



Universidad
Carlos III de Madrid

Departamento de ingeniería térmica y fluidos

TRABAJO FIN DE GRADO

Grado en Ingeniería Mecánica

GENERACIÓN DE POTENCIA ELÉCTRICA A PARTIR DE LA GEOTERMIA

Autor: Fernando del Castillo Lima

Tutor: Sergio Sánchez Delgado

Leganés, Junio de 2014

Título: Generación de potencia eléctrica a partir de la geotermia

Autor: Fernando del Castillo Lima

Director: Sergio Sánchez Delgado

EL TRIBUNAL

Presidente: Eduardo Antonio Fernández Tarrazo

Vocal: Beatriz Galiana Blanco

Secretario: Efren Díez Jiménez

Realizado el acto de defensa y lectura del Proyecto Fin de Carrera el día 14 de julio de 2014 en Leganés, en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid, acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de

VOCAL

SECRETARIO

PRESIDENTE

*“Hay suficiente en el mundo
para cubrir las necesidades
de todos los hombres,
pero no para satisfacer
su codicia”*

Mahatma Gandhi

*“Estamos tan cerca del límite,
que puede que despertemos
un día para darnos cuenta
de que ya nada queda por salvar”*

Maneka Gandhi

Índice

1. INTRODUCCIÓN	17
<i>La energía como pieza fundamental en el desarrollo humano</i>	17
<i>Centrales nucleares y de combustibles fósiles</i>	20
<i>Panorama de la alta geotermia a nivel mundial y europeo</i>	25
2. MOTIVACIÓN	31
3. OBJETIVOS	34
4. GEOTERMIA	36
<i>Calor generado por la Tierra</i>	36
<i>Recursos y yacimientos geotérmicos</i>	40
<i>Clasificación de los yacimientos geotérmicos</i>	45
<i>Explotación de un yacimiento geotérmico</i>	47
<i>Yacimientos de alta y media entalpía</i>	47
<i>Yacimientos de baja y muy baja entalpía</i>	49
<i>Tipos de sondeos</i>	50
<i>Características de las perforaciones</i>	54
<i>Gestión del yacimiento geotérmico</i>	55
<i>Aplicaciones de la geotermia</i>	56
<i>Yacimientos de baja y muy baja entalpía</i>	56
<i>Yacimientos de media entalpía</i>	57
<i>Yacimientos de alta entalpía</i>	58
<i>Ciclos para centrales geotérmicas</i>	59
<i>Tipos de ciclos usados en centrales geotérmicas</i>	59
<i>Optimización en ciclos de centrales geotérmicas</i>	67
<i>Explotación de los recursos geotérmicos de baja entalpía</i>	69
<i>Características de la energía geotérmica</i>	70
<i>Ventajas de la geotermia frente a otras fuentes de energía</i>	70
<i>Inconvenientes de la geotermia frente a otras fuentes de energía</i>	75
<i>Panorama a nivel nacional de la geotermia</i>	77
<i>Historia de la geotermia en España</i>	77
<i>Potencial de la geotermia en España</i>	78

<i>No desarrollo de la geotermia en España</i>	83
<i>Primeras centrales geotérmicas españolas</i>	85
5. <i>MODELIZACIÓN DE CENTRAL GEOTÉRMICA Y ESTUDIO DE DIFERENTES TECNOLOGÍAS</i>	87
<i>Planteamiento</i>	87
<i>Central tipo flash y doble flash</i>	88
<i>Central de ciclo binario</i>	90
<i>Ecuaciones utilizadas en la obtención de resultados</i>	95
<i>Hipótesis y consideraciones para los cálculos</i>	107
<i>Hipótesis asumidas</i>	107
<i>Selección del fluido de trabajo</i>	108
<i>Central para un yacimiento en Granada</i>	109
<i>Central flash</i>	109
<i>Central Doble Flash</i>	112
<i>Central ciclo binario básico</i>	116
<i>Central de ciclo binario con regeneración y purga</i>	120
<i>Ciclo binario de regeneración con bombeo</i>	125
<i>Ciclo binario de regeneración con intercambiador abierto</i>	129
<i>Central de ciclo binario con recalentamiento</i>	132
<i>Central geotérmica en función del yacimiento</i>	138
<i>Conclusiones</i>	140
<i>Yacimiento geotérmico en Granada</i>	140
<i>Central geotérmica en función del yacimiento</i>	141
6. <i>CONCLUSIONES FINALES</i>	143
7. <i>BIBLIOGRAFÍA</i>	146
8. <i>ANEXOS</i>	149
<i>Anexo 1</i>	149
<i>Anexo 2</i>	158

Índice de ilustraciones

<i>Ilustración 1. Esquema de la Máquina de Vapor diseñada por James Watt.</i>	18
<i>Ilustración 2. Movimiento del pistón de la Máquina de Vapor.</i>	19
<i>Ilustración 3. Producción eléctrica mundial en 2004 y 2010.</i>	20
<i>Ilustración 4. Distribución de reactores nucleares en 2011.</i>	22
<i>Ilustración 5. Producción eléctrica española en 2009.</i>	23
<i>Ilustración 6. Distribución de centrales nucleares en España.</i>	24
<i>Ilustración 7. Distribución mundial de potencia geotérmica instalada en 2007.</i>	25
<i>Ilustración 8. Capacidad mundial prevista para 2015.</i>	26
<i>Ilustración 9. Evolución de capacidad instalada y producción eléctrica prevista de origen geotérmico a nivel mundial.</i>	27
<i>Ilustración 10. Temperatura del subsuelo en Europa.</i>	28
<i>Ilustración 11. Proyección de Hubert en 1971 de la producción de petróleo a nivel mundial. Publicada en Scientific American. En la curva naranja puede apreciarse que, aunque las reservas de petróleo fueran el doble que las reales, el 80% de ellas tardaría en consumirse sólo seis años más que las reservas actuales.</i>	31
<i>Ilustración 12. Representación de petróleo disponible y emisiones de CO₂ en el s. XX.</i>	32
<i>Ilustración 13. Capas de la Tierra, junto a profundidades y temperaturas.</i>	37
<i>Ilustración 14. Estructura interna de la Tierra y repartición de flujos caloríficos según la estabilidad geológica de la zona.</i>	38
<i>Ilustración 15. Temperatura en función de la profundidad y gradiente geotérmico normal y anómalo.</i>	38
<i>Ilustración 16. Litosfera.</i>	39
<i>Ilustración 17. Convergencia entre corteza continental y oceánica.</i>	39
<i>Ilustración 18. Grandes placas de la Tierra, zonas con mayor actividad sísmica y principales volcanes.</i>	40
<i>Ilustración 19. Aguas termales en Costa Rica.</i>	41
<i>Ilustración 20. Géiser en el Parque Nacional de Yellowstone.</i>	42
<i>Ilustración 21. Teide, volcán actualmente inactivo en Tenerife, Canarias.</i>	42
<i>Ilustración 22. Fumarola en Furnas, en las Azores.</i>	43
<i>Ilustración 23. Volcán de fango en Azerbaiyán.</i>	43
<i>Ilustración 24. Esquema de un yacimiento geotérmico.</i>	44
<i>Ilustración 25. Ejemplo de modelo de reservorio creado en el Proyecto Geretsried, a partir de la interpretación de pruebas geofísicas y geológicas.</i>	49
<i>Ilustración 26. Funcionamiento de perforación por percusión y detalle de trépanos.</i>	50
<i>Ilustración 27. Detalle de trépano cruciforme o de estrella. Muy común en sondeos.</i>	51
<i>Ilustración 28. Esquema del funcionamiento de sondeo a rotación por circulación directa.</i>	51
<i>Ilustración 29. Esquema del funcionamiento de perforación por rotación inversa.</i>	52
<i>Ilustración 30. Funcionamiento y componentes de sondeo por roto-percusión directa con cabeza en fondo.</i>	53
<i>Ilustración 31. Funcionamiento de sondeo por roto-percusión inversa con cabeza en fondo.</i>	54
<i>Ilustración 32. Ejemplo de estudio de implantación en Burgos.</i>	55
<i>Ilustración 33. Ejemplo de separación entre pozos de explotación y reinyección para evitar el enfriamiento del agua extraída.</i>	56
<i>Ilustración 34. Porcentajes de consumo de energía geotérmica en el mundo para usos directos.</i>	58
<i>Ilustración 35. Ciclo básico de central flash.</i>	60
<i>Ilustración 36. Ciclo básico de central tipo doble flash.</i>	61

<i>Ilustración 37. Ciclo directo sin condensación de una central de vapor seco.</i>	62
<i>Ilustración 38. Ciclo directo con condensación de una central de vapor seco.</i>	63
<i>Ilustración 39. Ciclo binario básico.</i>	64
<i>Ilustración 40. Esquema de funcionamiento de un ciclo orgánico de Rankine.</i>	65
<i>Ilustración 41. Evolución de la potencia instalada en centrales geotérmicas a lo largo de la historia.</i>	67
<i>Ilustración 42. Distribución de tipos de centrales geotérmicas en el mundo.</i>	67
<i>Ilustración 43. Esquema del circuito en cascada de la instalación geotérmica en Klamath Falls, en Oregon.</i>	69
<i>Ilustración 44. Ciclo básico de utilización de energía geotérmica de baja/muy baja entalpía.</i>	70
<i>Ilustración 45. Cantidades de CO₂ emitidas al año en la climatización de una vivienda-tipo de 150 m².</i>	71
<i>Ilustración 46. Evolución de la temperatura media del subsuelo español en diferentes momentos del día y estaciones.</i>	79
<i>Ilustración 47. Recursos de baja temperatura y posibles aprovechamientos en España.</i>	81
<i>Ilustración 48. Recursos de media y alta temperatura y posibles aprovechamientos en España.</i>	83
<i>Ilustración 49. Esquema de central flash simple.</i>	88
<i>Ilustración 50. Esquema de una central doble flash simple.</i>	89
<i>Ilustración 51. Esquema de central de ciclo binario simple.</i>	90
<i>Ilustración 52. Esquema de central de ciclo binario con regeneración y purga.</i>	91
<i>Ilustración 53. Esquema de central de ciclo binario con regeneración y bombeo.</i>	92
<i>Ilustración 54. Esquema de central de ciclo binario de regeneración con intercambiador abierto.</i>	93
<i>Ilustración 55. Esquema de central de ciclo binario con recalentamiento.</i>	94
<i>Ilustración 56. Criterio de signos adoptado.</i>	95
<i>Ilustración 57. Representación simplificada de una turbina.</i>	96
<i>Ilustración 58. Representación simplificada de un condensador.</i>	98
<i>Ilustración 59. Representación simplificada de una válvula de expansión.</i>	100
<i>Ilustración 60. Representación simplificada de un separador de humedad.</i>	101
<i>Ilustración 61. Representación simplificada de una bomba.</i>	102
<i>Ilustración 62. Representación simplificada de un intercambiador de calor abierto.</i>	103
<i>Ilustración 63. Representación simplificada de un intercambiador de calor cerrado.</i>	105
<i>Ilustración 64. Esquema ciclo central flash.</i>	109
<i>Ilustración 65. Diagrama T-s ciclo central flash.</i>	110
<i>Ilustración 66. Esquema ciclo central doble flash.</i>	113
<i>Ilustración 67. Diagrama T-s ciclo central doble flash.</i>	113
<i>Ilustración 68. Esquema ciclo binario básico.</i>	117
<i>Ilustración 69. Diagrama T-s ciclo binario básico para el fluido geotérmico.</i>	117
<i>Ilustración 70. Diagrama T-s ciclo binario básico para isopentano.</i>	118
<i>Ilustración 71. Esquema ciclo binario de regeneración con purga.</i>	120
<i>Ilustración 72. Diagrama T-s ciclo de regeneración con purga para isopentano.</i>	121
<i>Ilustración 73. Esquema ciclo binario de regeneración con bombeo.</i>	125
<i>Ilustración 74. Diagrama T-s ciclo de regeneración con bombeo para isopentano.</i>	126
<i>Ilustración 75. Esquema ciclo binario de regeneración con intercambiador abierto.</i>	129
<i>Ilustración 76. Diagrama T-s ciclo de regeneración con intercambiador abierto para isopentano.</i>	130
<i>Ilustración 77. Esquema ciclo binario con recalentamiento.</i>	133
<i>Ilustración 78. Diagrama T-s ciclo binario con recalentamiento para el fluido geotérmico.</i>	133
<i>Ilustración 79. Diagrama T-s ciclo de recalentamiento para isopentano.</i>	134

