



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS  
DE HIDALGO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**TESIS:**

**ANÁLISIS DE LA CALIDAD DE VAPOR Y SU IMPACTO EN  
CENTRALES GEOTERMOELÉCTRICAS**

**QUE PRESENTA:**

**ÁLVARO MORALES GARCÍA**

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**INGENIERO ELECTRICISTA**

**ASESOR DE TESIS:**

**Dr. GILBERTO GONZÁLES AVALOS**

Morelia, Michoacán, noviembre de 2021



## Agradecimientos

Primeramente, a Dios:

Por haberme dado la oportunidad y dicha de realizar una carrera universitaria y por darme la sabiduría e inteligencia para poder salir adelante ante todas las dificultades en mi carrera y en la vida.

A mi asesor, Dr. Gilberto Gonzáles Avalos:

Por darme la oportunidad de apoyarme en este trabajo, y por compartirme sus enseñanzas y conocimientos tanto en este trabajo como dentro de las aulas, siendo uno de los mejores profesores que tuve durante mis estudios universitarios. Muchas gracias Dr. Gilberto.

A mis profesores de la facultad:

Que en su mayoría fueron excelentes profesores que me compartieron sus conocimientos y experiencias del ámbito laboral, y de los cuales aprendí bastante, muchas gracias.

A mis hermanos, Magdaleno; Verónica; Luis Alfredo:

Por apoyarme en todo momento de mi carrera universitaria, así como en la vida, brindándome su apoyo y consejos en todo momento que los necesite, Muchas gracias hermanos.

A mis amigos y compañeros de la facultad:

Por haber compartido las aulas y muchas anécdotas durante la carrera universitaria, muchas gracias.



## Dedicatoria

*Con amor, a mí Mamá Imelda:*

*Por haber estado ahí siempre a mí lado, brindándome tu apoyo y amor incondicional en todo momento de mi carrera y enseñarme a no rendirme y lograr mis metas, siendo un pilar fundamental para salir adelante en la vida y en mis proyectos y metas. Este trabajo te lo dedico con todo mi corazón.*

*Con amor, a mí Papá † Alfredo:*

*Aunque ya no estés conmigo físicamente pero siempre estás en mi corazón, por haberme dado todas las enseñanzas de vida para ser un hombre de bien y estar ahí siempre dándome tus consejos cuando los necesite, brindándome tu apoyo en todo momento de mi carrera y enseñarme a no rendirme y lograr mis metas. Hasta el cielo, este trabajo te lo dedico con todo mi corazón.*



# Índice

<b>Agradecimientos.....</b>	<b>II</b>
<b>Dedicatoria.....</b>	<b>III</b>
<b>Índice .....</b>	<b>IV</b>
<b>Resumen.....</b>	<b>1</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>2</b>
<b>Lista de figuras .....</b>	<b>3</b>
<b>Lista de tablas .....</b>	<b>6</b>
<b>Capítulo 1. Introducción .....</b>	<b>7</b>
<b>1.1 La energía geotérmica.....</b>	<b>7</b>
1.1.1 Usos y aplicaciones de la energía geotérmica .....	7
1.1.2 Sistemas de calefacción urbana y de uso directo de la energía geotérmica .....	8
1.1.3 Calefacción y refrigeración usando calor geotérmico .....	8
1.1.4 Generación de energía eléctrica y plantas geotérmicas.....	9
<b>1.2 Objetivo .....</b>	<b>10</b>
<b>1.3 Justificación.....</b>	<b>10</b>
<b>1.4 Metodología.....</b>	<b>11</b>
<b>Capítulo 2. Antecedentes de centrales eléctricas .....</b>	<b>12</b>
<b>2.1 Introducción .....</b>	<b>12</b>
<b>2.2 Energía nuclear de fisión .....</b>	<b>16</b>
2.2.1 Origen .....	16
2.2.1.1 Potencial energético.....	18
2.2.1.2 Formas de aprovechamiento.....	18
<b>2.3 Energía nuclear de fusión .....</b>	<b>19</b>
2.3.1. Origen .....	19
2.3.2. Potencial energético.....	21
2.3.3 Formas de aprovechamiento.....	21
2.3.4. Reservas.....	21



<b>2.4. Energía del carbón .....</b>	<b>22</b>
2.4.1. Origen .....	22
2.4.2 Potencial energético .....	24
2.4.3 Formas de aprovechamiento .....	24
<b>2.5. Energía del petróleo.....</b>	<b>25</b>
2.5.1. Origen .....	25
2.5.2 Potencial energético .....	28
2.5.3 Formas de aprovechamiento .....	28
<b>2.6. Energía solar .....</b>	<b>29</b>
2.6.1. Origen .....	29
2.6.2 Potencial energético .....	30
2.6.3. Formas de aprovechamiento .....	30
<b>2.7. Energía eólica .....</b>	<b>31</b>
2.7.1. Origen .....	31
2.7.2. Potencial energético .....	32
2.7.3. Formas de aprovechamiento .....	32
<b>2.8. Energía del oleaje .....</b>	<b>32</b>
2.8.1. Origen .....	32
2.8.2. Potencial energético .....	33
2.8.3. Formas de aprovechamiento .....	33
<b>2.9. Energía hidráulica .....</b>	<b>34</b>
2.9.1. Origen .....	34
2.9.2. Potencial energético .....	35
2.9.3. Formas de aprovechamiento .....	35
<b>2.10. Energía de la biomasa .....</b>	<b>35</b>
2.10.1. Origen .....	35
2.10.2. Potencial energético .....	36
2.10.3. Formas de aprovechamiento .....	36
<b>2.11. Energía geotérmica .....</b>	<b>37</b>
2.11.1. Origen .....	37
2.11.2. Potencial energético .....	39
2.11.3. Formas de aprovechamiento .....	39
<b>2.12. Energía de las mareas .....</b>	<b>39</b>
2.12.1. Origen .....	39



2.12.2. Potencial energético ..... 39  
2.12.3. Formas de aprovechamiento ..... 40

**Capítulo 3. Características de yacimientos geotérmicos y su vapor ..... 41**

**3.1 Tipos de yacimientos geotérmicos ..... 41**

3.1.1 Yacimientos de alta temperatura ..... 41  
3.1.2 Yacimientos de baja temperatura ..... 42  
3.1.3 Yacimientos de muy baja temperatura ..... 44  
3.1.4 Yacimientos de roca caliente seca ..... 44

**3.2 La Investigación de los recursos geotérmicos ..... 45**

3.2.1 Desarrollo de la investigación ..... 45  
3.2.1.1 Alta temperatura ..... 45  
3.2.1.2 Técnicas de prospección geotérmica ..... 46  
3.2.1.3 Baja temperatura ..... 48

**3.3 Explotación de los yacimientos ..... 49**

3.3.1 Utilización de recursos de alta temperatura (producción de electricidad) ..... 51  
3.3.1.1 Tipos de campos ..... 51  
3.3.2 Problemas de explotación ..... 52

**3.4 Desarrollo actual de la energía geotérmica en el mundo ..... 53**

3.4.1 Alta temperatura ..... 53  
3.4.2 Datos económicos ..... 54  
3.4.3 Baja y media temperatura ..... 56

**3.5 Energía geotérmica en México ..... 57**

3.5.1 Capacidad instalada y generación ..... 60  
3.5.2 Usos directos ..... 60

**3.6 Sistemas de generación de electricidad ..... 61**

3.6.1 Generación de electricidad ..... 64  
3.6.1.1 Plantas de vapor seco ..... 64  
3.6.1.2 Plantas de separación de vapor ..... 65  
3.6.1.3 Plantas de ciclo binario ..... 66

**Capítulo 4. Potencia de una central geotermoeléctrica basada en la calidad de su vapor ..... 67**

**4.1 Ciclo Rankine: El ciclo ideal para los ciclos de potencia de vapor ..... 67**

**4.2 Calidad del vapor ..... 69**



---

# ANÁLISIS DE LA CALIDAD DE VAPOR Y SU IMPACTO EN CENTRALES GEOTERMOELÉCTRICAS



<b>4.3 Turbinas de Vapor .....</b>	<b>70</b>
4.3.1 Clasificación .....	71
4.3.1.1-Turbina de vapor de reacción.....	71
4.3.1.2 -Turbina de vapor de acción .....	72
4.3.1.3 -Turbina monoetapa.....	72
4.3.1.4 -Turbina multietapa.....	73
4.3.1.5 -Turbina de flujo axial .....	73
4.3.1.6 -Turbina de flujo radial .....	73
4.3.1.7 -Turbina con extracción de vapor.....	73
4.3.1.8 -Turbina de contrapresión .....	73
4.3.1.9-Turbinas de condensación.....	73
<b>4.4 Vapor .....</b>	<b>74</b>
4.4.1 Vapor húmedo.....	74
4.4.2 Vapor húmedo con temperaturas menores a 150°C.....	75
4.4.3 Vapor saturado seco.....	75
<b>4.5 Desarrollo.....</b>	<b>75</b>
4.5.1 Cálculo de la potencia de una central geotermoeléctrica en base a la calidad de vapor.....	79
4.5.2 Problema .....	81
4.5.3 Central geotermoeléctrica con una etapa de flasheo .....	82
4.5.4 Central Geotermoeléctrica con dos etapas de flasheo .....	87
<b>4.6 Resultados.....</b>	<b>95</b>
<b>Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones .....</b>	<b>101</b>
<b>5.1 Conclusiones .....</b>	<b>101</b>
<b>5.2 Recomendaciones.....</b>	<b>102</b>
<b>Bibliografía.....</b>	<b>103</b>
<b>Glosario.....</b>	<b>105</b>



## Resumen

La generación de energía obtenida de fuentes de energía renovables es una alternativa a nivel mundial, tales como: la geotérmica, solar, eólica, entre otras. La energía aprovechada de los yacimientos geotérmicos es una fuente confiable para obtener vapor de proceso y energía térmica para calefacción o para generar energía motriz en una turbina de vapor. Las centrales geotermoeléctricas son plantas térmicas que garantizan una producción constante de potencia eléctrica, debido al recurso comprobado de energía térmica en las cavidades de la tierra donde se instala la central, que asegura una vida útil de producción de 20 años.

El aprovechamiento de este recurso natural se puede mejorar de acuerdo a las condiciones de operación de la central y de la configuración de los ciclos de vapor para incrementar la potencia generada y la *eficiencia térmica*. Sin embargo, no establecen las presiones óptimas para cada temperatura del *fluido geotérmico* para obtener el máximo trabajo en las turbinas de vapor, ya que se puede ocasionar una pérdida de trabajo mayor al 10% si no se establece la presión de operación en la vecindad de la presión óptima.

En la presente investigación se realiza un análisis de la *calidad de vapor* emitido por los yacimientos geotérmicos y su impacto en este tipo de central eléctrica, esto permitirá no solo aumentar la potencia generada y la eficiencia en relación a los proyectos de desarrollo de este tipo de central, sino planificar con mejores resultados de eficiencia en la central con los proyectos que se encuentren trabajando.

Finalmente se realiza un análisis de la investigación de acuerdo a la información y datos obtenidos y se realiza una conclusión del trabajo, así como algunas recomendaciones.

**Palabras clave:** Entropía, entalpía, potencia eléctrica, yacimiento, eficiencia.



## Abstract

The generation of energy obtained from renewable energy sources is an alternative worldwide, such as: geothermal, solar, wind, among others. The energy harnessed from geothermal reservoirs is a reliable source for obtaining process steam and thermal energy for heating or for generating motive power in a steam turbine. Geothermal power plants are thermal that produce a constant production of electrical power, due to the proven resource of thermal energy in the cavities of the earth where the power plant is installed, which ensures a useful production life of 20 years.

The use of this natural resource can be improved according to the operating conditions of the plant and the configuration of the steam cycles to increase the generated power and thermal efficiency. However, the optimum pressures for each temperature of the geothermal fluid were not found to obtain the work in the maximum steam turbines, since a loss of work greater than 10% can be caused if the pressure is not established in the vicinity of the optimal pressure.

In this research, an analysis of the quality of steam emitted by geothermal reservoirs and its impact on this type of power plant is carried out, this will not only increase the power generated and the efficiency in relation to the development projects of this type of power plant, but to plan with better efficiency results in the plant with the projects that are working.

Finally, an analysis of the research is carried out according to the information and data obtained and a conclusion of the work is made, as well as some recommendations.



## Lista de figuras

<b>Figura 1.1</b>	<b><i>Yacimiento geotérmico.....</i></b>	<b><i>7</i></b>
<b>Figura 2.1</b>	<b><i>Centrales eléctricas.....</i></b>	<b><i>14</i></b>
<b>Figura 2.2</b>	<b><i>Fuentes energéticas.....</i></b>	<b><i>15</i></b>
<b>Figura 2.3</b>	<b><i>Central nuclear. ....</i></b>	<b><i>16</i></b>
<b>Figura 2.4</b>	<b><i>Reacción de fisión en cadena. ....</i></b>	<b><i>17</i></b>
<b>Figura 2.5</b>	<b><i>Proceso de un reactor nuclear.....</i></b>	<b><i>18</i></b>
<b>Figura 2.6</b>	<b><i>Reacción de fusión. ....</i></b>	<b><i>20</i></b>
<b>Figura 2.7</b>	<b><i>Energía del carbón.....</i></b>	<b><i>22</i></b>
<b>Figura 2.8</b>	<b><i>Generación del carbón.....</i></b>	<b><i>23</i></b>
<b>Figura 2.9</b>	<b><i>Energía del petróleo. ....</i></b>	<b><i>25</i></b>
<b>Figura 2.10</b>	<b><i>Formación del petróleo.....</i></b>	<b><i>26</i></b>
<b>Figura 2.11</b>	<b><i>Formación del petróleo.....</i></b>	<b><i>26</i></b>
<b>Figura 2.12</b>	<b><i>Petróleo en los intersticios. ....</i></b>	<b><i>27</i></b>
<b>Figura 2.13</b>	<b><i>Trampas de petróleo.....</i></b>	<b><i>28</i></b>
<b>Figura 2.14</b>	<b><i>Energía solar. ....</i></b>	<b><i>30</i></b>
<b>Figura 2.15</b>	<b><i>Energía eólica.....</i></b>	<b><i>31</i></b>
<b>Figura 2.16</b>	<b><i>Energía del oleaje.....</i></b>	<b><i>33</i></b>
<b>Figura 2.17</b>	<b><i>Energía hidráulica.....</i></b>	<b><i>34</i></b>
<b>Figura 2.18</b>	<b><i>Energía de la biomasa. ....</i></b>	<b><i>36</i></b>
<b>Figura 2.19</b>	<b><i>Energía geotérmica. ....</i></b>	<b><i>38</i></b>
<b>Figura 2.20</b>	<b><i>Energía mareomotriz.....</i></b>	<b><i>40</i></b>
<b>Figura 3.1</b>	<b><i>Géiser: Salida natural de los yacimientos geotérmicos. ....</i></b>	<b><i>42</i></b>
<b>Figura 3.2</b>	<b><i>Yacimiento geotérmico de alta temperatura.....</i></b>	<b><i>42</i></b>



<b>Figura 3.3</b>	<b><i>Yacimiento geotérmico de baja temperatura. ....</i></b>	<b>43</b>
<b>Figura 3.4</b>	<b><i>Yacimiento de roca caliente seca de alta temperatura. ....</i></b>	<b>44</b>
<b>Figura 3.5</b>	<b><i>Solubilidad de la sílice con la temperatura. ....</i></b>	<b>47</b>
<b>Figura 3.6</b>	<b><i>Correlación disgrafías. ....</i></b>	<b>47</b>
<b>Figura 3.7</b>	<b><i>Fotografía en infrarrojo de la cumbre del Teide. ....</i></b>	<b>48</b>
<b>Figura 3.8</b>	<b><i>Sondeo san Sebastián de los reyes, España. ....</i></b>	<b>50</b>
<b>Figura 3.9</b>	<b><i>Central térmica de energía geotérmica de alta temperatura. ....</i></b>	<b>51</b>
<b>Figura 3.10</b>	<b><i>Producción de electricidad por geotérmica. ....</i></b>	<b>54</b>
<b>Figura 3.11</b>	<b><i>Evolución de la energía geotérmica. ....</i></b>	<b>56</b>
<b>Figura 3.12</b>	<b><i>Plantas geotermoeléctricas en México. ....</i></b>	<b>57</b>
<b>Figura 3.13</b>	<b><i>Ciclo directo sin condensación. ....</i></b>	<b>61</b>
<b>Figura 3.14</b>	<b><i>Ciclo directo con condensación. ....</i></b>	<b>62</b>
<b>Figura 3.15</b>	<b><i>Ciclo semidirecto con flashing. ....</i></b>	<b>62</b>
<b>Figura 3.16</b>	<b><i>Ciclos binarios. ....</i></b>	<b>63</b>
<b>Figura 3.17</b>	<b><i>Pozo de alta entalpía en desarrollo. ....</i></b>	<b>63</b>
<b>Figura 3.18</b>	<b><i>Diagrama de una planta de vapor seco. ....</i></b>	<b>65</b>
<b>Figura 3.19</b>	<b><i>Diagrama de una planta con separación de vapor. ....</i></b>	<b>65</b>
<b>Figura 3.20</b>	<b><i>Diagrama de una planta de ciclo binario. ....</i></b>	<b>66</b>
<b>Figura 4.1</b>	<b><i>Ciclo Rankine ideal simple. ....</i></b>	<b>67</b>
<b>Figura 4.2</b>	<b><i>Diagrama presión-calidad de vapor. ....</i></b>	<b>69</b>
<b>Figura 4.3</b>	<b><i>Turbina de vapor. ....</i></b>	<b>70</b>
<b>Figura 4.4</b>	<b><i>Vapor geotérmico. ....</i></b>	<b>74</b>
<b>Figura 4.5</b>	<b><i>Central geotermoeléctrica una cámara flash. ....</i></b>	<b>76</b>
<b>Figura 4.6</b>	<b><i>Central geotermoeléctrica dos cámaras flash. ....</i></b>	<b>78</b>



<b>Figura 4.7</b>	<b><i>Extracción y conducción de vapor. ....</i></b>	<b>79</b>
<b>Figura 4.8</b>	<b><i>Unidades campo geotérmico los Azufres. ....</i></b>	<b>80</b>
<b>Figura 4.9</b>	<b><i>Datos Iniciales de central con una cámara flash. ....</i></b>	<b>82</b>
<b>Figura 4.10</b>	<b><i>Datos iniciales de central con dos cámaras flash. ....</i></b>	<b>87</b>
<b>Figura 4.11</b>	<b><i>Válvula reductora de presión. ....</i></b>	<b>88</b>
<b>Figura 4.12</b>	<b><i>Turbina de doble admisión.....</i></b>	<b>90</b>
<b>Figura 4.13</b>	<b><i>Gráfica de la potencia generada y porcentaje de incremento con la calidad de vapor al 30%. ....</i></b>	<b>97</b>
<b>Figura 4.14</b>	<b><i>Gráfica de la potencia generada y porcentaje de incremento con la calidad de vapor al 32%. ....</i></b>	<b>98</b>
<b>Figura 4.15</b>	<b><i>Gráfica de la potencia generada y porcentaje de incremento con la calidad de vapor al 35%. ....</i></b>	<b>99</b>
<b>Figura 4.16</b>	<b><i>Gráfica de la potencia en una y dos etapas de flasheo incrementando la calidad del vapor. ....</i></b>	<b>99</b>
<b>Figura 4.17</b>	<b><i>Gráfica de la potencia y porcentaje en una y dos etapas de flasheo incrementando la calidad del vapor.....</i></b>	<b>100</b>
<b>Figura 4.18</b>	<b><i>Gráfica de la tendencia del porcentaje con dos calmaras flash cuando incrementa la calidad del vapor. ....</i></b>	<b>101</b>



## Lista de tablas

<i>Tabla 2.1</i>	<i>Diferentes carbones. ....</i>	<i>23</i>
<i>Tabla 2.2</i>	<i>Potencial energético.....</i>	<i>24</i>
<i>Tabla 2.3</i>	<i>Formas de aprovechamiento. ....</i>	<i>29</i>
<i>Tabla 2.4</i>	<i>Potenciales energéticos de la biomasa.....</i>	<i>37</i>
<i>Tabla 3.1</i>	<i>Fases de búsqueda y valoración yacimientos geotérmicos.....</i>	<i>45</i>
<i>Tabla 3.2</i>	<i>Producción de electricidad por geotérmica.....</i>	<i>55</i>
<i>Tabla 4.1.</i>	<i>Producción de vapor central geotérmica los Azufres. ....</i>	<i>80</i>
<i>Tabla 4.2.</i>	<i>Potencia de las unidades de los Azufres.....</i>	<i>81</i>
<i>Tabla 4.3.</i>	<i>Potencia generada de acuerdo a la calidad del vapor. ....</i>	<i>97</i>

## Capítulo 1. Introducción

### 1.1 La energía geotérmica



Figura 1.1 Yacimiento geotérmico.

La energía geotérmica es una energía renovable que se obtiene mediante el aprovechamiento del calor del interior de la Tierra que se transmite a través de los cuerpos de roca caliente o conducción y convección, donde se suscitan procesos de interacción de agua subterránea y rocas, dando origen a los sistemas geotérmicos.

El término «geotérmico» viene del griego *geo* («Tierra»), y *thermos* («calor»); literalmente «calor de la Tierra». El interior de la Tierra está caliente y la temperatura aumenta con la profundidad. Las capas profundas están a temperaturas elevadas y, a menudo, a esa profundidad hay capas freáticas en las que se calienta el agua: al ascender, el agua caliente o el vapor producen manifestaciones en la superficie, como los géiseres o las fuentes termales, utilizadas para baños desde la antigüedad. [1]

Fuente: Wikipedia. *Energía Geotérmica*. [En línea]. Disponible en: [https://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADa\\_geot%C3%A9rmica](https://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADa_geot%C3%A9rmica)

#### 1.1.1 Usos y aplicaciones de la energía geotérmica

Los usos de la **energía geotérmica** se pueden clasificar en:

- Sistemas de calefacción urbana y de uso directo.
- Sistemas de calefacción y refrigeración. Esta aplicación se trata de aprovechar el calor del interior de la Tierra directamente como energía térmica.
- Para producir energía eléctrica en las plantas geotérmicas.



Cuando se utilizan recursos geotérmicos, se hace una distinción entre el uso directo y el uso indirecto. El uso directo significa utilizar el calor en sí mismo. Cuando se habla de uso indirecto se refiere a que se realiza una conversión a otro tipo energía, por ejemplo a la energía eléctrica o electricidad.

### **1.1.2 Sistemas de calefacción urbana y de uso directo de la energía geotérmica**

Los sistemas de calefacción urbana y de uso directo utilizan agua caliente de manantiales o depósitos ubicados cerca de la superficie de la Tierra.

Las antiguas culturas romana, china y nativa americana usaban manantiales de agua caliente para bañarse, cocinar y calentarse. Hoy en día, todavía se utilizan muchas fuentes termales para bañarse.

Las primeras aplicaciones de la energía geotérmica se pueden encontrar en los baños del Imperio Romano, el Imperio Medio de los chinos y los Otomanos para la construcción de balnearios.

Los yacimientos geotérmicos también sirven para calentar directamente edificios con sistemas de calefacción urbana. Utilizando esta fuente de energía renovable se evita la emisión de CO<sub>2</sub> y otros gases de efecto invernadero.

### **1.1.3 Calefacción y refrigeración usando calor geotérmico**

Uno de los usos de la energía geotérmica son las [\*bombas de calor\*](#) geotérmicas. Estas bombas de calor permiten calentar y enfriar edificios, así como para la preparación de agua caliente sanitaria.

Para la mayoría de las aplicaciones, no se requiere obtener altas temperaturas. A menudo las temperaturas requeridas pueden estar disponibles directamente. Si esto no es suficiente, la temperatura puede elevarse con bombas de calor, como suele ser el caso con la energía geotérmica cercana a la superficie.

#### **Aire acondicionado natural**

Otro uso de este tipo de energía es el enfriamiento natural.

En el enfriamiento natural el agua con la temperatura de la superficie plana se usa directamente para enfriar el edificio (sin el uso de una bomba de calor). La temperatura de



la superficie es la temperatura media anual del sitio, por lo tanto, en verano es más baja que la temperatura ambiente.

### **Mantenimiento de obras civiles**

Otra aplicación directa es la de evitar la congelación de puentes, carreteras o aeropuertos. De nuevo, no se necesita bomba de calor. Esto incluye el tendido de tuberías de agua sin escarcha.

### **Aguas termales**

Para el uso de calor en aguas termales de la energía geotérmica se utilizan aguas profundas con temperaturas entre 40 y 150 ° C.

El agua termal generalmente se lleva a la superficie desde una profundidad de 1,000 a 4,500 metros a través de un pozo. El agua transfiere la mayor parte de su energía térmica a través de un intercambiador de calor a un segundo circuito de la red de calefacción "secundaria".

Luego se enfría y se presiona a través de un segundo orificio con una bomba en el suelo, en la capa de la que se extrajo.

### **1.1.4 Generación de energía eléctrica y plantas geotérmicas**

La generación de electricidad geotérmica requiere agua o vapor a alta temperatura. Las plantas de energía geotérmica generalmente se construyen donde se encuentran los yacimientos geotérmicos.

### **Energía hidrotermal**

Una fuente [hidrotermal](#) es una grieta o fumarola en la superficie de la cual fluye agua caliente de origen geotérmico.

En la generación de energía hidrotermal, se necesitan temperaturas del agua de al menos 80°C. Los depósitos hidrotermales de vapor caliente y seco con temperaturas superiores a 150 °C se pueden utilizar directamente para impulsar una turbina de vapor. [2]

Fuente: Solar energía. *Usos y aplicaciones de la energía geotérmica*. [En línea]. Disponible en: <https://solar-energia.net/energias-renovables/energia-geotermica/aplicaciones>



## 1.2 Objetivo

El objetivo del presente trabajo de tesis es analizar el comportamiento de la potencia y eficiencia de una central geotermoeléctrica en base a la calidad del vapor geotérmico. Esto de acuerdo al vapor que emiten los yacimientos geotérmicos, ya que esta fuente de generación renovable es una de las alternativas viables, ya que el uso de fuentes a base de combustibles fósiles se agota y son más contaminantes para el ambiente. Por este motivo es necesario realizar este análisis y demás estudios que ayuden a aumentar la potencia y por tanto la eficiencia de este tipo de central para así aprovechar más este recurso y realizar más exploraciones de yacimientos que permitan la generación de energía eléctrica.

## 1.3 Justificación

Como se sabe, la creciente demanda de energía eléctrica en el mundo y en el país requiere de fuentes de generación más eficientes y estables que garanticen la continua demanda para satisfacer las necesidades energéticas, ya que las fuentes de las que mayormente se depende como son los combustibles fósiles, el carbón, gas natural, etc., se están agotando y la energía geotérmica es una de las fuentes renovables más confiables, es por esto que en esta investigación se enfocará en analizar una de las variables que ayudan a aumentar la potencia, así como la eficiencia de las centrales geotermoeléctricas.

Así la presente investigación se enfocará en estudiar el vapor emitido por los yacimientos geotérmicos y su calidad para la generación de energía eléctrica y su impacto en este tipo de central eléctrica en base a esta fuente de energía, se sabe que los yacimientos geotérmicos actuales no tienen una calidad de vapor alta, esto que problemas genera y como la potencia se comporta ante esta problemática, esto se analizará en la tesis, así mismo esto permitirá no solo aumentar la eficiencia en relación a los proyectos de desarrollo de este tipo de central a largo plazo, sino planificar con mejores resultados de eficiencia en las centrales geotérmicas con los proyectos que se encuentren trabajando.



