo propuesto como primer prototipo del separador centrífugo empleando el software de diseño mecánico conocido como Solid Works versión 2010. Obteniendo la siguiente geometría.



**Figura 43. Modelo 3D del primer prototipo elaborado.**



Se aprecia en la figura 43 que el diseño propuesto cuenta con una geometría semi –circular para las tapas del equipo similares a las que reporta Lazalde, sin embargo, al pretender manufacturar el equipo esta geometría resultaba complicada, por lo que se optó por implementar tapas planas, aunque esto no es lo más adecuado ya que el vapor al ascender y chocar con la tapa plana superior induce la formación de condensado; el cual puede introducirse al tubo interno del que se extrae el vapor. Fue una modificación rápida considerando el tipo de material más no adecuada, aunque es importante aclarar que permitió probar el comportamiento del equipo y el material. El plano de construcción se encuentra en el apéndice 8 para una visualización detallada de las medidas que en este se reportan.

Con el material adquirido se procedió a manufacturar el primer prototipo, obteniendo finalmente el modelo como se apreciable en la siguiente figura.

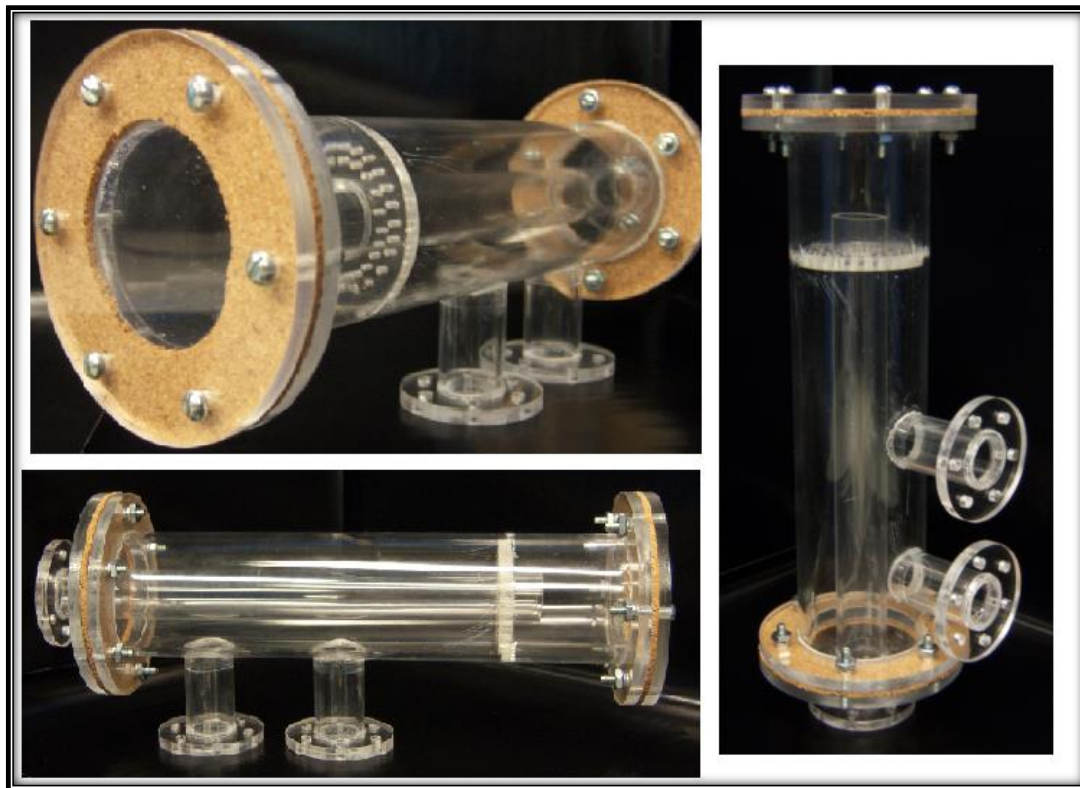


Figura 44. Separador de acrílico.

#### 4.7 Punto de operación y validación del prototipo.

El principio de operación que se espera cumpla el dispositivo es el siguiente:

Al tener una mezcla de agua – vapor con cierta velocidad (proveniente de la expansión efectuada en la placa orificio) dirigida por medio de la tubería de entrada  $D_{tr}$  a la entrada del separador, sufre un primer impacto al encontrarse con el tubo interno localizado en la parte central. Este impacto provoca que cierta parte de la mezcla choque directamente con el tubo interno, mientras que la mezcla restante manifiesta un movimiento circular o circunferencial debido a la disposición tangencial de la tubería  $D_{tr}$ , es decir, el flujo bifásico presenta un cambio de *momentum*<sup>9</sup> provocando así, una primera separación por impacto o choque.

Posteriormente en una sección dentro del dispositivo definida por “espacio libre” (figura 45) actúa la fuerza de gravedad sobre la mezcla. Debido al movimiento circunferencial inducido la mezcla se encuentra descendiendo por la pared del separador, sin embargo dentro del espacio libre debido a la fuerza de gravedad, el líquido abandonará la fase de vapor. El líquido al ser la fase con mayor densidad tenderá a dirigirse al fondo del recipiente con cierta rapidez, deslizándose por el contorno de la pared del dispositivo debido al movimiento inducido en la entrada sobre la corriente de flujo, fenómeno denominado como arrastre, en el que las gotas de vapor presentes en la corriente líquida se liberan.

Así mismo, debido a la fuerza de gravedad se produce la formación de vórtices dobles; presentes cuando el líquido va descendiendo y la fase gaseosa logra invertir su dirección de forma axial permitiéndole ascender y entrar al componente definido como tubo interno mediante el cual se logrará extraer el vapor en la parte inferior del dispositivo.

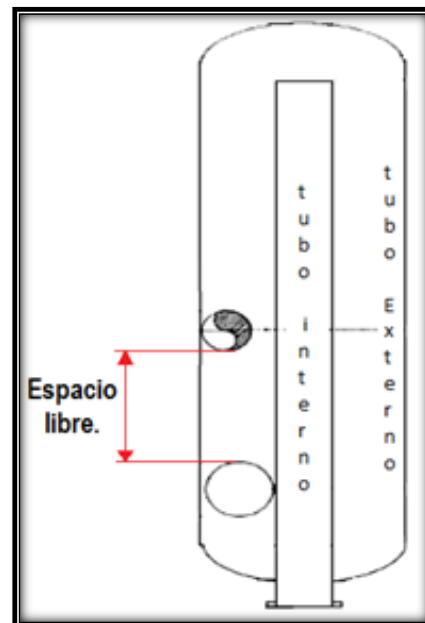


Figura 45. Espacio libre en el separador.

A la salida, el vapor debe cumplir con una de las especificaciones más importantes:

- Calidad de vapor a la salida en un rango de 0.99.

Con el equipo manufacturado y conociendo su funcionamiento ideal, el siguiente paso fue efectuar pruebas para corroborar primeramente que el equipo es capaz de proporcionar vapor de forma cualitativa y posteriormente corroborar que los datos obtenidos mediante los cálculos son en efecto los que el dispositivo arroja puesto en marcha.

---

<sup>9</sup> Momentum. Palabra del latín derivada del verbo mover, se define como una magnitud de tipo vectorial que describe el cambio de movimiento de un cuerpo.