Índice de tablas

Tabla 1. Potencia generada por en centrales térmicas por comunidad autónoma.....	23
Tabla 2. Localización, potencia, tipo, propietario y año de construcción de las centrales nucleares españolas.....	24
Tabla 3. Producción eléctrica mundial a partir de geotermia en distintos países.....	25
Tabla 4. Producción eléctrica a partir de geotermia en distintos países europeos.....	29
Tabla 5. MWt obtenidos a partir de geotermia en distintos países europeos.....	29
Tabla 6. Emisiones en g/kWh emitidas en distintas centrales de producción eléctrica.....	72
Tabla 7. Coste de una central geotérmica comparada con otro tipo de centrales.....	73
Tabla 8. Comparación de número de trabajos por MW producido en centrales geotérmicas y de gas natural.....	74
Tabla 9. Características termodinámicas del isopentano y R-12.....	108
Tabla 10. Características de seguridad y medioambientales del isopentano y R-12.....	108
Tabla 11. Parámetros para cada punto de la central tipo flash.....	112
Tabla 12. Características de la central tipo flash.....	112
Tabla 13. Parámetros para cada punto de la central tipo doble flash.....	116
Tabla 14. Características de la central tipo doble flash.....	116
Tabla 15. Parámetros para cada punto de la central de ciclo binario básico.....	119
Tabla 16. Características de la central de ciclo binario básico.....	119
Tabla 17. Parámetros para cada punto de la central de regeneración con purga.....	124
Tabla 18. Características de la central de regeneración con purga.....	124
Tabla 19. Parámetros para cada punto de la central de regeneración con bombeo.....	128
Tabla 20. Características de la central de regeneración con bombeo.....	128
Tabla 21. Parámetros para cada punto de la central de regeneración con intercambiador abierto.....	132
Tabla 22. Características de la central de regeneración con intercambiador abierto para isopentano...	132
Tabla 23. Parámetros para cada punto de la central de ciclo binario con recalentamiento.....	136
Tabla 24. Características de la central de ciclo binario con recalentamiento para isopentano.....	137
Tabla 25. Resumen prestaciones ofrecidas por cada central para una extracción de 220° C y líquido saturado.....	137
Tabla 26. Características de los dos tipos de centrales para las tres temperaturas estudiadas y fluido geotérmico en estado saturado en la extracción.....	138
Tabla 27. Características de los dos tipos de centrales para las tres temperaturas estudiadas y fluido geotérmico con $x=0.6$ en la extracción.....	139
Tabla 28. Resultados obtenidos para la central flash a partir de un yacimiento a 220°C y estado de líquido saturado.....	149
Tabla 29. Resultados obtenidos para la central flash a partir de un yacimiento a 100°C y estado de líquido saturado.....	149
Tabla 30. Resultados obtenidos para la central flash a partir de un yacimiento a 330°C y estado de líquido saturado.....	150
Tabla 31. Resultados obtenidos para la central flash a partir de un yacimiento a 220°C y $x=0.6$	150
Tabla 32. Resultados obtenidos para la central flash a partir de un yacimiento a 100°C y $x=0.6$	150
Tabla 33. Resultados obtenidos para la central flash a partir de un yacimiento a 330°C y $x=0.6$	151
Tabla 34. Resultados obtenidos para la central doble flash a partir de un yacimiento a 220°C y líquido saturado.....	151

<i>Tabla 35. Resultados obtenidos para la central de ciclo binario básico a partir de un yacimiento a 220°C y líquido saturado.....</i>	<i>152</i>
<i>Tabla 36. Resultados obtenidos para la central de ciclo binario básico a partir de un yacimiento a 100°C y líquido saturado.....</i>	<i>152</i>
<i>Tabla 37. Resultados obtenidos para la central de ciclo binario básico a partir de un yacimiento a 330°C y líquido saturado.....</i>	<i>153</i>
<i>Tabla 38. Resultados obtenidos para la central de ciclo binario básico a partir de un yacimiento a 100°C y x=0.6.....</i>	<i>153</i>
<i>Tabla 39. Resultados obtenidos para la central de ciclo binario básico a partir de un yacimiento a 220°C y x=0.6.....</i>	<i>153</i>
<i>Tabla 40. Resultados obtenidos para la central de ciclo binario con regeneración y purga a partir de un yacimiento a 220°C y líquido saturado.....</i>	<i>154</i>
<i>Tabla 41. Resultados obtenidos para la central de ciclo binario con regeneración y bombeo a partir de un yacimiento a 220°C y líquido saturado.....</i>	<i>155</i>
<i>Tabla 42. Resultados obtenidos para la central de ciclo binario con regeneración de intercambiador abierto a partir de un yacimiento a 220°C y líquido saturado.....</i>	<i>156</i>
<i>Tabla 43. Resultados obtenidos para la central de ciclo binario con recalentamiento a partir de un yacimiento a 220°C y líquido saturado.....</i>	<i>157</i>
<i>Tabla 44. Parámetros para cada punto de la central flash para 100°C y líquido saturado.....</i>	<i>158</i>
<i>Tabla 45. Parámetros para cada punto de la central flash para 100°C y x=0.6.....</i>	<i>158</i>
<i>Tabla 46. Parámetros para cada punto de la central de ciclo binario básico para 100°C y líquido saturado.....</i>	<i>158</i>
<i>Tabla 47. Parámetros para cada punto de la central de ciclo binario básico para 100°C y x=0.6.....</i>	<i>159</i>
<i>Tabla 48. Parámetros para cada punto de la central flash para 220° C y líquido saturado.....</i>	<i>159</i>
<i>Tabla 49. Parámetros para cada punto de la central flash para 220° C y x=0.6.....</i>	<i>159</i>
<i>Tabla 50. Parámetros para cada punto de la central ciclo binario básico para 220° C y líquido saturado.....</i>	<i>160</i>
<i>Tabla 51. Parámetros para cada punto de la central ciclo binario básico para 220° C y x=0.6.....</i>	<i>160</i>
<i>Tabla 52. Parámetros para cada punto de la central flash para 330° C y líquido saturado.....</i>	<i>160</i>
<i>Tabla 53. Parámetros para cada punto de la central flash para 330° C y x=0.6.....</i>	<i>161</i>

INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN

La energía como pieza fundamental en el desarrollo humano

La energía es un término empleado para designar la propiedad gracias a la cual un cuerpo realiza un trabajo. Todo cambio producido en nuestro entorno es realizado gracias a una transformación o transmisión de energía.

Por lo tanto, puede decirse que todo objeto o recurso físico posee cierta cantidad de energía, según ciertas características que posea, como su posición, movimiento, nivel de deformación, masa, temperatura, composición química... entre otras. Según el campo en el que nos encontremos emplearemos distintos conceptos de energía, en el de la termodinámica se encuentra la energía interna, energía mecánica de las partículas que forman el material, energía térmica, cantidad de calor que desprende el objeto, y potencial termodinámico, energía asociada a variables de estado.

La energía es utilizada como un recurso intermedio para obtener un bien o servicio. En el caso de las centrales para producción eléctrica, se utiliza la energía cinética de un fluido para mover una turbina, y así obtener una diferencia de potencial en el generador que produzca electricidad. El caso más sencillo es la obtención de este recurso directamente de la naturaleza, como en las fuentes de energía eólica, geotérmica (pocas veces) e hidráulica. Si no se puede extraer la energía cinética directamente de la naturaleza, puede conseguirse mediante la transmisión de energía térmica a partir de otro recurso, que en contacto con el fluido que pasa por la turbina, utiliza esta energía para cambiar de fase y así poder introducirse en la turbina. Algunos ejemplos son las fuentes de energía geotérmica, mareomotriz, solar, biomasa, nuclear, carbón, gas natural y petróleo.

Hace aproximadamente un millón de años, en la prehistoria, se produjo un suceso que marcaría el desarrollo del ser humano, el descubrimiento del fuego, lo que supuso el descubrimiento de los recursos energéticos.

Posterior al fuego, en el neolítico, se empezó a utilizar a los animales para la labranza y el transporte, utilizándolos como fuente de energía mecánica. También emplearon la energía cinética de la corriente de ríos y mares para desplazar barcos, y así fomentar el comercio y facilitar el transporte. La invención de la vela posibilitó el movimiento más rápido de estas embarcaciones, al aprovechar la energía cinética del viento.

En la Edad Media se amplió el uso de la energía cinética del agua y aire, gracias a los molinos, utilizados sobre todo para la alimentación. Además, en sustitución de la madera, comenzó la explotación del carbón como recurso natural fósil, recurso energético que hoy en día continúa explotándose. En China destaca el uso de la energía química con la invención de la pólvora, lo que desarrolló el sector militar.

Entre 1769 y 1782, James Watt desarrolló la máquina de vapor, invención que culminaba varios intentos de físicos anteriores. Esta máquina que transforma la energía térmica de un fluido, agua calentada mediante la combustión de carbón o madera en una caldera, en energía mecánica. Este invento trajo consigo la Revolución Industrial. Desarrolló el transporte marítimo, ya que se cambió la vela por la máquina de vapor, que al incorporar a una hélice, el barco genera su propia energía cinética de rotación, que hace que se mueva. Paralelo al barco de vapor, se inventó el ferrocarril, transporte terrestre que aprovecha la energía cinética de rotación, generada por una máquina de vapor, para desplazarse por unas vías colocadas en el terreno.

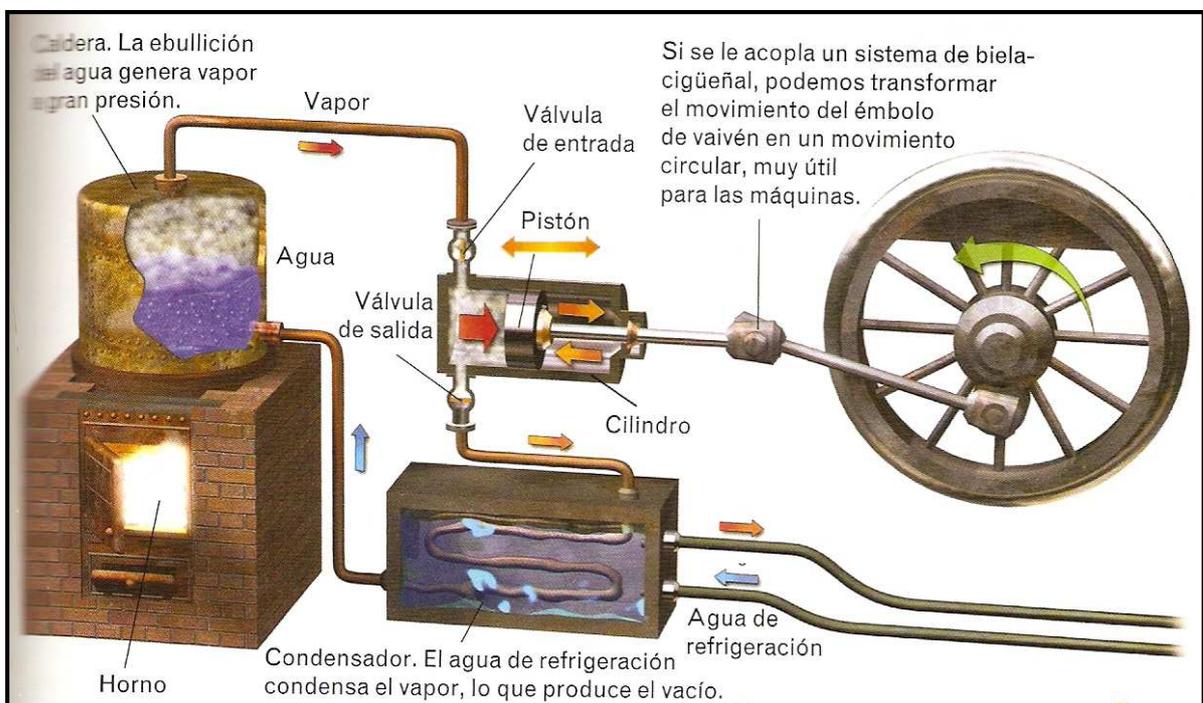


Ilustración 1. Esquema de la Máquina de Vapor diseñada por James Watt.

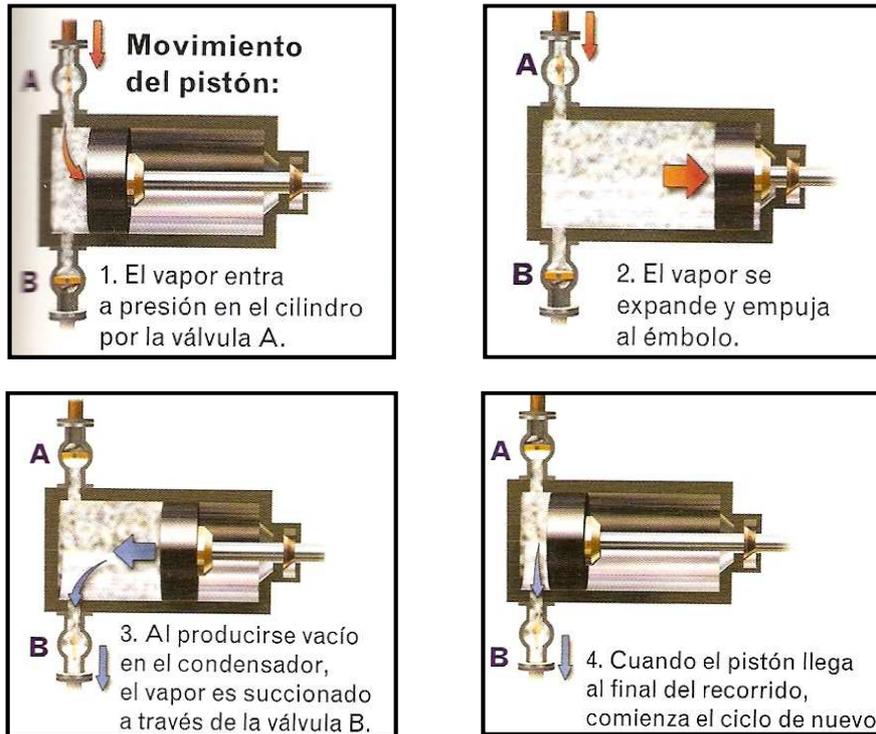


Ilustración 2. Movimiento del pistón de la Máquina de Vapor.