## 1.4 Metodología

La metodología que se realizará en la presente investigación se enfocará principalmente en la recolección de información obtenida de libros, artículos e internet, con estos datos obtenidos se realizará un análisis con las ecuaciones de la calidad de vapor así como con ecuaciones termodinámicas de la [entalpía](#) y entropía, para finalmente graficar los resultados obtenidos y determinar los cambios que se observen en las variables como la potencia de salida y así mismo observar la eficiencia, y con estos resultados dar una conclusión de la investigación.



## Capítulo 2. Antecedentes de centrales eléctricas

### 2.1 Introducción

La primera central eléctrica de *Thomas Alva Edison* daba corriente a unas pocas bombillas. Desde entonces, la red que lleva la electricidad a los hogares, industrias y comercios, se ha extendido y hoy asume su mayor reto: liberarse por completo de los combustibles fósiles.

Se sabe que, electricidad y luz van de la mano. Pero, en contra de lo que popularmente se ha establecido, el inventor de la electricidad no fue Edison. Tampoco fue el primero en patentar la bombilla de incandescencia. Otros inventores se le adelantaron casi una década, pero la suya era la única comercialmente viable. Tras obtener la patente en 1879, fundó la *Edison Illuminating Company* e inauguró en 1882 la primera central eléctrica para vender electricidad a los compradores de sus bombillas.

Comenzó con 80 clientes y 400 bombillas, pero en dos años el negocio había crecido a más de 500 clientes —entre ellos *The New York Times*— y 10.000 bombillas. Además de la primera central eléctrica también fue la primera planta de *cogeneración*, ya que el vapor se aprovechaba para dar calefacción a los edificios aledaños. Ese mismo año el industrial *H. J. Rogers* creó la primera central de energía hidroeléctrica en el río Fox (Wisconsin, Estados Unidos). [3]

#### Transporte y distribución

Estas primeras centrales eléctricas funcionaban con corriente continua, lo que impedía transportar la energía a largas distancias. Otro genio resolvió el problema: *Nikola Tesla* y su apuesta por la corriente alterna. Junto al industrial *George Westinghouse*, construyó en 1895 la central hidroeléctrica de las cataratas del Niágara, llevando la electricidad hasta la ciudad de Buffalo, a 40 kilómetros de distancia. Había comenzado la electrificación del mundo y, con ella, la segunda revolución industrial.

Dos nuevos proyectos en 1898 impulsaron este proceso: la central hidroeléctrica de *Decew Falls* en Ontario (Canadá) fue la primera en generar electricidad de alto voltaje para ser transportada a grandes distancias; y la de *Rheinfelden* (Alemania) fue la primera en usar corriente alterna trifásica a 50 Hertz, el estándar hoy en día en casi todo el mundo.



En 1900, el 40% de la electricidad de Estados Unidos provenía de centrales hidroeléctricas. En 1940 era el 30% y, actualmente, solo el 10%. En 1951 se inauguró la primera central nuclear experimental en Ohio (Estados Unidos). Durante el siglo XX los combustibles fósiles y las centrales nucleares tomaron el relevo del agua como generadores de energía en todo el mundo. [3]

### **Fuentes alternas**

La idea de concentrar los rayos del sol para aprovechar su calor viene de la antigua Grecia, pero fue el visionario *Frank Shuman* el primero en hacerla comercialmente viable. En 1911 fundó *Sun Power Co.* creando la primera planta solar en Tancony (Estados Unidos). Pero su gran proyecto, truncado por la I Guerra Mundial, fue una granja solar de 52.000 km<sup>2</sup> en el Sahara suficiente para abastecer a todo el planeta.

El aprovechamiento del sol mediante placas fotovoltaicas comenzó en la década de los 60 y se estima que la potencia instalada en todo el mundo alcance los 750 GW en 2025, con China como principal motor, según un estudio de Globaldata. La otra gran fuente de energía renovable y limpia es la energía eólica, la de mayor crecimiento en la última década en todo el mundo. Desde la instalación del primer aerogenerador en 1956 en la costa danesa con 200 kW, actualmente la potencia instalada en el mundo ronda los 500 GW.

El sueño de una energía limpia e inagotable podría ser realidad en el futuro si el proyecto ITER consigue sus objetivos previstos para 2027. Se trata de la fusión nuclear, la energía de las estrellas reproducida en un reactor de confinamiento magnético. El combustible es el hidrógeno, uno de los elementos más abundantes en nuestro planeta. [3]

### **Gestión de la red eléctrica**

La electricidad es un producto especialmente complejo: se produce, se distribuye por la red y se vende al usuario final. Por esta razón la red eléctrica es tan importante: debe formar un sistema con varias fuentes de generación donde puedan sumarse o relevarse unas a otras.

En una noche de verano sin viento, las plantas solares y los molinos eólicos no producen electricidad. Si además hay sequía, el uso de agua para electricidad estará limitado. Si la población enciende el aire acondicionado en sus casas y genera un pico de demanda, habrá que intensificar el uso de las centrales térmicas o comprar potencia a algún país vecino. La

red y sus gestores deben estar preparados para responder a la demanda con los recursos que sean necesarios.

Iberdrola. *150 años de camino a la sostenibilidad: historia de la electricidad*. [En línea]. Disponible en: <https://www.iberdrola.com/medio-ambiente/historia-electricidad>

### Centrales eléctricas



Figura 2.1 Centrales eléctricas.

Una central eléctrica es una instalación capaz de convertir la energía mecánica, obtenida mediante otras fuentes de energía primaria, en energía eléctrica.

Las centrales eléctricas son las diferentes plantas encargadas de la producción de energía eléctrica y se sitúan, generalmente, en las cercanías de fuentes de energía básicas (ríos,

yacimientos de carbón, etc.). También pueden ubicarse próximas a las grandes ciudades y zonas industriales, donde el consumo de energía es elevado.

Los generadores o alternadores son las máquinas encargadas de la obtención de la electricidad. Estas maquinarias son accionadas por motores primarios. El motor primario junto con el generador forma un conjunto denominado grupo.

### Tipos de Centrales

Los diferentes tipos de centrales eléctricas dependen de las distintas materias primas empleadas para obtener la energía eléctrica. Se diferencian en la energía potencial primaria que origina la transformación como se muestra en la figura 2.2.

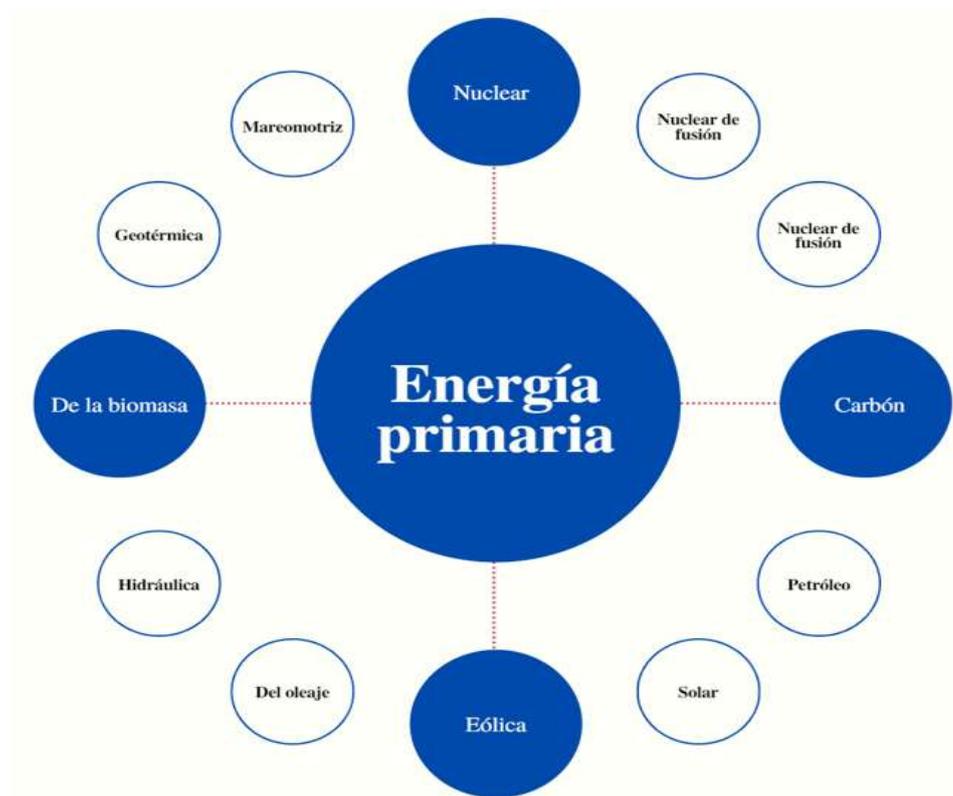


Figura 2.2 Fuentes energéticas.

## 2.2 Energía nuclear de fisión

### 2.2.1 Origen

La energía nuclear de fisión tiene su origen en la ruptura, por el bombardeo de protones, del núcleo de ciertos elementos pesados (uranio, torio, plutonio).



Figura 2.3 Central nuclear.

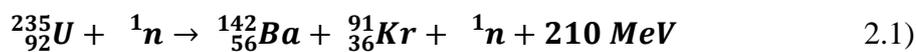
El más destacado es la uraninita (*pechblenda*), con un contenido del 60-80% de óxido de uranio, seguido de la carnotita, que es un polvo amarillo que contiene óxidos de uranio, potasio y vanadio. Menos corrientes son la torbenita, autunita y otros.

Para considerar rentable la explotación del uranio contenido en estas u otras sustancias (incluida el agua de los océanos), este contenido debe sobrepasar las 1.000 ppm (partes por millón).

En estado puro es un metal de color blanco argénteo, y muy difícil de obtener. El uranio tiene un peso atómico de 238,07 y su número atómico es de 92. Posee ocho isótopos, que van del 233 al 240, siendo los más abundantes el U-234, U-235 y U-238.

Cuando el núcleo de un átomo de U-235 es alcanzado por un neutrón (lento o rápido) se rompe en dos átomos más ligeros (kriptón y bario) que salen desplazados a gran velocidad.

La reacción que tiene lugar es la siguiente:



La cantidad de energía que se transfiere a los nuevos núcleos es aproximadamente igual a la diferencia entre la masa del núcleo del U-235 y la suma de los dos nuevos núcleos más la del neutrón capturado. El núcleo de U-235, además de formar dos nuevos átomos, libera dos o más neutrones y una intensa radiación gamma ( $\gamma$ ).

Estos neutrones liberados, pueden impactar con los núcleos de otros átomos U-235, rompiéndolos de nuevo. Se produce, así, una reacción en cadena (Figura 2.4).

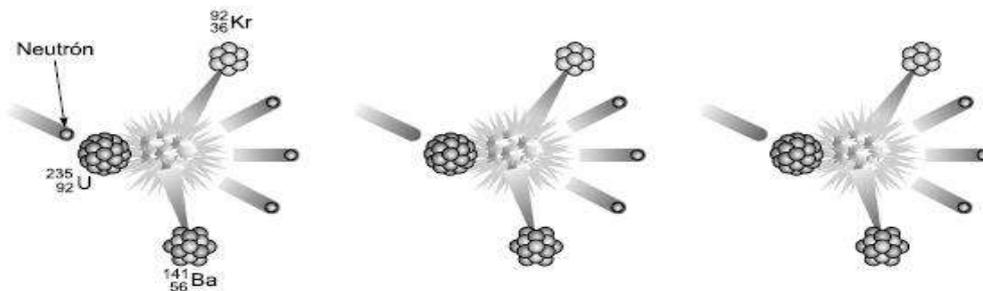


Figura 2.4 Reacción de fisión en cadena.

Para que se mantenga la reacción en cadena hay que disponer de una **masa crítica** del elemento fisionable.

Y para que la reacción no sea explosiva, ha de disponerse de un moderador que frene la velocidad de los neutrones liberados (como puede ser el agua ligera —H<sub>2</sub>O— o pesada —

H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>—). En los reactores nucleares se emplean, además, unos absorbedores de neutrones para parar la reacción, o para controlar la potencia del reactor: varillas de control.

En la Figura 2.4 se muestra un esquema del proceso básico en el seno de un reactor nuclear.

La energía cinética de estos fragmentos se transfiere (por colisión) a otros átomos (agua, CO<sub>2</sub>, sodio, etc.), originando un aumento de su temperatura (energía calorífica).

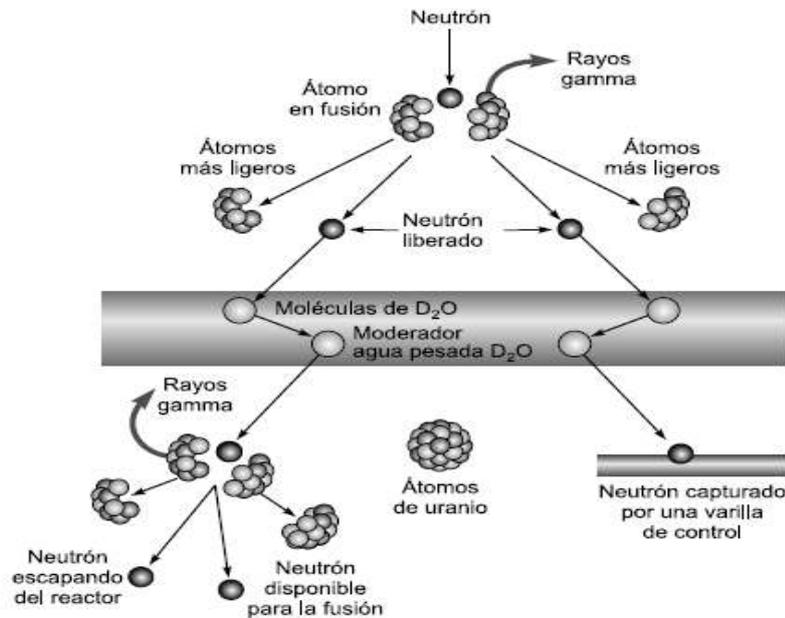


Figura 2.5 Proceso de un reactor nuclear.

### 2.2.1.1 Potencial energético

$$1 \text{ Tn } U^{235} = 10,000 \text{ Tn } \text{petróleo} = 20,000 \text{ Tn } \text{carbón}$$

$$\text{Para producir } 1 \frac{\text{GWh}}{\text{año}} \text{ se precisan } 30 \text{ Tn } U^{235}$$

### 2.2.1.2 Formas de aprovechamiento

La forma de aprovechamiento de esta energía es, exclusivamente, la producción de calor (energía térmica), elevando la temperatura de una sustancia (agua, CO<sub>2</sub>, sodio) hasta convertirla en vapor o gas a alta presión y mover con esta una turbina (convirtiéndola finalmente en energía mecánica). [4]



## 2.3 Energía nuclear de fusión

### 2.3.1. Origen

Su origen se encuentra en la fusión de dos núcleos atómicos para dar lugar a la aparición de otro núcleo más pesado, pero algo menos que la suma de las dos iniciales.

Esa diferencia se transforma en energía, según la conocida expresión:

$$E = m c^2 \quad 2.2)$$

*Donde:*

*E=Energía*

*m=Masa*

*c=Velocidad de la luz en el vacío*

Para que una reacción de fusión pueda tener lugar se precisa acercar lo suficiente los dos núcleos atómicos a unir, lo que implica vencer las fuerzas de repulsión coulombiana, que a estas escalas resultan ser muy grandes.

La combinación de elevada presión, elevada densidad y elevada temperatura en una sustancia conduce a que los electrones queden liberados de los núcleos y se alcance un estado de la materia denominado **plasma**. En estas condiciones, la cercanía de los núcleos, además de su elevada energía cinética (temperatura muy alta), permite vencer la repulsión coulombiana y hacer posible las reacciones de fusión.

El Sol, al igual que todas las estrellas, es un enorme reactor de fusión. Éste está formado principalmente por H<sub>2</sub>, que al unirse entre sí forman átomos de helio (He), un átomo de He tiene una masa algo menor que los dos de H<sub>2</sub>, liberando una gran cantidad de energía, de acuerdo con la expresión:



Para que esta reacción pueda tener lugar se precisa una presión de 108 bares (posible dada la enorme masa del Sol, y las consecuentes fuerzas gravitatorias), una temperatura superior a 20 millones de °C y una densidad de 104 kg/m<sup>2</sup>.

En el Sol, cada segundo, 564 millones de Tn de  $H_2$  se transforman en 560 Tn de He. La energía resultante, mediante procesos de irradiación y de convección, es transportada a la superficie del Sol e irradiada al espacio exterior. La pérdida de masa por esta causa se eleva a 4,3 millones de Tn por segundo, lo que supone que para consumir el 10% de su masa se precisan 6.000 millones de años.

Conseguir estas condiciones en la Tierra es un arduo problema, aunque puede suavizarse si en lugar de hidrógeno se emplea hidrógeno pesado (deuterio) o superpesado (tritio).

Entonces las condiciones de inicio de la reacción son más suaves: 100 millones de  $^{\circ}C$  y 100 billones de partículas por  $cm^3$ , simultáneamente.

La bomba de  $H_2$  consigue tales condiciones utilizando una explosión de fisión como detonante.

La reacción deuterio-tritio es la más fácil de conseguir, puesto que requiere temperaturas relativamente más bajas. El deuterio  $21 H$  es muy abundante en la naturaleza, encontrándose en una concentración de  $30 g/m^3$  en el agua del mar; sin embargo, el tritio  $31 H$  no se encuentra en estado natural, y se produce en una reacción nuclear a partir del litio natural, que sí es abundante en la naturaleza.

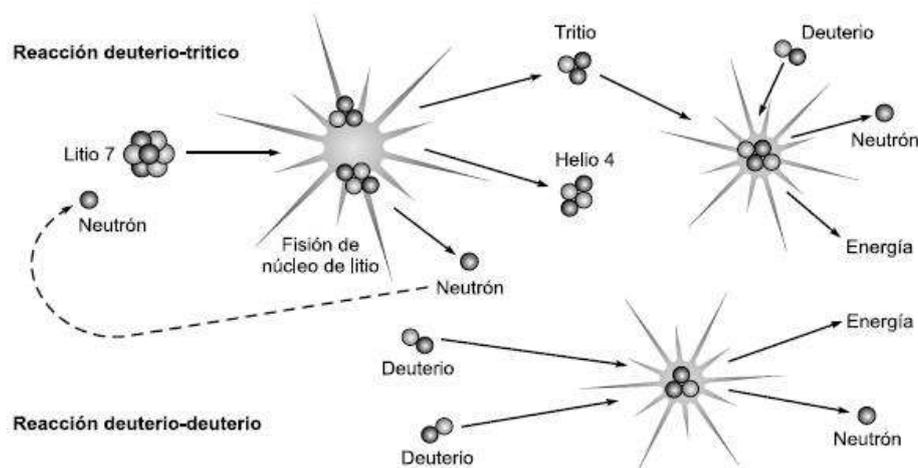
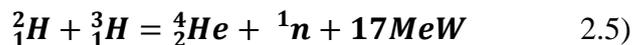
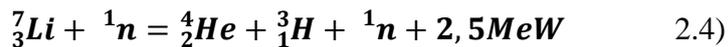
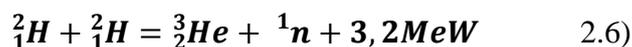


Figura 2.6 Reacción de fusión.

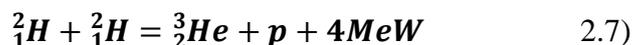
En la reacción, los neutrones fisionan el litio en helio y tritio, para posteriormente fusionarse al deuterio y el tritio y formar helio, liberando un neutrón y gran cantidad de energía.



La reacción deuterio-deuterio es más difícil de conseguir. En esta se produce helio y un neutrón, o también, tritio y un protón.



También



### 2.3.2. Potencial energético

Tanto el deuterio como el tritio son sustancias muy abundantes en la Tierra. 1 m<sup>3</sup> de agua de mar contiene 1025 átomos de deuterio, con una masa de 34,4 g y una energía de 8x10<sup>12</sup> julios. Equivale a 300 Tn de carbón o 1.500 barriles de petróleo. Ello significa que 1 km<sup>3</sup> de agua de mar equivale a 300.000 millones de Tn de carbón o 1.500 millones de barriles de petróleo. Como los océanos tienen 1.500 millones de km<sup>3</sup> de agua, el empleo de 1% del deuterio del océano equivale a 500.000 veces la energía de todos los combustibles fósiles existentes.

En cuanto al tritio, puede obtenerse a partir de la fusión de los átomos de litio, cuyas reservas también pueden considerarse ilimitadas.

### 2.3.3 Formas de aprovechamiento

La única forma de aprovechamiento es producir calor y evaporar agua, para su posterior conversión en energía mecánica mediante una turbina de vapor.

La formación de 1 kg de helio, a partir de H<sub>2</sub> libera una energía equivalente a 27.000 Tn de carbón.

### 2.3.4. Reservas

A efectos prácticos, pueden considerarse ilimitadas. [4]

## 2.4. Energía del carbón



Figura 2.7 Energía del carbón.

### 2.4.1. Origen

Su origen se encuentra en la transformación de masas vegetales enterradas bajo el subsuelo y sometidas a procesos de descomposición (anaerobia) y presión.

La materia vegetal inicial se transforma en turba (perdiendo agua y gases).

Cuando las turberas se hunden, el aumento de presión y temperatura expulsan más agua y gases ( $O_2$  y  $N_2$ ), formándose el lignito y los carbones pardos. Mayores presiones y temperaturas eliminan

más gases transformando el carbón pardo en carbón bituminoso (hulla). La fase final de compresión y expulsión de gases da lugar a la antracita, de gran poder calorífico pero que arde con dificultad (Figura 2.6).

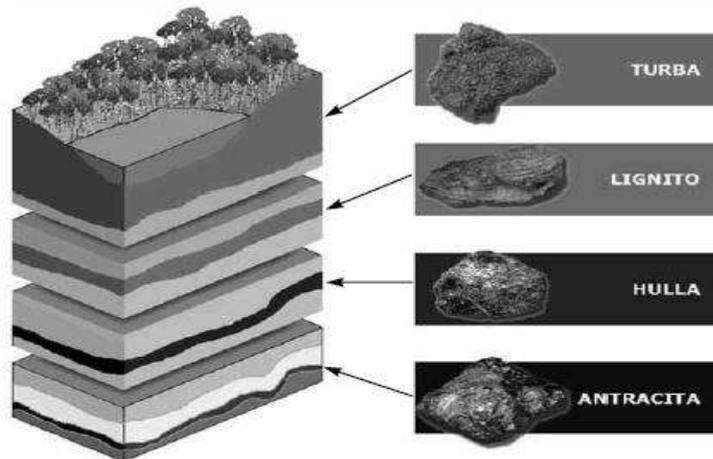


Figura 2.8 Generación del carbón.

La mayor parte del carbón se produjo hace 300 millones de años, en el Período Carbonífero, cuando se depositó en forma de turba el 80% del carbón natural actual a lo largo de un extenso cinturón que atraviesa Norteamérica, Europa, Rusia y China (también, en menor medida, Sudáfrica y Australia).

Las vetas oscilan entre 0,6 y 2,5 m. de espesor, a profundidades entre 12 y 50 o más metros, aunque hay algunos que han aflorado.

Los lignitos proceden de carbonizaciones de 50 millones de años, y los principales yacimientos se encuentran en Canadá, México y Alemania.

La composición de los diferentes carbones es la siguiente (partiendo de la composición de la madera):

Tabla 2.1 Diferentes carbones.

	%C	%H <sub>2</sub>	%N <sub>2</sub>	%O <sub>2</sub>
Madera	49.6	6.23	0.92	43.2
Turba	95.4	6.28	1.72	36.56
Lignito	72.9	5.24	1.31	20.5



Hulla	84.2	6.56	1.52	8.69
Antracita	93.5	2.81	0.97	2.72

Fuente: BP, British Petroleum.

### 2.4.2 Potencial energético

El potencial energético de esta fuente de acuerdo a los diferentes materiales, se pueden observar en la tabla 2.2.

Tabla 2.2 Potencial energético.

	kJ/kg	kWh/kg
Madera	19.77	5.491
Turba	18.663	5.18
Lignito	27.2	7.55
Hulla	32.1	8.91
Antracita	32.56	9.04

Fuente: BP, British Petroleum.

### 2.4.3 Formas de aprovechamiento

Desde el punto de vista energético el carbón se aprovecha para producir calor (quemándolo, es decir, haciendo que reaccione con el oxígeno del aire) y con él, evaporar agua para mover una turbina y transformarlo en energía mecánica.

También se emplea su energía para fundir el mineral de hierro en los altos hornos y para obtener diversos productos en la industria química. Además, existen procedimientos para convertir el carbón en combustibles líquidos y gaseosos. [4]

## 2.5. Energía del petróleo

### 2.5.1. Origen

La mayor parte del material orgánico que forma el petróleo deriva de organismos microscópicos (plancton) que se crían en las aguas superficiales de los océanos y que se van concentrando, a su muerte, en el fondo del mar. También de otros animales y vegetales que viven en lagunas o desembocaduras de ríos.



Figura 2.9 Energía del petróleo.

Estos restos van formando espesas capas de lodos en los fondos marinos. Tales lodos, foco de bacterias anaerobias, fueron fermentados, de manera que se convirtieron en una masa pastosa compuesta principalmente por  $C_2$  y  $H_2$ , y carentes de  $O_2$  (Figura 2.7).

Para que la materia orgánica se transforme en petróleo, la velocidad de acumulación de los sedimentos debe ser elevada, o en su caso, la concentración de oxígeno en el fondo del océano pequeña, pues la materia orgánica no debe oxidarse antes de que sea enterrada.

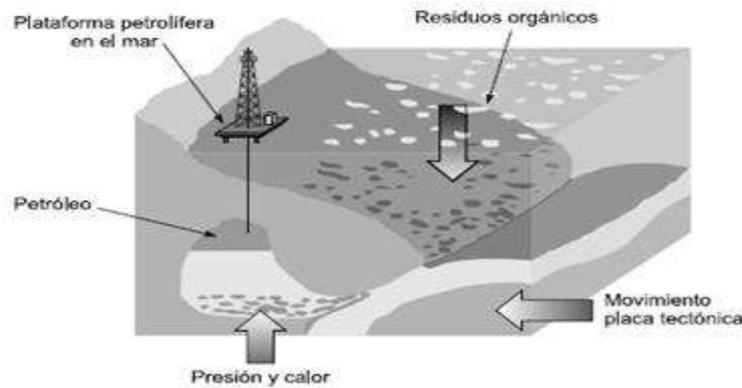


Figura 2.10 Formación del petróleo.

El enterramiento de estas cuencas sedimentarias cargadas de lodos y agua de mar eleva la presión y la temperatura de esta materia orgánica y modifica la composición química de estos restos (Figura 2.8). La materia orgánica se transforma en hidrocarburos gracias a la presión y al calor generados en su enterramiento.

Cuando el calor alcanzado es elevado, parte de los hidrocarburos se convierten en gases (gas natural). También existen gases naturales que tienen su origen en la descomposición de restos de vegetales en zonas pantanosas.

El resultado final de este proceso, que puede tener una duración de desde cientos de miles a millones de años, es una mezcla de gases (metano, etano, propano, butano, hidrógeno) líquidos ligeros (petróleo, aceites ligeros), líquidos muy viscosos (que no fluyen si no se calientan), hasta arenas y pizarras bituminosas.