#### 4.8 Simulación del sistema de generación de vapor.

Al inicio de este trabajo se especificó que el ciclo propuesto CBEI trabaja mediante el empleo de recursos geotérmicos que lamentablemente no está a nuestro alcance, razón por la cual se requirió improvisar un pozo geotérmico que nos proporcione el flujo.

Teniendo disponible un calentador casero, se modificó su sistema de control para lograr elevar la temperatura más allá de su rango máximo. Un calentador casero convencional maneja temperaturas menores a 70°C; cuenta con una válvula de alivio como dispositivo de seguridad que es activada si se excede este rango de temperaturas o si se alcanza una presión de 2 psi.

La presión máxima de operación de la válvula es de 10 kgf/cm<sup>2</sup> aproximadamente 9.8 Bar, debido a que la válvula se activa mediante el registro de la temperatura en el termostato y la presión dentro del calentador, se eliminaron estos dos elementos para lograr temperaturas mayores a 100°C y alcanzar la temperatura que nos proporcionara un recurso geotérmico de baja entalpia de forma real y a su vez realizar las pruebas con los rangos especificados al inicio del capítulo 4.

El calentador modificado, fue de la marca General Electric (*figura 46 (a)*) con una capacidad de almacenamiento de 38 litros; debido a que es indispensable conocer datos de presión y de temperatura durante la manipulación del calentador como un “pozo geotérmico” se implementó un termómetro y un manómetro (*figura 46 (b)*).



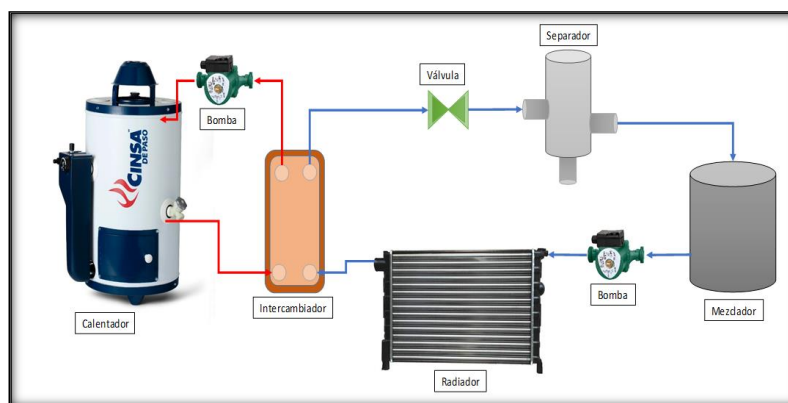
Figura 46. Calentador que simula un pozo geotérmico.

Con el pozo geotérmico improvisado, se procedió a conectar únicamente los elementos que conforma la etapa de generación de vapor respectivamente. En la figura 38 se observa que dicha etapa se adapta mediante la implementación de un intercambiador de calor, una placa orificio y finalmente el separador de flujos.

El intercambiador de calor, fue previamente calculado en un trabajo de tesis como propuesta de diseño y dimensionamiento para su implementación en un ciclo geotérmico con una generación de potencia bruta de 100 kW [16]. Aunque para llevar a cabo la experimentación en una escala reducida se adquirió un equipo comercial que nos permitiera únicamente la transferencia de calor del calentador al flujo frío.

Mientras que la placa orificio es uno de los elementos que carece de caracterización teórica respecto a su funcionamiento, por lo que fue remplazada por una válvula de estrangulamiento de compuerta. Esta sustitución está respaldada mediante la investigación que se hace actualmente para lograr la caracterización de su uso y funcionamiento. Y finalmente el separador de flujos, elemento dimensionado en el presente trabajo.

Para crear un circuito cerrado con los cuatro elementos anteriormente descritos y lograr una recirculación del líquido, se requirió de la instalación de un recipiente que funciona como un mezclador o colector (figura 38) que cumple la función de recaudar el líquido extraído de la mezcla en el separador y dirigirlo nuevamente al calentador. Así mismo se instaló un radiador que funciona como disipador de calor, en el que se pretende disminuir la temperatura del líquido recaudado para evitar un recalentamiento en el flujo logrando así, dirigir una corriente de líquido con menor temperatura al calentador. Para la recirculación se requirió la instalación de dos bombas para dirigir el flujo en el sentido adecuado, la primera se instaló después del colector para lograr conducir con cierta presión el líquido a través del radiador, mientras que la segunda fue instalada a la salida del intercambiador en su sección de baja temperatura para reingresar el líquido al calentador por la parte superior del mismo. En la figura 47 se aprecia la distribución de los equipos que conforman el circuito cerrado para una comprensión de lo especificado anteriormente, no se debe perder de vista que el sistema propuesto únicamente servirá para evaluar la generación de vapor.



**Figura 47. Distribución de los equipos con los que se evaluará el sistema de generación de vapor.**

#### 4.9. Pruebas del primer prototipo: separador de acrílico.

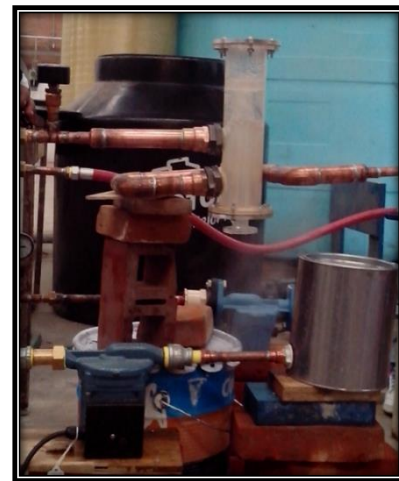
Al tener ensamblado el circuito descrito en el apartado anterior y a su vez el primer prototipo, se ejecutaron las primeras pruebas para corroborar la generación de vapor mediante el fenómeno de evaporación flash.

Primeramente se debe conocer la forma de operar el circuito, a continuación se describe el procedimiento a seguir para lograr su puesta en marcha:

Inicialmente se debe calentar el agua contenida dentro del calentador hasta alcanzar una temperatura de 120°C (aproximadamente demora 1 h 30 min) con la temperatura alcanzada se activa una bomba para dirigir el fluido caliente a través del intercambiador de calor, equipo en el que tan solo en pocos segundos permite la rápida transferencia de calor hacia una corriente de agua fría. Esta corriente con la energía calorífica absorbida, se hace circular a través de la válvula y el separador en el que se logrará la obtención de vapor por su sección inferior, mientras que el líquido resultante de la separación se colecta en el mezclador con el que se logra la recirculación del líquido mandándolo hacia el radiador o enfriador con ayuda de la segunda bomba permitiendo su acceso en el intercambiador y así tener el circuito cerrado en funcionamiento logrando evaluar de forma continua la generación de vapor.

Instalando el separador de acrílico, se llevó a cabo la primera prueba poniendo en marcha el circuito descrito anteriormente, en la que se logró la obtención satisfactoria de vapor. Debido a falta de instrumentación para conocer sus características específicas a la salida, dicha adquisición fue únicamente cualitativa.