Con el paso de los años, se cambió la madera por carbón, y después por petróleo. En base a la máquina de vapor, en 1876, Otto desarrolló el primer motor de combustión interna, fundamental en la sociedad actual. Gracias a los estudios realizados de electricidad y electromagnetismo, se inventó la bombilla y se pudo obtener energía mecánica a partir de eléctrica, con lo que empezaron a crearse máquinas dependientes de electricidad y las ciudades empezaron a crecer de forma vertiginosa.

Para alimentar de electricidad a las ciudades se crearon las centrales térmicas e hidroeléctricas, donde se produce este recurso a partir de energía térmica, tras la combustión de carbón y petróleo, y cinética del agua. Posteriormente también se comenzó a utilizar los recursos nucleares y el gas natural.

Sin embargo, existe una relación entre los niveles de contaminación y el uso masivo de recursos fósiles para producción eléctrica y trabajo mecánico, por lo que desde hace años se intenta sustituir la energía calorífica extraída de estos combustibles, por energía extraída de fuentes denominadas “renovables”, muchísimo menos dañinas para el medio ambiente, y prácticamente inagotables.

Actualmente la electricidad es uno de los bienes más demandados en todo el mundo, por ello es de gran importancia poder producirla en centrales a partir de fuentes renovables, como las fuentes de energía hidráulica, eólica, solar y geotérmica.

Como se ha visto a lo largo de la historia, el desarrollo del ser humano crece en paralelo con el consumo de la energía de nuestro entorno, por lo que a día de hoy, para seguir

desarrollándonos, es necesario satisfacer nuestras necesidades energéticas, aunque siempre con un consumo responsable.

Centrales nucleares y de combustibles fósiles

Actualmente, la mayor parte de producción eléctrica a nivel mundial se genera en a partir de carbón, petróleo, gas natural, energía hidráulica y reacciones nucleares.

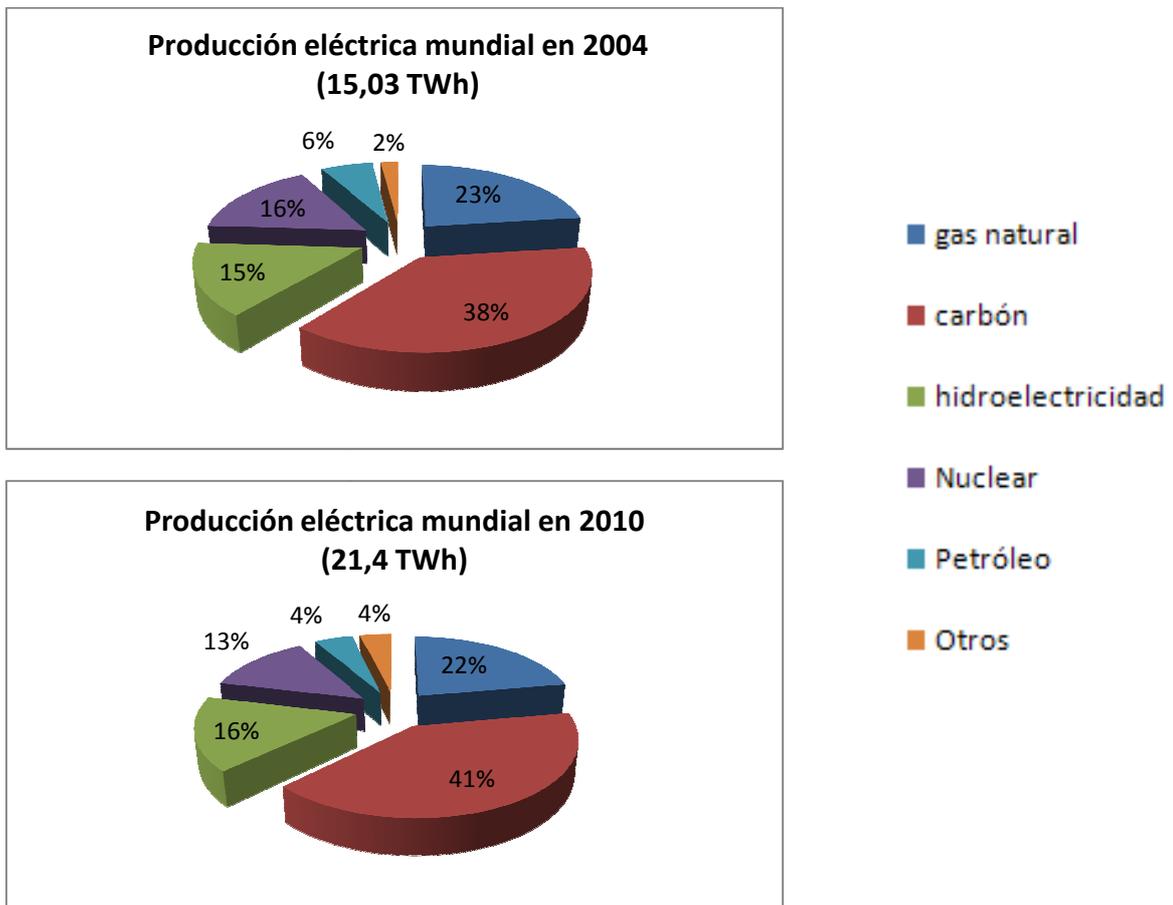


Ilustración 3. Producción eléctrica mundial en 2004 y 2010.

Como puede verse en la ilustración anterior, se ha producido un crecimiento en la producción eléctrica a partir de energías renovables, ya que se trata del futuro de la producción de energía, incentivado por el agotamiento de los combustibles fósiles, sobre todo del petróleo (relación reservas/consumo de 40 años) y del uso de la energía nuclear (muy peligrosa en caso de fugas), lo que ha provocado un aumento del uso del carbón, recurso más abundante (133 años). En cambio el gas natural se ha mantenido en su línea (60 años).

Algunos de los problemas que plantean las centrales de combustión de recursos fósiles son:

- Aumento de la contaminación del aire, suelo y agua, debido a los óxidos de nitrógeno y dióxidos de azufre desprendidos en la combustión, entre otras partículas. Es posible reducir su emisión, sin embargo, son tecnologías muy caras.
- Coste por KWh producido en estas centrales depende del coste de los combustibles fósiles, por lo que varía continuamente.
- La mayoría de los combustibles utilizados en este tipo de centrales se encuentran en países inestables políticamente, lo que dificulta las relaciones comerciales.
- La cantidad de combustibles fósiles que queda en el planeta es limitada, lo que significa que llegará un día en el que se agoten, conforme nos acercamos a ese día, el precio irá aumentando.
- Estas centrales desprenden gran cantidad de CO₂, lo que favorece el efecto invernadero y afecta al calentamiento global, además también favorecen la lluvia ácida.
- El arranque en la producción es lento.
- Bajo rendimiento.
- En el caso de centrales que usan carbón no pulverizado, la combustión es difícil de controlar.
- Alto costo de inversión.
- Generan gran cantidad de calor, ruido y vibraciones.
- Ocupan una gran cantidad de terreno, en el caso del carbón y petróleo es necesaria la construcción de carreteras de acceso a la planta, para poder transportarlo, en el caso del gas natural, oleoductos.
- Un accidente durante el transporte de petróleo por mar puede ocasionar mareas negras, provocando un desastre medioambiental.

De igual forma, las plantas nucleares también tienen grandes inconvenientes:

- Tiempo de construcción elevado, de 5 a 10 años.
- En el caso de fuga, los desastres humanos, materiales y medioambientales son incalculables. Además la gente no puede volver a vivir en ese lugar tras pasadas décadas. Algunos de los desastres más conocidos son el de Chernobyl en 1986 y el de Fukushima en 2011.
- Los residuos que generan este tipo de centrales son muy contaminantes, por lo que resulta muy difícil y costoso su almacenamiento.
- Este tipo de instalaciones requieren un costoso y continuo mantenimiento.
- Gran oposición por la mayoría de la sociedad hacia las centrales nucleares, provocado por los graves incidentes que han ocurrido a lo largo de la historia.
- Elevado coste de construcción.
- Poca flexibilidad. Los picos de demanda energética de los países obligan a las centrales a producir más en ocasiones puntuales, sin embargo, estas centrales

tardan unas horas desde que se da la orden hasta que baja/ aumenta su producción.

- Son plantas de gran tamaño, ya que no resulta viable construir una central nuclear para una pequeña población.

A pesar de las desventajas que tienen este tipo de centrales, en el mundo hay más de 400 reactores nucleares en funcionamiento, distribuidos según se ven en la ilustración siguiente.

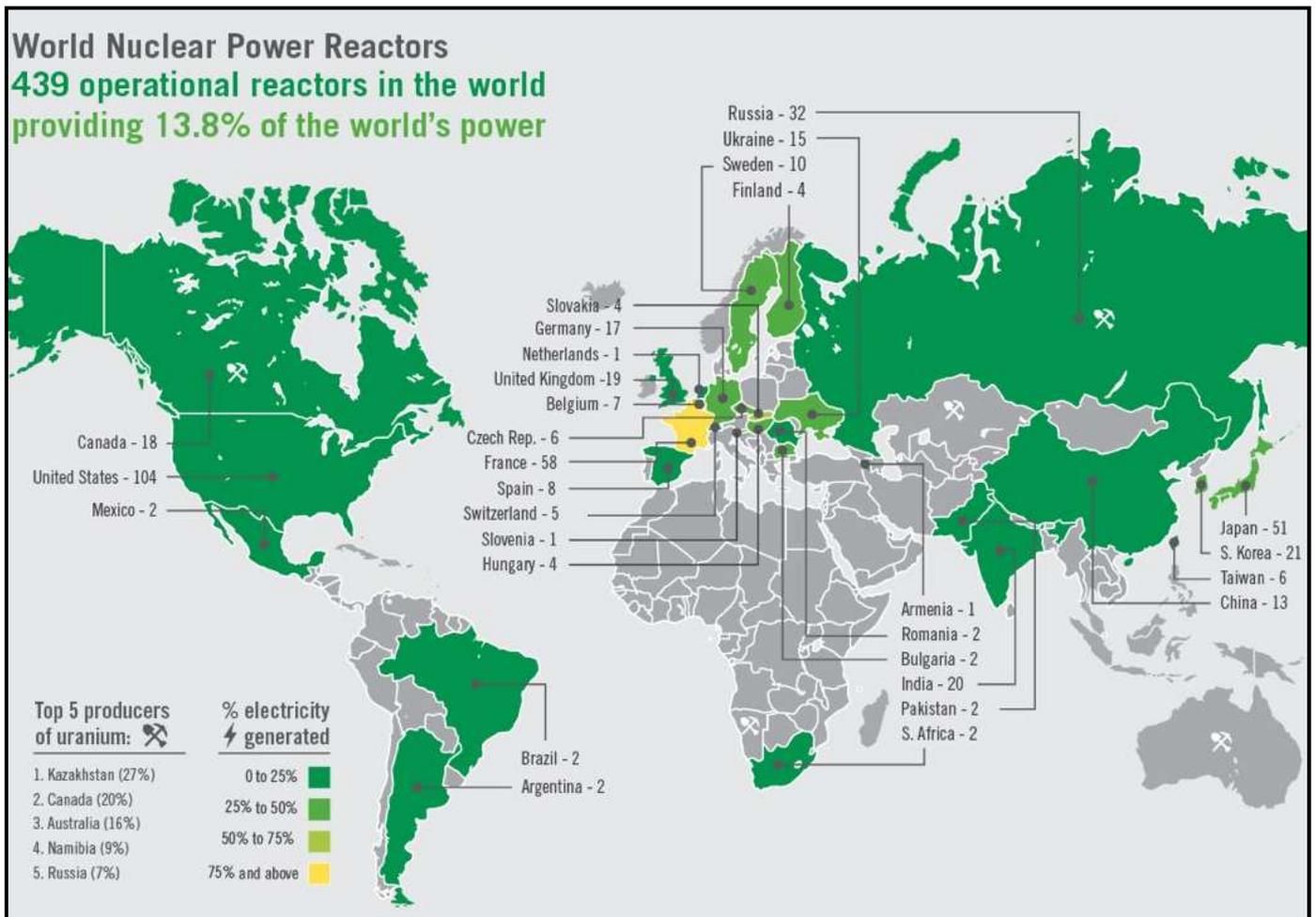


Ilustración 4. Distribución de reactores nucleares en 2011.