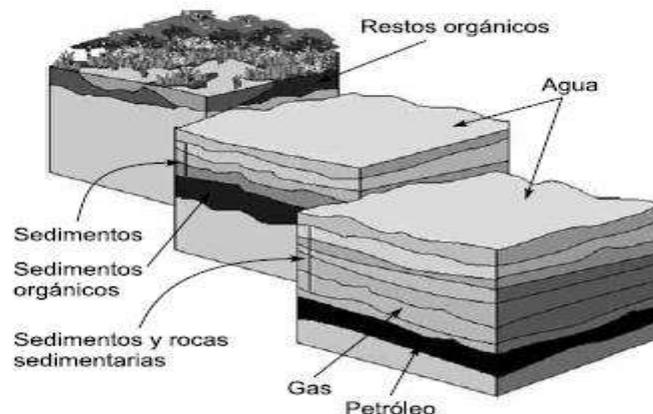


Figura 2.11 Formación del petróleo.

También en el petróleo varía el contenido de impurezas, entre las que destaca el azufre y en el caso del gas, el CO<sub>2</sub> (50% en algunos campos de México), y el N<sub>2</sub> (90% en algunos campos daneses).

La aparición de bolsas de petróleo y gas requiere de unas condiciones geológicas precisas para su formación.

El petróleo necesita una fuente sedimentaria (roca madre), una roca porosa (Figura 2.9) que le sirva de recipiente (roca almacén) y una estructura cerrada que lo retenga (roca cobertera).

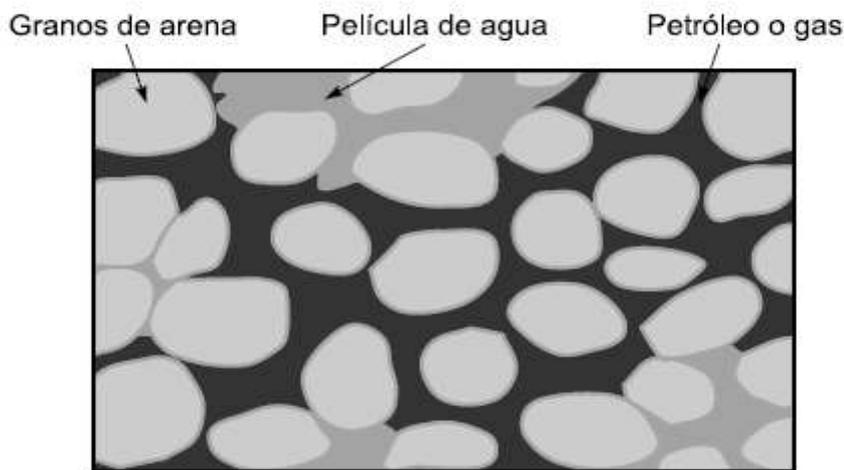


Figura 2.12 Petróleo en los intersticios.

Por efecto de la presión, los hidrocarburos volátiles y ligeros, junto al agua de mar, que están atrapados en los sedimentos, ascienden a través de capas de rocas permeables (con sus poros y fisuras inundados de petróleo o gas y agua de mar) y se acumulan en bolsas atrapadas por estructuras impermeables (si no existiera este tapón, los volátiles continuarían ascendiendo y se escaparían a la atmósfera).

Estas «trampas» pueden ser de muy varios tipos: de origen estructural (plegamientos, anticlinales, fallas), de origen estratigráfico (deposiciones y sedimentos, tipo lentejones, arrecifes y disconformidades) o de origen salino (domos salinos), originados al ascender la sal por su menor densidad y formar auténticos tapones que retienen el petróleo (Figura 2.10).

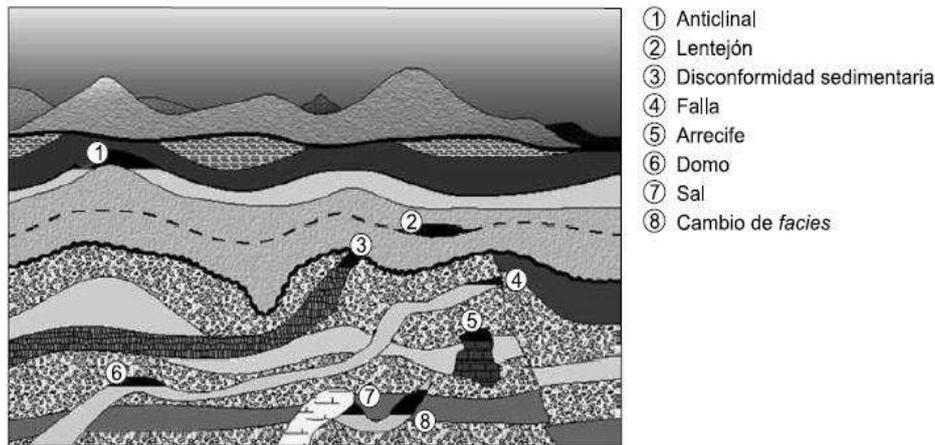


Figura 2.13 Trampas de petróleo.

### 2.5.2 Potencial energético

*1 kg de petróleo equivale a 11 kWh o 39.600 kJ.*

*1.000 m<sup>3</sup> de gas natural equivalen a 900 kg de petróleo.*

### 2.5.3 Formas de aprovechamiento

Desde el punto de vista energético, el petróleo se aprovecha para producir calor (por combustión con el oxígeno del aire), evaporando agua, moviendo una turbina y transformándolo en energía mecánica. También se emplea para el accionamiento de todo tipo de vehículos terrestres, marítimos, aéreos, (donde es prácticamente insustituible) y, en menor medida, en calefacción y otras industrias que requieran una aportación energética de tipo calorífico.

Finalmente, del petróleo se obtiene una gran cantidad de compuestos químicos (plásticos, fibras, medicamentos, insecticidas, etc.).

El gas se destina predominantemente a consumo doméstico (calefacción y cocción), así como a la producción de vapor de agua (por combustión del gas) para la industria generadora eléctrica. [4]



Tabla 2.3 Formas de aprovechamiento.

Estado natural	Productos elaborados	Usos industriales
Sólidos (asfaltos, bitúmenes)	Vaselinas	Lubricantes
	Parafinas	Plásticos
	Alquitranes	Impermeabilizantes
Líquidos (crudos)		Pavimentos
	Fuel	
	Gasóleo	Combustibles de centrales térmicas
	Gasolina	Automoción
	Keroseno	Aviación
Gaseosos (gas natural)	Propano	Calefacción
	Etano	Cocción
	Butano	
	Metano	

Fuente: BP, British Petroleum.

## 2.6. Energía solar

### 2.6.1. Origen

Es la energía radiante procedente del Sol y que llega a la superficie de la Tierra (infrarrojo, luz visible y ultravioleta).



Figura 2.14 Energía solar.

### 2.6.2 Potencial energético

Es variable, en función de la hora del día, época del año y situación atmosférica: día noche, estación del año (altura del sol sobre el horizonte), nubes, nieblas, smog, calimas, etc.

En teoría, la radiación media incidente por  $m^2$  fuera de la atmósfera es de  $1,4 \text{ kW}/m^2$ . En la práctica y en una zona como Canarias, la energía solar anual, por  $m^2$ , es aproximadamente de  $2.000 \text{ kWh}/m^2$  (con un promedio de 3.000 h. de insolación, equivalente a  $4.200.000 \text{ kJ}/m^2\text{año}$  o  $1.711.488 \text{ kcal}/m^2\text{año}$  o  $478,5 \text{ kcal}/m^2\text{día}$ ).

### 2.6.3. Formas de aprovechamiento

Los métodos de aprovechamiento pueden englobarse en dos grandes grupos: térmicos y fotovoltaicos.

Los primeros transforman la energía solar en energía térmica (calentando aire, agua u otras sustancias). Los segundos transforman la energía solar en energía eléctrica, aprovechando el efecto fotovoltaico, en las denominadas «células solares» o «fotovoltaicas». [4]

## 2.7. Energía eólica



Figura 2.15 Energía eólica.

### 2.7.1. Origen

La energía eólica no es más que la energía cinética de una masa de aire en movimiento.

Su origen se encuentra en la existencia sobre la Tierra de masas de aire a diferentes temperaturas, originadas por diferentes intensidades de radiación solar, a nivel global o local,



las cuales producen corrientes ascendentes y descendentes, formando *anillos de circulación* del aire.

La energía eólica es, por consiguiente, un pequeño porcentaje de la energía solar incidente sobre el planeta.

### **2.7.2. Potencial energético**

Es variable, en función de la hora del día, del día del año, de la situación geográfica general y de la topografía local.

Por razones técnicas, es imposible extraer toda la energía cinética existente en una corriente de aire.

A título de ejemplo, en un viento de 8 m/s de media anual, pueden extraerse alrededor de 2.800 kWh por m<sup>2</sup> y año. Un viento de 13 m/s, a través de una superficie de 150 m<sup>2</sup>, tiene una potencia de 198 kW.

### **2.7.3. Formas de aprovechamiento**

El aprovechamiento de esta fuente energética es su conversión directa en energía mecánica a través del giro del eje de la turbina eólica con una cierta potencia.

Esta energía mecánica puede transformarse posteriormente en energía potencial (bombeo) o energía eléctrica (por accionamiento de un generador eléctrico acoplado al eje de la turbina).

[4]

## **2.8. Energía del oleaje**

### **2.8.1. Origen**

Su origen es la acción del viento sobre las superficies de las aguas. Es, por consiguiente, un pequeño porcentaje de la energía del viento.

El viento sobre una zona del mar y las olas formadas, están directamente relacionadas, aun cuando las mismas pueden prolongarse a gran distancia del punto de generación.



Figura 2.16 Energía del oleaje.

### 2.8.2. Potencial energético

Varía mucho de un punto a otro de los mares y de una estación del año a otra.

Como promedio y en zonas libres del Atlántico, Pacífico e Índico, pueden alcanzarse los 40-70 kW por metro de frente de ola.

En teoría, el potencial energético de las olas en el mundo se estima en 0,5 TW.

### 2.8.3. Formas de aprovechamiento

La forma de aprovechamiento es transformarla en energía mecánica (de movimiento o de presión).

Esta energía mecánica puede posteriormente transformarse en energía eléctrica (por medio de un generador) o en energía potencial (por medio de un sistema de bombeo). [4]

## 2.9. Energía hidráulica

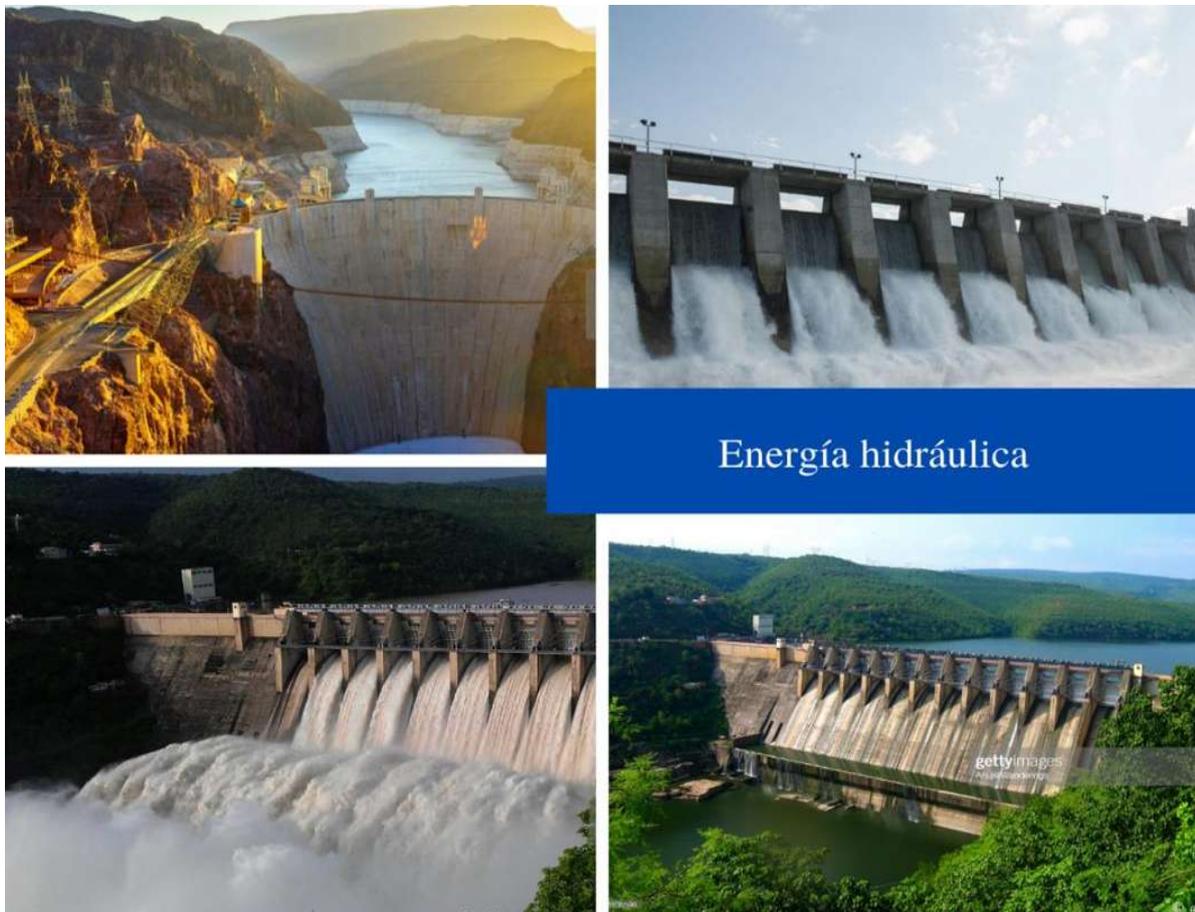


Figura 2.17 Energía hidráulica.

### 2.9.1. Origen

En teoría, la energía hidráulica es la contenida en una masa de agua elevada respecto de un nivel de referencia (de utilización).

En la práctica, la energía hidráulica se obtiene a partir de cualquier masa de agua en movimiento. Tal puede ser el caso de la corriente de un río, como la corriente que discurre por un tubo originada por una diferencia de altura entre dos pantanos. En ambos casos, la energía potencial del agua se transforma en energía cinética, y ésta es la aprovechable.

Su origen es la evaporación del agua (en el mar, tierra, pantanos, etc.) por la acción de la energía solar y que cae en forma de lluvia o nieve en cotas altas de la superficie terrestre.



Es, por tanto, un pequeño porcentaje de la energía solar que llega a la Tierra.

### **2.9.2. Potencial energético**

La energía hidráulica constituye una de las energías renovables más importantes del planeta.

***1 Tn de agua, a 10 m de altura, tiene una energía de 278 kWh .***

En teoría, el potencial de energía hidráulica aprovechable en toda la Tierra se estima entre 2 y 3 TW.

### **2.9.3. Formas de aprovechamiento**

La energía potencial del agua se transforma en energía cinética y ésta a su vez en energía mecánica, por medio de las turbinas hidráulicas, colocadas en la base de los correspondientes embalses reguladores.

El empleo de la energía captada es, casi exclusivamente, para la producción de electricidad, acoplando a la turbina hidráulica un generador eléctrico. [4]

## **2.10. Energía de la biomasa**

### **2.10.1. Origen**

Es la energía solar almacenada en los seres vivos, vegetales o animales por medio del proceso de fotosíntesis (vegetales) y la digestión (comida) de estos vegetales por los animales.

Se trata, por tanto, de un pequeño porcentaje de la energía solar que llega a la Tierra.

En la práctica pueden suponerse tres fuentes de energía de la biomasa:

De origen vegetal: biomasa natural, cultivos energéticos.

De origen animal: excrementos y purines.

De origen humano: los Residuos Sólidos Urbanos (RSU), procedentes de viviendas, comercios, fábricas, etc.



Figura 2.18 Energía de la biomasa.

### 2.10.2. Potencial energético

La producción energética a partir de la biomasa puede variar según el tipo de cultivo, el método de aprovechamiento empleado y las necesidades de transporte de la misma hasta el punto de aprovechamiento.

Como valores de referencia pueden tomarse los indicados en la tabla 2.4.

### 2.10.3. Formas de aprovechamiento

La energía de la biomasa se emplea directamente para producir calor por combustión de la misma (calefacción, cocción), o indirectamente para producir electricidad (evaporando agua y transformándola en energía mecánica con una turbina).



Tabla 2.4 Potenciales energéticos de la biomasa.

Madera (seca)	15 GJ/Tn	(10 GJ/m <sup>3</sup> )
Papel (periódicos compactados)	17 GJ/Tn	(9 GJ/m <sup>3</sup> )
Paja (empacada)	14 GJ/Tn	(1.4 GJ/m <sup>3</sup> )
Caña de azúcar (seca)	14 GJ/Tn	(10 GJ/m <sup>3</sup> )
Césped (recién cortado)	4 GJ/Tn	(3 GJ/m <sup>3</sup> )
Boñigas (secas)	16 GJ/Tn	(4 GJ/m <sup>3</sup> )
Residuos domésticos (sin tratar)	9 GJ/Tn	(1.5 GJ/m <sup>3</sup> )
Residuos comerciales	16 GJ/Tn	

Fuente: BP, British Petroleum.

También se puede transformar la biomasa en combustibles líquidos (bioalcoholes) o gaseosos (biogás) para ser posteriormente quemados y convertidos en energía calorífica y posteriormente, en mecánica (automoción o generación eléctrica). [4]

## 2.11. Energía geotérmica

### 2.11.1. Origen

Su origen se encuentra en el calor acumulado en el interior de la tierra, en su magma fundido. Sin embargo, su aprovechamiento solo es posible en aquellas zonas donde el calor se aproxima a la superficie, normalmente en los denominados **cinturones sísmicos**, bien por una intrusión magmática —cono volcánico—, o por una corteza anormalmente delgada.



Figura 2.19 Energía geotérmica.

También pueden originarse zonas térmicas por concentraciones de radioactividad elevadas.

Los campos térmicos pueden clasificarse en dos grandes grupos: hipertérmicos y semitérmicos.

En los primeros, el agua caliente, o en forma de vapor, alcanza la superficie. En los segundos, el agua o gases calientes no afloran.

Los campos hipertérmicos (que a veces se manifiestan como géiseres, fumarolas, barro caliente, fuentes termales, etc.) están contruidos normalmente por agua de lluvia que alimenta el manto acuífero y que es calentada por el magma próximo. Debido a la presión, el agua subterránea puede alcanzar los 200-300 °C y a medida que asciende se transforma en vapor al disminuir la presión. Si este vapor continúa hasta la superficie, se condensa en contacto con capas más frías, dando lugar a campos de agua caliente, o *campos húmedos*. Por el contrario, si el vapor queda atrapado en bolsas se dice que es un *campo seco*.



### **2.11.2. Potencial energético**

En conjunto, el potencial energético del flujo geotérmico de la Tierra se estima en unos 30 TW.

### **2.11.3. Formas de aprovechamiento**

El agua y gases calientes, en afloramientos naturales, se emplea directamente para la calefacción u otros usos industriales que exijan esta forma de energía.

En perforaciones efectuadas sobre campos hipertérmicos, el agua caliente o el vapor se emplean para mover turbinas de vapor y producir electricidad.

En los campos semitérmicos, las perforaciones se emplean casi exclusivamente para la calefacción de aguas, invernaderos, etc. En perforaciones efectuadas sobre campos hipertérmicos, el agua caliente o el vapor se emplean para mover turbinas de vapor y producir electricidad.

En los campos semitérmicos, las perforaciones se emplean casi exclusivamente para la calefacción de aguas, invernaderos, etc. [4]

## **2.12. Energía de las mareas**

### **2.12.1. Origen**

Su origen es la interacción gravitatoria Tierra-Luna que desplaza cantidades ingentes de las aguas de los océanos.

### **2.12.2. Potencial energético**

El potencial energético depende del punto del planeta y de la época del año, así como de la disponibilidad de zonas donde embalsar el agua del mar durante la pleamar. En la práctica son aprovechables los niveles superiores a los 4 m.



Figura 2.20 Energía mareomotriz.

### 2.12.3. Formas de aprovechamiento

La única forma de aprovechamiento es la conversión en energía mecánica, para su conversión posterior en energía eléctrica, mediante turbinas hidráulicas. [4]

Fuente: José A. C. González, Roque C. Pérez, Antonio C. Santos, Manuel-A. Castro Gil. (2009). *Centrales de Energías Renovables: Generación Eléctrica con Energías Renovables*. Madrid, España: Editorial Pearson Educación, S.A.



## Capítulo 3. Características de yacimientos geotérmicos y su vapor

La definición expuesta de la energía geotérmica es muy amplia y no contempla el aspecto de su aplicación práctica.

Desde este punto de vista, se puede restringir la definición diciendo que la energía geotérmica es la energía calorífica contenida en las rocas del subsuelo y que puede ser extraída por el hombre en términos económicos.

Esta nueva condición va determinar la definición de otro concepto importante: el YACIMIENTO GEOTERMICO. Cuando en un área geográfica se cumplen las condiciones necesarias para que se pueda explotar el subsuelo, se dice que allí existe un yacimiento geotérmico. Estas condiciones son las mismas si se trata de un yacimiento de alta temperatura que si se trata de un yacimiento de baja temperatura. [4]

### 3.1 Tipos de yacimientos geotérmicos

#### 3.1.1 Yacimientos de alta temperatura

En estos yacimientos, además de existir una concentración de la energía geotérmica, es decir, existencia de un foco de calor activo que asegura la alta temperatura del almacén, se deben presentar las condiciones que eviten la disipación de la energía hacia la superficie, lo que se consigue cuando existe una cobertura impermeable.

Así, las condiciones de existencia de yacimientos de alta temperatura, se pueden resumir en:

*Foco de calor activo.*

*Roca permeable que almacene el fluido.*

*Capas de rocas impermeables superpuestas al almacén.*

Generalmente la cobertura impermeable no es perfecta, por lo que existe un escape de fluido a la superficie, dando lugar a géiser, fumarola, solfatara o simplemente fuente termal. Estas manifestaciones son los indicios de existencia de yacimiento geotérmico. En la figura 3.2 podemos observar las características de este tipo de yacimiento, así como la profundidad y la temperatura del almacén a la que se encuentra. [5]



Figura 3.1 Géiser: Salida natural de los yacimientos geotérmicos.

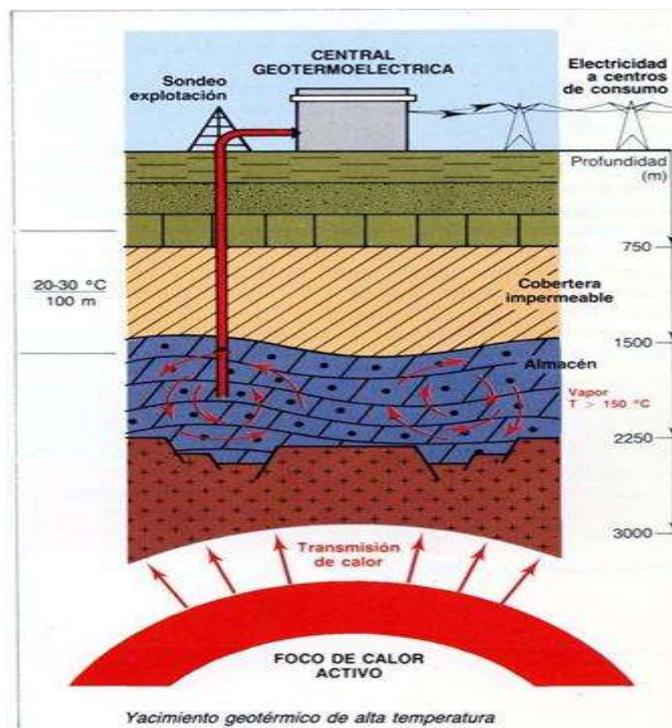


Figura 3.2 Yacimiento geotérmico de alta temperatura.

### 3.1.2 Yacimientos de baja temperatura

En los yacimientos de baja temperatura, el valor del flujo calorífico es el normal en la corteza terrestre, por lo que es innecesaria la existencia de dos de las condiciones anteriores: existencia de *foco de calor activo* y *aislamiento del almacén* a la profundidad adecuada para

que, con el *gradiente geotérmico* existente de dicha zona, se tengan temperaturas que hagan económica su explotación.

No obstante, existe un condicionante no geológico muy importante para la explotación del yacimiento de baja temperatura: la presencia en sus proximidades de centros de consumo de suficiente magnitud.

Por lo tanto, se pueden definir con las condiciones de existencia de yacimientos de baja temperatura (60-100 °C) en:

- Rocas permeables a profundidad de 1.500-2.500 m.
- Suficiente demanda energética en la misma zona. [4]

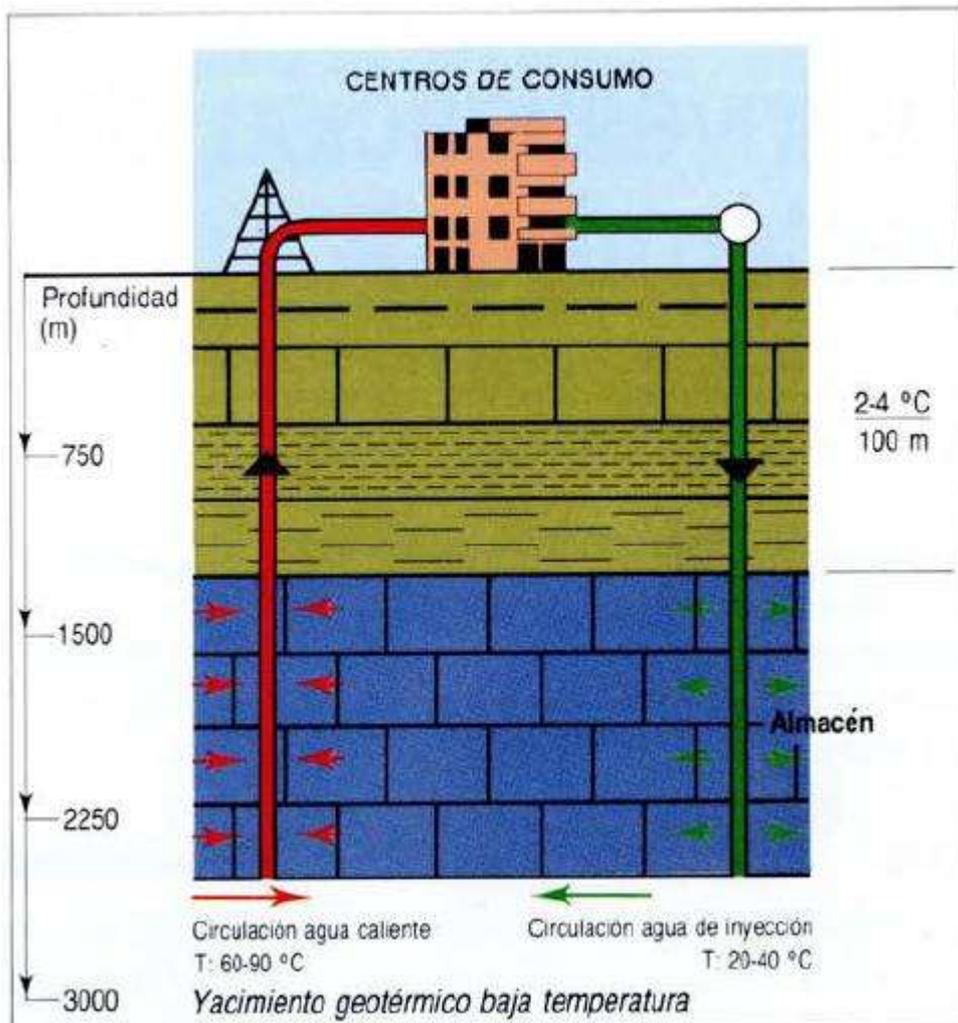


Figura 3.3 Yacimiento geotérmico de baja temperatura.