En la figura 48 se aprecia el dispositivo instalado, al someterlo a condiciones de operación se determinó que su dimensionamiento era adecuado gracias a que cumplió con el funcionamiento esperado. Se logró la separación de la mezcla y la obtención de vapor a la salida. Sin embargo, al instalarlo se observó que parte del diseño no era apropiado, ya que al tener la tubería de entrada de mezcla y tubería de salida del líquido orientada hacia el mismo lado, provocaba en primer lugar que el acrílico se fracturara debido a la carga que debe soportar por las tuberías, lo que a su vez dificultó su instalación. En segundo lugar se presentaron fugas, debido a no tener los sellos adecuados en las tapas y a que la temperatura afectó las uniones de los componentes ya que estos se colocaron mediante uso de un pegamento especial para acrílico.



**Figura 48. Instalación de primer prototipo.**

Debido a las afectaciones observadas en el dispositivo durante su instalación y después de operarlo cierto tiempo se determinó que este prototipo no era el adecuado, por lo que se rediseñó con la finalidad de abordar todas y cada una de las afectaciones presentes.



#### 4.10 Rediseño del separador centrífugo.

El material seleccionado a pesar de ser el más económico, no resulto ser eficiente. Por otro lado, analizando los cálculos de rendimiento presentados en el apartado 4.5 se observa que la caída de presión del dispositivo construido con acrílico varia 1.85 [KPa] comparado con la obtenida si el dispositivo se manufacturará con cobre, así mismo existe una diferencia aproximada de 1% en la calidad de vapor a la salida; cantidades que involucran directamente el rendimiento del equipo.

Teniendo como antecedente, que el separador centrífugo construido con acrílico presenta fugas y afectaciones por la temperatura no represento la mejor opción; pero permitió visualizar el comportamiento del flujo dentro del equipo gracias a su característica de ser un material traslucido, sin embargo analizando sus rangos teóricos de desempeño reporta los más bajos, comparados con los obtenido para cobre, que representa la segunda opción de manufactura.

Debido a lo mencionado anteriormente, se decidió trabajar con los cálculos obtenidos para el dimensionamiento del equipo en cobre. Las medidas correspondientes a los diámetros calculados para tubería de cobre, obtenidas en la sección 4.4 se aproximaron de igual forma a dimensiones nominales, con la finalidad de proporcionar un nuevo modelo 3D y elaborar planos para cotizar una manufactura del equipo con una nueva propuesta de diseñado.

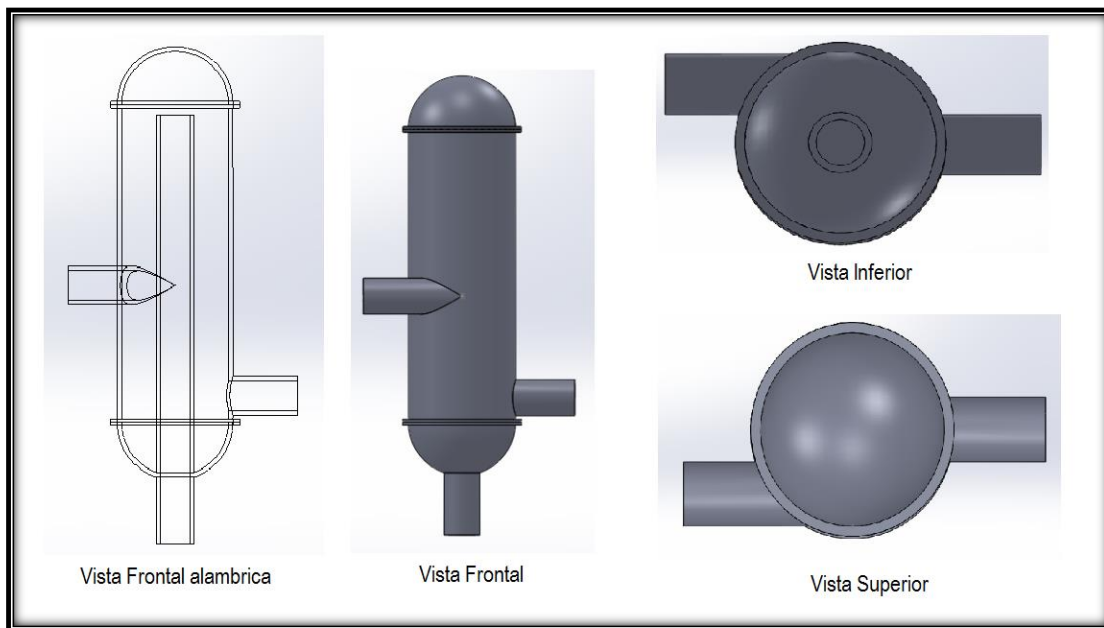
Los valores reportados finalmente en función de medidas nominales son los siguientes:

- Para la tubería correspondiente a:  $D_e = D_b = D_{tr} = 20.6 [mm]$  la medida más aproximada corresponde a  $13/16" = 20.638 [mm]$  sin embargo, es complicado manufacturar con medidas tan reducidas y al ser diminutas su costos se incrementan; razón por lo que se decidió que la medida nominal de tubería fuera de 1". Si se considera tubería con espesor correspondiente a 3 [mm] el diámetro interno de la tubería será de 19.4 [mm] medida que estará 1.2 [mm] por debajo de lo solicitado aun así, un milímetro de diferencia no se creé afecte el rendimiento del equipo.
- Mientras que para el tubo exterior que conforma el cuerpo del separador, se especificó una dimensión de  $D_c = 68 [mm]$  la medida más aproximada corresponde a  $2\ 3/4" = 69.85 [mm]$  sin embargo, considerando que estas medidas puede dificultar la manufacturar y elevar los costos al ser tan exactas, se consideró la medida de 3" = 76.20 [mm].

Vale la pena señalar que al considerar las dimensiones nominales antes especificadas, el dimensionamiento de los componentes que conforman el separador reportados en la tabla 13 (apartado 4.4) variarán. Razón por la que a continuación se presenta el modelo 3D y los nuevos planos con las medidas correspondientes para cada uno de los componentes, así como una nueva propuesta en la distribución de tubería de entrada de mezcla y tubería de salida de agua.

#### 4.11 Modelo 3D del separador centrífugo rediseñado.

El modelo computacional del nuevo separador centrífugo propuesto se realizó bajo las medidas nominales especificadas en el apartado anterior y con ayuda del software de diseño Solid Works versión 2010, la figura 49 muestra el sólido obtenido en el que se aprecia la nueva distribución de las tuberías, para la tubería de entrada de la mezcla se propuso una configuración tangencial, mientras que para la tubería de extracción de líquido se propuso una salida centrada.



**Figura 49. Imágenes obtenidas del modelo 3D del separador centrífugo re-diseñado.**

El plano de diseño se encuentra en el apéndice 9 para una mayor apreciación de las dimensiones que en este se reportan. Vale la pena indicar, que los cálculos de las medidas con las que se realizaron los modelos 3D de las dos propuestas de diseño, se realizaron para una generación total en el ciclo de 3 [kW]. Es importante recordar que la altura del equipo cambiará en función de las condiciones iniciales y de las solicitaciones que se le exijan al ciclo; así mismo se debe tomar en cuenta que puede existir cierta problemática para la manufactura de las cúpulas, debido a su forma semi-circulares.



#### **4.12 Cotización con fabricantes y manufactura del dispositivo.**

Al presentar dificultades con el primer prototipo y contando con mayores recursos económicos se decidió buscar una empresa capaz de efectuar la manufactura del segundo separador centrífugo propuesto.