A nivel nacional, la producción eléctrica en 2013 queda representada en la siguiente ilustración.

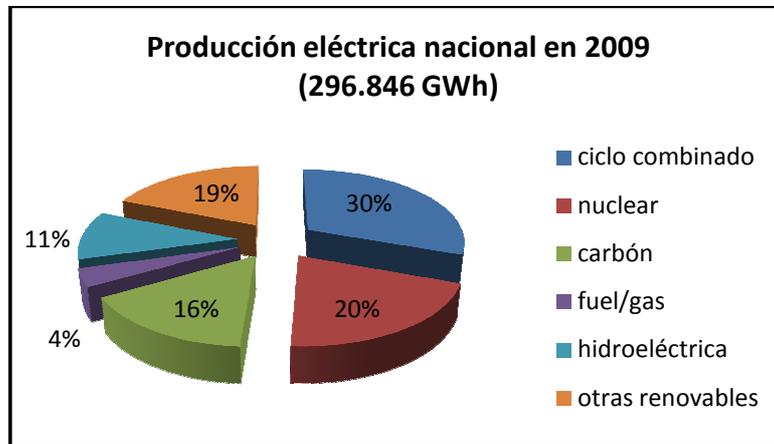


Ilustración 5. Producción eléctrica española en 2009.

La mayoría de la electricidad generada en España se produce en centrales de ciclos combinados, seguida de energía nuclear, carbón y energías renovables (destaca la eólica, con un 16%). El porcentaje representado por la hidroelectricidad es menor que en el resto del mundo, al igual que la electricidad obtenida a partir de gas natural y fuel.

En la siguiente tabla se muestra la potencia instalada en las centrales térmicas españolas, por comunidad autónoma.

Comunidad autónoma	Potencia instalada (MW)	Comunidad autónoma	Potencia instalada (MW)
Andalucía	8052	Ceuta	100
Aragón	2980	Galicia	3281
Asturias	3553	Melilla	84
Baleares	2160	Murcia	3231
Canarias	2700.6	Navarra	1228
Castilla y León	2734	País Vasco	1952
Castilla La Mancha	1986	La Rioja	800
Cataluña	4837	Valencia	2850

Tabla 1. Potencia generada por en centrales térmicas por comunidad autónoma.

La distribución de centrales nucleares y potencia nuclear es la siguiente:



Ilustración 6. Distribución de centrales nucleares en España.

Central	Localidad	Potencia (MW)	Tipo	Propietario	Año
Santa María de Garoña	Burgos	466	B.W.R.	Iberdrola y Endesa	1971
Almaraz I	Cáceres	977	P.W.R.	Iberdrola, Endesa y Gas Natural	1981
Ascó I	Tarragona	1032.5	P.W.R.	Endesa	1983
Almaraz II	Cáceres	980	P.W.R.	Iberdrola, Endesa y Gas Natural	1983
Cofrentes	Valencia	1092.02	B.W.R.	Iberdrola	1984
Ascó II	Tarragona	1027.21	P.W.R.	Endesa e Iberdrola	1985
Vandellós II	Tarragona	1087.14	P.W.R.	Endesa e Iberdrola	1987
Trillo	Guadalajara	1066	P.W.R.	Iberdrola, Gas Natural, HC y Nuclear	1988

P.W.R.: Reactor de agua a presión
B.W.R.: Reactor de agua en ebullición

Tabla 2. Localización, potencia, tipo, propietario y año de construcción de las centrales nucleares españolas.

Panorama de la alta geotermia a nivel mundial y europeo

El uso de la energía geotérmica para la producción de electricidad ha crecido a lo largo de los años, desde que en el Valle del Diablo en 1911, se construyera la primera planta de producción eléctrica basada en la geotermia. Hoy en día es raro el país que no hace uso de este tipo de energía, ya sea para uso en viviendas o a mayor escala.

En la siguiente tabla se pueden ver los principales países productores de electricidad a partir de la geotermia:

País	Año 2005		Año 2010		Capacidad prevista 2015 (MWe)
	Capacidad instalada (MWe)	Producción eléctrica (GWh)	Capacidad instalada (MWe)	Producción eléctrica (GWh)	
EEUU	2.564	16.840	3.060	14.533	5400
Filipinas	1930	9253	1904	10311	2500
Indonesia	797	6085	1197	9600	3500
México	953	6282	958	7047	1140
Italia	791	5340	843	5520	920
Japón	535	3467	536	3064	535
Nueva Zelanda	435	2774	628	4055	1240
Islandia	202	1	575	4597	535
Total mundial	8933	55709	10715	67246	18500

Tabla 3. Producción eléctrica mundial a partir de geotermia en distintos países.

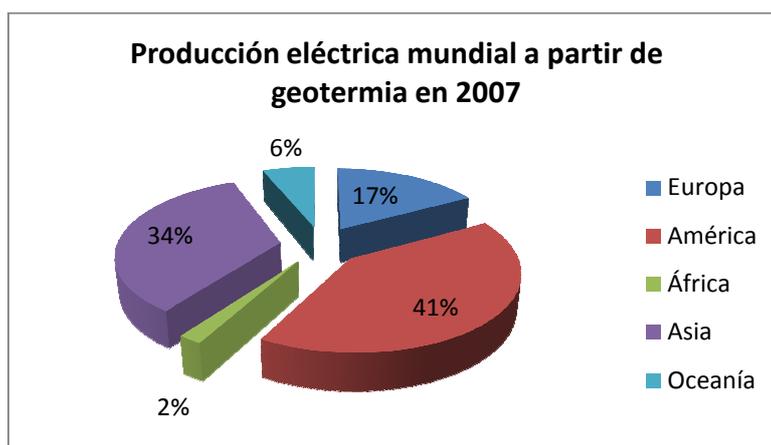


Ilustración 7. Distribución mundial de potencia geotérmica instalada en 2007.

En la siguiente figura puede verse la capacidad prevista que se instale para el 2015.

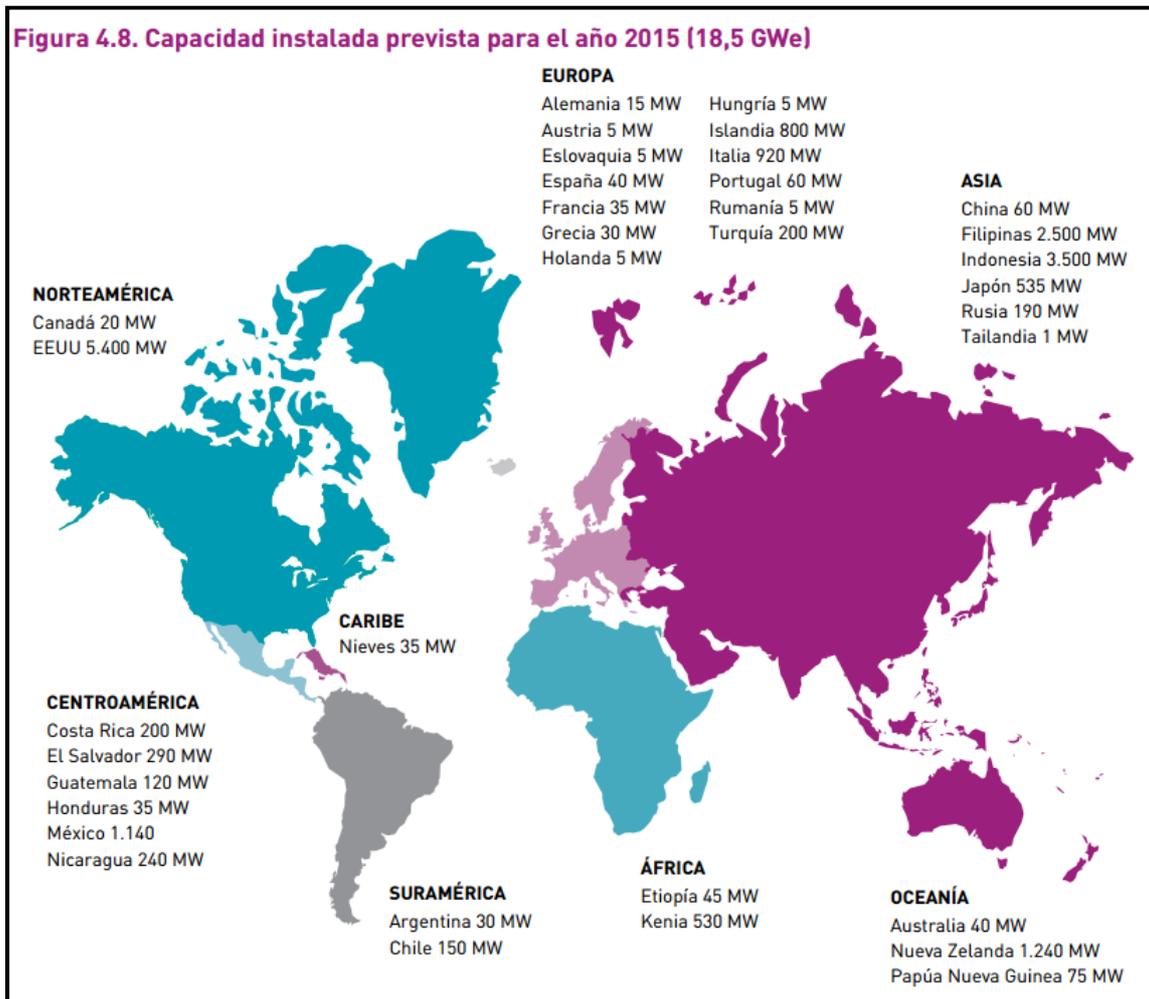


Ilustración 8. Capacidad mundial prevista para 2015.

En 2010, la potencia geotérmica mundial llegó a 10715 MWe instalados. En el período 2000-2010 Islandia fue el país que más potencia instaló, llegando a doblar su producción, hasta los 575 MW, mientras que Indonesia fue el segundo país, con un aumento del 33%. Según el Germany Trade and Invest, Indonesia tiene como objetivo convertirse en el mayor productor de electricidad del mundo a partir de fuentes geotérmicas, antes del 2025, para ello planea la instalación de una potencia de 9500 MW.

En la ilustración 9 puede verse la evolución de la capacidad instalada para producción eléctrica, y la estimada para 2015.

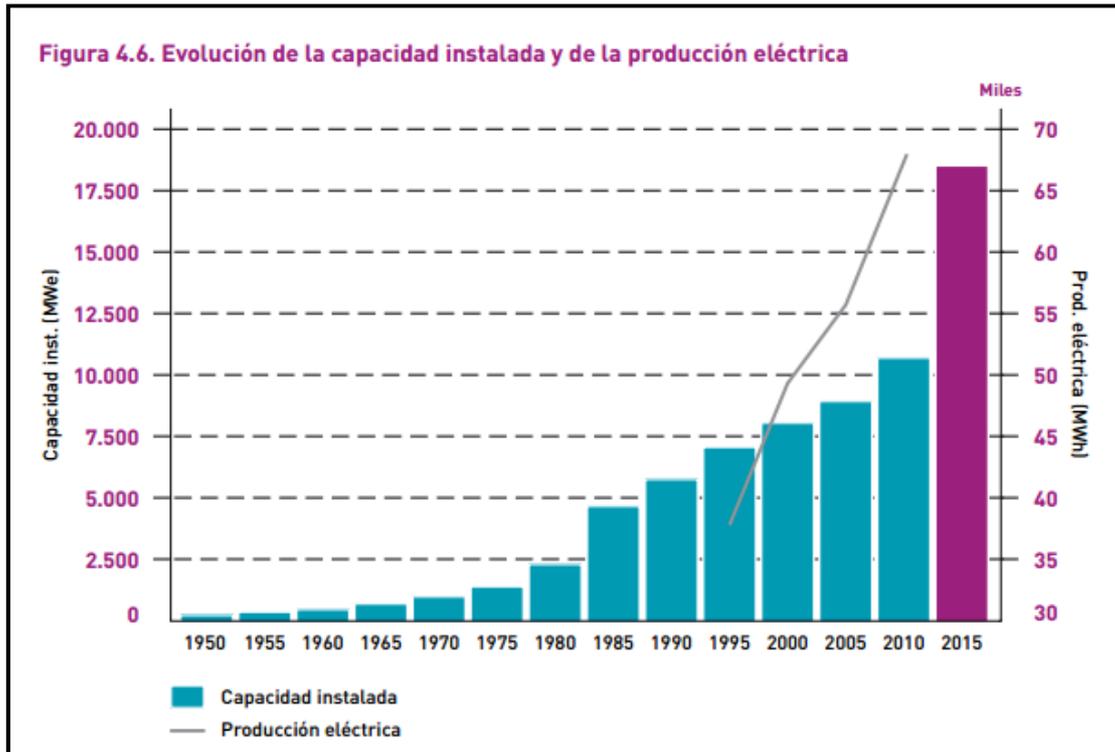


Ilustración 9. Evolución de capacidad instalada y producción eléctrica prevista de origen geotérmico a nivel mundial.