### 3.1.3 Yacimientos de muy baja temperatura

El avance conseguido en la tecnología de utilización y aprovechamiento del calor, sobre todo cuando a bomba de calor se refiere, ha hecho que los límites inferiores de temperatura se reduzcan, fijándose para las evaluaciones de recursos geotérmicos, según las normativas de distintos organismos de diferentes países, los 15 °C como la temperatura a partir de la cual el calor contenido en el agua o la roca se puede considerar como recurso geotérmico.

De esta forma, prácticamente todas las aguas subterráneas contienen una energía geotérmica que es posible extraer y utilizar. [5]

### 3.1.4 Yacimientos de roca caliente seca

Las acotaciones <<geológico-económicas>> al concepto de energía geotérmica dependen mucho, como es lógico, del estado de desarrollo de la tecnología. El avance en las técnicas de extracción del calor y su transformación en energía utilizable influye a la hora de cuantificar la energía geotérmica y de definir las condiciones de explotación. Un ejemplo claro constituye la explotabilidad de los yacimientos de roca caliente seca, es decir, sin fluido geotérmico. En el estado actual de la técnica, aun no se pueden considerar recursos explotables y no cumplen una de las condiciones clásicas de los yacimientos geotérmicos: existencia de almacén. No obstante, cuando se domine la técnica de fracturación artificial y los procedimientos de perforación e inyección de fluidos a grandes profundidades, empezará a ser económica la explotación de estos recursos. [5]

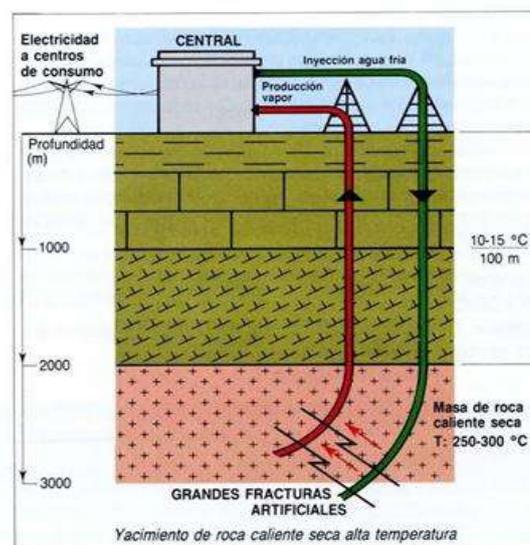


Figura 3.4 Yacimiento de roca caliente seca de alta temperatura.



## 3.2 La Investigación de los recursos geotérmicos

Tabla 3.1 Fases de búsqueda y valoración yacimientos geotérmicos.

FASE	RECONOCIMIENTO	PREFACTIBILIDAD	FACTIBILIDAD	DESARROLLO Y EXPLOTACION
Objetivo	Selección de regiones geotérmicas	Selección de áreas geotérmicas	Confirmación y evacuación del yacimiento	Confirmación extensión del campo
	Proposición de programas	Estimación de potencial	Estudios de vialidad	Evaluación con la explotación
		Proposición de modelo geológico	Proposición de sistemas de explotación	Utilización del yacimiento
Duración	3-4 años	4-5 años	2-3 años	25-30 años

INVESTIGACION PROPIAMENTE DICHA 9-12 AÑOS,

La investigación de los recursos geotérmicos se realiza con métodos y técnicas similares a los empleados en la prospección de otros recursos minerales y energéticos. La metodología de obtención e interpretación de datos, es muy parecida en su desarrollo a la empleada en aguas subterráneas e hidrocarburos.

El proceso de búsqueda, puesta de manifiesto y valoración de yacimientos geotérmicos se puede representar como una secuencia de fases que obedecen a un plan concreto cuyo fin es ir seleccionando las áreas de mayores posibilidades hasta finalmente encontrar y valorar los recursos geotérmicos. [5]

### 3.2.1 Desarrollo de la investigación

#### 3.2.1.1 Alta temperatura

En la búsqueda de yacimientos de alta temperatura se pueden distinguir cuatro fases.



La primera, **RECONOCIMIENTO**, se realiza a nivel nacional y ella, base a estudios preliminares de documentación, geología, hidrogeología y geoquímica, se seleccionan las principales regiones geotérmicas del país, y se propone un programa detallado de investigación para cada una.

En la segunda fase, **PREFACTIBILIDAD**, se llevan a cabo los programas propuestos, de manera que se investiguen exhaustivamente las distintas regiones, con el fin de definir los yacimientos geotérmicos posibles, realizar una estimación de su potencial y proponer un modelo geológico.

En la fase de **FACTIBILIDAD**, se confirma la existencia y características del yacimiento, así como la viabilidad técnico-económica de su explotación, proponiéndose finalmente los sistemas de explotación más adecuados a las características estudiadas.

Por último, se considera como una fase más en la investigación de los recursos geotérmicos el **DESARROLLO Y EXPLOTACION** del yacimiento, durante el cual se confirma su extensión, mediante nuevos sondeos, y se estudia la evolución de las condiciones del yacimiento con la extracción del fluido del almacén. [5]

### 3.2.1.2 Técnicas de prospección geotérmica

Geológicas

Objetivos: confirmar las condiciones geológicas del yacimiento:

foco de calor, almacén y cobertera.

- Fotointerpretación.
- Tectónica
- Estratigrafía
- Volcanología
- Sismología
- Petrografía
- Datación absoluta

Geoquímicas



## ANÁLISIS DE LA CALIDAD DE VAPOR Y SU IMPACTO EN CENTRALES GEOTERMOELÉCTRICAS



Objetivos: Confirmar la existencia de fluidos geotérmicos y definir sus características físico-químicas.

- Hidroquímica
- Geotermometría química
- Técnicas isotópicas
- Geoquímica de gases y volátiles
- Estudio de depósitos y alteraciones hidrotermales

### Sondeos Exploratorios

Objetivos: Confirmar todos los datos suministrados por las técnicas geológicas, geoquímicas y geofísicas, así como evaluar los yacimientos descubiertos.

- Perforación
- Diagrafías eléctricas
- Ensayos sobre testigos de *porosidad* y *permeabilidad*
- Pruebas de presión
- Ensayos de producción e interferencias.

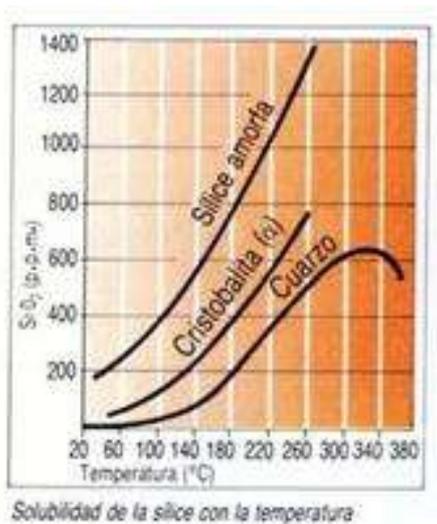


Figura 3.5 Solubilidad de la sílice con la temperatura.

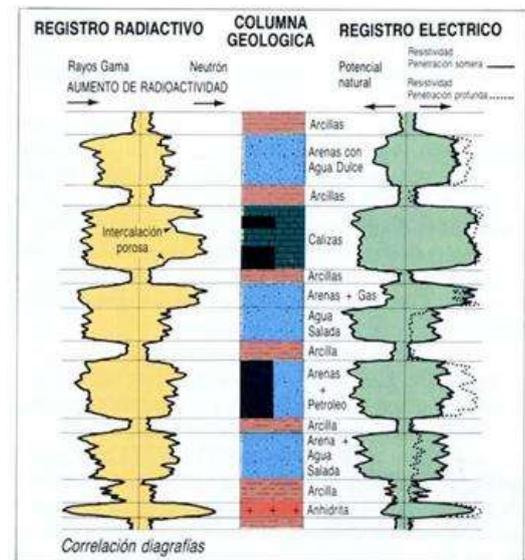


Figura 3.6 Correlación diagrafías.

Geofísicas

Objetivos: Delimitar geoméricamente el yacimiento geotérmico y definir sus características térmicas (temperatura y fluido de calor).

Geofísica estructural

- Teledetección
- Gravimetría
- Magnetismo
- Sísmica

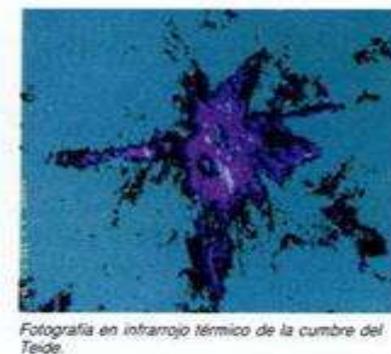


Figura 3.7 Fotografía en infrarrojo de la cumbre del Teide.

Geofísica de detalle

- Eléctrica
- Electromagnética
- Magnetotelúricos (AMT y MT)
- Ruido sísmico
- Polarización espontanea
- Termometrías y medidas de flujo

### 3.2.1.3 Baja temperatura

La investigación de yacimientos de baja temperatura, difiere esencialmente, del cuadro que se ha expuesto. Ello es debido a dos causas fundamentalmente: a) Las condiciones geológicas son diferentes, ya que no existe un flujo de calor anómalo y b) El valor económico del yacimiento es menor, por lo que no está justificada la aplicación de técnicas muy sofisticadas y caras.

Siguen existiendo tres fases en la investigación, pero su contenido es diferente.



**Fase 1.- Documentación, estudios geológicos e hidrológicos.**

Se realiza una evaluación de la información existente y disponible, seleccionando acuíferos profundos. Se lleva a cabo un estudio geológico e hidrogeológico, de tales acuíferos vistas a predecir sus características. Por último, se fijan los puntos de perforación.

**Fase 2.- Estudio de demanda y viabilidad técnico-económica.**

Se analiza detalladamente la demanda energética y su adaptación al recurso previsto, se estudian las distintas soluciones posibles, evaluando inversiones en equipos y sondeos, así como costos de explotación, finalizando con un análisis de los ratios económicos más importantes y selección de solución idónea. Posteriormente se estudia el montaje financiero y administrativo de la operación.

**Fase 3.- Sondeos profundos. Desarrollo de la operación.**

Superada positivamente la Fase 2, y conseguida la financiación de la operación, hay que realizar el primer sondeo profundo, que ha de confirmar o desmentir las hipótesis establecidas en la Fase 1. [5]

### **3.3 Explotación de los yacimientos**

Tal y como se encuentra en la Tierra el recurso geotérmico no es factible de utilizar por el hombre. Es necesario convertirlo en un tipo de energía directamente utilizable, que dependerá, sobre todo, del nivel térmico del recurso.

El primer paso en esta conversión es situar el recurso, que generalmente se encuentra a profundidades de 1,5 - 3 km, en la superficie. Esto se consigue por la presencia de un fluido que actúa de vehículo transportador de la energía. Este fluido accede a la superficie mediante los sondeos perforados por el hombre.

Para cumplir su objetivo, los sondeos han de reunir las condiciones de dimensión y acabado adecuadas, de manera que duren el mayor tiempo posible, produciendo la máxima cantidad de fluido con el menor coste de mantenimiento.

El *fluido geotérmico*, una vez alcanzada la superficie, se ha de someter a las transformaciones necesarias para que su energía potencial pueda ser útil al hombre. Los procesos empleados en la transformación dependen del nivel térmico del fluido.

Los fluidos de **alta temperatura** ( $T > 150^{\circ}\text{C}$ ), se emplean para la producción directa de electricidad; los de **media temperatura** ( $100^{\circ}\text{C} < T < 150^{\circ}\text{C}$ ) se pueden emplear para producir electricidad con ciclos binarios, pero el rendimiento es por ahora muy bajo, siendo su mejor utilización la aplicación en procesos industriales; y, por último, los de **baja temperatura** ( $T < 100^{\circ}\text{C}$ ) se emplean en usos directos del calor, como calefacción de viviendas, procesos industriales y usos agrícolas. [5]

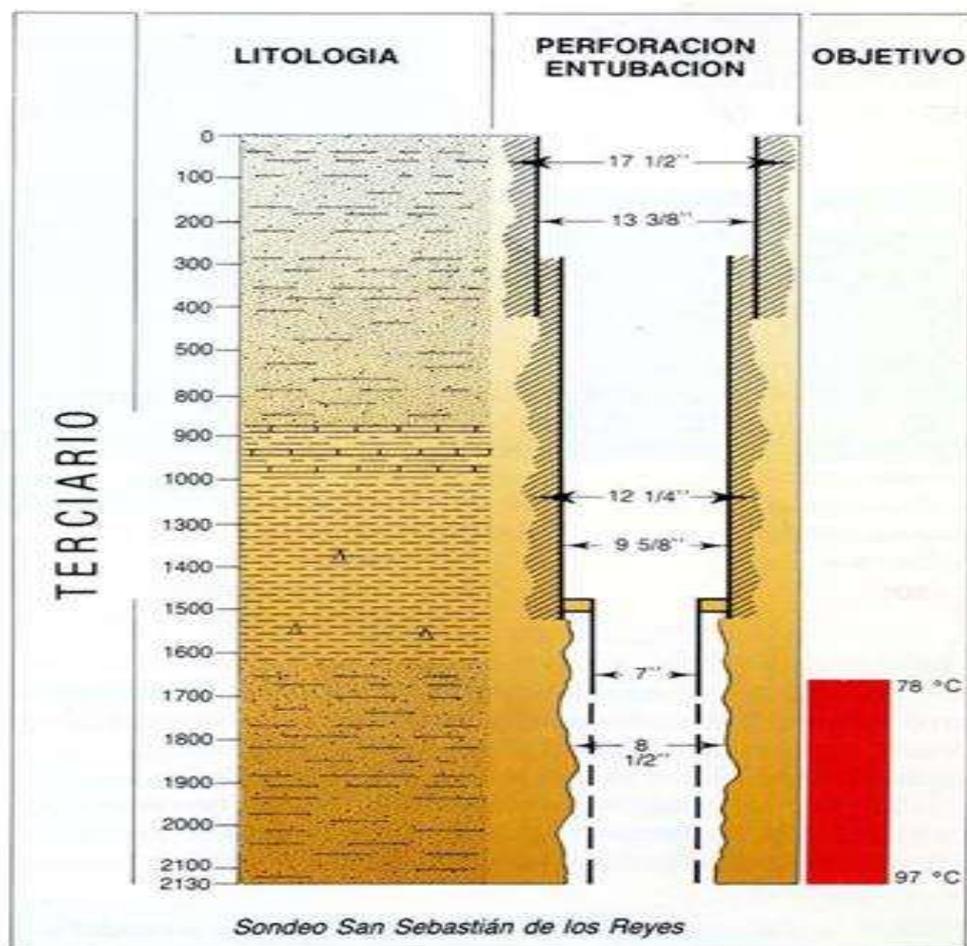


Figura 3.8 Sondeo san Sebastián de los reyes, España.



Figura 3.9 Central térmica de energía geotérmica de alta temperatura.

### 3.3.1 Utilización de recursos de alta temperatura (producción de electricidad)

#### 3.3.1.1 Tipos de campos

Los procesos empleados para producir electricidad a partir de fluidos geotérmicos de alta temperatura dependen de las características termodinámicas de dichos fluidos que varían según el tipo de campo.

Se pueden diferenciar tres tipos de campos geotérmicos de alta temperatura:

- Campos de vapor seco.
- Campos de agua caliente o vapor húmedo.
- Campos de salmueras.

En los campos de **vapor seco**, el fluido, debido a las condiciones de presión y temperatura, se encuentra en fase gaseosa, y está constituido por una mezcla de vapor de agua y gases. En los campos de **agua caliente**, debido a las elevadas presiones, el fluido se encuentra en fase líquida, en el almacén. Cuando es comunicado con la superficie mediante el sondeo y, por lo tanto, puesto a la presión atmosférica, se produce una mezcla de fases dando lugar a una cantidad de vapor, que puede ser enviado a turbinas después de separado, y a una cantidad de agua caliente de menor entalpía que la original de almacén. Los campos de **salmueras** constituyen una variedad de los campos de agua caliente, pero que debido a su concentración en sales es difícil producir el flashing y la consiguiente



mezcla de vapor y agua. Por ello es necesario que cedan su entalpía a un fluido que pueda utilizarse en las turbinas y que generalmente es agua dulce.

Los primeros, es decir los campos de **vapor seco**, son los de mayor potencial, debido a su mayor entalpía. Aunque son los más raros, solo existen tres campos importantes, The Geysers (U.S.A.), Larderello (Italia) y Matsukawa (Japón), que representan en total el 50% de la potencia instalada en el mundo. Los campos de **agua caliente** son los más comunes, Cerro Prieto (México), Wairakey y Broadlands (Nueva Zelanda), Reykjavik (Islandia), Otake (Japón), Ahuachapan (El Salvador) y Luzón (Filipinas). Los campos de **salmuera** son muy escasos, siendo el ejemplo más característico el de Salton Sea (U.S.A.). [5]

### 3.3.2 Problemas de explotación

Los principales problemas de la explotación de los yacimientos surgen precisamente del quimismo de las aguas geotérmicas y actualmente están perfectamente dominados mediante un control adecuado del fluido geotérmico y el empleo de materiales apropiados en los equipos. Estos problemas son:

**Corrosión**, debida a esa presencia de ciertos elementos químicos y a las variaciones en los parámetros físicos, temperatura y presión y pH. Se evita con un estricto control de las condiciones.

**Depósitos minerales**, debidos a la precipitación causada por la variación de presión, temperatura y pH. Los depósitos más frecuentes son los de calcita y sílice.

**Partículas sólidas**, ligadas a las características geológicas del yacimiento.

**Desgasificación**, que se produce cuando existen descensos en la presión de la red. Puede crear graves problemas en las bombas y se evita manteniendo la presión en la red por encima del punto de burbuja. [5]



### 3.4 Desarrollo actual de la energía geotérmica en el mundo

Entre las llamadas energías complementarias, la geotérmica es en la actualidad una de las de mayor potencia instaladas en el mundo. Esto es debido, fundamentalmente, a que en su exploración, investigación, explotación y utilización se emplea tecnología totalmente conocida y dominada, tanto para alta temperatura como para baja temperatura.

Así, en todas las fases del desarrollo que van desde exploraciones preliminares hasta evaluación de yacimientos y extracción de los fluidos, se utilizan técnicas comunes en la prospección y explotación de hidrocarburos y aguas subterráneas. En cuanto a la utilización o transformación del calor en energía utilizable, para alta temperatura los sistemas son similares a las centrales térmicas convencionales y para baja temperatura los sistemas son similares a las calefacciones clásicas. [5]

#### 3.4.1 Alta temperatura

Actualmente, la potencia instalada en el mundo para producir electricidad a partir de fluidos geotérmicos de alta temperatura alcanza los 3.000 MW, siendo los principales explotadores de este tipo de energía EE.UU., Filipinas, Italia, México, Nueva Zelanda y Japón. De acuerdo con las investigaciones actualmente en marcha, la previsión para 1986 es de 6.000 MW de potencia instalada.

Estos datos son tanto más significativos si los comparamos con la evolución de potencia instalada en los últimos 30 años:

1950	150 MW
1960	350 MW
1970	700 MW
1976	1.360 MW
1982	3.000 MW



Como se puede ver en la curva de crecimiento, la inflexión se produce en 1974 coincidiendo con la primera gran crisis energética originada por la acción de los países productores sobre los precios de los hidrocarburos.

### 3.4.2 Datos económicos

A pesar del bajo rendimiento termodinámico las centrales geotermoeléctricas son hoy día económicamente competitivas con respecto a las centrales convencionales (incluidas las nucleares).

Los últimos datos globales existentes, procedentes de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Fuentes de Energía Nuevas y Renovables (1981) dan valores de **inversiones en centrales geotermoeléctricas que oscilan entre 400 y 750 \$ por KW instalado, y costo de producción del kWh que oscila entre 15 y 43 milésimas de dólar con una media de 25 milésimas de dólar.** [5]

Nación	Potencia instalada - MW(e)	
	1982	1986 (previsión)
Portugal	3	13-18
China	5	11
Djibouti	—	5-15
El Salvador	60	95
Grecia	—	3,5-10
Islandia	38	68
Indonesia	1	30
Italia	440	500-550
Japón	168	350
Kenia	—	30
México	225	650-700
Nueva Zelanda	202	300
Nicaragua	—	36
Filipinas	446	1.500
Taiwan	0,5	3
Turquía	0,5	18
USA	1.400	2.700
URSS	6	10
<b>TOTAL</b>	<b>2.995</b>	<b>6.322,5-6.444</b>

Figura 3.10 Producción de electricidad por geotérmica.



Tabla 3.2 Producción de electricidad por geotérmica.

Nación	Columna1	Columna2
	Potencia instalada MW(e)	Potencia instalada MW(e)
	1982	1986 (previsión)
Portugal	3	13-18
China	5	11
Djibouti	-	5-15
El Salvador	60	95
Grecia	-	3.5-10
Islandia	38	68
Indonesia	1	30
Italia	440	500-550
Japón	168	350
Kenia	-	30
México	225	650-700
Nueva Zelanda	202	300
Nicaragua	-	36
Filipinas	446	1500
Taiwán	0.5	3
Turquía	0.5	18
Usa	1400	2700



URSS	6	10
<b>Total</b>	<b>2995</b>	<b>6322.5-6444</b>



Figura 3.11 Evolución de la energía geotérmica.

### 3.4.3 Baja y media temperatura

En cuanto a los recursos de baja y media temperatura, cuya aplicación más eficaz es la utilización directa del calor en procesos de calefacción de viviendas, industriales y agrícolas, la potencia instalada en el mundo según los últimos datos disponibles alcanza los 7.140 MW (térmicos) de los cuales 5.570 lo son en agricultura (fundamentalmente calefacción de invernaderos), 235 en procesos industriales y 1.335 en calefacción de viviendas. En estas cifras no están contemplados los baños termales, que son, por otra parte, el uso más antiguo dado por el hombre a la energía geotérmica.

El tipo de utilización dado a esta energía de baja y media temperatura depende del rango de temperaturas del fluido, como puede verse en la ilustración adjunta.

Así como la explotación de los recursos de alta temperatura no suele ofrecer dudas en cuanto a su factibilidad económica, no ocurre lo mismo para bajas temperaturas, ya que el coste final de la kilotermia va a depender en gran medida de condiciones de utilización: dimensiones de las redes de distribución, condiciones climáticas del lugar, sistemas de

calefacción empleados, salto térmico aprovechado, etc. y de condiciones económicas, sobre todo sistema de financiación de las operaciones. En resumen, para que el coste de calefacción sea competitivo con sistemas clásicos, ha de existir una perfecta adaptación entre recurso y demanda, además de una buena estructura financiera. [5]

La energía geotérmica: Instituto geológico y minero de España. José Enrique Azcarate Martin. Disponible en: <https://www.igme.es/Geotermia/Ficheros%20PDF/MasInfor/Folleto%20color.pdf>

### 3.5 Energía geotérmica en México

A finales de la década de los cuarenta, el ingeniero Luis de Anda, de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), se enteró de los logros obtenidos en el campo geotérmico de *Larderello* (Italia). Esto lo motivó a realizar estudios en ese lugar, en donde se familiarizó con las técnicas de exploración y explotación que allí se utilizaban. Más tarde, en el mes de mayo de 1955 se formó la Comisión de Energía Geotérmica, cuyo director fue el mismo ingeniero de Anda. [6]



Figura 3.12 Plantas geotermoeléctricas en México.



### **Pathé**

La explotación de la energía geotérmica en México se inició en Pathé, una localidad del estado de Hidalgo, la cual se encuentra aproximadamente a 130 km de la Ciudad de México (Fig. 3.12). Debido al éxito de las primeras perforaciones, se decidió instalar una planta piloto de 3.5 MWe, la cual inició operaciones en el mes de noviembre de 1959. En Pathé se perforaron 17 pozos, sin embargo, nunca fue posible obtener suficiente vapor para generar más de 600 kW, por lo que la planta se mantuvo generando hasta 1973. A pesar de todo la planta representó un importante logro, ya que permitió que nuestro país fuera el tercero en el mundo en utilizar la geotermia, puso de manifiesto la capacidad de los ingenieros mexicanos y sirvió para capacitar a los cuadros técnicos que habrían de conducir en el futuro el desarrollo de la geotermia en México. Después de Pathé, la [CFE](#) desarrolló los campos de Cerro Prieto, en Baja California, Los Azufres, en Michoacán y Los Humeros, en Puebla (Fig. 3.12).

### **Cerro Prieto**

El campo de Cerro Prieto se encuentra localizado a 30 km al sur de la ciudad de Mexicali. Es el campo geotérmico de líquido dominante más grande del mundo y su explotación ha sido también una de las más exitosas. En este campo se han perforado más de 300 pozos con profundidades entre 700 y 4,300 metros. Actualmente se tienen instaladas cuatro centrales con una capacidad instalada total de 720 MWe (Gutiérrez-Negrin y Quijano León, 2005). La central CP-1 cuenta con cinco unidades (las primeras dos de 37.5 MWe cada una) y entraron en operación en 1973. Para 1979 se adicionaron otras dos unidades de 37.5 MW y en 1981 entró en operación una unidad de baja presión de 30 MWe. Las centrales CP-II y CP-III, cuentan cada una con dos unidades de 110 MWe, mismas que entraron en operación entre 1985 y 1987 (Hiriart y Gutiérrez, 1992). La central Cerro Prieto IV entró en operación en el año 2000 y consta de cuatro unidades de 25 MWe cada una.

### **Los Azufres**

El campo geotérmico de Los Azufres se encuentra localizado a 200 km al oeste de la Ciudad de México (Fig. 3.12). Los primeros estudios en este campo se efectuaron en los años cincuenta, pero fue en 1977 cuando se perforaron los primeros pozos productores, con los que se confirmó la existencia de un potencial energético de magnitud considerable. En Los Azufres se han perforado más de 80 pozos con profundidades de entre 600 y 3,544 metros,



con una temperatura máxima de fondo de 358 °C. En esta zona, el *flujo de calor* promedio es de 0.22 W/m<sup>2</sup>, lo cual corresponde a un gradiente local de 117°C/km (Suárez, 2000), que es casi cuatro veces mayor que el normal. Actualmente, la CFE tiene instalados en este campo 188 MWe, distribuidos en una unidad de condensación de 50 MWe, cuatro unidades de flasheo simple 25 MWe cada una, siete unidades a contrapresión de 5 MWe cada una y dos unidades de ciclo binario de 1.5 MWe cada una. Las unidades de 25 MWe entraron en operación en 2003 (Gutiérrez-Negrin y Quijano León, 2005).

### **Los Humeros**

El campo geotérmico de Los Humeros se encuentra localizado en el extremo oriental del Cinturón Volcánico Mexicano, aproximadamente a 200 km de la Ciudad de México (Fig. 3.12). En 1968, la Comisión Federal de Electricidad (CFE) efectuó los primeros estudios geológicos, geoquímicos y geofísicos en este campo. En 1982 se perforó el primer pozo profundo, con el objeto de confirmar los resultados de los estudios. Pero fue hasta 1990 que se inició la explotación comercial del yacimiento, con la instalación de la primera unidad de 5 MWe. A la fecha se han perforado más de 40 pozos y se cuenta con una capacidad instalada de 35 MWe, en 7 unidades de 5MWe cada una (Gutiérrez-Negrin y Quijano León, 2005; Gutiérrez-Negrín, 2007).

### **Las Tres Vírgenes**

Este campo se localiza en la parte media de la Península de Baja California, en la parte norte del estado de Baja California (Fig. 3.12). Los estudios de exploración se iniciaron en 1982 y en 1986 se perforó el primer pozo exploratorio. Actualmente se tienen dos plantas instaladas de 5 MWe del tipo de condensación, las cuales iniciaron sus operaciones en julio de 2001. Estas plantas generaron 32.8 GWh en 2003, los cuales se distribuyeron a ciudades como Santa Rosalía y otras poblaciones que están aisladas del sistema eléctrico nacional (Gutiérrez-Negrin y Quijano León, 2005; Gutiérrez-Negrín, 2007).