Dentro de la búsqueda se contactó a una empresa mexicana especializada en el diseño, construcción y montaje de equipos para procesos en plantas industriales. Al contar con experiencia en la manufactura de diversos equipos utilizados en diferentes tipos de industrias como lo son: la farmacéutica, la alimenticia, la química entre otras, se solicitó una cotización para la construcción del equipo proporcionándoles los planos obtenidos del nuevo re-diseño con las medidas requeridas.

La empresa al visualizar los planos, propuso las siguientes recomendaciones de manufactura sobre el diseño: manufactura en acero inoxidable, implementación de ferrulas para emplear abrazaderas tipo clamp y empaques de silicón. Estas sugerencias se evaluaron considerando que su implementación no afectará el desempeño del equipo, el resultando de dicha valoración fue positivo por lo que se aprobaron y solicitaron para la manufactura final del equipo.

En la figura 50 se aprecia finalmente el dispositivo manufacturado y ensamblado.



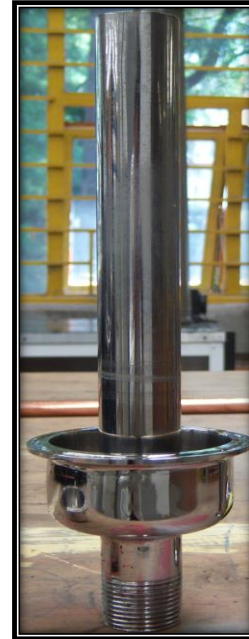
**Figura 50. Separador de flujos manufacturado en acero inoxidable.**



A continuación se muestra cada uno de los componentes que conforman el dispositivo.



**Figura 51. Tubo externo.**



**Figura 52. Tubo interno y cúpula inferior.**



**Figura 53. Cúpula superior.**



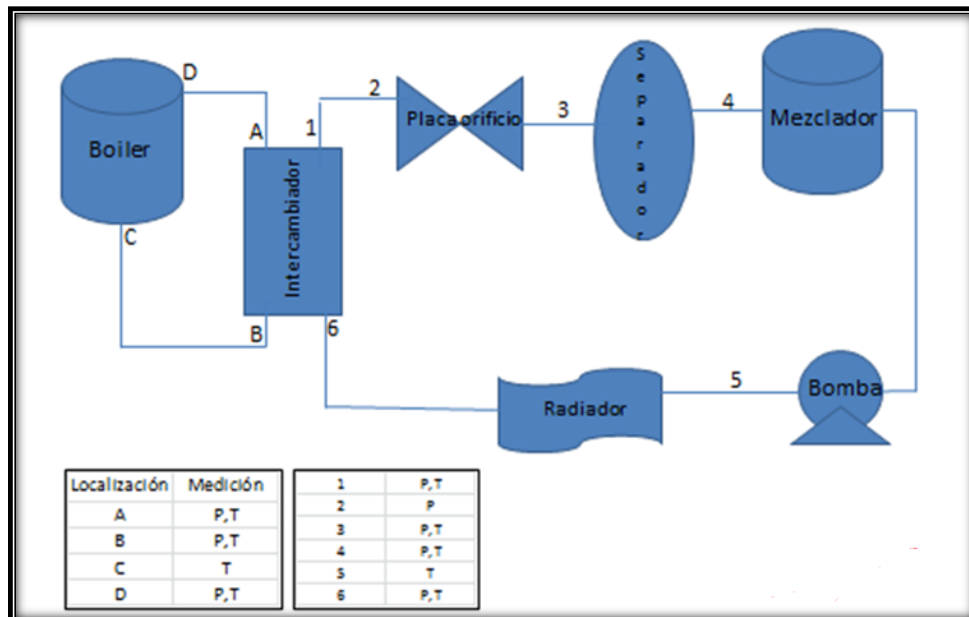
**Figura 54. Abrazadera tipo clamp.**



**Figura 55. Empaques de silicón.**

### 4.13 Pruebas del separador centrífugo re-diseñado.

Las pruebas se volvieron a realizar para evaluar el desempeño del nuevo equipo adquirido, bajo la configuración del circuito cerrado mostrado en el apartado anterior (4.8) sin embargo, para conocer cada uno de los estados presentes dentro del circuito se propuso implementar dispositivos electrónicos que permitieran la adquisición de datos para conocer los valores de presión y temperatura en cada punto de interés. La figura 56 expone la localización de los sensores dentro del sistema de generación de vapor, así como los parámetros de interés para cada elemento del circuito.

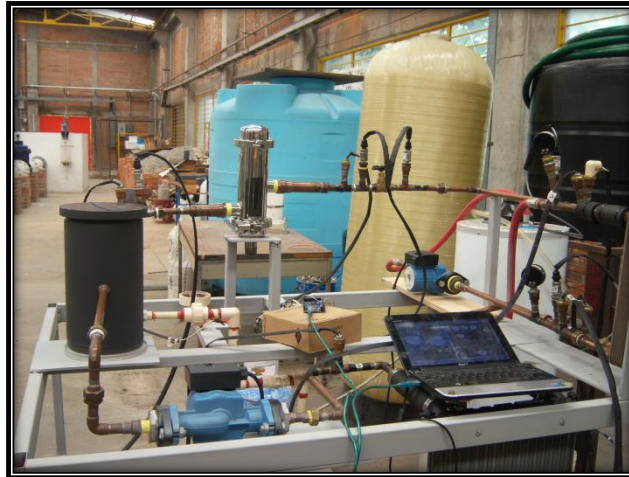


**Figura 56. Propuesta de instrumentación.**

Equipando el circuito, se colocaron sensores para la adquisición de datos referentes a temperatura del tipo RTD's (*resistive temperature detector*) con rangos de operación respectivamente de  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; mientras que los datos de presión se obtuvieron empleando dos diferentes tipos de sensores; manométricos y absolutos. Los primeros son sensores eléctricos, analógicos con salida de  $4 - 20\text{ [mA]}$  con rangos de operación de  $0 - 100\text{ [psi]}$ , dentro del ciclo se implementaron únicamente dos con estas características. Entre tanto, los segundos son transductores, electrónicos analógicos, con una salida proporcional de  $0.5 - 4.5\text{ [v]}$  y manifiestan un rango de operación entre  $0$  y  $100\text{ [psi]}$ .

Para conocer los datos al poner en marcha el sistema de generación, se empleó una tarjeta de adquisición de datos conocida como "arduino", permitiendo conocer en tiempo real los datos de presión y temperatura en cada punto y evaluar el comportamiento de los equipos al estar en operación.

En la figura 57 se puede observar el circuito ensamblado y equipado con los sensores descritos anteriormente, así como su montaje en una estructura manufacturada robusta que permite un fácil ensamble y desensamble de los equipos, al igual que una accesible operación del ciclo, puesto en operación.



**Figura 57. Estructura final del circuito con sensores digitales.**

Contando con lo anterior, se procedió a efectuar las pruebas pertinentes poniendo en marcha el ciclo bajo el procedimiento descrito en el apartado 4.8, logrando obtener únicamente vapor por la sección inferior del separador. Es importante señalar que con el re-diseño del separador centrífugo se tuvo un desempeño más alto ya que no presento fugas, el acoplamiento de sus dispositivos se logra de forma rápida y fácil, la transferencia de calor y generación de vapor se efectúa en cuestión de segundos y los rangos del vapor obtenido aproximadamente a la salida corresponden entre  $85^{\circ}\text{C} - 90^{\circ}\text{C}$ .