Si hablamos del uso de energías renovables, hay que hacer una mención especial a Islandia, país que obtiene el 99.9 % de su electricidad a partir de este tipo de fuentes.

El uso de energía geotérmica para usos directos también ha experimentado un cambio significativo durante estos últimos años, superior al de producción de electricidad. Durante el período 1995-2000 se produjo un aumento del 75 % en el uso de energía geotérmica de baja y muy baja entalpía, finalizando el año con una potencia instalada de más de 50000 MWt.

EEUU es el país con mayor potencia geotérmica instalada, no sólo a gran escala sino también a pequeña. Esto se debe sobre todo a que EEUU patentó el sistema de bombas de calor geotérmicas, lo que produjo una revolución en el sistema de calefacción de muchos hogares. Esta revolución se trasladó posteriormente a países como Rusia, Japón, China, Rumanía, Suecia y Francia, entre otros. En este aspecto, Islandia sobresale del resto de países, al contar con el sistema de calefacción instalado más grande, en Reikiavik.

A pesar del incremento del uso de la energía geotérmica, todavía queda mucho camino por recorrer en este sector, pues según APPA Geotérmica, con tan sólo “el 1 por ciento de los recursos geotérmicos del planeta sería suficiente para cubrir todas las necesidades de energía durante los próximos 3.500 años”, lo que unido a otras fuentes renovables, acabaría con los problemas energéticos a nivel global.

En el siguiente mapa que muestra la temperatura del subsuelo en Europa, las líneas rojas representan los mercados ya asentados en energía geotérmica (tanto a baja como gran escala), las azules a los países en expansión en los últimos años, y las verdes a los emergentes.

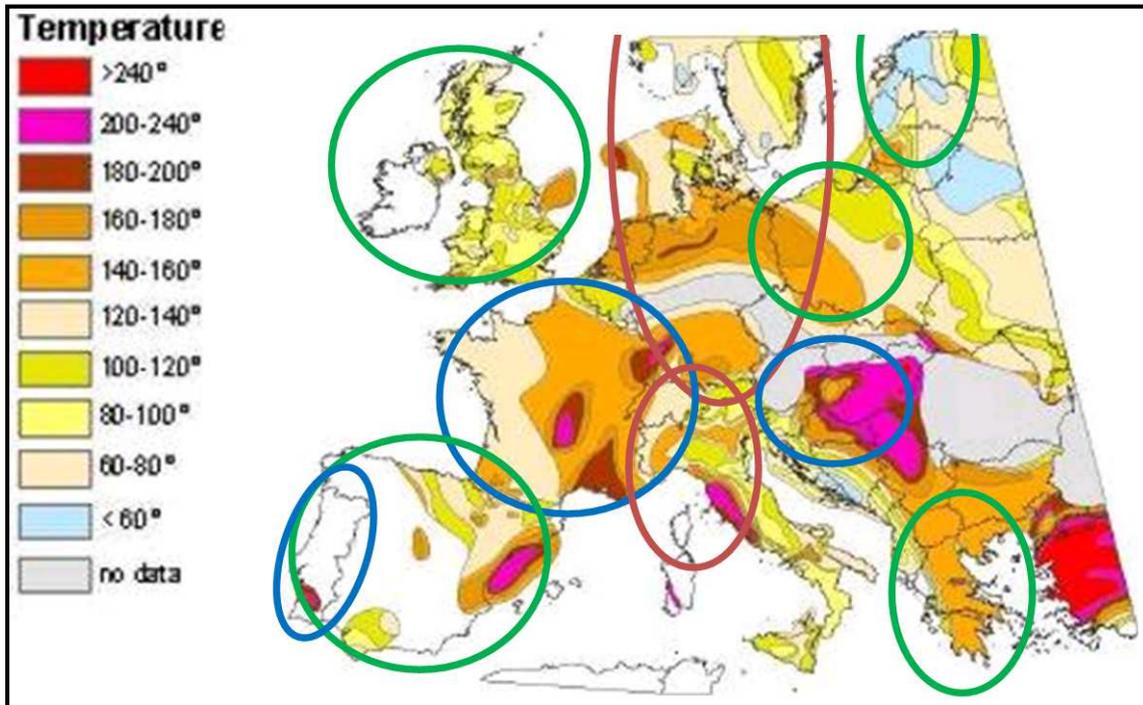


Ilustración 10. Temperatura del subsuelo en Europa.

Como se aprecia en la figura, los mercados ya asentados se corresponden con Noruega, Islandia (no aparece en la figura), Suecia, Dinamarca, Finlandia, Suiza, Austria, Italia y Alemania. Se trata de países con gran experiencia en el sector geotérmico que, aunque no dispongan de muchos recursos de alta entalpía, destacan por el uso de la geotermia a pequeña escala, sobre todo para el uso de la bomba de calor. Austria y Alemania aprovechan el calor destinado a la electricidad también para uso directo, gracias a las centrales híbridas.

Italia es el país con mayor producción eléctrica a partir de recursos geotérmicos de toda Europa y del mundo, actualmente cuenta con más de 900 MWe de potencia instalada. A pesar de no recibir fondos públicos para el desarrollo de la geotermia, sólo el 1%, Italia también es uno de los mayores consumidores de energía geotérmica para uso directo.

Francia se trata de un país en auge durante los últimos años, destaca en la producción eléctrica en la isla de Guadalupe y Soultz-sous-Forets, y en el aprovechamiento de la geotermia para uso directo. Sigue a Portugal en capacidad instalada para producción eléctrica, gracias a la explotación de las Azores, archipiélago con gran entalpía. Holanda es un país en expansión que emplea la geotermia para uso directo del calor

Hungría es el que más rápido ha evolucionado estos últimos años, pasando de casi no disponer de potencia instalada en 2007 a 654 MW en 2010. En cuanto a uso directo destina la mayor parte de esta energía en piscinas y baños termales, seguido de calefacción.

Países como Grecia, España y Polonia están muy poco asentados en el sector geotérmico, aunque se espera un crecimiento en el futuro.

País	Año 2005		Año 2010		Capacidad prevista 2015 (MWe)
	Capacidad instalada (MWe)	Producción eléctrica (GWh)	Capacidad instalada (MWe)	Producción eléctrica (GWh)	
Italia	791	5340	843	5520	920
Islandia	202	1	575	4597	535
Portugal	16	90	29	175	60
Francia	15	102	16	95	35
Alemania	0	2	7	50	15
Austria	1	3	1	4	5

Tabla 4. Producción eléctrica a partir de geotermia en distintos países europeos.

País	Capacidad instalada (MWt)	Utilización anual		Factor de capacidad
		TJ/año	GW/h año	
Suecia	4460	45301	12584.6	0.32
Noruega	3300	25200	700.6	0.24
Islandia	2826	24361	6767.5	0.42
Alemania	2485.4	12764.5	3546	0.16
Holanda	1410.3	10699.4	2972.3	0.24
Francia	1345	12929	3591.7	0.3
Suiza	1060.9	7714.6	2143.1	0.23
Italia	867	9941	2761.6	0.36
Finlandia	857.9	8370	2325.2	0.31
Hungría	654.6	9767	2713.3	0.47
Austria	662.9	3727.7	1035.6	0.2
Polonia	281.1	1501.1	417	0.17
Dinamarca	200	2500	694.5	0.4

Tabla 5. MWt obtenidos a partir de geotermia en distintos países europeos.

MOTIVACIÓN

2. MOTIVACIÓN

Hace ya unos años que los gobiernos de los países en todo el mundo buscan una fuente de energía capaz de reemplazar a los combustibles fósiles. La mayoría de energía producida hasta ahora proviene del carbón, petróleo y gas, se trata de recursos agotables, sucios y muy escasos en ciertas regiones del planeta, por lo que no todas las personas pueden permitirse acceder a la energía que éstos producen. Además, a lo largo de la historia se han desarrollado conflictos por el control de estos recursos energéticos, de los cuales algunos han acabado en guerras.

Hoy en día, el reto se centra en la búsqueda continua de fuentes de energía que permitan obtener la misma producción energética que los combustibles fósiles, pero que además se traten de fuentes inagotables, mínimamente contaminantes y económicamente rentables. No se trata de una necesidad en un futuro próximo por la escasez de estos combustibles, tal como demuestra Hubbert, sino de una necesidad presente, ya que el cambio climático es una realidad, y la inmensa mayoría de científicos que lo estudian establecen una relación entre el aumento de temperatura terrestre y la combustión de estos recursos fósiles.

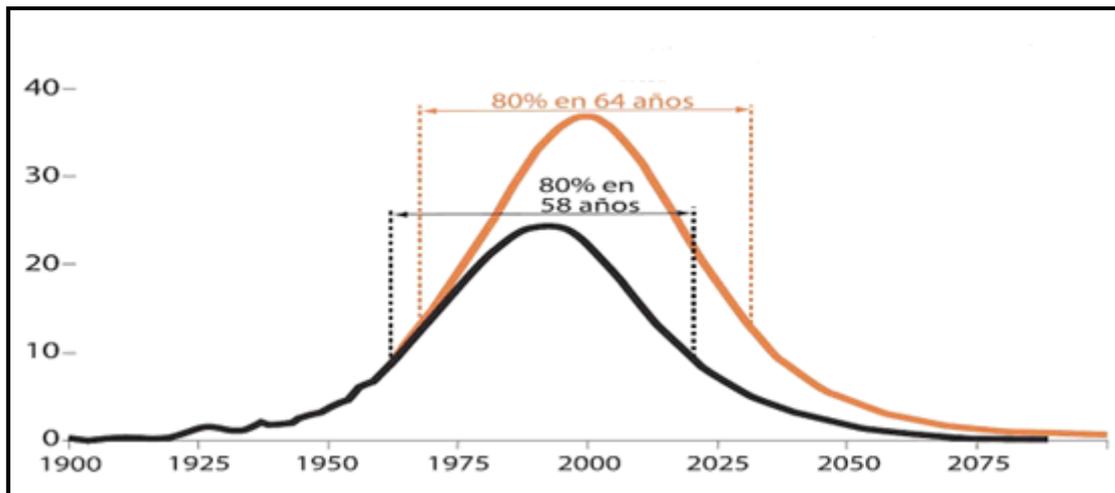


Ilustración 11. Proyección de Hubbert en 1971 de la producción de petróleo a nivel mundial. Publicada en Scientific American. En la curva naranja puede apreciarse que, aunque las reservas de petróleo fueran el doble que las reales, el 80% de ellas tardaría en consumirse sólo seis años más que las reservas actuales.

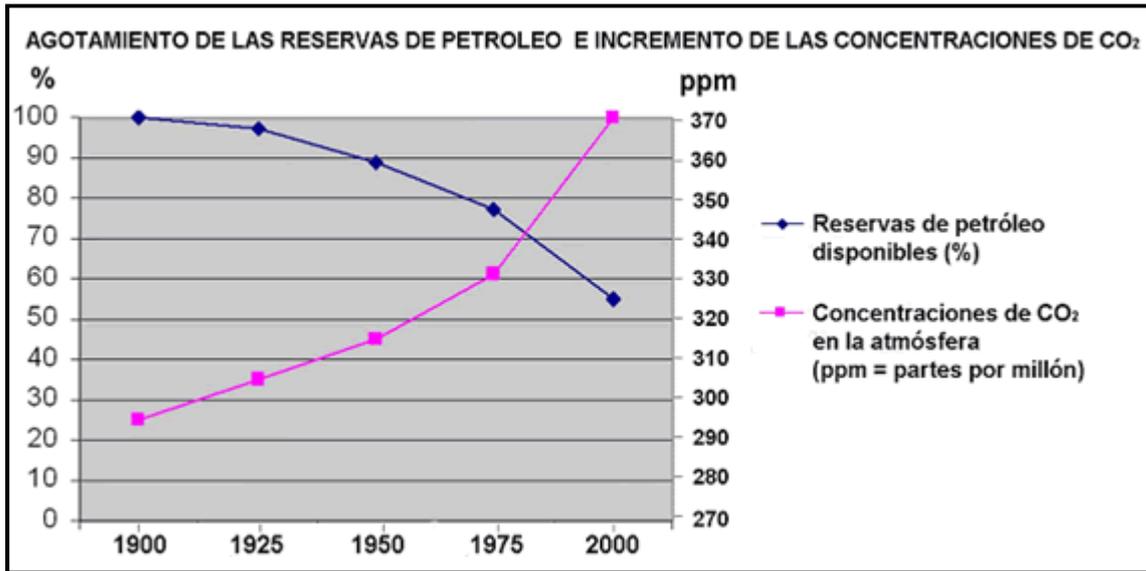


Ilustración 12. Representación de petróleo disponible y emisiones de CO₂ en el s. XX.