## Otros recursos

La Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos de la CFE ha establecido la existencia de más de dos mil manifestaciones termales en la República Mexicana (Fig. 3.12), habiéndose llevado a cabo estudios de factibilidad en cuando menos 30 sitios. En algunos lugares ya se han perforado pozos exploratorios, entre los más recientes podemos mencionar a Los Negritos, Michoacán, y Acoculco, Puebla.

### 3.5.1 Capacidad instalada y generación

La potencia geotérmica instalada en México es de 953 MWe, que representa el 2% de la capacidad instalada en el país. La geotermia produjo 6,685 GWh de electricidad en 2006, que contribuyeron con el 3% de la generación eléctrica total, debido a los altos factores de planta que se tienen (Gutiérrez-Negrin, 2007). Actualmente, México ocupa el cuarto lugar mundial en potencia geotermoeléctrica instalada (Bertani, 2007; Fridleifsson, 2008). En 1992 se obtuvo el segundo lugar en energía generada, gracias al esfuerzo de los técnicos de la Comisión Federal de Electricidad por incrementar la disponibilidad de vapor en las turbinas del campo Cerro Prieto. En la actualidad se tiene el nivel más alto de eficiencia en el mundo, por lo que la [CFE](#) ha recibido reconocimientos en diversos foros internacionales. La generación de electricidad por medio de plantas geotermoeléctricas es una realidad en México, y se estima que para el año 2010 se contará con una capacidad instalada de 1,178 MWe, debido a la aprobación de los proyectos Cerro Prieto V (100 MWe) y Los Humeros II (46 MWe). El proyecto Cerritos Colorados (75 MWe), antes La Primavera, aún no tiene fecha programada.

### 3.5.2 Usos directos

En la actualidad, los usos directos de la energía geotérmica en México se limitan a la balneología. Se estima que la capacidad instalada es de aproximadamente 164 MWt, distribuidos en más de 160 sitios en 19 estados del país (Quijano-León y Gutiérrez-Negrin, 2000). Esta capacidad instalada es modesta, en relación con el tamaño de los recursos existentes y en cuanto a la variedad de aplicaciones posibles. También existen algunos proyectos piloto desarrollados por la CFE, que ilustran algunas posibles aplicaciones directas del calor geotérmico en México, aplicaciones que fueron implementadas en los campos geotérmicos de Cerro Prieto, Los Azufres y Los Humeros. Estos proyectos incluyen: calefacción de oficinas, invernaderos para apoyar las labores de reforestación (Ortega-

Varela, 1997), secado de frutas y verduras (Casimiro-Espinosa, 1997), germinado de bulbos, producción acelerada de flores, criadero de hongos comestibles (Salazar Loa, 1997) y secado de madera (Pastrana-Melchor, 1997). Asimismo, el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) y la CFE han realizado trabajo de investigación y desarrollo sobre Bombas de Calor operando con energía geotérmica y efluentes industriales. Los sistemas probados a la fecha incluyen sistemas de compresión

mecánica y sistemas por absorción, así como transformadores térmicos (García-Gutiérrez et al, 2007).

### 3.6 Sistemas de generación de electricidad

- Campos de **vapor seco**. Se pueden explotar mediante dos tipos de ciclos:

Ciclo directo **sin condensación**. El vapor escapa libremente a la atmosfera tras su paso por turbinas. Los costes de instalación son muy bajos, pero también su eficacia es muy baja. Son obligados cuando los gases incondensables representan más del 50% ó el total de gases es superior al 10%. Se suelen emplear en plantas piloto, o en unidades aisladas de pequeña potencia.

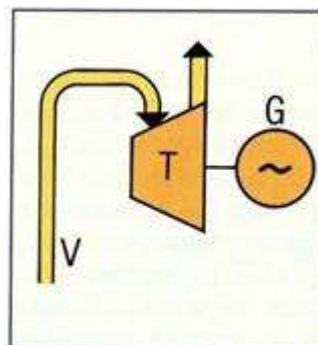


Figura 3.13 Ciclo directo sin condensación.

Ciclo directo **con condensación**. Es el más común en Larderello y The Geysers. El vapor después de su paso por turbinas es condensado, separándose los gases.

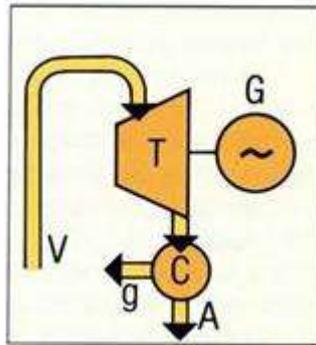


Figura 3.14 Ciclo directo con condensación.

• Campos de **agua caliente**. Estos campos se explotan generalizadamente mediante ciclo semidirecto con flash en una o varias etapas y con condensación. Este ciclo es el utilizado en las centrales geotermoeléctricas más abundantes. La primera operación que se realiza es la separación de las fases vapor y agua líquida. El vapor se envía a la turbina de alta presión o a la zona de alta de turbinas multietapas. El agua caliente separada es sometida a flashing, con separación de vapor a baja presión que se envía a turbinas de baja presión o a la zona de baja de las turbinas multietapas. Esta operación puede ser repetida tantas veces como lo permita la entalpía del agua separada.

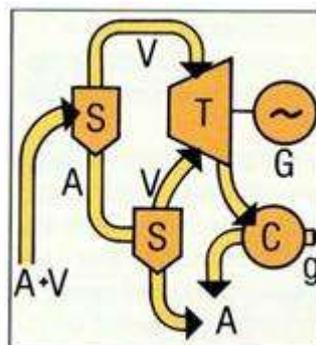


Figura 3.15 Ciclo semidirecto con flashing.

• Campos de **salmueras**. Estos campos han de ser explotados mediante ciclos binarios.

En estos ciclos el fluido geotérmico cede su calor a un fluido binario, que una vez adquirido el calor y ya en fase vapor pasa a las turbinas. Posteriormente, tras un proceso de

condensación, el fluido binario vuelve al intercambiador, por lo que este fluido se encuentra en un circuito cerrado. Cuando el fluido geotérmico tiene suficiente entalpía ( $>200$  kcal/kg), se puede utilizar como fluido binario agua.

Sin embargo, cuando el fluido geotérmico tiene menor entalpía (fluidos de media temperatura), se usa como fluido binario alguno con bajo punto de ebullición (freones).

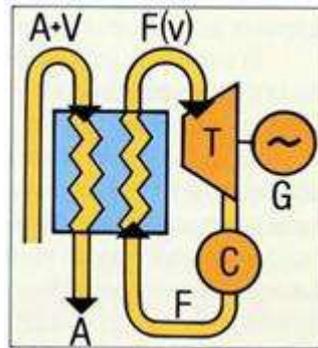


Figura 3.16 Ciclos binarios.

Leyenda en las figuras:

V: vapor

A + V: mezcla agua vapor

A: agua

g: gases extraídos

F: fluido binario

F(v): fluido binario vaporizado

T: turbina

G: generador

S: separador

C: condensador



Figura 3.17 Pozo de alta entalpía en desarrollo.



### 3.6.1 Generación de electricidad

La generación de electricidad por medio de la energía geotérmica está íntimamente ligada con las condiciones naturales del yacimiento geotérmico utilizado para ese fin. La presión de entrada a las turbinas de vapor está determinada por la presión y la temperatura del yacimiento. Adicionalmente, la presión del yacimiento, y por lo tanto la presión de entrada a las turbinas, disminuirá con el tiempo a una velocidad que dependerá de la relación entre la extracción de fluidos y su recarga.

Además, las plantas geotermoeléctricas requieren de pequeñas cantidades de agua de enfriamiento, por ello, no compiten por este recurso con otras aplicaciones como la agricultura.

La unidad geotermoeléctrica más grande del mundo es de 135 MWe (instalada en el campo de los *Geysers*, en Estados Unidos), pero es muy común encontrar unidades de 55 MWe, 30 MWe, 15 MWe, 5 MWe e incluso más pequeñas. La confiabilidad de las plantas geotermoeléctricas es muy buena y cuentan con factores de planta entre el 80% y 90%, este factor es muy superior al de otro tipo de plantas.

Existen varios tipos de procesos de conversión de energía para generar electricidad por medio de recursos hidrotermales. Actualmente, tres de estos procesos se encuentran en operación comercial: vapor seco, sistemas de separación de vapor y ciclo binario.

#### 3.6.1.1 Plantas de vapor seco

Las plantas de vapor seco se utilizan para producir energía de yacimientos de vapor dominante. En este caso, el vapor saturado o ligeramente sobrecalentado que se obtiene en la superficie se envía directamente a las turbinas (Fig. 3.18). El vapor húmedo se condensa a la salida, para regresarse al yacimiento a través de pozos de inyección. Es una tecnología bien desarrollada y comercialmente disponible, con tamaños de turbina típicos en el rango de 35 MWe a 120 MWe.

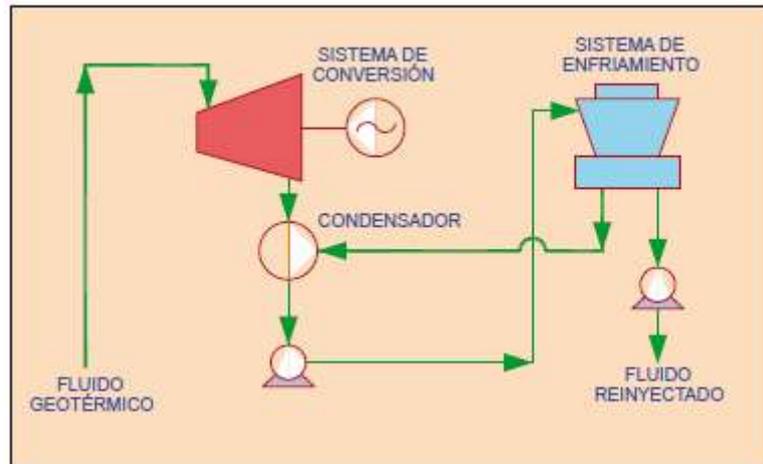


Figura 3.18 Diagrama de una planta de vapor seco.

Los sistemas de vapor dominante han sido explotados únicamente en Indonesia, Italia, Japón y Estados Unidos. La mitad de la capacidad de generación instalada se encuentra en estos campos. Los campos de líquido dominante son mucho más comunes.

### 3.6.1.2 Plantas de separación de vapor

En yacimientos geotérmicos dominados por líquido, los pozos generalmente producen una mezcla de agua y vapor en la superficie, esto se debe a que el fluido del yacimiento sufre un proceso de ebullición en el interior del pozo, causado por la caída de presión a lo largo de la tubería. Cuando la mezcla llega a la superficie, el vapor y el líquido se separan por medio de instalaciones adecuadas. El primero es utilizado para alimentar la turbina, mientras que el líquido se inyecta nuevamente al yacimiento (Fig. 3.19).

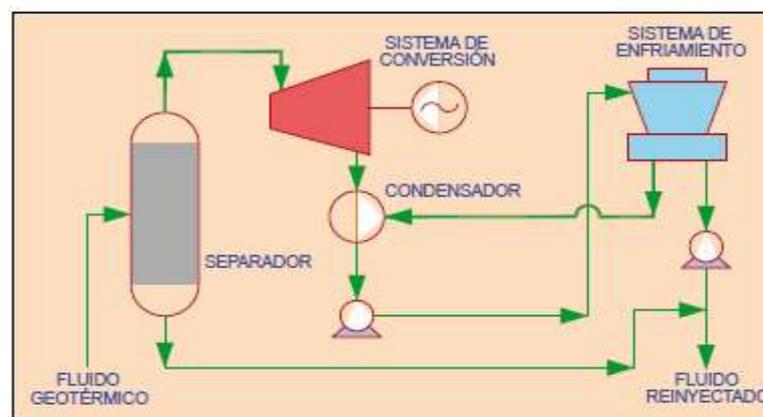


Figura 3.19 Diagrama de una planta con separación de vapor.

Las plantas de separación de vapor se utilizan para producir electricidad de los sistemas de líquido dominante, que están lo suficientemente calientes como para permitir la ebullición de una porción importante de líquido en la superficie. Se cuenta con tamaños de turbina típicos en el rango de 10MWe a 55 MWe.

### 3.6.1.3 Plantas de ciclo binario

Las plantas de ciclo binario son apropiadas para la explotación de los sistemas geotérmicos de líquido dominante, que no están lo suficientemente calientes como para producir una importante ebullición del fluido geotérmico, y para utilizar el calor contenido en los fluidos de desecho de las plantas de separación de vapor.

En estas plantas el calor que se obtiene del fluido geotérmico se transmite por medio de un *intercambiador de calor*, a un fluido de trabajo secundario con un menor punto de ebullición (por lo general es un refrigerante). El fluido de trabajo se expande en una turbina, se condensa y se recalienta en otro ciclo (Fig.3.20). Existen unidades de 1 MWe a 25 MWe y actualmente hay en el mundo una capacidad instalada de aproximadamente 300 MWe, en este tipo de plantas. [6]

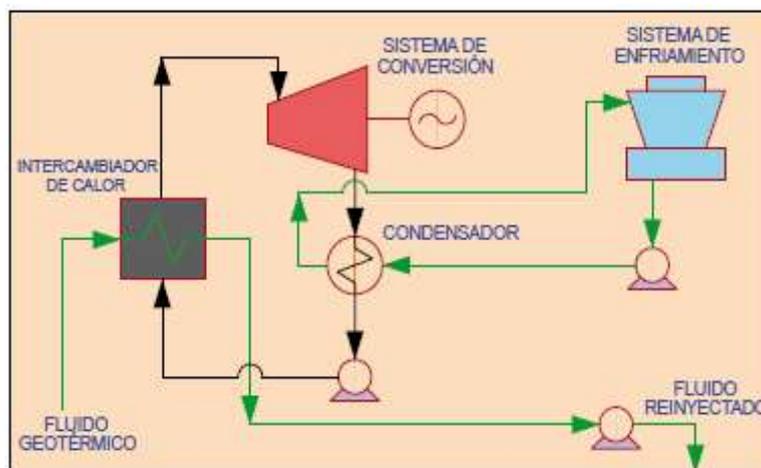


Figura 3.20 Diagrama de una planta de ciclo binario

## Capítulo 4. Potencia de una central geotermoeléctrica basada en la calidad de su vapor

### 4.1 Ciclo Rankine: El ciclo ideal para los ciclos de potencia de vapor

Es posible eliminar muchos de los aspectos imprácticos asociados con el ciclo de Carnot si el vapor es sobrecalentado en la caldera y condensado por completo en el condensador, como se muestra de manera esquemática en un diagrama  $T-s$  en la figura 4.1. Lo que resulta es el **ciclo Rankine**, el cual es el ciclo ideal para las centrales eléctricas de vapor. El [ciclo Rankine](#) ideal no incluye ninguna irreversibilidad interna y está compuesto de los siguientes cuatro procesos:

- 1-2 Compresión isentrópica en una bomba.
- 2-3 Adición de calor a presión constante en una caldera.
- 3-4 Expansión isentrópica en una turbina.
- 4-1 Rechazo de calor a presión constante en un condensador.

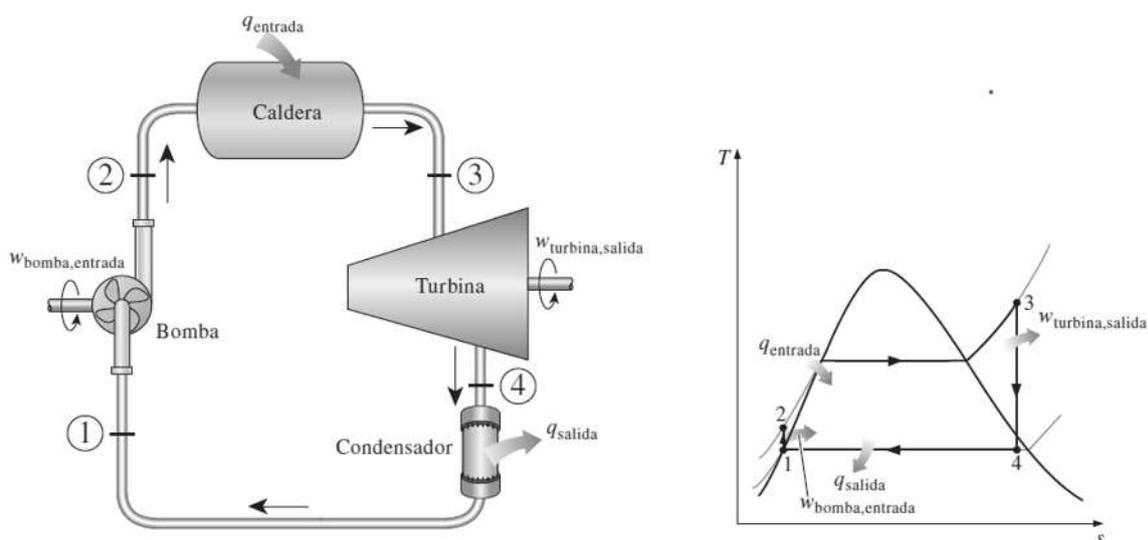


Figura 4.1 Ciclo Rankine ideal simple.

El agua entra a la *bomba* en el estado 1 como líquido saturado y se condensa isentrópicamente hasta la presión de operación de la caldera. La temperatura del agua



aumenta un poco durante este proceso de compresión isentrópica debido a una ligera disminución en el volumen específico del agua.

La distancia vertical entre los estados 1 y 2 en el diagrama  $T-s$  se exagera de manera considerable para mayor claridad. (Si el agua fuera realmente incompresible, ¿habría un cambio de temperatura durante este proceso?).

El agua entra a la *caldera* como líquido comprimido en el estado 2 y sale como vapor sobrecalentado en el estado 3. La caldera es básicamente un gran intercambiador de calor donde el calor que se origina en los gases de combustión, reactores nucleares u otras fuentes, se transfiere al agua esencialmente a presión constante. La caldera, junto con la sección (sobrecalentador) donde el vapor se sobrecalienta, recibe el nombre de *generador de vapor*.

El vapor sobrecalentado en el estado 3 entra a la *turbina* donde se expande isentrópicamente y produce trabajo al hacer girar el eje conectado a un generador eléctrico. La presión y la temperatura del vapor disminuyen durante este proceso hasta los valores en el estado 4, donde el vapor entra al *condensador*. En este estado el vapor es por lo general un vapor húmedo con una alta calidad. El vapor se condensa a presión constante en el condensador, el cual es básicamente un gran intercambiador de calor, rechazando el calor hacia un medio de enfriamiento como un lago, un río o la atmósfera. El vapor sale del condensador como líquido saturado y entra a la bomba, completando el ciclo.

En áreas donde el agua es muy valiosa, las centrales eléctricas son enfriadas con aire en lugar de agua. Este método de enfriamiento, que también se emplea en motores de automóvil, es conocido como *enfriamiento seco*. Varias centrales eléctricas en el mundo, incluidas algunas en Estados Unidos, utilizan enfriamiento seco para conservar el agua.

Recuerde que el área bajo la curva del proceso en un diagrama  $T-s$  representa la transferencia de calor para procesos internamente reversibles; y observe que el área bajo la curva del proceso 2-3 representa el calor transferido hacia el agua en la caldera y que el área bajo la curva del proceso 4-1 representa el calor rechazado en el condensador. La diferencia entre estas dos (el área encerrada por el ciclo) es el trabajo neto producido durante el ciclo. [7]

## 4.2 Calidad del vapor

El **título de vapor** o **calidad** del vapor es la fracción másica de vapor en una mezcla líquido-vapor y suele denotarse con la letra  $x$ .

$$x = \frac{m_{\text{vapor}}}{m_{\text{vapor}} + m_{\text{líquido}}} \quad (4.1)$$

El valor de  $x$  varía desde 0 (líquido saturado) hasta 1 (vapor saturado). Para valores del título cercanos a 1 se tiene una masa de líquido pequeña en forma de gotitas en suspensión. Para valores inferiores el líquido se deposita sobre el fondo del recipiente por efecto de la gravedad.

La coexistencia de líquido y vapor se indica normalmente con el término **vapor húmedo** y, en el diagrama, corresponde a la zona bajo la campana. Las líneas de título constante se trazan dividiendo las líneas de presión constante, comprendidas entre el estado líquido y el estado del vapor saturado seco, en partes iguales. [8]

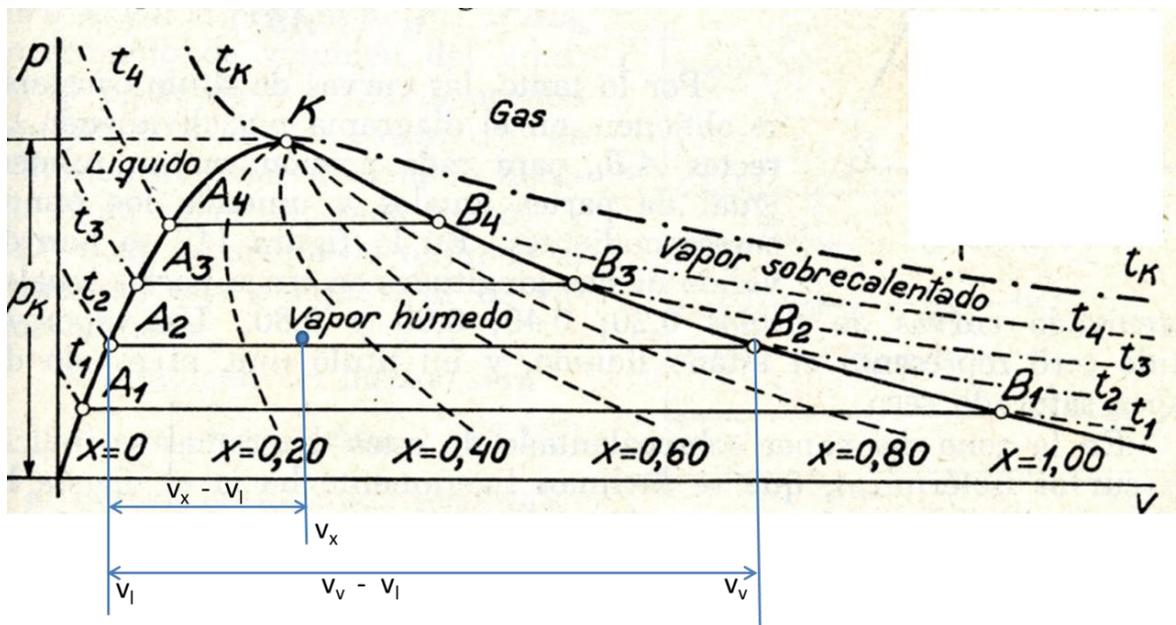


Figura 4.2 Diagrama presión-calidad de vapor.

Es muy normal que, en una mezcla de líquido saturado y vapor saturado, la masa de cada fase suela desconocerse, en cuyo caso, pueden relacionarse los volúmenes y el título se definiría como; la relación existente entre el aumento de volumen durante la vaporización y el aumento de volumen que correspondería al vapor saturado seco a la misma presión.

$$x = \frac{v_x - v_l}{v_v - v_l} \quad 4.2)$$

$v_x$  es el volumen específico de la mezcla,  $v_l$  es el volumen específico del líquido saturado y  $v_v$  es el volumen específico del vapor saturado.

De acuerdo con esta ecuación, la calidad se relaciona con las distancias horizontales en el diagrama. En un diagrama h-S, la misma relación que hay entre estas distancias sobre la línea de presión constante, habrá sobre sus proyecciones sobre los ejes cartesianos, por lo que también se puede escribir:

$$x = \frac{h_x - h_l}{h_v - h_l} \quad 4.3) \quad \rightarrow \quad x = \frac{s_x - s_l}{s_v - s_l} \quad 4.4)$$

$h$  es la entalpía y  $S$  es la entropía específica. Los subíndices expresan lo mismo que en la ecuación anterior.

$$x = \frac{h_x - h_f}{h_g - h_f} \quad 4.5) \quad \rightarrow \quad x = \frac{s_x - s_f}{s_g - s_f} \quad 4.6) \quad \rightarrow \quad x = \frac{s_x - s_f}{s_{fg}} \quad 4.7)$$

En algunos libros se ocupan los subíndices  $f$  y  $g$  se refieren a líquido saturado y gas saturado respectivamente, y  $fg$  se refiere a vaporización o la diferencia de propiedades.

### 4.3 Turbinas de Vapor

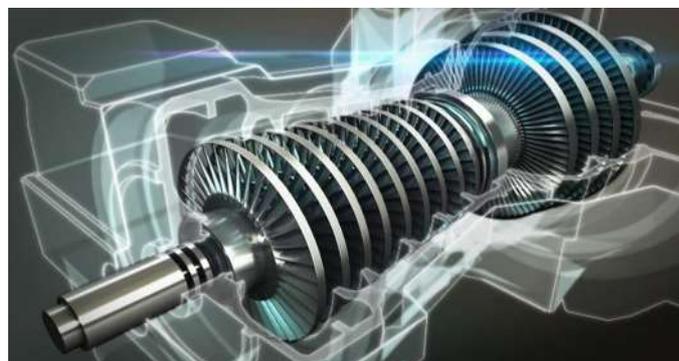


Figura 4.3 Turbina de vapor.



Una turbina de vapor es una **turbomáquina motora**, que transforma la energía de un flujo de vapor en energía mecánica a través de un intercambio de cantidad de movimiento entre el fluido de trabajo (el vapor) y el rodete, órgano principal de la turbina, que cuenta con palas o álabes los cuales tienen una forma particular para poder realizar el intercambio energético. Las turbinas de vapor están presentes en diversos ciclos de potencia que utilizan un fluido que pueda cambiar de fase, entre éstos el más importante es el Ciclo Rankine, el cual genera el vapor en una caldera, de la cual sale en unas condiciones de elevada temperatura y presión. En la turbina se transforma la energía interna del vapor en energía mecánica que, típicamente, es aprovechada por un generador para producir electricidad. En una turbina se pueden distinguir dos partes, el **rotor** y el **estátor**. El rotor está formado por ruedas de álabes unidas al eje y que constituyen la parte móvil de la turbina. El estátor también está formado por álabes, no unidos al eje sino a la carcasa de la turbina.

El término turbina de vapor es muy utilizado para referirse a una máquina motora la cual cuenta con un conjunto de turbinas para transformar la energía del vapor, también al conjunto del rodete y los álabes directores. [9]

### 4.3.1 Clasificación

Existen turbinas de vapor en una gran variedad de tamaños, desde unidades de *1 HP (0.75 kW)* usadas para accionar bombas, compresores y otro equipo accionado por flecha, hasta turbinas de *2,000,000 HP (1,500,000 kW)* utilizadas para generar electricidad. Hay diversas clasificaciones para las turbinas de vapor modernas, y por ser turbomáquinas son susceptibles a los mismos criterios de clasificación de éstas.

La clasificación de las turbinas de vapor puede hacerse según la forma de aprovechamiento de la energía contenida en el flujo de vapor (*reacción o acción*), según el número de etapas (*multietapa o monoetapa*), según la dirección del flujo de vapor (*axiales o radiales*), si existe o no extracción de vapor antes de llegar al escape y por último por la presión de salida del vapor (*contrapresión, escape libre o condensación*). [9]

#### 4.3.1.1-Turbina de vapor de reacción

En la turbina de reacción la energía mecánica se obtiene de la aceleración del vapor en expansión. Las turbinas de este tipo cuentan con dos grupos de palas, unas móviles y las otras fijas. Las palas fijas están colocadas de forma que cada par actúa como una boquilla a



través de la cual pasa el vapor mientras se expande, llegando a las palas de las turbinas de reacción, que se montan en un tambor que actúa como eje de la turbina.