**Figura 58. Experimentación y obtención de vapor.**

A pesar de su temperatura alta obtenida, por falta de dispositivos adecuados no se pudo medir la cantidad de humedad que el vapor presenta a su salida, sin embargo la generación de vapor se logra cubriendo así el objetivo principal de este trabajo, además se puede decir que la implementación del sistema permite la generación de vapor de una forma fácil, económica y sin necesidad de implementar energías externas para su obtención.





---

## Capitulo 5. Conclusiones.

---

Este apartado, enlista detalles generales obtenidos del trabajo desarrollado, con ideas que aseveran el cumplimiento de los objetivos descritos al principio. Así mismo, se enlistarán ideas que se creen convenientes como trabajo a futuro que surgieron al concluir este trabajo.





## 5.1 Conclusiones generales.

Se comprendió el ciclo CBEI lo que permitió, efectuar una análisis termodinámico y disponer de las características requeridas para elaborar el dimensionamiento geométrico del separador de flujos.

Fundamentado en la investigación realizada, se comprobó que el tipo de dispositivos encargados disgregar mezclas provenientes de los pozos geotérmicos, son del tipo centrífugo; empleados en gran escala en la industria geotermoeléctrica.

El objetivo primordial del presente trabajo se cumplió con éxito, al obtener dimensiones geométricas así como un modelo 3D del separador de flujos bifásico, para la generación bruta especificada en el ciclo de 3 [kW]. Sin embargo, si la potencia a analizar fuera de un rango mayor es posible recalcular las dimensiones del equipo gracias a la hoja de cálculo en la que se reportan los datos y es fácil interpretarlos.

Para una visualización concreta de los cálculos realizados, se elaboró una hoja de cálculo en la que se reportan los datos más significativos y mediante los cuales se logra el dimensionamiento del equipo. Con ayuda de esta herramienta, se varió la cantidad de flujo a la entrada del dispositivo con el fin de visualizar los rangos que los cálculos presentarían. Observando que en efecto, el dimensionamiento está ligado con el porcentaje de generación bruta que se le solicite al ciclo o a la variación del flujo que se disponga a la entrada del equipo. Además, se pudo visualizar que los cálculos de eficiencia siempre arrojan valores de 99% a pesar de estar fuera de los parámetros de diseño propuestos. Razón por la que se cree necesaria la corroboración de datos de eficiencia mediante pruebas de operación y así decidir si el diseño es el adecuado al proporcionar las condiciones de vapor requeridas.

Con el modelo 3D, se obtuvieron planos mediante los cuales se efectuó la manufactura final del dispositivo en acero inoxidable, con el que será posible efectuar las pruebas de operación correspondientes.

Cabe aclarar que el empleo de acero inoxidable en servicios que involucra directamente el uso de vapor, es extenso. Su utilización en líneas de transporte de vapor así como en líneas de muestreo, proporcionan resistencia a presiones y temperaturas altas, también disminuye la posibilidad de trasportar contaminantes algo que no evita el acero ordinario.

El tamaño reportado como final es mayor al reportado en los cálculos, debido a las aproximaciones que se realizaron de los diámetros de tubería calculada respecto a los valores nominales de tubería.

La manufactura del dispositivo, tiene como propósito efectuar las pruebas necesarias para respaldar que la obtención del vapor cumple con las características requeridas que es, proporcionar vapor saturado a la turbina en cantidad suficiente para romper su inercia.

La implementación del ciclo, representa un cambio técnico al tener un objetivo específico: comunidades aisladas a las que sea posible, proporcionarles servicios básicos, que les proporcionará una mejor calidad de vida.



## 5.2 Aportaciones futuras.

Con el dispositivo manufacturado, será posible efectuar pruebas de operación y evaluar el desempeño del equipo diseñado, corroborando si es el adecuado para las solicitudes requeridas. De no ser así, realizar las modificaciones pertinentes para cumplir con los objetivos y proporcionar el vapor con las condiciones solicitadas.

La corriente de vapor será impura, se contiene gotas de agua, para asegurarse que el vapor es saturado o “puro” se deberán tomar pruebas preferentemente de tuberías verticales lo suficientemente largas que permitirán que las gotas presentes se distribuyan uniformemente por la tubería al ser arrastradas por la corriente de vapor.

Al efectuar la variación de flujo a la entrada del dispositivo se corrobora que en efecto el dimensionamiento no será el mismo para todos los casos, por lo que se propone plantear una metodología de cálculo, para proporcionar las dimensiones geométricas de los separadores de flujo requeridas para diferentes potencias y optimizar su construcción.

Algunos dispositivos son equipados con aditamentos para hacer más eficiente su desempeño, por lo que, si al efectuar las pruebas de operación el equipo diseñado no cumple con lo estipulado, se pensaría en la implementación de alguno de ellos. Los platos perforados son los más simples y económicos, no son más que laminas con agujeros redondos que cumplen con la función de permitir el paso del fluido a través de ellos proporcionando la liberación más rápida de la corriente de vapor.

La implementación de todos los dispositivos que conforman el ciclo será un punto crucial para demostrar su efectividad y funcionamiento, lo que será evaluado al corroborar con éxito que los datos técnicos referentes a su desempeño se cumplen al estar en operación. Confirmando lo anterior, se deberá trabajar en aspectos económicos, sociales y de impacto.

Uno de los objetivos a largo plazo, es la construcción del ciclo CBEI como planta modular, que permita su fácil instalación en comunidades aisladas de la red nacional, por lo que se deberá evaluar específicamente el mercado potencial real, realizar una estimación del tamaño requerido y escalar los equipos de forma técnica y económica.

Teniendo un análisis respaldado en cuanto a cuestión teórica y económica de implementación, se trabajará en la forma de difusión, con el objetivo de mostrar su factibilidad, comprender los objetivos y convencer a las personas de su efectividad.





---

## Bibliografía

---

- [1] IDAE, Manual de geotermia, Madrid: Instituto de la Diversificación y Ahorro de la Energía, 2008.
- [2] V. R. A. Guillermo Llopis Trillo, Guía de la Energía Geotérmica, Madrid: Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid, 2008 .
- [3] I. S. T. A. Edgar Santoyo Gutierrez, «Escenario futuro de explotación de la energía geotérmica: Hacia un desarrollo sustentable.,» *Revista Digital universitaria*, vol. 11, nº 10, 2010.
- [4] M. H. D. a. M. Fanelli, «International Geothermal Association (IGA),» Istituto di Geoscienze e Georisorse, CNR , Pisa, Italy, 2004. [En línea]. Available: [http://www.geothermal-energy.org/geothermal\\_energy/what\\_is\\_geothermal\\_energy.html](http://www.geothermal-energy.org/geothermal_energy/what_is_geothermal_energy.html). [Último acceso: 26 08 2014].
- [5] «Geotermia.org.mx,» Asociación Geotérmica Mexicana, [En línea]. Available: <http://www.geotermia.org.mx/geotermia/>. [Último acceso: 20 Junio 2014].
- [6] «Wikipedia,» [En línea]. Available: [http://es.wikipedia.org/wiki/Caldera\\_de\\_Yellowstone](http://es.wikipedia.org/wiki/Caldera_de_Yellowstone). [Último acceso: 26 08 2014].
- [7] O. T. d. I. Energía, Mapa Tecnológico: Calor y Frio Renovables, España: IDAE, 2012.
- [8] PROMOEENAER-A, «Anexo 1. Tecnologías del aprovechamiento de los recursos geotérmicos.,» Cooperación transfronteriza España - Portugal., España.
- [9] M. G. & V. Loksha, «Geothermal handbook: Planning and financing power generation.,» Washington, USA, 2012.
- [10] R. E. P. N. f. t. 2. Century, «REN 21,» 2013. [En línea]. Available: <http://www.ren21.net/>. [Último acceso: 26 Febrero 2014].
- [11] I. R. M. González y I. L. C. G. Negrín., «Recursos Geotérmicos para generar electricidad en México,» *Revista Digital Universitaria*, vol. 8, nº 12, 2007.





DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SEPARADOR DE FLUJOS PARA  
UN CICLO DE GENERACIÓN GEOTERMOELÉCTRICA.



- [12] «SENER,» Gobierno Federal , 2012. [En línea]. Available: <http://www.renovables.gob.mx/portal/Default.aspx?id=1653&lang=1>. [Último acceso: 11 09 2014].
- [13] R. Bertani, «Geothermal Power Generation in the world 2005-2010 update report,» de *Proceedings world goethermal congress 2010*, Bali, Indonesia., 2010.
- [14] D. G. H. L. Bert, «Evaluación de la energía geotérmica en México,» Comisión Reguladora de Energía; CRE, México, 2011.
- [15] R. Bertani, «Proceedings world geothermal congress 2010,» de *Geothermal power generation in the world 2005-2010. Update report.*, Bali, Indonesia., 2010.
- [16] E. F. R. Zárate, «Propuesta de diseño de in intercambiador de calor de placas para el Ciclo PWG.,» México D.F., 2013.
- [17] N. T. I. Service, «Oil Water Separators,» Estados Unidos, 1982.
- [18] M. Pérez Omaña, *Estado del arte de las tecnologías utilizadas para minimizar el arrastre de líquidos en separadores liquido-vapor en un proceso de acondicionamiento de gas.*, Caracas, 2005.
- [19] A. S. Foust, *Principios de Operaciones Unitarias*, México: Compañía Editorial Continental, 1987.
- [20] R. Treybal, *Operaciones de transferencia de masa.*, Segunda edición ed., McGRAW-HILL.
- [21] J. D. & D. Leith., «Cyclone collection Efficiency: compararison of experimental results with theoretical predictions.,» *Aerosol Science and technology*, vol. 4, pp. 401-415, 1985.
- [22] K.C.Foong, «Desing Concept for a more efficient steam-water separator,» de *Proceedings World Geothermal Congress*, Antalya, Turkey., 2005.
- [23] P. 2Bangma, «The development and performance of a steam- water separator for use on geothermal bores,» *U: N. Symposium on the development and utilization of geothermal recources.*, vol. Vol. 3, pp. 60 - 77, 1961.
- [24] H. C. H. Armstead, *Energía Geotérmica.*, México: Limusa, 1989.
- [25] K. Elsayed, «Analysis and optimization of cyclone separators geometry using RANS and LES methodologies.,» universitypress, Brussel, Belgium, 2011.





DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SEPARADOR DE FLUJOS PARA  
UN CICLO DE GENERACIÓN GEOTERMOELÉCTRICA.



- [26] «Facultad de ingeniería Universidad Nacional de la Plata,» 11 Junio 2011. [En línea]. Available: <http://www.ing.unlp.edu.ar/dquimica/paginas/catedras/iofq809/apuntes/Ciclones.pdf>. [Último acceso: 2 Agosto 2014].
- [27] H. Morales Aguilar , Efectos de la variación de la longitud del cono en la operación de un separador tipo ciclón., Mexico D.F, 2008.
- [28] P. Sims, «El separador de próxima generación: Un cambio de reglas.,» *Oilfield Review*, vol. No. 3, nº 22, pp. 52,53, 2011.
- [29] H. L. -. Crabtree, «Design approach of steam-water separators and steam dryers for geothermal applications.,» México, D.F., 1984.
- [30] «Final Report IIE/FE-G2/4,» june 1980.
- [31] P. Bangma, «The development and performance of a steam-water separator for use on geothermal bores,» de *Symposium on the development and utilization of geothermal recources*, Rome, 1961.
- [32] «Google,» 22 10 2014. [En línea]. Available: [www.google.com.mx](http://www.google.com.mx).
- [33] C. A. Ribas, «UPCommons,» Enero 2004. [En línea]. Available: <https://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/2932/1/31120-1.pdf>. [Último acceso: 02 10 2014].
- [34] E. J. V. Avila, «Diseño de un separador bifásico de tipo horizontal para crudo.,» Universidad de Oriente, Venezuela , 2009.
- [35] «Wikipedia,» [En línea]. Available: [http://es.wikipedia.org/wiki/Fuente\\_hidrotermal](http://es.wikipedia.org/wiki/Fuente_hidrotermal). [Último acceso: 26 08 2014].
- [36] A. Diaz y A. Paguay , «Parámetros requeridos en el diseño de separadores para manejar mezclas gas-líquido.,» Escuela Superior Politecnica del Litoral (ESPOL), Guayaquil - Ecuador, 2011.





DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SEPARADOR DE FLUJOS PARA  
UN CICLO DE GENERACIÓN GEOTERMOELÉCTRICA.



---

***Apéndice.***

---







DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SEPARADOR DE FLUJOS PARA  
UN CICLO DE GENERACIÓN GEOTERMOELÉCTRICA.



**Apéndice 1. Análisis térmico del ciclo CBEI.**

**Tabla Propiedades del Ciclo CBEI**

Punto	Recurso geotermico			Fluido de trabajo									Agua de enfriamiento			
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	12'	13	14	15	
T (°C)	140.000	140.047	99.755	96.755	137.000	100.434	100.434	45.806	45.806	45.814	100.434	96.691	25	25.021323	35	
P(MPa)	0.362	0.662	0.362	0.632	0.332	0.103	0.103	0.010	0.010	0.103	0.103	0.103	0.1	0.4	0.3	
Gasto(Kg/s)	0.146	0.146	0.146	0.139	0.139	0.139	0.010	0.010	0.010	0.130	0.130	0.130	0.584	0.584	0.584	
Gasto(m <sup>3</sup> /s)	0.00016	0.000	0.000	0.000	0.000	0.016	0.016	0.128	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	
Densidad(Kg/m <sup>3</sup> )	926.134	926.255	958.647	960.906	928.789	8.738	0.607	0.075	989.833	989.871	958.037	960.699	906.607	997.177	994.121	
Entalpia Liq(KJ/Kg)	589.162	589.557	418.329	405.894	576.305	420.998			191.806	191.806	191.921	420.998	405.223	104.919	105.286	146.898
Entalpia Vap (KJ/Kg)	2733.443					2676.255	2676.255									
Entalpia Mezcla (KJ/Kg)	586.040					576.305	2363.479									
Calidad(%)	0.000				0.000	0.069	1.000	0.908	0.000	0.000	0.000	0.000				
Entrop Liq(KJ/Kg)	1.739	1.739	1.304	1.270	1.708	1.312	0.649	0.649	0.649	0.649	1.312	1.270	0.3672			
Entrop Gas(KJ/Kg)						7.349	7.349	7.349								
Entrop Mezcla (KJ/Kg)						1.728	7.458									
Carga Térmica(KW)		24.984							20.830							24.291295
Potencia Bomba(KW)	0.058			0.093						0.001			0.21			