El cambio climático no sólo provoca una alteración en la fauna y flora terrestre, llevando a la extinción de muchas especies, sino un aumento de los desastres naturales, como terremotos, huracanes, tsunamis, lluvias y sequías, que arrasan grandes núcleos de población. Por todo ello, países de todos los continentes llevan a cabo reuniones periódicas donde se fijan unos objetivos medioambientales (destaca la Cumbre de las Naciones Unidas, de Río de Janeiro en 1992, de Johannesburgo en 2002 y el Protocolo de Kioto en ese mismo año), los cuales pueden conseguirse mediante un desarrollo en la utilización de fuentes de energía renovables.

El aumento de la población y del nivel de industrialización del planeta ha provocado un aumento en el consumo de energía, obtenida mayoritariamente a partir del petróleo, lo que unido a que se trata de una fuente agotable, ha disparado el precio del barril, con lo que diariamente se producen nuevas disputas entre países compradores y vendedores, que acaban extendiéndose a temas políticos, económicos...

Actualmente, entre esas energías destacan: energía solar, eólica, hidroeléctrica, geotérmica, biomasa y biocombustibles. De entre ellas, la menos conocida hasta la fecha es la geotérmica, la cual tiene un gran potencial para poder satisfacer las necesidades energéticas del mundo, reduciendo y evitando los problemas que plantean las actuales fuentes no renovables y algunas renovables.

El presente proyecto tiene la finalidad de demostrar que la geotermia es un recurso más a tener en cuenta para la producción eléctrica, una alternativa que permite lograr un planeta algo menos contaminado, sin renunciar por ello a las facilidades que da la electricidad. También tiene la finalidad de proporcionar información sobre algunas características de las plantas geotérmicas, y unas nociones básicas sobre geotermia, para que esta fuente energética sea un poco menos desconocida.

OBJETIVOS

3. OBJETIVOS

Los objetivos que se pretenden conseguir son unos conocimientos básicos acerca de:

- La geotermia como fuente de energía.
- Las operaciones necesarias que se realizan sobre el yacimiento geotérmico, previas a la construcción de una planta geotérmica.
- Técnicas de sondeos para construir pozos para las centrales.
- Ciclos ya existentes de generación de potencia en centrales geotérmicas.
- Distintas características que ofrece este tipo de energía.
- Subsuelo español y el no desarrollo de la geotermia nacional a gran escala.
- Proyectos actuales de centrales geotérmicas en España.

Además, se modelizarán varios tipos de centrales geotérmicas en distintos yacimientos geotérmicos, con el objetivo de:

- Escoger la planta que proporciona las mejores prestaciones para un yacimiento real en Granada.
- Observar las características termodinámicas que ofrecen las dos tecnologías de geotermia a gran escala más utilizadas actualmente, en función del yacimiento.

GEOTERMIA

4. GEOTERMIA

La energía geotérmica, a rasgos generales, y, según El Consejo Europeo de la Energía Geotérmica es: *"LA ENERGÍA ALMACENADA EN FORMA DE CALOR POR DEBAJO DE LA SUPERFICIE DE LA TIERRA"*.

Basándonos en la definición que nos aporta el Instituto Geológico y Minero de España: *"FUENTE DE ENERGÍA RENOVABLE ABUNDANTE, DE EXPLOTACIÓN VIABLE, TÉCNICA Y ECONÓMICAMENTE, QUE EVITA EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO Y CUYA EXISTENCIA EN NUESTRO SUBSUELO ESTÁ PROBADA"*.

Ya en la Prehistoria el ser humano aprovechaba el calor del subsuelo de cuevas para buscar cobijo frente a las bajas temperaturas del exterior. Durante el Imperio Romano se construyeron termas y, durante la Edad Media, el "hamman" o baño turco. Desde la Antigüedad el hombre conocía y hacía uso de la energía geotérmica. Hoy en día su uso abarca una gran extensión, desde el calentamiento de agua sanitaria para un hogar, hasta la obtención de electricidad en una central.

Calor generado por la Tierra

La Tierra se formó hace aproximadamente unos 3800 millones de años. A partir de una bola inerte de gases y polvo, mayoritariamente, se constituyeron 3 capas concéntricas: núcleo, manto y corteza.

La parte interna del globo terrestre es el núcleo, sólido en su parte interna y líquido en la externa, formado en su mayor parte por hierro fundido, con una temperatura entre los 4000 y 5000° C.

La capa intermedia es el manto, formado por silicatos de hierro y magnesio en su mayor parte. Se divide en: manto interno, elástico y prácticamente sólido, abarca desde los 650 hasta los 2700-2900 km de profundidad, con temperaturas entre los 1000° C hasta los 4000° C conforme nos acercamos al núcleo. Y manto superior, fluido y viscoso, abarca desde los 6 km bajo la corteza oceánica hasta los 650 km de profundidad, con temperaturas que oscilan entre 600° C hasta los 1000° C según nos adentramos al manto interno.

La corteza, que constituye la envoltura de nuestro planeta, formada mayoritariamente por silicatos aluminicos y magnésicos, consta de dos partes: corteza oceánica, que llega aproximadamente hasta los 5 km bajo el fondo del océano, y corteza continental, hasta los 70 km de profundidad desde las cadenas montañosas, la corteza terrestre abarca unas temperaturas que van desde los 15-20° C hasta los 650° C según bajamos hasta el manto superior.

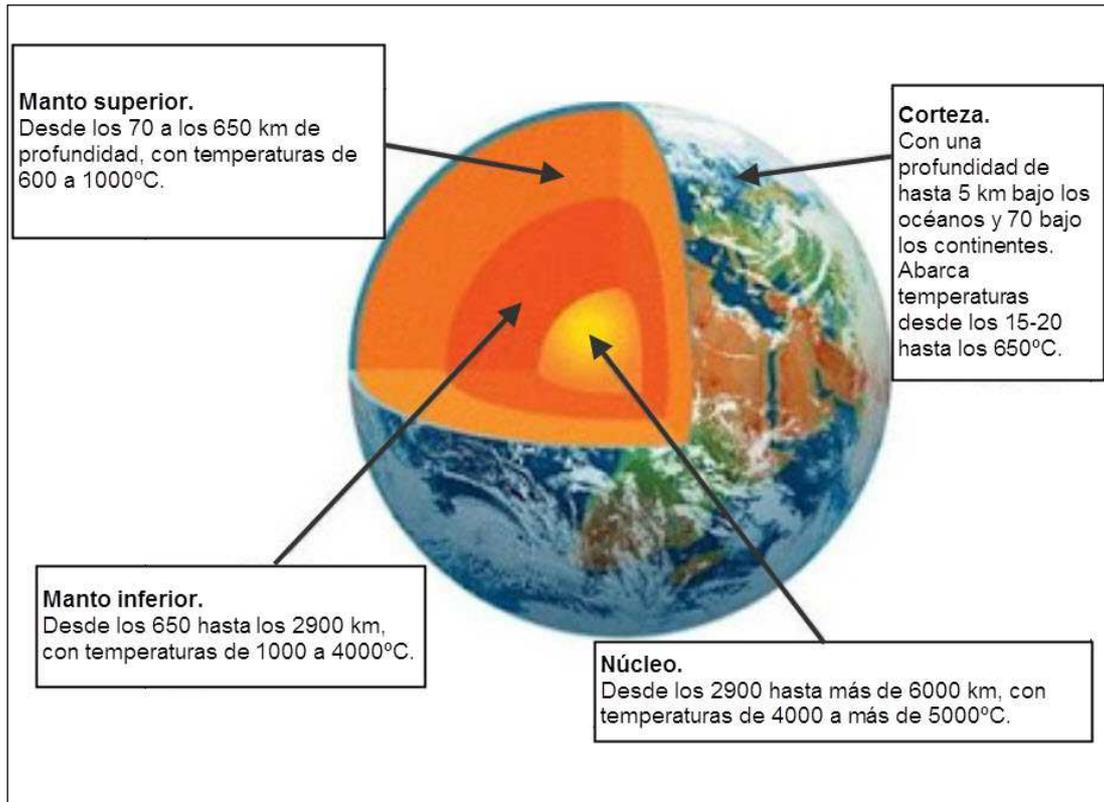


Ilustración 13. Capas de la Tierra, junto a profundidades y temperaturas.

Puede apreciarse una gran diferencia de temperatura entre el punto más interno y el más externo de la Tierra, lo que genera un flujo de calor continuo desde el foco caliente, núcleo, hasta el frío, corteza, que produce una renovación continua de corteza terrestre y su consiguiente absorción por el manto, y se traduce en desplazamientos de las placas tectónicas. Sin embargo, a lo largo de los 4500 millones de años desde que la Tierra comenzó a formarse, este flujo de calor debería haber cesado. Las causas de que a día de hoy aún siga produciéndose son las siguientes:

- Desintegración de algunos isótopos radiactivos que se encuentran en manto y corteza, principalmente potasio 40, uranio 238, uranio 235 y torio 232.
- Energía inicial de formación en forma de calor liberado hace 4500 millones de años, que aún llega a la superficie.
- Movimiento relativo entre las capas de la Tierra, sobre todo entre el núcleo y manto.
- Calor latente de cristalización del núcleo externo. En la zona de contacto entre el núcleo externo, que es líquido y está continuamente cristalizando, y el núcleo interno, sólido, se libera una gran cantidad de calor.

Como consecuencia de este flujo continuo de calor, se calcula que a la superficie del globo llega una cantidad de energía de unos $40 \cdot 10^{12}$ J en cada segundo. Esta energía es resultado del calor intercambiado por conducción, convección y radiación entre las distintas

capas. De esos $40 \cdot 10^{12}$ J, $8 \cdot 10^{12}$ J es calor generado por la corteza, $30 \cdot 10^{12}$ J es generado por el manto, y $2 \cdot 10^{12}$ J es debido al núcleo.

Según nos adentramos al interior de la Tierra, observamos cómo aumenta la temperatura del punto donde nos encontramos, este incremento de temperatura se denomina gradiente geotérmico. En la mayor parte del planeta, la temperatura aumenta unos $2.5\text{-}3^\circ\text{C}$ por cada 100 metros que nos adentramos en el subsuelo. Estos valores se corresponden a un gradiente geotérmico normal. Sin embargo, hay zonas en las que la temperatura aumenta unos 10°C por cada 100 m que bajamos, se trata de regiones con gradiente geotérmico anómalo.

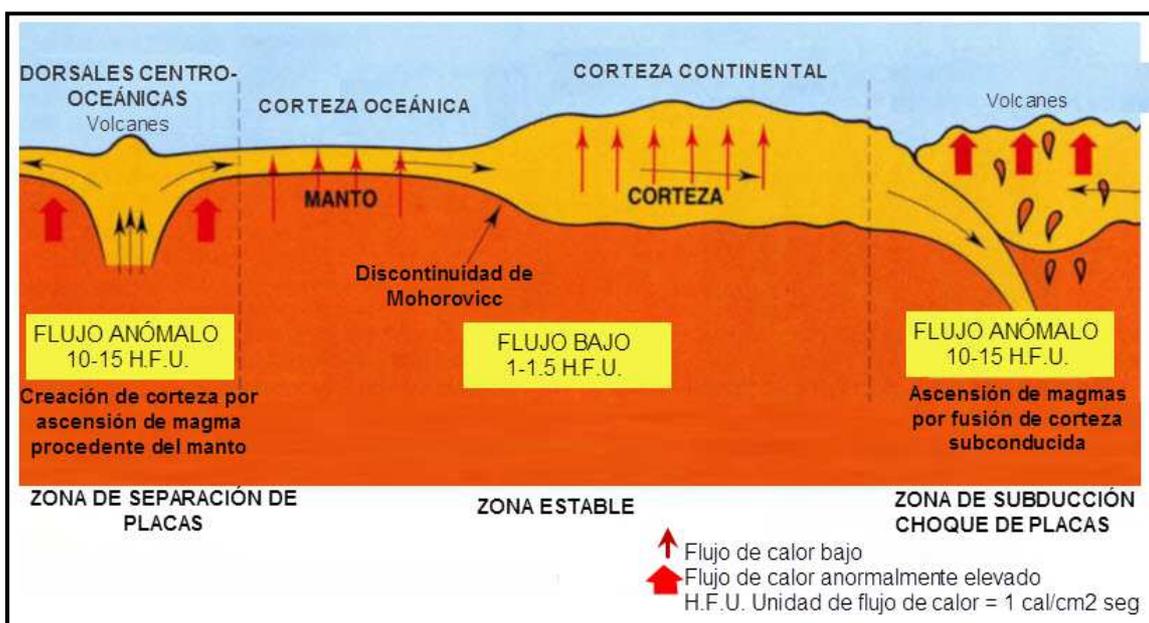


Ilustración 14. Estructura interna de la Tierra y repartición de flujos caloríficos según la estabilidad geológica de la zona.