En la turbina de reacción se produce un escalonamiento de velocidad. Este escalonamiento consiste en producir una gran caída de presión en un grupo de toberas y utilizar la velocidad resultante del vapor en tantos grupos de alabes como sea necesario mediante un juego de enderezadores reorientando el vapor de salida de la primera etapa para que entre en un segundo rodete.

Se denomina grado de reacción a la fracción de la expansión producida en la corona móvil respecto a la total, un grado de reacción 1 indica que la turbina es de reacción pura, mientras que para el valor cero será una turbina de vapor de acción. [9]

#### **4.3.1.2 -Turbina de vapor de acción**

Una turbina de vapor de acción con un escalonamiento de velocidad consta fundamentalmente de:

**-Un distribuidor fijo**, compuesto por una o varias toberas, cuya misión es transformar la energía térmica del vapor puesta a su disposición, total (acción), o parcialmente (reacción), en energía cinética.

**-Una corona móvil**, fija sobre un eje, cuyos álabes situados en la periferia tienen por objeto transformar en energía mecánica de rotación, la energía cinética puesta a su disposición.

Su funcionamiento consiste en impulsar el vapor a través de las toberas fijas hasta alcanzar las palas, que absorben una parte de la energía cinética del vapor en expansión, lo que hace girar el rotor y con ella el eje al que está unida. Las turbinas de acción habituales tienen varias etapas, en las que la presión va disminuyendo de forma escalonada en cada una de ellas. [9]

#### **4.3.1.3 -Turbina monoetapa**

Se utilizan para turbinas de hasta 2 MW de potencia, al ser de más simple construcción son las más robustas y seguras, además de acarrear menores costes de instalación y mantenimiento que la multietapa. [9]



#### **4.3.1.4 -Turbina multietapa**

El objetivo de los escalonamientos en la turbina de vapor es disminuir la velocidad del rodete conservando una velocidad de los alabes próxima al valor óptimo con relación a la velocidad del chorro de vapor. Si tenemos una presión de vapor muy elevada sin las etapas necesarias, sería necesario que la turbina girase a una velocidad muy alta, que no sería viable mecánicamente por las dimensiones que debería tener el reductor (caja de engranajes que ajustaría la velocidad final del eje a la deseada).

Consiguen mejores rendimientos que las monoetapa, además pueden absorber flujos de vapor de mucha mayor presión, por lo que se utilizan para turbinas de alta potencia. Suelen utilizarse turbinas mixtas, con las primeras etapas de acción y las finales de reacción. [9]

#### **4.3.1.5 -Turbina de flujo axial**

Es el método más utilizado, el paso de vapor se realiza siguiendo un cono que tiene el mismo eje que la turbina.

#### **4.3.1.6 -Turbina de flujo radial**

El paso de vapor se realiza siguiendo todas las direcciones perpendiculares al eje de la turbina. [9]

#### **4.3.1.7 -Turbina con extracción de vapor**

Se realiza en etapas de alta presión, enviando parte del vapor de vuelta a la caldera para sobrecalentarlo y reenviarlo a etapas intermedias. En algunas ocasiones el vapor también puede ser extraído de alguna etapa para derivarlo a otros procesos industriales. [9]

#### **4.3.1.8 -Turbina de contrapresión**

La presión del vapor a la salida de la turbina es superior a la atmosférica, suele estar conectado a un condensador inicial que condensa al vapor, obteniéndose agua caliente o sobrecalentada, que permite su aprovechamiento térmico posterior. [9]

#### **4.3.1.9-Turbinas de condensación**

El vapor sale a una presión inferior a la atmosférica, en este diseño existe un mayor aprovechamiento energético que a contrapresión, se obtiene agua de refrigeración de su condensación. Este diseño se utiliza en turbinas de gran potencia que buscan un alto rendimiento. [9]

*Energiza. Especial turbinas de vapor. Edición Mensual Año I diciembre 2011 Edita renovetec. [En línea]. Disponible en: <http://www.energiza.org/antiores/energizadiciembre2011.pdf>*

## 4.4 Vapor



Figura 4.4 Vapor geotérmico.

Las temperaturas de los fluidos geotérmicos se encuentran entre 100°C y 350°C. Para temperaturas menores a 150°C se utilizan ciclos híbridos para aprovechar esta energía de bajo potencial. Cuando la temperatura es mayor a 150°C y dependiendo del tipo de fase del fluido que contenga el yacimiento, se genera energía en centrales con las especificaciones siguientes:

### 4.4.1 Vapor húmedo

Se requiere implementar una cámara flash para separar el vapor de proceso que se expande en la turbina. Una desventaja de estos sistemas, es que sólo una fracción del fluido extraído del reservorio se puede utilizar. Sin embargo, se puede instalar una segunda cámara flash e incrementar la potencia generada. Del total de las plantas geotermoeléctricas a nivel mundial, el 40% son con cámara flash, contribuyendo con el 60% de la capacidad instalada.



#### 4.4.2 Vapor húmedo con temperaturas menores a 150°C

Para estas condiciones se instalan ciclos binarios, es decir, después de la separación en la cámara flash se reutiliza el agua líquida para calentar o sobrecalentar el fluido secundario, para generar potencia adicional en un ciclo Rankine orgánico o Kalina. En la actualidad, se tienen 266 unidades de este tipo de un total de 536 unidades geotérmicas; sin embargo, sólo contribuyen en un 10% a la capacidad de generación instalada.

#### 4.4.3 Vapor saturado seco

Este se suministra directamente a la turbina. El vapor se pasa previamente por un secador, en donde se elimina el porcentaje de agua líquida presente. La capacidad de generación de este tipo de centrales es mayor, debido a que trabajan con flujos completos y no con fracciones como son las centrales flash. El 11% de las centrales geotérmicas son de este tipo y corresponde al 26% de la capacidad instalada con respecto a la energía obtenida del recurso geotérmico. [10]

[10] Salazar M., Mora A., Bonilla A. E., Lugo R., Lugo H. D. *Análisis paramétrico de las centrales geotermoeléctricas: Vapor seco, cámara flash y ciclos híbridos*, DYNA, vol. 84, núm. 203, pp. 273-282, 2017. [En línea]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/journal/496/49655603035/html/>

### 4.5 Desarrollo

Para este análisis el tipo de plantas que se utilizan son las plantas con separador de vapor, ya que son las más comunes por el tipo de yacimientos de vapor húmedo que en su mayoría son los que más abundan en el mundo, así como en el país.

Vamos a realizar el análisis para una y dos configuraciones de flasheo (separador) ya que con un tercero los cambios en la eficiencia son muy poco.

En estas configuraciones se utilizarán las ecuaciones termodinámicas que nos relacionan la calidad de vapor, y otras variables, así como la entalpía y la entropía del sistema, etc.

Para fines prácticos, tomando en consideración aspectos termodinámicos y económicos el número de etapas de flasheo se limita a dos, instalaciones de este tipo se encuentran en los azufres.

Un inconveniente de este ciclo, es cuando el contenido de gases no condensables es alto, es la gran potencia que requieren eyectores o compresores para la eliminación en el condensador de estos gases.

Para resolver este problema mencionado se han desarrollado sistemas que modifican el ciclo original de flasheo.

Los ciclos de vapor flash geotérmicos se muestran en la figura 4.3 y figura 4.4 respectivamente. El fluido de trabajo inicial es separado después de pasar por la cámara flash, de tal manera que, la fracción de vapor es suministrada a la turbina para generar trabajo mecánico. Al final de la expansión, el vapor residual se condensa y se reinyecta al pozo, figura 4.5. En la figura 4.6 se muestra la configuración con dos cámaras flash, con la finalidad de recuperar una segunda fracción de vapor después de la primera cámara flash, esta segunda fracción de vapor se suministra a la turbina de baja presión para generar mayor trabajo. También se puede colocar un intercambiador de calor para un segundo ciclo de potencia orgánico en lugar de una segunda cámara flash.

Para la central geotermoeléctrica con un separador de vapor se tiene el siguiente arreglo.

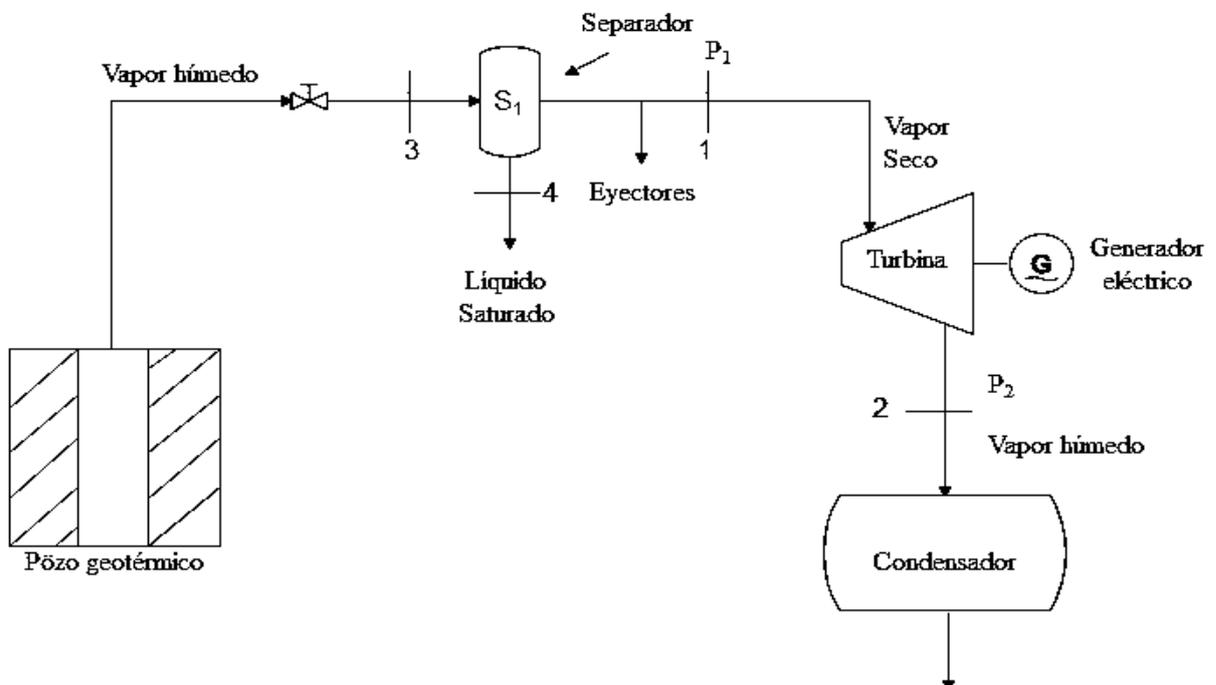


Figura 4.5 Central geotermoeléctrica una cámara flash.



$\dot{m}_3 \rightarrow$  Vapor geotermico húmedo

$$P_3 = P_1 = P_4 \quad 4.8)$$

$$h_1 = h_g |_{P_1} \quad 4.9) \quad s_1 = s_g |_{P_1} \quad 4.10)$$

$$h_4 = h_f |_{P_1} \quad 4.11) \quad s_4 = s_f |_{P_1} \quad 4.12)$$

$$\dot{m}_1 = x_3 * \dot{m}_3 \quad 4.13)$$

$$s_1 = s_2 = s_{f2} + x_2 * s_{fg2} \quad 4.14)$$

$$h_2 = h_{f2} + x_2 * h_{fg2} \quad 4.15)$$

$$x_2 = \frac{s_1 - s_{f2}}{s_{g2} - s_{f2}} \quad 4.16)$$

$$P_E = n_{tg} * \dot{m}_1 (h_1 - h_2) \quad 4.17)$$

Donde:

$h_f$ : Entalpía del líquido saturado (kJ/kg)

$h_g$ : Entalpía del vapor (kJ/kg)

$h_{fg}$ : Entalpía líquido – vapor (kJ/kg)

$s_f$ : Entropía del líquido saturado (kJ/kg · K)

$s_g$ : Entropía del vapor saturado (kJ/kg · K)

$P$ : Presión del vapor (bar)

$\dot{m}$ : Vapor geotérmico húmedo (ton/hr)

$x$ : Calidad de vapor

$n_{tg}$ : Eficiencia del turbogenerador

$P_E$ : Potencia eléctrica generada (kW)

Los números de los subíndices nos indican la etapa en la que se toma el dato termodinámico.

Si  $X_3$  aumenta o disminuye, que es el caso de la calidad de vapor en la boca del pozo, en teoría si la calidad de vapor aumenta, se obtendría un aprovechamiento de la máxima generación de potencia de la central, esto es el caso de los yacimientos de vapor seco, pero en el caso de los yacimientos de vapor húmedo se obtiene solo un porcentaje del vapor seco, aunque en este caso también incrementan las pérdidas en el proceso de generación de energía.

$$x_3 = 1 \rightarrow \text{Vapor Seco} \rightarrow \text{Pot maxima}$$

De acuerdo a la fórmula de la potencia como vemos que  $\dot{m}_1$  está en función de  $x_3$ , y esta es directamente proporcional al vapor geotérmico en  $\dot{m}_3$ , ecuación 4.13, si aumentamos la calidad de  $x_3$  al máximo esto va hacer que tengamos la máxima potencia de generación ecuación 4.17, en el caso de que disminuya también disminuye la potencia eléctrica.

$$\dot{m}_1 = x_3 * \dot{m}_3 \quad 4.13)$$

$$P_E = n_{tg} * m_1(h_1 - h_2) \quad 4.17)$$

En cuestiones prácticas esto no sucede ya que se sabe que la calidad de vapor de los pozos geotérmicos es baja, pero se puede aprovechar al máximo optimizando procesos en la configuración de las centrales geotérmicas.

Para la configuración con dos cámaras flash tenemos el siguiente arreglo.

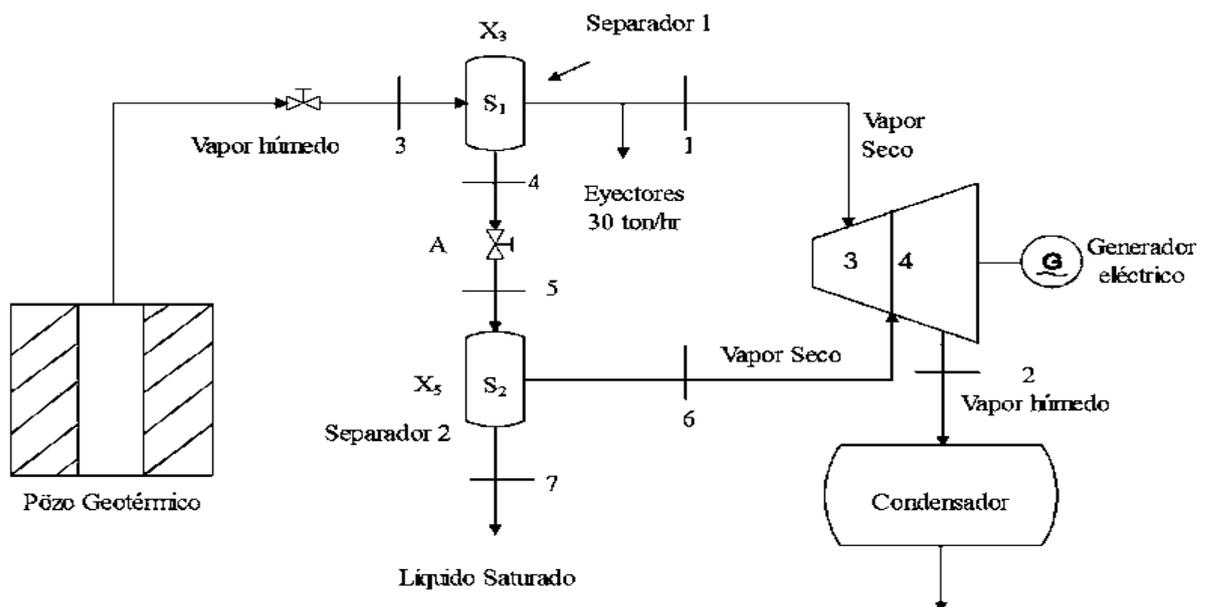


Figura 4.6 Central geotermoeléctrica dos cámaras flash.

$$P_4 > P_5 \text{ (Dato)}$$

4) Líquido saturado

5) Vapor húmedo

$$h_4 = h_5 = h_{f5} + x_5 * h_{fg5} \quad 4.18)$$

$$x_5 = \frac{h_4 - h_{f5}}{h_{fg5}} \quad 4.19)$$

$$P_5 = P_6 = P_7 \quad 4.20)$$

$$P_E = [\dot{m}_1(h_1 - h_3) + (\dot{m}_1 + \dot{m}_2)(h_4 - h_5)]n_{tg} \quad 4.21)$$

### 4.5.1 Cálculo de la potencia de una central geotermoeléctrica en base a la calidad de vapor

En la figura 4.7 podemos observar el proceso de extracción y conducción de vapor en una central geotermoeléctrica para obtener vapor seco y generar energía eléctrica

Extracción y conducción de vapor

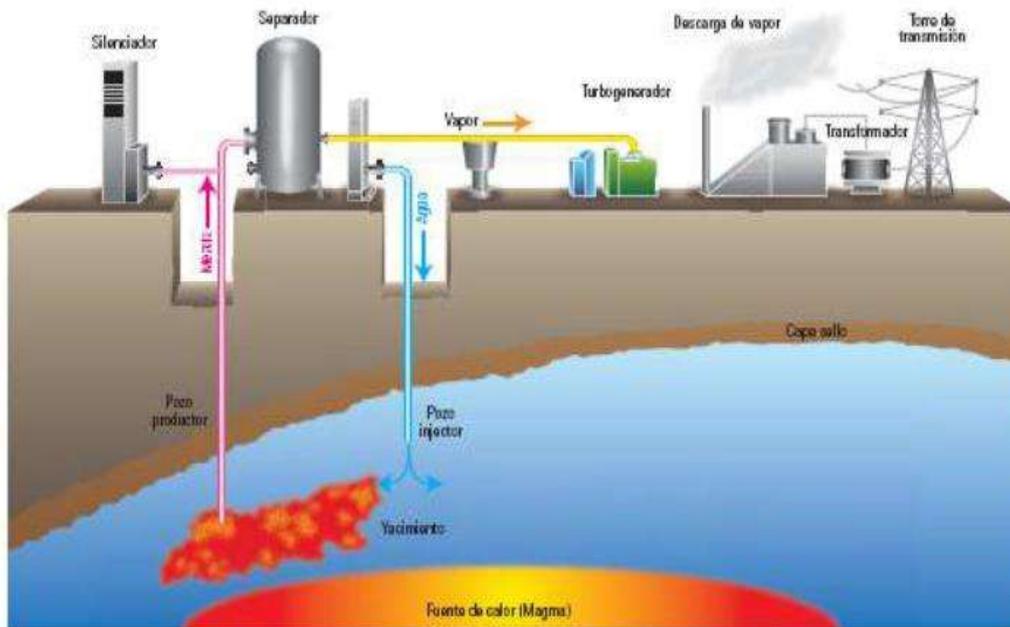


Figura 4.7 Extracción y conducción de vapor.



## ANÁLISIS DE LA CALIDAD DE VAPOR Y SU IMPACTO EN CENTRALES GEOTERMOELÉCTRICAS



En la figura 4.8 se observa el campo geotérmico de los azufres en el que se tiene las unidades instaladas, así como el tipo de turbogenerador que se tiene y la potencia de la unidad, así mismo se tiene un dato importante como es la producción promedio de vapor en *tn/h*, este dato se toma para nuestro análisis, estos datos se observan en las tablas 4.1 y 4.2 respectivamente.



### 4. Campo Geotérmico Los Azufres

CG	Generación Anual 2017 (GWh)	Producción promedio de vapor (t/h)
Los Azufres	1766	1865



Unidades Instaladas

Unidad	Tipo	Marca	Capacidad (MW)
1,2,3,4,5	Contrapresión	Mitsubishi	5 (cada una)
6	Contrapresión	Toshiba	5
7	Condensación	General Electric	50
8,9 y 10	Contrapresión	Ansaldo Makrotek	5 (cada una)
11 y 12	Ciclo binario	Ormat	1.5 (cada una)
13,14,15,16	Condensación	Alstom	25 (cada una)
17	Condensación	Mitsubishi	50
18	Condensación	Fuji	25 (En construcción)

Fuente: Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos. septiembre de 2018.

Figura 4.8 Unidades campo geotérmico los Azufres.

De acuerdo con algunos datos obtenidos de la central geotérmica de los azufres son los siguientes:

Tabla 4.1. Producción de vapor central geotérmica los Azufres.

Central Geotermoeléctrica	Generación Anual 2007 (GW)	Producción promedio de vapor (ton/hr)
Los Azufres	1766	1865

Fuente: Gerencia de proyectos geotérmicos, CFE/Generación VI.



Tabla 4.2. Potencia de las unidades de los Azufres.

Unidad	Tipo	Marca	Capacidad (MW)
1,2,3,4,5	Contrapresión	Mitsubishi	5 (cada una)
6	Contrapresión	Toshiba	5
7	Condensación	General Electric	50
8,9,10	Contrapresión	Ansaldo Makrotec	5 (Cada una)
11,12	Ciclo Binario	Ormat	1.5 (Cada una)
13,14,15,16	Condensación	Alstom	25 (Cada una)
17	Condensación	Mitsubishi	50
18	Condensación	Fuji	25 (En construcción)

Fuente: Gerencia de proyectos geotérmicos, CFE/Generación VI.

Díaz S., *Evolución de la geotermia en Michoacán: Campo Geotérmico Los Azufres. CFE/Generación VI Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricas*, 4 de octubre de 2018. Disponible en: <http://www.apercc.org.mx/wp-content/uploads/2018/10/ENREN2018-evaluacion-geotermia-Michoacan-Los-Azufres-compressed.pdf>

#### 4.5.2 Problema

Supóngase que se dispone de un yacimiento geotérmico, donde se desea diseñar una planta geotermoeléctrica de flasheo con varias alternativas y bajo las siguientes condiciones:

- Producción de vapor de los pozos, **1865 ton/hr** (dato tomado de la CG los Azufres).
- Condición 1: Calidad del vapor en la boca del pozo, **X= 0.30** (dato propuesto)
- Condición 2: Calidad del vapor en la boca del pozo, **X= 0.32** (dato propuesto)
- Condición 3: Calidad del vapor en la boca del pozo, **X= 0.35** (dato propuesto)
- Consumo de vapor por eyectores, 30 ton/hr (dato propuesto)
- Eficiencia del turbogenerador,  $n_{tg} = 0.9$  (dato propuesto)
- Presión del vapor en la boca del pozo,  $P = 8$  bar abs

-Presión en el escape de la turbina,  $P = 0.1 \text{ bar}$  (3 pulg Hg)

Calcular la potencia para los siguientes casos:

- 1.- Una etapa de flasheo, una turbina.
- 2.- Dos etapas de flasheo, una turbina.

### 4.5.3 Central geotermoeléctrica con una etapa de flasheo

Para una etapa de flasheo se puede disponer del arreglo siguiente:

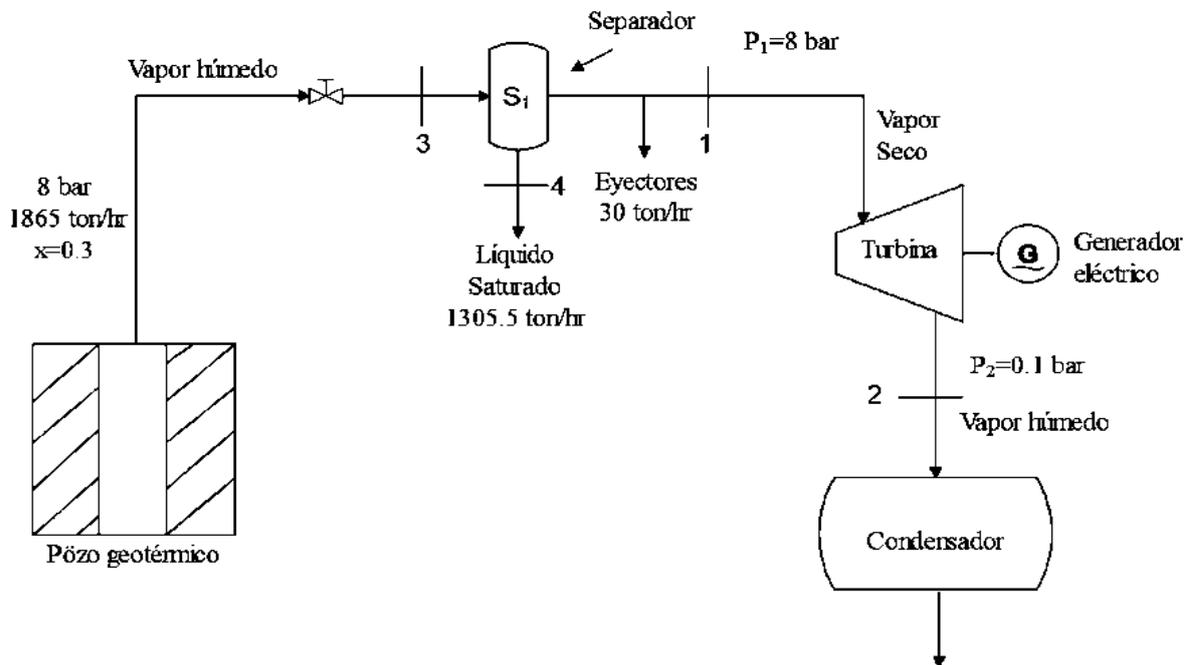


Figura 4.9 Datos Iniciales de central con una cámara flash.



*Condición 1: Configuración con una cámara flash, calidad del vapor en la boca del pozo al 30%,  $X=0.30$*

El flujo de vapor que sale del separador es:

$$\dot{m}_v = x_3 * \dot{m}_3$$

$$x_3 = 0.3$$

$$\dot{m}_3 = 1865 \frac{\text{ton}}{\text{hr}}$$

$$\dot{m}_v = 0.3 * 1865 \frac{\text{ton}}{\text{hr}} = 559.5 \frac{\text{ton}}{\text{hr}}$$

El vapor que llega a la turbina, suponiendo que del separador el vapor sale seco es:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_v - 30 \frac{\text{ton}}{\text{hr}} = 529.5 \frac{\text{ton}}{\text{hr}}$$

De las tablas de vapor para una presión de 8 bar.

$$h_1 = 2769.1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = h_g$$

$$s_1 = 6.6628 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} * \text{K}}$$

A la salida de la turbina, para una presión de 0.1 bar y considerando que:

$$s_1 = s_2$$

$$s_1 = s_2 = s_{f2} + x_2 * s_{fg2}$$

$$h_2 = h_{f2} + x_2 * h_{fg2}$$

$$x_2 = \frac{s_1 - s_{f2}}{s_{g2} - s_{f2}}$$

$$s_1 = 6.6628 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} * \text{K}}$$

$$h_{f2} = 191.83 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$



$$h_{fg2} = 2392.8 \frac{kJ}{kg}$$

Los valores de *entropía* se obtienen de las tablas de vapor.

$$s_{f2} = 0.6493 \frac{kJ}{kg * K}$$

$$s_{g2} = 8.1502 \frac{kJ}{kg * K}$$

$$s_{fg2} = 8.1502 \frac{kJ}{kg * K} - 0.6493 \frac{kJ}{kg * K} = 7.5009 \frac{kJ}{kg * K}$$

$$x_2 = \frac{6.6628 - 0.6493}{7.5009} = 0.8017$$

$$h_2 = 191.83 + (0.8017 * 2392.8) = 2110.14 \frac{kJ}{kg}$$

$$h_2 = 2110 \frac{kJ}{kg}$$

Eficiencia del turbogenerador es:

$$n_{tg} = 0.9$$

De acuerdo a la ecuación siguiente, la potencia eléctrica generada es:

$$P_E = \dot{m}_1 * (h_1 - h_2) * n_{tg}$$

Sustituyendo valores numéricos.

$$P_E = \left[ \frac{529.5 \times 10^3 \text{ kg}}{3.6 \times 10^3 \text{ seg}} * (2769 - 2110) \frac{kJ}{kg} \right] * 0.9$$

$$P_E = 87.2351 \times 10^3 \text{ kW} = 87.2351 \text{ MW}$$



**Condición 2: Configuración con una cámara flash, calidad del vapor en la boca del pozo al 32%,  $X=0.32$**

El flujo de vapor que sale del separador es:

$$\dot{m}_v = x_3 * \dot{m}_3$$

$$x_3 = 0.32$$

$$\dot{m}_3 = 1865 \frac{\text{ton}}{\text{hr}}$$

$$\dot{m}_v = 0.32 * 1865 \frac{\text{ton}}{\text{hr}} = 596.8 \frac{\text{ton}}{\text{hr}}$$

El vapor que llega a la turbina, suponiendo que del separador el vapor sale seco es:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_v - 30 \frac{\text{ton}}{\text{hr}} = 566.8 \frac{\text{ton}}{\text{hr}}$$

Eficiencia del turbogenerador es:

$$n_{tg} = 0.9$$

Se tienen los valores de entropía y entalpía del primer caso iguales ya que, la presión sigue siendo 8 bar y solo se sustituye la calidad de vapor al 32%.