Datos de los Equipos	
Eficiencia bomba de pozo %	82
Eficiencia turbina %	90
Eficiencia intercambiador %	95
ΔP del intercambiador (bar)	3
Acercamiento de temp Inter C	3
Eficiencia bomba G %	82
Eficiencia bomba H %	82
Eficiencia Bomba de circulación %	82
Eficiencia del Condensador %	85

Fluidos y Unidades	
Recurso geotermico	water
Fluido de Trabajo	water
Fluido de enfriamiento	water
Unidades	C

Eficiencia termica %	<b>10.5</b>
----------------------	-------------

Potencia	
Bruta KW	Neta KW
<b>3.00</b>	<b>2.63</b>

Se aprecia dentro del análisis una tabla que lleva por nombre "Datos de equipos" en la que se especifica la eficiencia de cada uno de los dispositivos involucrados en el ciclo termodinámico. Datos que pueden cambiar en función de las especificaciones que el proveedor especifique, los valores presentados están basados en una búsqueda bibliográfica de diferentes proveedores. Su implementación se hace con la finalidad de evaluar el ciclo mediante una buena aproximación teórica del desempeño que tendrá el ciclo mediante la interacción de todos los equipos involucrados.

Mientras que la tabla que especifica el nombre de los fluidos utilizados, es debido al uso del software de apoyo.





DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SEPARADOR DE FLUJOS PARA

UN CICLO DE GENERACIÓN GEOTERMOELÉCTRICA.



**Apéndice 2. Tablas de selección para diámetros de tubería.**

Tabla de Diametro nominal tipo "M" Cobre

Medida Nominal		Diámetro Exterior		Diámetro Interior		Pe so		Presión Máxima		Presión Constante	
Pulgadas	milímetros	Pulgadas	milímetros	Pulgadas	milímetros	Lb/pie	kg/m	PSI	kg/cm2	PSI	kg/cm2
1/4	6.35	0.375	9.525	0.325	8.255	0.107	0.159	6133	431.15	1226	86.18
3/8	9.5	0.5	12.7	0.45	11.43	0.145	0.216	4500	316.35	900	63.27
1/2	12.7	0.625	15.875	0.569	14.453	0.204	0.304	4032	283.45	806	56.66
3/4	19	0.875	22.225	0.811	20.599	0.328	0.488	3291	231.35	658	46.25
1	25	1.125	28.575	1.055	26.767	0.465	0.693	2800	196.84	560	39.36
1 1/4	32	1.375	34.925	1.291	32.791	0.683	1.016	2749	193.25	550	38.66
1 1/2	38	1.625	41.275	1.527	38.785	0.941	1.4	2713	190.72	542	38.1
2	51	2.125	53.975	2.009	51.029	1.461	2.176	2470	173.65	491	34.51
2 1/2	64	2.625	66.675	2.495	63.373	2.032	3.025	2228	156.62	445	31.28
3	76	3.125	79.375	2.981	75.718	2.683	3.994	2073	145.73	414	29.1
4	102	4.125	104.775	3.935	99.949	4.665	6.945	2072	145.65	414	29.1

Tabla de Diametro nominal de tubo de acrilico sin costura "extruido PM II"

Medida Nominal		Diámetro Exterior		Diámetro Interior		Pared nominal
Pulgadas	milímetros	Pulgadas	milímetros	Pulgadas	milímetros	milímetros
		1/4	6.3		0.3	3
		3/8	9.5		3.5	3
		1/2	12.7		6.7	3
		3/4	19		13	3
		1	25.4		19.4	3
			31.7		25.7	3
			38.1		32.1	3
			50.8		44.8	3
			63.5		57.5	3
			76.2		70.2	3





DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SEPARADOR DE FLUJOS PARA  
UN CICLO DE GENERACIÓN GEOTERMOELÉCTRICA.



**Apéndice 3. Cálculos preliminares y cálculos de diseño fase 1.**

CÁLCULOS PRELIMINARES			
<b>Xmez</b>	Calidad de mezcla	0.06886	7%
<b>°Qvap</b>	Flujo volumetrico de vap [m3/s]	0.0158	
<b>°Qmez</b>	Flujo volumetrico de mez [m3/s]	0.01594	
<b>°Qliq</b>	Flujo volumetrico de liq [m3/s]	0.00014	
CÁLCULOS DE DISEÑO FASE ①			
<b>Ae</b>	Area de entrada [m2]	0.00046	<b>in</b> <b>mm</b>
<b>Dtub</b>	Diametro de tuberia aprox [m]	0.0241	0.9480    24.0803
	Mediante tabla nominal	tubo cobre "M"	3/4    20.599
	Mediante tabla nominal	tubo "acrílico"	1    19.4
<b>Dtr</b>	Diametro de tuberia real [m]	0.0206	0.0194
<b>Ar</b>	Area de entrada real [m2]	0.0003	0.000296
<b>Vtr</b>	Velocidad de entrada real [m/s]	47.8297	53.9246

**Apéndice 4. Parámetros calculados mediante las relaciones presentabas en la tabla 12, para el dimensionamiento del equipo.**

PARÁMETROS DE DISEÑO OBTENIDOS MEDIANTE RELACIONES.		Cobre	Acrílico
<b>Dc</b>	Diametro del separador [m]	0.068	0.064
<b>De</b>	Diametro tub de salida Vap [m]	0.021	0.019
<b>Db</b>	Diametro tub de salida Agua [m]	0.021	0.019
<b>α</b>	Parametro α [m]	-0.003	-0.003
<b>β</b>	Parametro β [m]	0.072	0.068
<b>z</b>	Parametro z [m]	0.113	0.107





DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SEPARADOR DE FLUJOS PARA  
UN CICLO DE GENERACIÓN GEOTERMOELÉCTRICA.