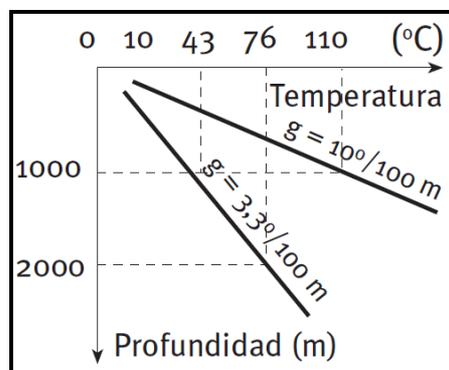


Ilustración 15. Temperatura en función de la profundidad y gradiente geotérmico normal y anómalo.

La zona exterior del globo se llama litosfera, está formada por la corteza y parte del manto superior. En el manto terrestre se producen fenómenos de convección térmica, lo que genera movimientos internos de materiales en el interior de nuestro planeta, y por consiguiente, formación de nueva corteza terrestre. Debido a que no existe un incremento de la superficie del globo, cuando la nueva corteza sale al exterior, se producen choques y rozamientos con la corteza vieja, que termina introduciendo una parte de la litosfera al interior de la Tierra. Las zonas donde se produce este desplazamiento hacia el interior se denominan zonas de subducción.

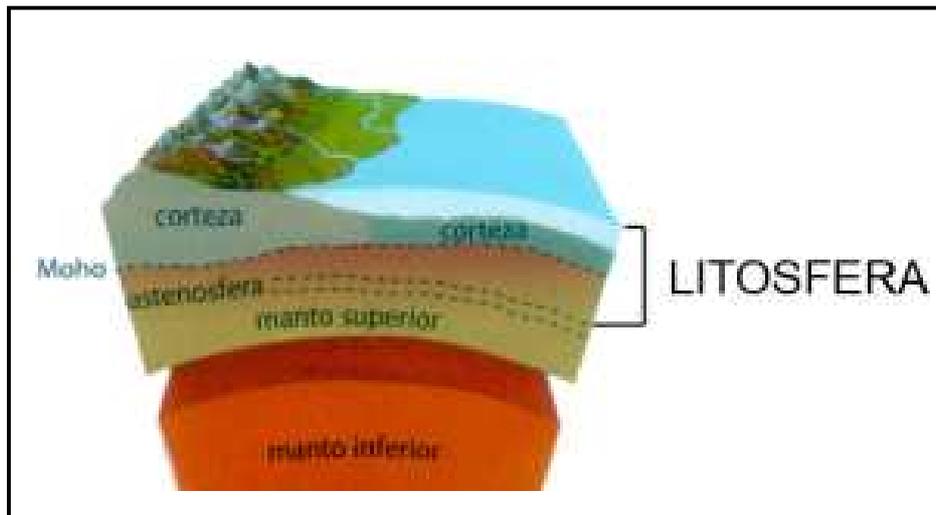


Ilustración 16. Litosfera.

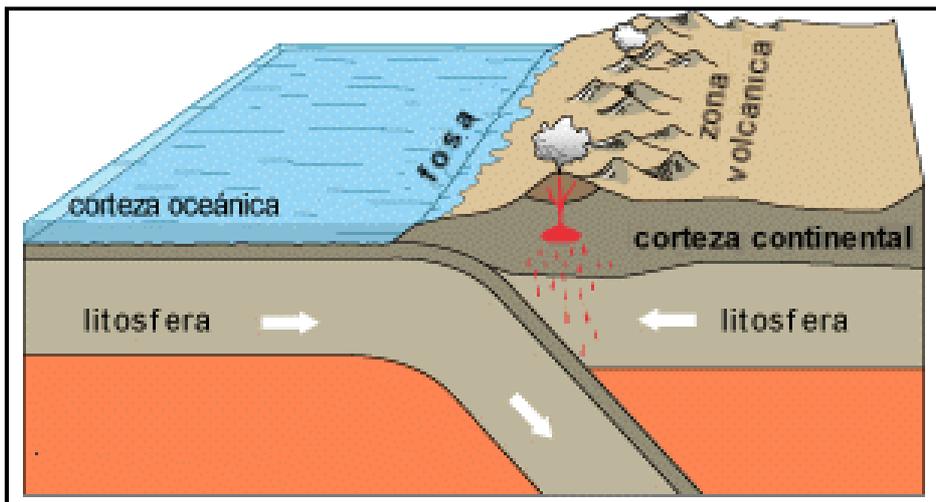


Ilustración 17. Convergencia entre corteza continental y oceánica.

atrapa. Así, a través del fluido geotérmico, agua con sales minerales y en unas condiciones de presión y temperatura determinadas, puede obtenerse energía geotérmica.

El agua que circula por las rocas de la litosfera puede salir a la superficie mediante pozos practicados por la acción del hombre, o bien de forma natural, a través de fallas o grietas, formándose géiseres, fumarolas, aguas termales y volcanes de fango. Las principales diferencias que presentan frente a los afloramientos de aguas comunes son la combinación con gases y su alta temperatura, ya que suelen provenir de las últimas fases de los procesos magmáticos.

Los afloramientos de agua anteriormente nombrados, junto a los volcanes, son los ejemplos visibles más claros de la energía geotérmica, a continuación se ofrece información más detallada de cada uno de ellos:

- **Aguas termales:** son aguas minerales que brotan del suelo a más de 5° C que la temperatura superficial. Muchas de ellas son utilizadas con fines terapéuticos, como baños, inhalaciones, irrigaciones y calefacción. Son bastante frecuentes en casi cualquier país, destacan algunas de áreas volcánicas, como las de Nueva Zelanda, México, Islandia, Japón, Colombia, Bolivia y las del parque de Yellowstone, en EEUU.



Ilustración 19. Aguas termales en Costa Rica.

- **Géiseres:** se trata de un tipo de fuentes termales que emiten una mezcla de agua en estado líquido, vapor y sales disueltas y en suspensión, intermitentemente, a unos 70-100° C. Las sales que transporta el agua se depositan alrededor del géiser. Estos tipos de afloramientos son bastante raros de encontrar, ya que necesitan de unas condiciones muy específicas de agua, calor y conductos. Algunos de los campos de géiseres más importantes se encuentran en: Parque Nacional de Yellowstone (Wyoming, EEUU), Dolina Geiserov (Península de Kamchatka, Rusia), El Tatio (Chile), Taupo (Nueva Zelanda) e Islandia.



Ilustración 20. Géiser en el Parque Nacional de Yellowstone.

- Volcanes: aberturas en la superficie del globo que desprenden lava, cenizas y vapor durante episodios de violenta actividad llamados erupciones. Suelen tener forma cónica característica, que se debe a la acumulación de material durante las erupciones y a la presión del magma interior. La cumbre se denomina cráter o caldera, mientras que las paredes exteriores, laderas. Los volcanes pueden ser tanto terrestres como marinos, siendo éstos últimos muy numerosos, al ubicarse mayoritariamente en las dorsales oceánicas. Normalmente, tanto los terrestres como los marinos, suelen situarse en los límites de placas tectónicas, aunque existe una excepción, como las islas Hawái, que se encuentran sobre puntos calientes.



Ilustración 21. Teide, volcán actualmente inactivo en Tenerife, Canarias.

- Fumarolas: se trata de combinaciones de vapores y gases que emergen a la superficie por las grietas exteriores de los volcanes o de las coladas de lava. Su temperatura varía de unas decenas de grados hasta más de 500° C. Su composición depende de su temperatura, por lo que varía durante su vida. Existen dos tipos de fumarolas: terrestres y marinas.



Ilustración 22. Fumarola en Furnas, en las Azores.

- Volcanes de fango: son alteraciones del relieve formadas por un cráter y un cono volcánico, de muy poca altura y muy poca pendiente. Son formados en zonas donde no hay suficiente cantidad de agua para formar una fuente termal o un géiser, por lo que desprenden erupciones de gases y barro. Suelen relacionarse con yacimientos petrolíferos. El vapor y los gases ascienden arcillas muy hidratadas que forman charcas. Suelen encontrarse en casi todos los países petroleros y sur de Europa, como Italia, Rumanía, Venezuela, Colombia y alrededor del mar Caspio, donde se ubica la mayor concentración de estos volcanes.



Ilustración 23. Volcán de fango en Azerbaiyán.

Se conoce como recurso geotérmico a una cantidad de energía del subsuelo, en forma de calor, que resulta económicamente rentable aprovecharla con las técnicas existentes. Para poder extraer energía a través del calor de un fluido geotérmico, éste debe encontrarse en un yacimiento geotérmico. Para que haya un yacimiento geotérmico deben reunirse al menos 3 condiciones geológicas:

- Fuente de calor continua: suele ser magma entre los 700-1000° C situado a unos 5-10 km por debajo de la superficie.
- Acuífero: la “jaula” que atrapa el calor y agua del subsuelo, y a partir de la cual el agua obtiene el calor y las sales minerales del entorno, que la convierten en fluido geotérmico. Se trata de un almacén formado por rocas permeables con base impermeable por el que el agua que circula obtiene el calor necesario. Debe estar conectada a una “recarga” de agua superficial, que permita sustituir el agua que asciende por las fuentes termales o por los pozos de explotación.
- Capa impermeable sobre el acuífero: actúa a modo de “sello” para que limite o impida la salida del agua.

Por lo tanto, se denomina yacimiento geotérmico a un volumen de corteza terrestre formado por materiales permeables que contienen un recurso geotérmico.

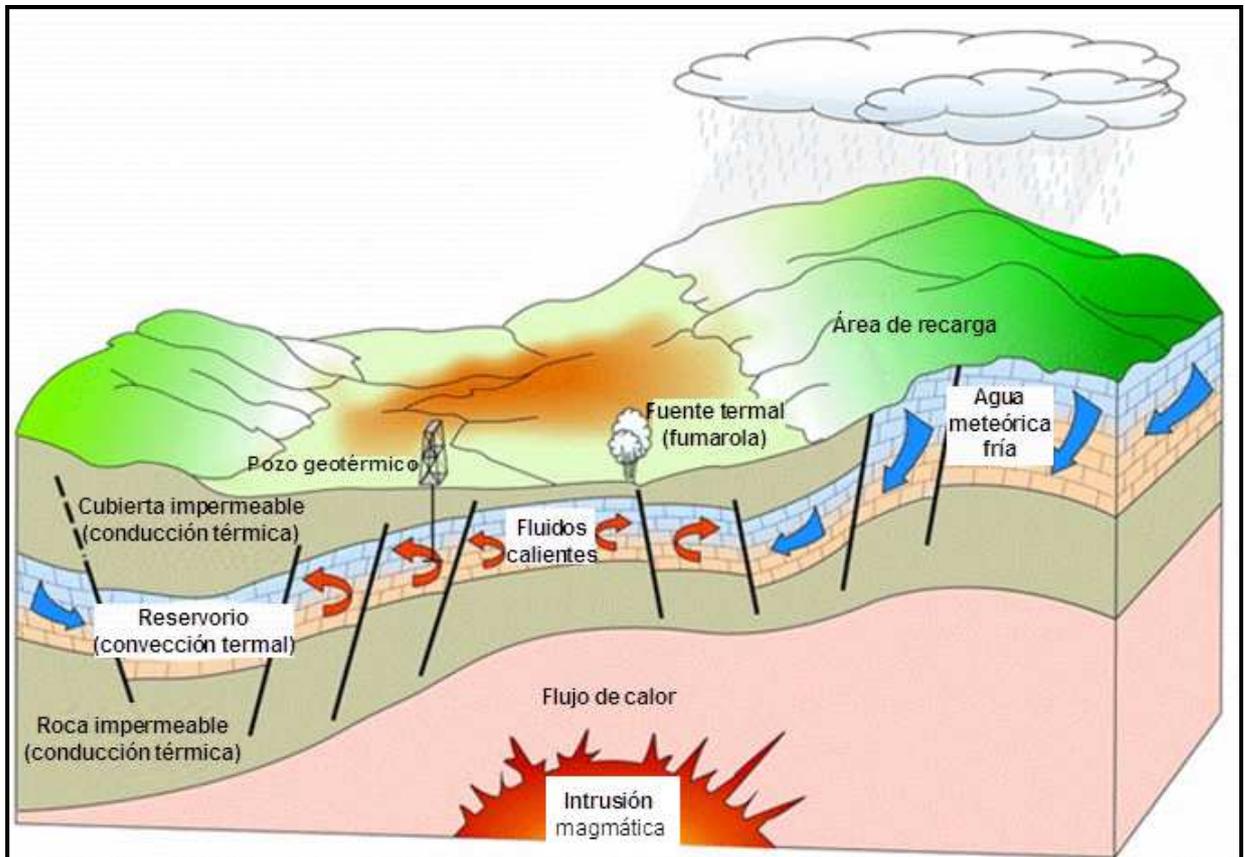


Ilustración 24. Esquema de un yacimiento geotérmico.