De acuerdo a la siguiente ecuación, la potencia eléctrica generada es:

$$P_E = \dot{m}_1 * (h_1 - h_2) * n_{tg}$$

Sustituyendo valores numéricos.

$$P_E = \left[ \frac{566.8 \times 10^3 \text{ kg}}{3.6 \times 10^3 \text{ seg}} * (2769 - 2110) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right] * 0.9$$

$$P_E = 93.3802 \times 10^3 \text{ kW} = 93.3802 \text{ MW}$$



**Condición 3: Configuración con una cámara flash, calidad del vapor en la boca del pozo al 35%,  $X = 0.35$**

El flujo de vapor que sale del separador es:

$$\dot{m}_v = x_3 * \dot{m}_3$$

$$x_3 = 0.35$$

$$\dot{m}_3 = 1865 \frac{\text{ton}}{\text{hr}}$$

$$\dot{m}_v = 0.35 * 1865 \frac{\text{ton}}{\text{hr}} = 652.75 \frac{\text{ton}}{\text{hr}}$$

El vapor que llega a la turbina, suponiendo que del separador el vapor sale seco es:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_v - 30 \frac{\text{ton}}{\text{hr}} = 622.75 \frac{\text{ton}}{\text{hr}}$$

Eficiencia del turbogenerador es:

$$n_{tg} = 0.9$$

Se tienen los valores de entropía y entalpía del primer caso iguales ya que, la presión sigue siendo 8 bar y solo se sustituye la calidad de vapor al 35%.

De acuerdo a la siguiente ecuación, la potencia eléctrica generada es:

$$P_E = \dot{m}_1 * (h_1 - h_2) * n_{tg}$$

Sustituyendo valores numéricos.

$$P_E = \left[ \frac{622.75 \times 10^3 \text{ kg}}{3.6 \times 10^3 \text{ seg}} * (2769 - 2110) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right] * 0.9$$

$$P_E = 102.5980 \times 10^3 \text{ kW} = 102.5980 \text{ MW}$$

#### 4.5.4 Central Geotermoeléctrica con dos etapas de flasheo

En el caso donde se tiene dos etapas de flasheo; el arreglo quedara como se muestra en la figura 4.10.

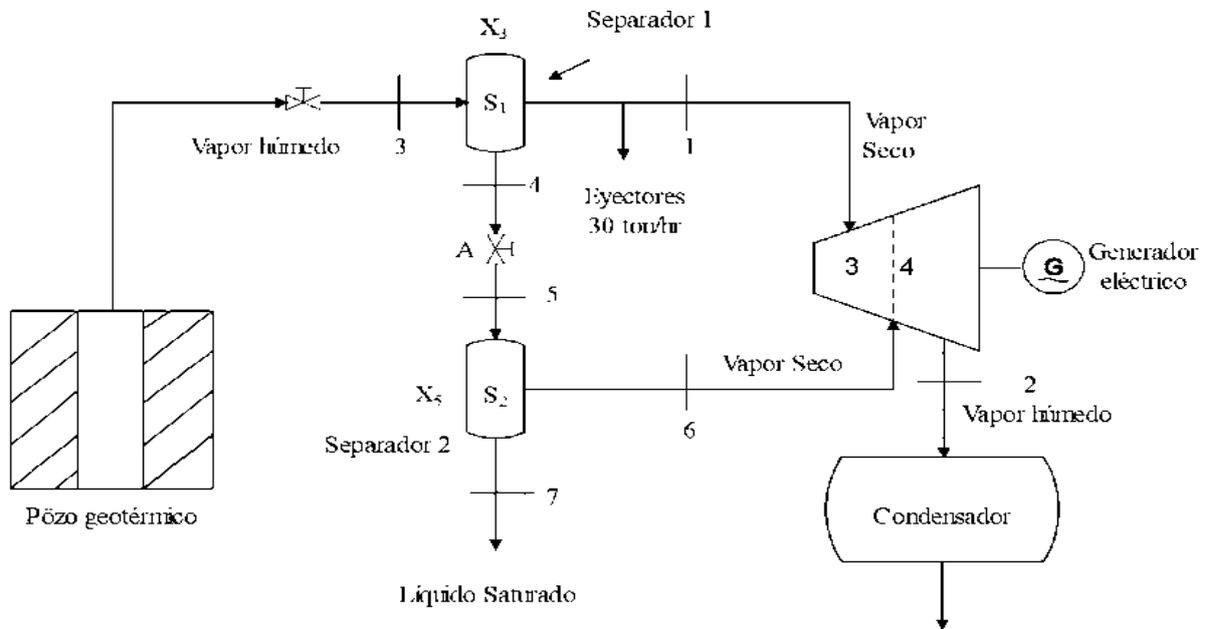


Figura 4.10 Datos iniciales de central con dos cámaras flash.

El agua que sale del separador 1 es líquido saturado, por lo tanto, su entalpía a 8 bar es:

$$h_a = 721 \frac{kJ}{kg}$$

En la válvula de expansión, A, supóngase que la presión se desea bajar a 1.4 bar, pero la entalpía se conserva constante si el proceso es adiabático.

La anterior aseveración se puede analizar haciendo un balance de energía (primera ley de termodinámica).

Sea la siguiente figura la válvula reductora de presión.

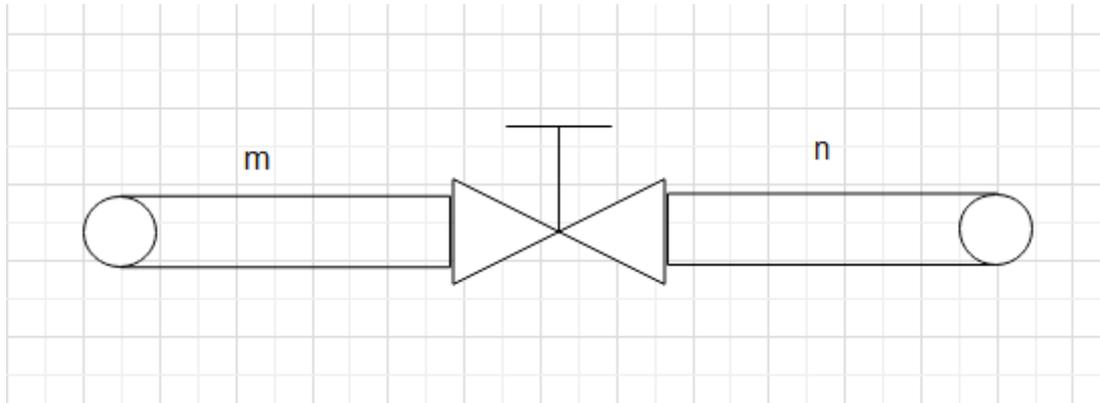


Figura 4.11 Válvula reductora de presión.

Se tiene la siguiente expresión:

$$q - w = (V_n^2 - V_m^2)/2 + (Z_n - Z_m) + h_n - h_m \quad (4.22)$$

Esto es por unidad de masa

Se tiene para este caso

$q=0$ , proceso adiabático

$w=0$ , no se realiza ningún trabajo

$Z_1 = Z_2$ , la diferencia de altura es insignificante

La expresión anterior se reduce

$$\frac{v_n^2 - v_m^2}{2} + h_n - h_m = 0 \quad (4.23)$$

Es posible hacer  $V_m=V_n$  si se ajusta el diámetro del tubo en el punto n, con base, en la ecuación de continuidad. Se tendrá entonces.

$$h_m = h_n = h_a \quad (4.24)$$

Recordando que m es líquido saturado, y en n al reducirse la presión, se tendrá vapor generalmente húmedo.

$$h_a = h_{fn} + x_n h_{fgn} \quad (4.25)$$



$$x_n = \frac{721 - h_{fn}}{h_{fgn}} \quad 4.26)$$

De las tablas de vapor para 1.4 bar

$$h_{fn} = 458 \frac{kJ}{kg}, h_{fg} = 2232 \frac{kJ}{kg}$$

Sustituyendo valores queda:

$$x_n = \frac{721 - 458}{2332}$$

$$x_n = 0.1179$$

Además, con  $x=0.3$ , el flujo del líquido que sale del separador 1 es de 1305.5 ton/hr este mismo entra al separador 2 pero como vapor, por tanto, el flujo de vapor que sale del separador 2 es:

$$\dot{m}_v = 559.5$$

$$\dot{m}_4 = \dot{m}_5 = 1865 - \dot{m}_v = 1305.5 \text{ ton/hr}$$

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_5 * x_n \quad 4.27)$$

$$\dot{m}_2 = 1305.5 * 0.1179 = 153.91 \text{ ton/hr}$$

La entalpía de este vapor seco es

$$h_2 = 2690 \frac{kJ}{kg}$$

Se trata de una turbina de doble admisión,  $\dot{m}_1$  a 8 bar y  $\dot{m}_2$  a una presión de 1.4 bar.

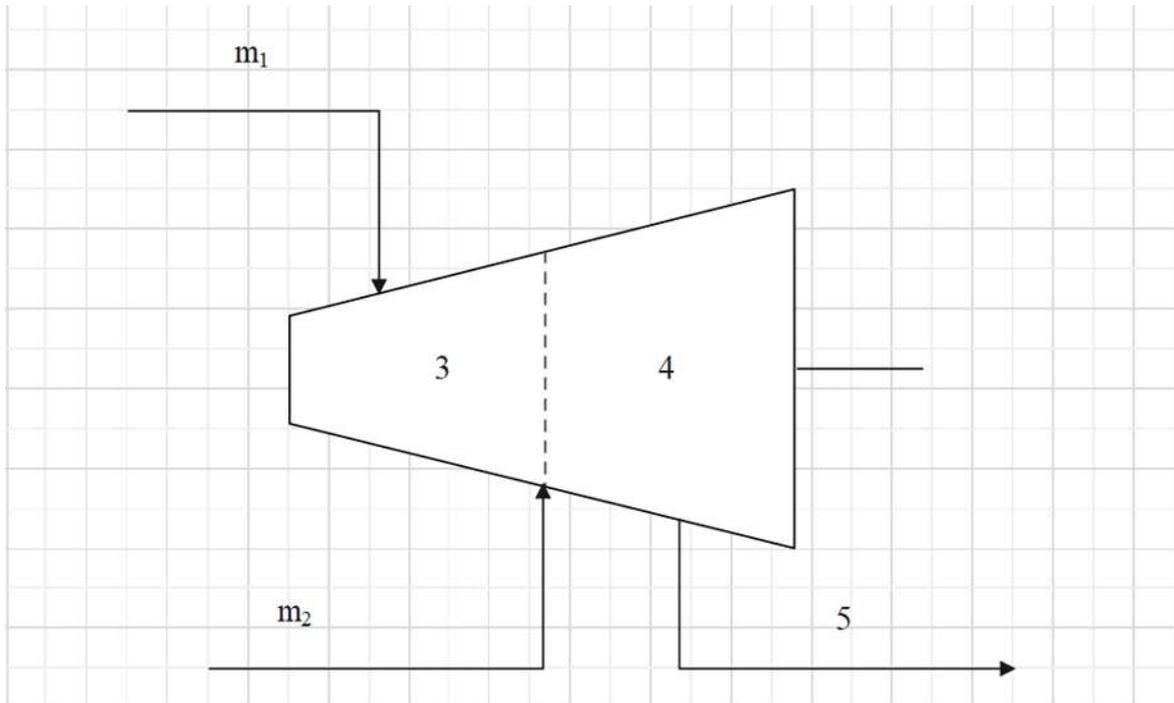


Figura 4.12 Turbina de doble admisión.

Del punto 1 al 3 el proceso es isentrópico

$$s_1 = s_3 = s_{f3} + x_3 * s_{fg3} \quad (4.28)$$

$$x_3 = \frac{s_1 - s_{f3}}{s_{fg3}} = \frac{6.66 - 1.41}{5.835} = 0.9$$

Los valores de entropía se obtienen de las tablas de vapor.

$$x_3 = 0.9$$

Por lo tanto

$$h_3 = 0.9 h_g \quad (\text{Para 1.4 bar})$$

$$h_3 = 2467.2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

En el punto 4 se unen  $\dot{m}_1$ , y  $\dot{m}_2$



Por lo que:

$$\dot{m}_1 h_3 + \dot{m}_2 h_2 = (\dot{m}_1 + \dot{m}_2) h_4$$

$$h_4 = \frac{\dot{m}_1 h_3 + \dot{m}_2 h_2}{\dot{m}_1 + \dot{m}_2}$$

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

Sustituyendo valores

$$h_4 = 2519 \frac{kJ}{kg}$$

La calidad de este vapor es:

$$x_4 = \frac{h_4 - h_{f4}}{h_{fg4}} = \frac{2519.4 - 456.4}{2232.1}$$

Además  $s_4 = s_5$

Con  $h_4$  y  $x_4$  se tiene:

$$s_4 = 6.8$$

Para el punto 5, descarga de la turbina, con  $s_5$  y la presión (0.1 bar) se obtiene:

$$x_5 = 0.82$$

y

$$h_5 = 2154 \frac{kJ}{kg}$$

**Condición 1: Configuración con dos cámaras flash, calidad del vapor en la boca del pozo al 30%,  $x = 0.30$**

De la configuración con una cámara flash y la calidad del vapor al 30% se tiene

$$\dot{m}_1 = 529.5 \frac{ton}{hr}$$

La potencia eléctrica generada es:



$$P_E = [\dot{m}_1(h_1 - h_3) + (\dot{m}_1 + \dot{m}_2)(h_4 - h_5)]n_{tg}$$

$$\dot{m}_1 = 529.5 \frac{\text{ton}}{\text{hr}}$$

$$\dot{m}_2 = 153.91 \frac{\text{ton}}{\text{hr}}$$

$$h_1 = 2769.1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_3 = 2467.2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_4 = 2519 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_5 = 2154 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$P_E = \left[ \frac{529.5 \times 10^3 \text{ kg}}{3.6 \times 10^3 \text{ seg}} * (2769.1 - 2467.2) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + \left( \frac{529.5}{3.6 \times 10^3} + \frac{153.91}{3.6 \times 10^3} \right) (2519 - 2154) \right] * 0.9$$

Corregir potencia de acuerdo a la  $m_2$  que cambió.

$$P_E [44.4191 \times 10^3 \text{ kW} + 69.2901 \times 10^3 \text{ kW}] * 0.9$$

$$P_E = 102.3252 \times 10^3 \text{ kW} = 102.3252 \text{ MW}$$

**Condición 2: Configuración con dos cámaras flash, calidad del vapor en la boca del pozo al 32%,  $x = 0.32$**

De la configuración con una cámara flash y la calidad del vapor al 32% se tiene

$$\dot{m}_1 = 566.8 \frac{\text{ton}}{\text{hr}}$$

El flujo de vapor que sale del separador es:



$$\dot{m}_v = x_3 * \dot{m}_3$$

$$x_3 = 0.32$$

$$\dot{m}_3 = 1865 \frac{\text{ton}}{\text{hr}}$$

$$\dot{m}_v = 0.32 * 1865 \frac{\text{ton}}{\text{hr}} = 596.8 \frac{\text{ton}}{\text{hr}}$$

El vapor que llega a la turbina, suponiendo que del separador el vapor sale seco es:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_v - 30 \frac{\text{ton}}{\text{hr}} = 566.8 \frac{\text{ton}}{\text{hr}}$$

Para obtener  $\dot{m}_2$  se realiza lo siguiente.

Sustituyendo valores queda:

$$x_n = 0.1179$$

Además, se tiene ahora  $x=0.32$ , el flujo del líquido que sale del separador 1 es de 1298.2 ton/hr este mismo entra al separador 2 pero como vapor, por tanto, el flujo de vapor que sale del separador 2 es:

En este caso el líquido que sale del separador 1 cambia de acuerdo a lo siguiente:

$$\dot{m}_v = 596.8 \text{ ton/hr}$$

$$\dot{m}_4 = \dot{m}_5 = 1865 - \dot{m}_v = 1268.2 \text{ ton/hr}$$

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_5 * x_n$$

$$\dot{m}_2 = 1268.2 * 0.1179 = 149.5207 \text{ ton/hr}$$

La potencia eléctrica generada es:

$$P_E = [\dot{m}_1(h_1 - h_3) + (\dot{m}_1 + \dot{m}_2)(h_4 - h_5)]n_{tg}$$

$$P_E = \left[ \frac{566.8 \times 10^3 \text{ kg}}{3.6 \times 10^3 \text{ s}} * (2769 - 2467.2) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + \frac{\text{kg}}{\text{s}} \left( \frac{566.8 \times 10^3}{3.6 \times 10^3} + \frac{149.52 \times 10^3}{3.6 \times 10^3} \right) (2519 - 2154) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right] * 0.9$$



$$P_E = 108.1434 \times 10^3 \text{ kW} = 108.1434 \text{ MW}$$

**Condición 3: Configuración con dos cámaras flash, calidad del vapor en la boca del pozo al 35%,  $x = 0.35$**

De la configuración con una cámara flash y la calidad del vapor al 35% se tiene

$$\dot{m}_1 = 622.75 \frac{\text{ton}}{\text{hr}}$$

El flujo de vapor que sale del separador es:

$$\dot{m}_v = x_3 * \dot{m}_3$$

$$x_3 = 0.35$$

$$\dot{m}_3 = 1865 \frac{\text{ton}}{\text{hr}}$$

$$\dot{m}_v = 0.35 * 1865 \frac{\text{ton}}{\text{hr}} = 652.75 \frac{\text{ton}}{\text{hr}}$$

El vapor que llega a la turbina, suponiendo que del separador el vapor sale seco es:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_v - 30 \frac{\text{ton}}{\text{hr}} = 622.75 \frac{\text{ton}}{\text{hr}}$$

Para obtener  $\dot{m}_2$  realizamos lo siguiente.

Sustituyendo valores queda:

$$x_n = 0.1179$$

Además, se tiene ahora  $x=0.35$ , el flujo del líquido que sale del separador 1 es de 1242.25 ton/hr este mismo entra al separador 2 pero como vapor, por tanto, el flujo de vapor que sale del separador 2 es:

En este caso el líquido que sale del separador 1 cambia de acuerdo a lo siguiente:

$$\dot{m}_v = 652.75 \text{ ton/hr}$$



$$\dot{m}_4 = \dot{m}_5 = 1865 - \dot{m}_v = 1212.25 \text{ ton/hr}$$

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_5 * x_n$$

$$\dot{m}_2 = 1212.25 * 0.1179 = 142.9242 \text{ ton/hr}$$

La potencia eléctrica generada es:

$$P_E = [\dot{m}_1(h_1 - h_3) + (\dot{m}_1 + \dot{m}_2)(h_4 - h_5)]n_{tg}$$

$$P_E = \left[ \frac{622.75 \times 10^3 \text{ kg}}{3.6 \times 10^3 \text{ s}} * (2769 - 2467.2) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + \frac{\text{kg}}{\text{s}} \left( \frac{622.75 \times 10^3}{3.6 \times 10^3} + \frac{142.92 \times 10^3}{3.6 \times 10^3} \right) (2519 - 2154) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right] * 0.9$$

$$P_E = 116.86.94 \times 10^3 \text{ kW} = 116.8694 \text{ MW}$$

## 4.6 Resultados

### Configuración con una cámara flash.

-Condición 1: Calidad del vapor en la boca del pozo,  $x = 0.30$

$$P_E = 87.2351 \times 10^3 \text{ kW} = 87.2351 \text{ MW}$$

-Condición 2: Calidad del vapor en la boca del pozo,  $x = 0.32$

$$P_E = 93.3802 \times 10^3 \text{ kW} = 93.3802 \text{ MW}$$

-Caso 3: Calidad del vapor en la boca del pozo,  $x = 0.35$

$$P_E = 102.5980 \times 10^3 \text{ kW} = 102.5980 \text{ MW}$$

### Configuración con dos cámaras flash.

-Condición 1: Calidad del vapor en la boca del pozo,  $x = 0.30$



$$P_E = 102.3252 \times 10^3 \text{ kW} = 102.3252 \text{ MW}$$

-Condición 2: Calidad del vapor en la boca del pozo,  $x = 0.32$

$$P_E = 108.1434 \times 10^3 \text{ kW} = 108.1434 \text{ MW}$$

-Condición 3: Calidad del vapor en la boca del pozo,  $x = 0.35$

$$P_E = 116.86.94 \times 10^3 \text{ kW} = 116.8694 \text{ MW}$$

En la tabla 4.3 se tiene un resumen de los resultados, se puede observar la *configuración* en la columna izquierda en una y dos etapas de flasheo, en la columna siguiente se tiene la *calidad de vapor* en las tres condiciones para las dos configuraciones, la siguiente columna se tiene la *potencia eléctrica* respecto a la calidad de vapor en las dos configuraciones, en la columna de la derecha se tiene el *porcentaje* de la potencia eléctrica generada, se puede observar que el porcentaje en la configuración con una etapa de flasheo está al 100%, es decir es la potencia máxima que se puede obtener en la configuración con una etapa de flasheo para las tres condiciones propuestas, en la misma columna del porcentaje también se puede observar el porcentaje en la configuración con dos etapas de flasheo, en el caso de la calidad en  $x=0.3$ , se tiene 117.29% esto respecto a la configuración con una etapa de flasheo con la calidad al mismo valor, en el caso de la calidad en  $x=0.32$  se tiene 115.8% con respecto a la configuración con una etapa de flasheo con la calidad al mismo valor, y en el caso de la calidad en  $x=0.35$  se tiene 113.91% de igual manera respecto a la configuración con una etapa de flasheo con la calidad con el mismo valor, de esta manera se tiene un incremento del 15.66% promedio, que en potencia eléctrica generada es alrededor de 15 MW más en la configuración con dos etapas de flasheo.



## ANÁLISIS DE LA CALIDAD DE VAPOR Y SU IMPACTO EN CENTRALES GEOTERMOELÉCTRICAS



Tabla 4.3. Potencia generada de acuerdo a la calidad del vapor.

Configuración	Calidad de Vapor (x)	Potencia Eléctrica (MW)	Porcentaje (%)
<b>Una etapa de flasheo</b>			
	0.3	87.2351 MW	100%
	0.32	93.3802 MW	100%
	0.35	102.5980 MW	100%
<b>Dos etapas de flasheo</b>			
	0.3	102.3252 MW	117.29%
	0.32	108.1434 MW	115.8%
	0.35	116.8694 MW	113.91%

Fuente: Elaboración propia, análisis de la calidad del vapor.

En la figura 4.13 se puede observar la gráfica la potencia eléctrica, en configuración con una y dos cámaras flash, cuando la calidad de vapor está al 30%, con una cámara flash se tiene una potencia de 87.2351 MW, con dos cámaras flash se tiene 102.3252 MW potencia eléctrica, se observa que en la configuración con dos cámaras flash se tiene un incremento del 17.29% con respecto a la de una cámara flash.

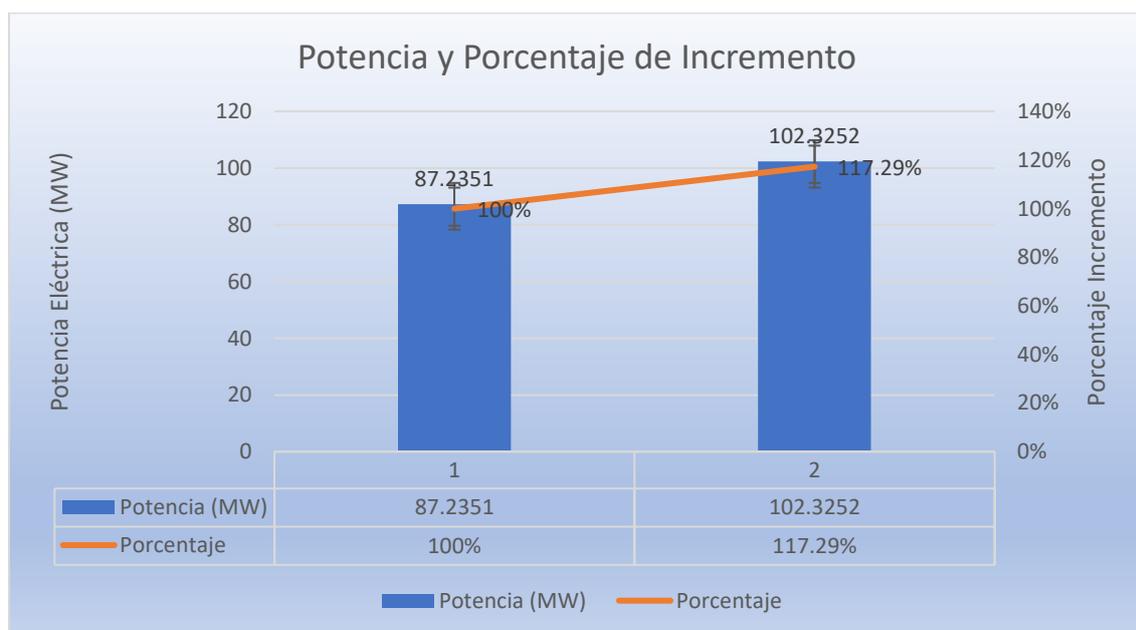


Figura 4.13 Gráfica de la potencia generada y porcentaje de incremento con la calidad de vapor al 30%.



## ANÁLISIS DE LA CALIDAD DE VAPOR Y SU IMPACTO EN CENTRALES GEOTERMOELÉCTRICAS



En la figura 4.14 se puede observar la gráfica de la potencia eléctrica, en configuración con una y dos cámaras flash, cuando la calidad de vapor está al 32%, con una cámara flash se tiene una potencia de 93.3802 MW, con dos cámaras flash se tiene 108.1434 MW potencia eléctrica, se observa que en la configuración con dos cámaras flash se tiene un incremento del 15.8% con respecto a la de una cámara flash.