**Apéndice 5. Parámetros de diseño previos para cálculos de eficiencias.**

PARÁMETROS DE DISEÑO OBTENIDOS MEDIANTE RELACIONES.		Cobre	Acrílico
<b>Ao</b>	Área trans de entra en pared del separador [m2]	0.0004243	0.0003764
<b>u</b>	Velocidad de gota tangencial [m/s]	37.565	42.352
<b>n1</b>	Parámetro especificado en ecuación (6)	0.459	0.455
<b>n</b>	Parámetro n [m]	0.424	0.420
ter de temp	Parámetro de temperaturas en ecuación (7)	0.931	0.931
<b>Vos</b>	Volumen del Separador [m3]	0.000373	0.000312
<b>tmi</b>	Tiem prom residencia de Vap en el separador [s]	0.024	0.020
<b>VO1</b>	Volumen de "α" [m3]	-0.0000112	-0.0000094
<b>VO2</b>	Volumen [m3]	0.0000254	0.0000213
<b>VO3</b>	Volumen [m3]	0.00000280	0.00000234
<b>VOH</b>	Volumen Total [m3]	0.0000114	0.0000095
<b>tma</b>	Tiem max adicional de vap en el separador [s]	0.000723	0.000604
<b>tr</b>	Tiemp de residencia [s]	0.024	0.020
<b>Kc</b>	Parámetro	1.217	1.217
<b>C</b>	Parámetro	106.054	106.054

**Apéndice 6. Cálculos para conocer el tipo de régimen de flujo presente en el caso de estudio.**

PARÁMETROS REQUERIDOS EN EL MAPA DE BAKER			
<b>λ</b>	Parámetro λ	0.68753	
<b>ψ</b>	Parámetro ψ	0.83224	
<b>m° vap</b>	Flujo de Vap [kg/s]	0.00959	
<b>m°liq</b>	Flujo de Liq [kg/s]	0.12969	
	Coordenada x [kg/m2s]	254	287
	Coordenada y [kg/m2s]	33	37

Patrón de flujo bifásico presente en función del Mapa Baker: **ANULAR** **ANULAR**







DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SEPARADOR DE FLUJOS PARA

UN CICLO DE GENERACIÓN GEOTERMOELÉCTRICA.



**Apéndice 7. Parámetros y cálculos de eficiencia en el equipo.**

<b>VT</b>	Velocidad [m/s]	47.82974	53.92459
<b><math>\rho</math> liq. Flujo</b>	Densidad de Liquido flujo [g/cm3]	0.95804	
<b><math>\sigma</math> flujo</b>	Tension Superficial flujo [dina/cm]	58.82812	
<b><math>\mu</math> liq</b>	Viscosidad de liquido [P]	0.002803	
<b>dw</b>	Diametro de gota [micras]	141.81074	136.6171601
<b><math>\psi</math></b>	Parámetro $\psi$	6.87775E+13	7.61925E+13
<b>VAN</b>	Parámetro VAN [m/s]	4.83617	5.45244
<b>j</b>	Parámetro adimencional j	-0.0001149	-0.000610648

<b>EFICIENCIAS</b>				<b>Eficiencia Cobre</b>		<b>Eficiencia Acrílico</b>	
<b><math>\eta_m</math></b>	Eficiencia centrífuga	1	100%	1	100%		
<b><math>\eta_A</math></b>	Eficiencia de arrastre	0.99974	100%	0.99859	100%		
<b><math>\eta_{ef}</math></b>	Eficiencia del separador	0.99974	100%	0.99859	100%		
<b>Wv</b>	Flujo másico de Vap [kg/s]	0.00959					
<b>WL</b>	Flujo másico de Liq [kg/s]	0.12969					
<b>Xo</b>	Calidad de Vap a salida	0.99643	100%	0.98136	98%		
<b>NH</b>	Parámetro NH	16	kPa	16	kPa		
<b><math>\Delta P</math></b>	Caída de Presión [Pa]	6851.37084	6.85137	8708.7356	8.70874		

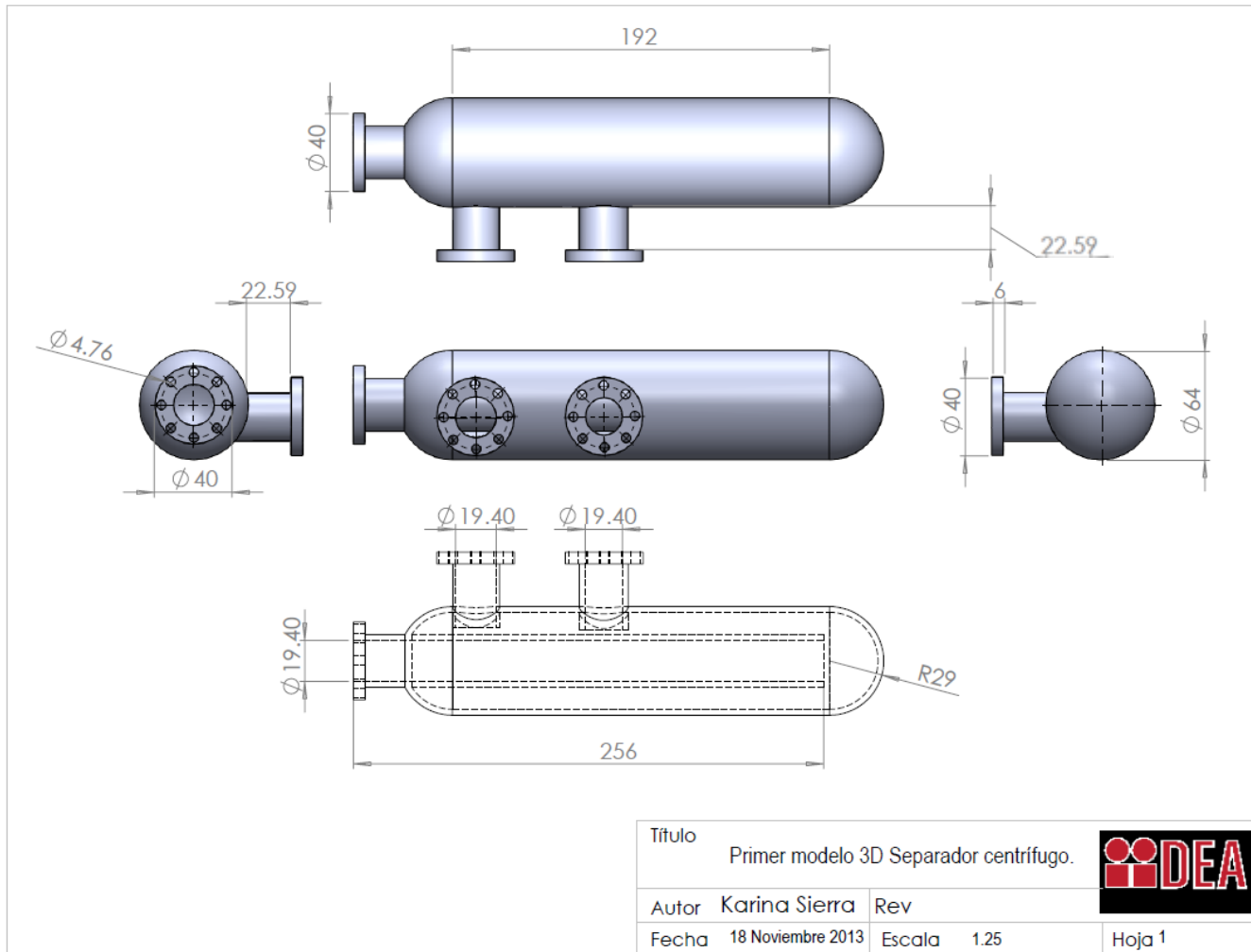




DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SEPARADOR DE FLUJOS PARA  
UN CICLO DE GENERACIÓN GEOTERMOELÉCTRICA.



**Apéndice 8. Planos del separador de acrílico construido como primer prototipo.**







DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SEPARADOR DE FLUJOS PARA  
UN CICLO DE GENERACIÓN GEOTERMOELÉCTRICA.



**Apéndice 9. Plano de re-diseño, separador centrífugo de acero.**