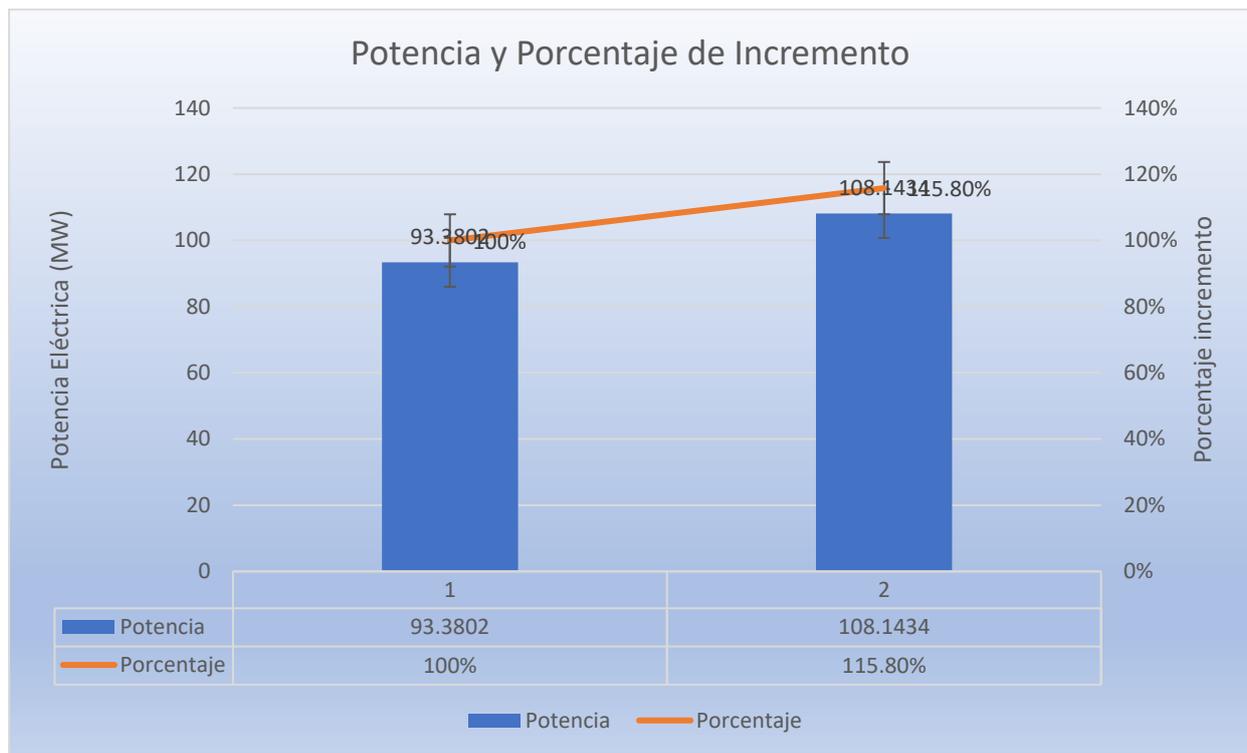


Figura 4.14 Gráfica de la potencia generada y porcentaje de incremento con la calidad de vapor al 32%.

En la figura 4.15 se puede observar la gráfica de la potencia eléctrica, en configuración con una y dos cámaras flash, cuando la calidad de vapor está al 35%, con una cámara flash se tiene una potencia de 102.598 MW, con dos cámaras flash se tiene 116.8694 MW potencia eléctrica, se observa que en la configuración con dos cámaras flash se tiene un incremento del 13.91% con respecto a la de una cámara flash.



## ANÁLISIS DE LA CALIDAD DE VAPOR Y SU IMPACTO EN CENTRALES GEOTERMOELÉCTRICAS

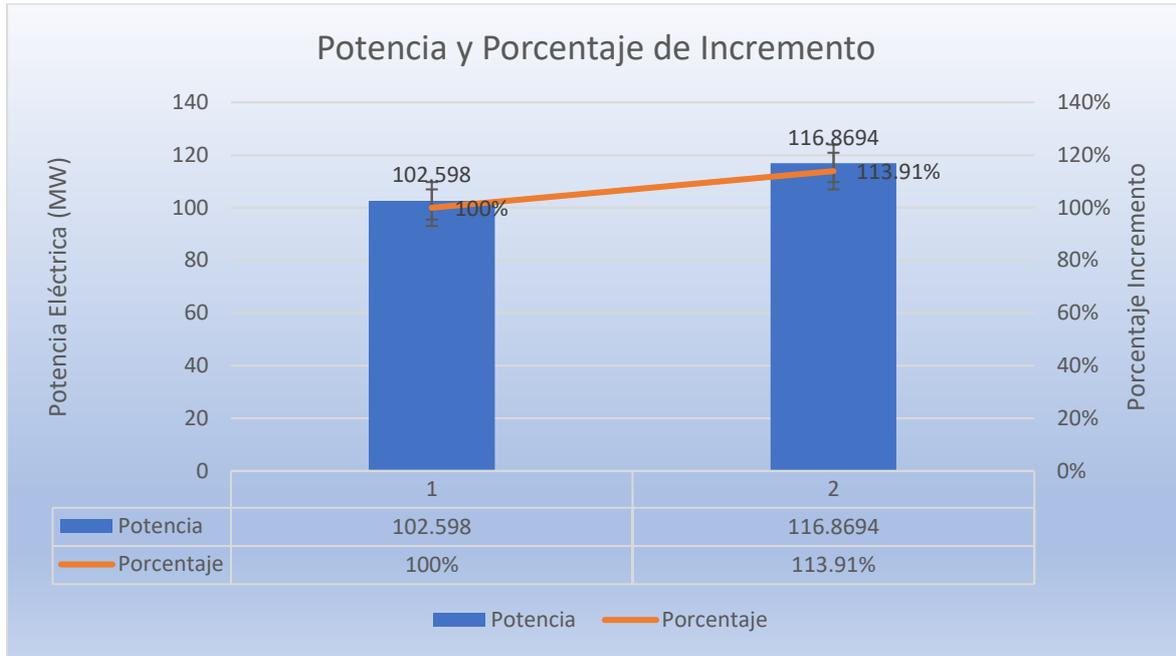


Figura 4.15 Gráfica de la potencia generada y porcentaje de incremento con la calidad de vapor al 35%.

En la figura 4.16 se observa una comparación de las gráficas en la potencia eléctrica, el porcentaje que incrementa la potencia de acuerdo a la calidad de vapor en las tres condiciones, en configuración con una y dos cámaras flash.

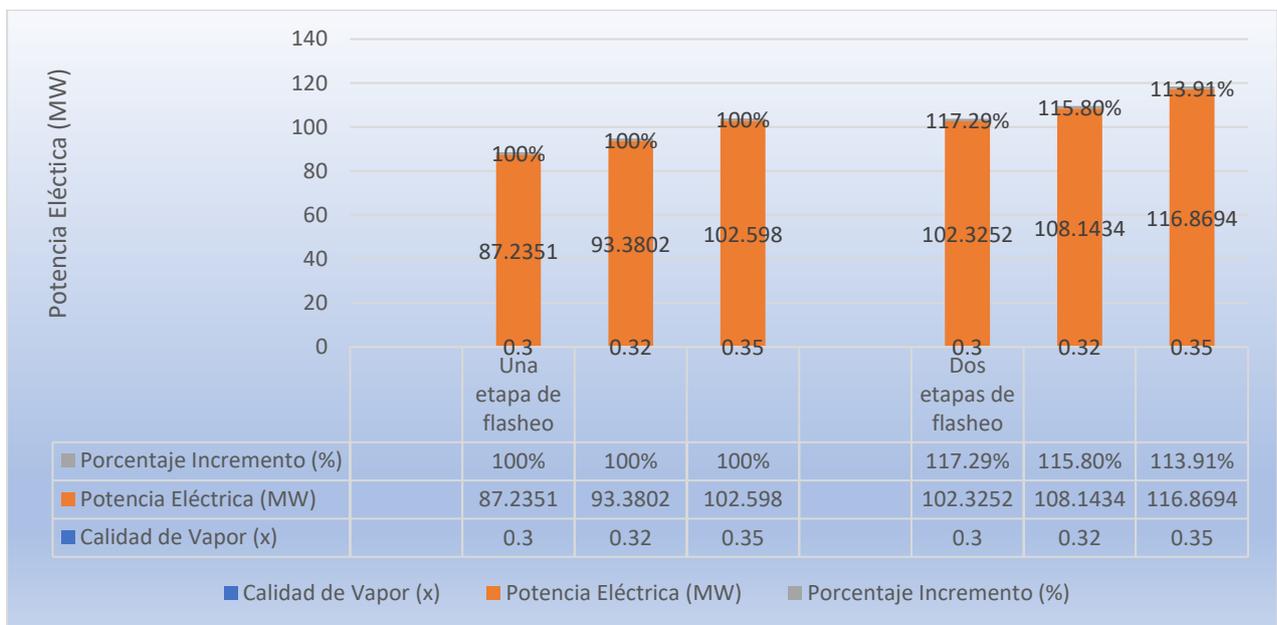


Figura 4.16 Gráfica de la potencia en una y dos etapas de flasheo incrementando la calidad del vapor.



## ANÁLISIS DE LA CALIDAD DE VAPOR Y SU IMPACTO EN CENTRALES GEOTERMOELÉCTRICAS



En la figura 4.17 se observa una comparación de las gráficas en la potencia eléctrica, el porcentaje que incrementa la potencia de acuerdo a la calidad de vapor en las tres condiciones, en configuración con una y dos cámaras flash, en las gráficas con dos cámaras flash se observa una tendencia del porcentaje a la baja.

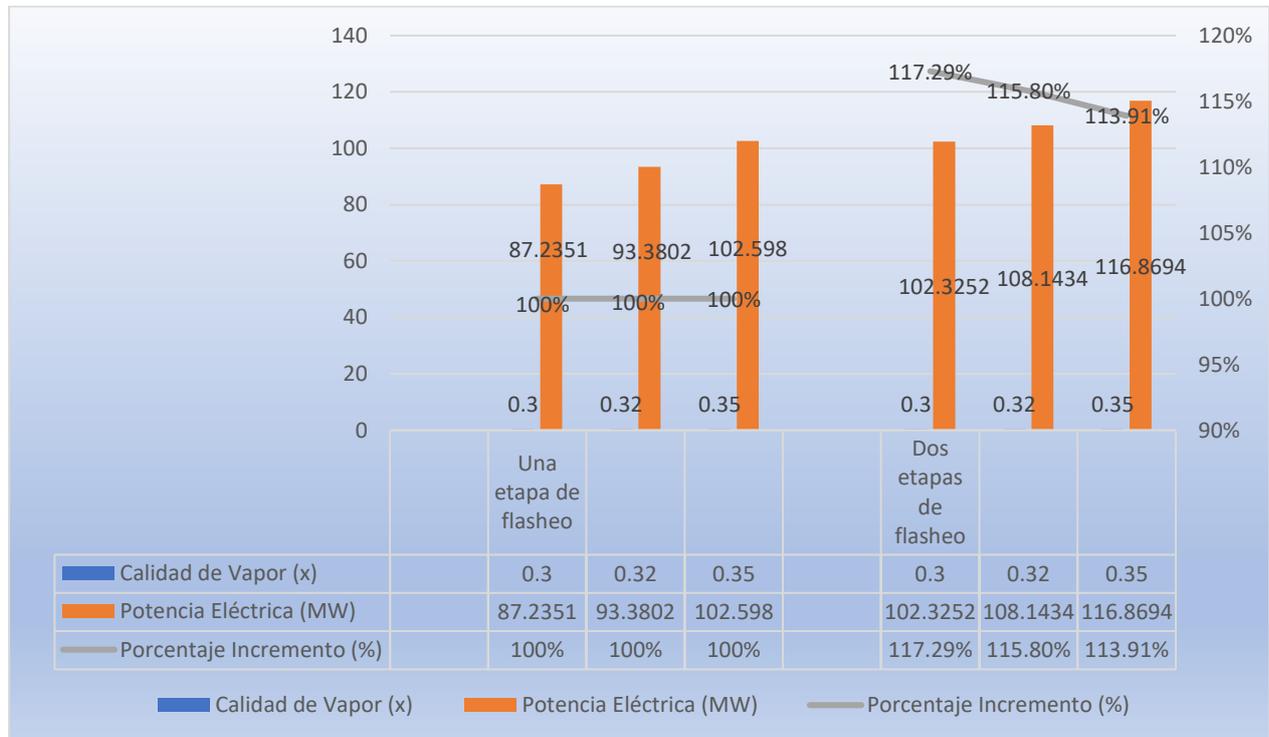


Figura 4.17 Gráfica de la potencia y porcentaje en una y dos etapas de flasheo incrementando la calidad del vapor.

En la figura 4.18 se observa la gráfica de la tendencia del porcentaje, cuando la potencia incrementa respecto la calidad de vapor, la gráfica es para la configuración con dos cámaras flash, se observa una tendencia del porcentaje a la baja, está pérdida de porcentaje es baja, pero cada que incrementa la calidad de vapor también va disminuyendo el porcentaje, esto porque las pérdidas en el proceso de generación de potencia eléctrica también incrementan.

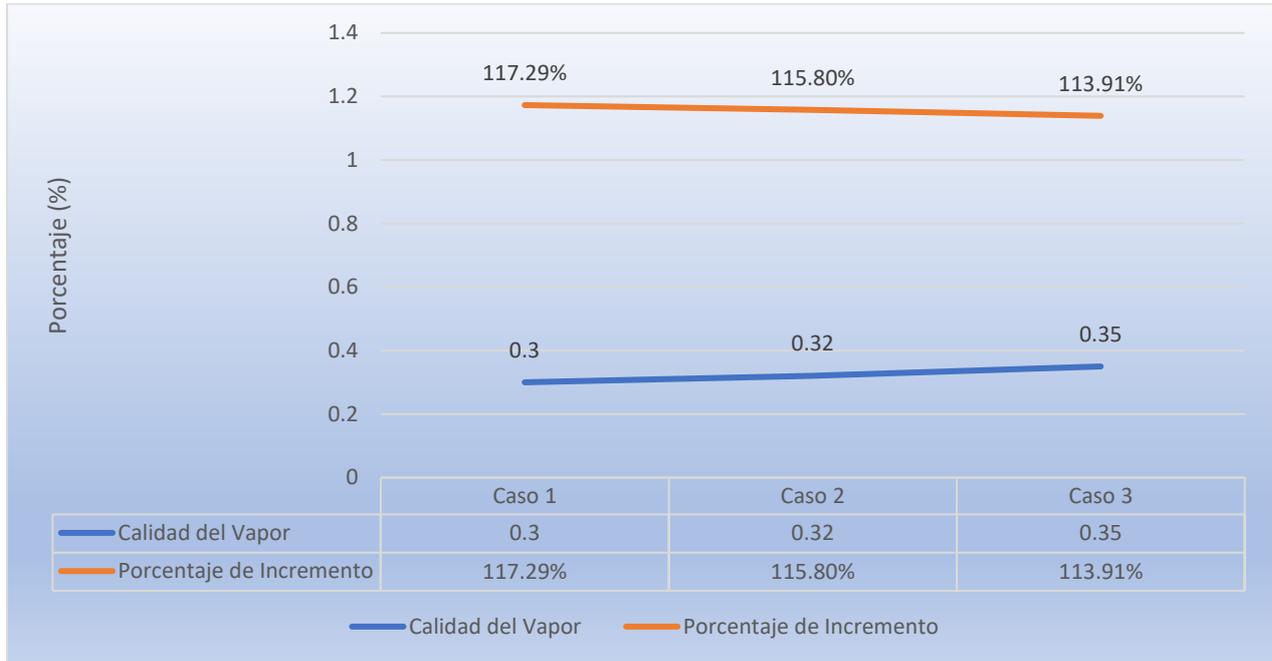


Figura 4.18 Gráfica de la tendencia del porcentaje con dos calmaras flash cuando incrementa la calidad del vapor.

## Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones

### 5.1 Conclusiones

Las plantas de generación de potencia que utilizan como fuente de energía la geotérmica, en específico vapor húmedo, presentan un buen desempeño cuando integran en su configuración dos cámaras flash. El implementar una tercera cámara flash no incrementa de forma significativa la eficiencia térmica ni la generación de potencia, debido a que se incrementan las pérdidas de la disponibilidad de la energía en la tercera sección de la expansión en la turbina de vapor.

El análisis termodinámico a las centrales geotérmicas muestra que al incluir cámaras flash en los sistemas, se incrementa el trabajo de expansión y adicionalmente la seguridad en la operación por mantener la calidad del vapor mayor. Sin embargo, como sistemas de baja entalpía, no se presenta la opción de minimizar la generación de irreversibilidades, debido a que se aprovecha el efecto del incremento en el volumen específico, al mantener la presión



y temperaturas constantes en la cámara separadora y la turbina de vapor, incrementando su energía.

Como se sabe el vapor húmedo obtenido de la boca del pozo, la cantidad de vapor seco que se aprovecha es muy baja como en este caso se propuso alrededor del 30% al 35% de la calidad, así mismo se observó que el aprovechamiento de la calidad del vapor se mejora de acuerdo a la óptima operación de la central y el aprovechar la configuración con dos etapas flash, esto generó un incremento de la potencia eléctrica, de esta manera se tiene un incremento del 15.66% promedio, que en potencia eléctrica generada es alrededor de 15 MW más, para la configuración con dos etapas de flasheo, de esta manera se observó que se obtiene un buen desempeño y una ganancia considerable en la potencia generada para dos cámaras flash.

## 5.2 Recomendaciones

El presente análisis se realizó teniendo en cuenta que se tiene un turbogenerador de alta eficiencia, ya que el cálculo se propuso una eficiencia del 90% para el turbogenerador, es decir el análisis teórico recomienda que, para tener una generación óptima y un porcentaje de incremento de acuerdo a los resultados obtenidos, se debe contar una turbina que tenga una eficiencia alrededor de la eficiencia propuesta en el cálculo.

Para fines prácticos, tomando en consideración aspectos termodinámicos y económicos el número de etapas de flasheo se limita a dos, es por eso que se recomienda que las plantas geotermoeléctricas con etapas de flasheo se limite a dos etapas de flasheo, ya con dos etapas se tiene un incremento considerable de la generación de la potencia, instalaciones de este tipo se encuentran en los azufres y cerro prieto.

Otro aspecto que se considera es que en las etapas de flasheo los incrementos son cada vez más pequeños a medida que aumenta el número de etapas, por lo que económicamente no se justifica un número alto.

Un inconveniente de este ciclo, es cuando el contenido de *gases no condensables* es alto, es la gran potencia que requieren eyectores o compresores para la eliminación en el condensador de estos gases. Para resolver este problema se han desarrollado sistemas que modifican el ciclo original.



## Bibliografía

- [1] Wikipedia. *Energía Geotérmica*. [En línea]. [Citado el: 05 de octubre de 2020.] Disponible en: [https://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADa\\_geot%C3%A9rmica](https://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADa_geot%C3%A9rmica)
- [2] Solar energía. *Usos y aplicaciones de la energía geotérmica*. [En línea]. [[Citado el 05 de octubre de 2020.] Disponible en: <https://solar-energia.net/energias-renovables/energia-geotermica/aplicaciones>
- [3] Iberdrola. *150 años de camino a la sostenibilidad: historia de la electricidad*. [En línea]. [Citado el: 10 de octubre de 2020.] Disponible en:  
<https://www.iberdrola.com/medio-ambiente/historia-electricidad>
- [4] José A. C. González, Roque C. Pérez, Antonio C. Santos, Manuel-A. Castro Gil. (2009). *Centrales de Energías Renovables: Generación Eléctrica con Energías Renovables*. Madrid, España: Editorial Pearson Educación, S.A. [Citado el: 08 de octubre de 2020.]
- [5] Azcarate J. E., *La energía geotérmica*. Instituto geológico y minero de España. [Citado el: 26 de octubre de 2020.] Disponible en:  
<https://www.igme.es/Geotermia/Ficheros%20PDF/MasInfor/Folleto%20color.pdf>
- [6] Arellano V. M., Iglesias E., and García A., *La energía geotérmica: una opción tecnológica y económicamente madura. Tendencias tecnológicas*. [Citado el: 026 de octubre de 2020.] Disponible en: <https://www.ineel.mx/boletin032008/tendencias.pdf>
- [7] Yunus, A., Çengel and Boles, M.A., *Termodinámica*, Ed. McGraw-Hill, 2015. [Citado el: 03 de noviembre de 2020.]
- [8] Thermal engineering, *Qué es Steam, Propiedades de Steam*. [En línea]. [Citado el: 15 de noviembre de 2020.] Disponible en: <https://www.thermal-engineering.org/es/que-es-steam-propiedades-de-steam-definicion/>
- [9] Energiza. *Especial turbinas de vapor*. Edición Mensual Año I diciembre 2011 Edita renovetec. [En línea]. [Citado el: 20 de noviembre de 2020.] Disponible en: <http://www.energiza.org/anteriores/energizadiciembre2011.pdf>
- [10] Salazar M., Mora A., Bonilla A. E., Lugo R., Lugo H. D. *Análisis paramétrico de las centrales geotermoeléctricas: Vapor seco, cámara flash y ciclos híbridos*, DYNA, vol. 84,



núm. 203, pp. 273-282, 2017. [En línea]. [Citado el: 20 de noviembre de 2020.] Disponible en: <https://www.redalyc.org/journal/496/49655603035/html/>

[11] Díaz S., *Evolución de la geotermia en Michoacán: Campo Geotérmico Los Azufres*. CFE/Generación VI Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricas, 4 de octubre de 2018. [Citado el: 25 de abril de 2021.] Disponible en: <http://www.apercc.org.mx/wp-content/uploads/2018/10/ENREN2018-evaluacion-geotermia-Michoacan-Los-Azufres-compressed.pdf>

[12] Gonzales, G., *Centrales eléctricas; capítulo 4; Plantas Geotermoeléctricas*. [Notas de clase].

[13] Ordaz, A.R., Flores, M. y Ramírez, G., *Potencial geotérmico de la República Mexicana*. *Revista Mexicana de Geoenergía*, [en línea] [Citado el: 28 de octubre de 2020.] Disponible en: <http://pubs.geothermal-library.org/lib/journals/Geotermia-Vol24-1.pdf>

[14] Lugo, R., Salazar, M., Zamora, J.M., Torres, A. y Toledo, M., *Análisis energético de una central termoeléctrica*, *Científica, IPN*. [en línea]. Disponible en: <http://www.redalyc.org/pdf/614/61412184004.pdf>

[15] Hiriart G., (mayo de 2011), *Evaluación de la Energía Geotérmica en México, Informe para el Banco Interamericano de Desarrollo y la Comisión Reguladora de Energía México*. [Citado el: 8 de mayo de 2021.] Disponible en: <https://www.cre.gob.mx/documento/2026.pdf>

[16] Hiriart G., *INFORME PREPARADO PARA LA CRE, CON EL APOYO DEL BID Evaluación de la Energía Geotérmica en México*. [Citado el: 20 de mayo de 2021.] Disponible en: <https://www.cre.gob.mx/documento/2027.pdf>



## Glosario

**Bomba de calor:** Instalación que transfiere calor de un lugar frío a uno caliente, de manera opuesta a la dirección natural de flujo de calor. De manera similar a un refrigerador, las bombas de calor se usan para extraer calor de ambientes como el suelo (bombas de calor geotérmico), el agua o el aire, y pueden invertir su funcionamiento para proveer enfriamiento en verano.

**Calidad de vapor:** En termodinámica, es una propiedad extensiva de los fluidos que representa la relación entre la cantidad de vapor en masa, con respecto a la cantidad total de fluido.

**CFE:** Comisión Federal de Electricidad.

**Ciclo Rankine:** Un ciclo termodinámico que consiste en una serie cerrada de cuatro procesos: presurización de líquido, calentamiento-evaporación, expansión del vapor y enfriamiento-condensación. En la práctica hay diversas variantes del ciclo Rankine básico.

**Cogeneración:** Generación de energía eléctrica y aprovechamiento simultáneo del calor residual en un proceso industrial. En plantas geotermoeléctricas, se refiere al uso del agua caliente y/o vapor residual para aplicaciones directas que requieran calor. Sinónimo: Generación combinada de calor y electricidad (CHP: *Combined heat and power*).

**Eficiencia térmica:** Para un ciclo, es la relación entre la energía neta producida y la cantidad de calor introducida al ciclo.

**Energía interna:** En ingeniería, la energía interna ( $U$ ) de un sistema intenta ser un reflejo de la energía térmica que contiene. En física molecular, es la suma de la energía cinética interna (es decir, de las sumas de las energías cinéticas de las individualidades que lo forman respecto al centro de masas del sistema) y de la energía potencial interna (la energía potencial asociada a las interacciones entre estas individualidades).

**Entalpia:** Término utilizado por los ingenieros para denominar a la cantidad de calor útil que contiene un fluido. Es decir, es la energía interna del fluido más el trabajo asociado a su expansión al momento de aprovecharlo. Generalmente se denomina con la letra  $H$  o  $h$ .



**Fluido geotérmico:** Cualquier fluido producido por un pozo geotérmico. Puede ser vapor seco o sobrecalentado, líquido presurizado o una mezcla de líquido y vapor saturado, acompañada usualmente de gases incondensables.

**Flujo de calor, flujo térmico:** Cantidad de calor que pasa por una superficie por unidad de tiempo y por unidad de área, cuando la superficie se somete a un diferencial de temperatura entre sus caras. Es proporcional al producto de la conductividad térmica por el gradiente térmico.

**Gases no condensables:** Gases tales como el bióxido de carbono, el ácido sulfhídrico, el metano y otros en muy pequeñas concentraciones que son constituyentes de los fluidos geotérmicos, como componentes gaseosos del vapor. Estos gases no se condensan a la temperatura normal de condensación del vapor y se acumulan en el condensador, reduciendo la generación de energía, a menos que se bombeen hacia afuera del condensador.

**Gradiente geotérmico:** Proporción en la cual se incrementa la temperatura de la Tierra con la profundidad, reflejando el flujo de calor del interior de la misma hacia su superficie. El gradiente geotérmico normal medio en la litósfera se estima entre 25 y 30°C por cada kilómetro de profundidad, pero puede ser mucho más alto en zonas geotérmicas.

**Hidrotermal:** En el contexto de un sistema geotérmico, se refiere a soluciones mineralizadas calentadas por contacto con rocas calientes y/o por magmas en enfriamiento, que sufren movimientos de convección en un yacimiento.

**Intercambiador de calor:** Equipo que logra una transferencia de calor eficiente entre uno y otro medio sin que estos se mezclen, por ejemplo: radiadores, calderas, intercambiadores de calor, condensadores.

**Turbina:** Equipo que convierte la energía total de un fluido (aire, agua, gas caliente o vapor) en energía mecánica de rotación utilizada de manera directa para mover un generador eléctrico acoplado. Las turbinas de vapor a condensación descargan el vapor a un intercambiador de calor (llamado condensador) donde mediante enfriamiento artificial, se condensa el vapor y se extrae como líquido haciendo un vacío que mejora la eficiencia del ciclo, mientras que las turbinas de vapor a contrapresión descargan el vapor directamente a la atmósfera a través de un silenciador. 8



**Yacimiento:** En geotermia, es una zona del subsuelo compuesta por rocas calientes con fluidos naturales calientes cuya energía térmica puede ser económicamente explotada para generar energía eléctrica o en diversas aplicaciones directas.

**Permeabilidad:** Medida de la capacidad de los poros, grietas o aberturas de un material para permitir que los líquidos o gases fluyan a través de él bajo un gradiente de presión.

**Porosidad:** En geología, propiedad de una roca que cuantifica la cantidad de poros (espacios vacíos) que presenta, por unidad de volumen.

**Potencia (Capacidad):** Tasa a la cual se realiza un trabajo, expresado en unidades de joules por segundo (J/s) o watts (W) o sus múltiplos.

### UNIDADES

GW: Gigawatt. Medida de potencia equivalente a mil millones de watts. O bien a mil Megawatts

kWh: Kilowatt-hora. Medida de energía que equivale a mil watts en una hora.

MW: Megawatt. Medida de potencia equivalente a un millón de watts.