Clasificación de los yacimientos geotérmicos

Se conoce como entalpía a la cantidad de energía térmica que un sistema (líquido, sólido o gas) puede intercambiar con su alrededor. Suele expresarse en KJ/kg o Kcal/kg.

Los yacimientos geotérmicos existentes pueden clasificarse en función de la cantidad de energía calorífica de los fluidos geotérmicos que albergan, obteniéndose así, 4 tipos de yacimientos:

- Yacimientos de alta entalpía: en este tipo de yacimientos se cumplen las tres condiciones geológicas descritas anteriormente, la capa impermeable no suele ser perfecta, lo que provoca que una parte del fluido geotérmico ascienda a la superficie dando lugar a géiseres, fumarolas o aguas termales, por lo que la existencia de estos fenómenos suele asociarse con yacimientos de alta entalpía. El foco de calor mantiene al fluido geotérmico, vapor seco o mezcla de vapor y líquido, a una temperatura de unos 150° C como mínimo, por lo que en este tipo de yacimientos se suele utilizar el fluido geotérmico directamente para la producción de electricidad. Suelen encontrarse a una profundidad de entre 1500 y 3000 m en regiones de gradiente geotérmico muy elevado, de unos 30° C por cada 100 m, por lo que suelen coincidir con una gran actividad sísmica, actividades volcánicas y situarse en bordes de placas litosféricas.
- Yacimientos de media entalpía: en estos yacimientos el fluido geotérmico se encuentra entre los 100 y 150° C, que aunque permite la producción de electricidad en ciclos binarios, debe utilizarse un fluido de intercambio que alimenta a las centrales. El rendimiento suele ser algo inferior a los de alta entalpía. No necesitan de una capa impermeable sobre el acuífero que mantenga la presión y temperatura. Se localizan a una profundidad comprendida entre los 2000-4000 m de profundidad en zonas de adelgazamiento litosférico y en zonas con alta concentración de isótopos radiactivos, o a menos de 1000 m en zonas con las mismas condiciones geológicas que las de alta entalpía, pero a menos profundidad. Destacan el de la región de Pomerania (Alemania) y el de la cuenca molásica de Haute-Autriche (Austria).
- Yacimientos de baja entalpía: su temperatura se encuentra entre los 30 y 100° C, lo que es insuficiente para la producción de energía eléctrica, pero idóneo para calefactar edificios, balneoterapia y aplicaciones industriales y agrícolas. En estos yacimientos sólo es necesario que haya un “almacén” de fluido, con formaciones geológicas permeables que permitan almacenar y dejar circular fluido, con un gradiente geotérmico que haga que su explotación sea económica, para ello la demanda energética debe existir en sus proximidades. Suelen encontrarse a una profundidad de 1500-2500 m. Algunos de los más importantes se encuentran en la cuenca del Amazonas y Río de la Plata (América del Sur), cuenca del Mississippi

(Missouri, América del Norte), las cuencas de París y Aquitania (Francia), cuenca Artesiana (Australia) y la Región de Pekín y Asia Central.

- Yacimientos de muy baja entalpía: son yacimientos con una temperatura que ronda los 15-30° C. Gracias a un pequeño salto térmico que proporcionan las bombas de calor, puede aprovecharse el calor contenido en estos fluidos para usos de calefacción/climatización. A partir de los 15 m. de profundidad, la temperatura subterránea puede considerarse constante durante todo el año, lo que puede ser de gran utilidad a nivel doméstico. Estos yacimientos se encuentran prácticamente en la totalidad del globo, salvo en regiones donde se encuentran masas de aguas continentales o marinas.

El término yacimiento de muy baja entalpía no suele utilizarse, ya que este tipo de yacimientos se encuentra en toda la corteza terrestre.

Hasta ahora se han visto los yacimientos geotérmicos más convencionales, sin embargo, existen otros tipos:

- Yacimientos de roca caliente seca (Hot Dry Rock): son yacimientos de alta temperatura, en los que no existe un acuífero, ya que los materiales geológicos de los que se componen no son permeables y/o porosos. Están calentados por cámaras de magma de las zonas volcánicas cercanas.

Puede conseguirse la permeabilidad de las rocas mediante su fracturación por medio de una inyección de agua a elevada presión, tras producirse esta fractura en la roca, se inyecta fluido desde la superficie, agua, y se recoge con un alto incremento en su temperatura. Esta técnica (EGS, Enhanced Geothermal Systems, Sistemas geotérmicos estimulados) se utilizó por vez primera en 1977 en Los Álamos, Nuevo México (EEUU). La tecnología EGS puede emplearse tanto para crear yacimientos nuevos de alta temperatura, como para ampliar la extensión de yacimientos ya existentes, y así ampliar su producción.

- Yacimientos supercríticos: se caracterizan por encontrarse en zonas volcánicas, donde el recurso geotérmico es calentado por la acción del magma subsuperficial, alcanzando temperaturas de al menos 300 °C. La tecnología para poder extraer el calor está actualmente en desarrollo, pues se precisa de equipos que aguanten condiciones muy extremas. Estos yacimientos son especialmente útiles para la producción de electricidad e hidrógeno.
- Yacimientos geopresurizados: son un tipo de yacimientos en los que el acuífero se encuentra prácticamente sellado y sometido a grandes presiones, entre el 40-90 % superiores a la que debería tener. Estos yacimientos son ricos en energía geotérmica (debido a la profundidad a la que se encuentran, en ocasiones más de 6000 m, alcanzan temperaturas superiores a los 150 °C), energía mecánica (por la presión a la que se encuentra el fluido) y de combustión, pues el fluido suele ser una mezcla de agua y gas natural (hay grandes concentraciones de metano).

Suelen encontrarse en cuencas sedimentarias, como en el Golfo de Texas-Louisiana, en EEUU, aunque también en áreas volcánicas.

Las tecnologías actuales son capaces de explotar estos tipos de yacimientos, sin embargo, no resulta viable económicamente hablando. Se espera que empiecen a ser usados a medida que las reservas de combustibles fósiles disminuyan e incrementen su precio.

Explotación de un yacimiento geotérmico

Se distinguen dos etapas en la vida de todo yacimiento geotérmico aprovechado: investigación y explotación.

Yacimientos de alta y media entalpía

La etapa de investigación de un yacimiento de alta y media entalpía cubre distintas fases:

- Fase I: Reconocimiento.

Esta fase tiene una duración de 3-4 años y cubre un área nacional de unos 10.000-100.000 km². Con ella se pretende llegar a una selección de las principales regiones geotérmicas del país, y definir un programa de investigación de cada uno de ellos, a partir de estudios preliminares de documentación, geología, hidrogeología y geoquímica. Deben obtenerse los permisos necesarios para realizar estos estudios de la zona. El coste de esta fase suele encontrarse entre los 200.000-1.000.000 €.

- Fase II: Pre factibilidad.

Dura 4-5 años y cubre una superficie a nivel regional, de 500-2000 km². Los programas anteriormente propuestos ven la luz en esta fase, además se procede a una investigación exhaustiva de las distintas regiones, para determinar los yacimientos posibles, estimar así su potencial y proponer un modelo geotérmico preliminar.

- Fase III: Factibilidad.

Comprende una duración de 2-3 años y la superficie de actuación es de 10-100 km². En esta fase se confirma la existencia del yacimiento a explotar y sus

características. Además se estima la viabilidad técnico-económica. La fase dos y tres comprenden un desembolso estimado de veinte millones de euros.

Tras realizar la etapa de investigación, se procede a la etapa de explotación:

- Fase IV: Desarrollo y explotación.

Durante un período de 25-30 años se procede a la explotación del yacimiento geotérmico, con el fin de la comercialización de su energía. Esta fase comprende la construcción de la planta geotérmica, se confirma la extensión del yacimiento con nuevos sondeos y se realiza un seguimiento en la evolución de las características del acuífero, además tiene lugar una actualización constante de información. Todo ello supone un coste de unos 100 millones de euros.

Una vez acabada la fase IV, se procede al fin de la explotación y a la posible desmantelación de la central. La etapa de explotación finaliza cuando la potencia geotérmica extraída disminuye lo suficiente con respecto al inicio de la fase IV, y ya no resulta rentable la explotación del yacimiento. Con lo cual, es necesario dejar que el acuífero se recupere. Es un proceso lento, puede durar incluso siglos, por lo que en muchos casos es preferible desmantelar la central, lo que puede durar 2-3 años.

A la hora de localizar y evaluar un yacimiento geotérmico de alta y media entalpía deben aplicarse diversas técnicas prospectivas durante su investigación, entre ellas destacan las siguientes:

- Técnicas geológicas: su objetivo es confirmar las condiciones geológicas del yacimiento, es decir, el foco de calor, acuífero y capa impermeable. Para ello se llevan a cabo diversas pruebas, entre las que destacan: fotointerpretación, tectónicas, estratigrafía, sismología, petrografía y datación absoluta.
- Geoquímicas: con estas técnicas se llega a la confirmación de la existencia de fluidos geotérmicos, también analizan sus características físico-químicas. Algunas pruebas geoquímicas son: hidroquímicas, geotermometría química, isotópicas, geoquímica de gases y volátiles y estudio de depósitos y alteraciones hidrotermales.
- Geofísicas: delimitan la extensión del yacimiento geotérmico y definen su temperatura y flujo de calor. Realizan pruebas de teledetección, gravimetría, magnetismo, sísmicas, eléctricas, electromagnéticas, magneto telúricas, de microsismicidad, de polarización espontánea entre otras.
- Sondeos exploratorios: con esta técnica se pretende confirmar todos los datos obtenidos anteriormente y así obtener una evaluación definitiva del yacimiento. Para ello se llevan a cabo pruebas de perforación, diagráfias eléctricas, ensayos en testigos (porosidad y permeabilidad), pruebas de presión y ensayos de producción e interferencias.

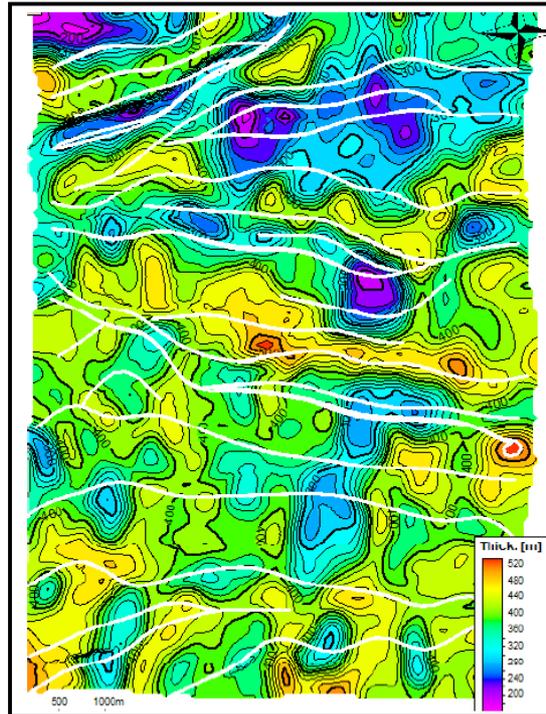


Ilustración 25. Ejemplo de modelo de reservorio creado en el Proyecto Geretsried, a partir de la interpretación de pruebas geofísicas y geológicas.

Yacimientos de baja y muy baja entalpía

Estos tipos de yacimiento requieren de unas fases de investigación y técnicas prospectivas diferentes a las expuestas anteriormente, ya que el flujo de calor es normal y no anómalo y por tanto, el valor económico del yacimiento es más bajo, por lo que no compensa el uso de técnicas demasiado sofisticadas y caras. El uso más común de estos yacimientos es la climatización de hogares, por lo que la zona de explotación es muy concreta, de unos pocos m^2 . El proceso completo de investigación dura unos 17-30 meses, y consta de tres fases:

- Fase I: Documentación, estudios geológicos e hidrogeológicos.

Comprende una duración de 6 a 12 meses. A partir de la información existente y disponible, se seleccionan los acuíferos más profundos y se realiza un estudio hidrogeológico y geológico de ellos, con el objetivo de conocer sus características. Finalmente se concretan los puntos donde se desarrollará la perforación.

- Fase II: Estudio de la demanda y viabilidad técnico-económica.

Durante 3-4 meses se analiza la demanda energética existente, además se realizan estudios acerca de inversiones en equipos, sondeos, costos de explotación

necesarios para cubrir dicha demanda. Después se pasa a estudiar la financiación y administración.

- Fase III: Sondeos profundos y desarrollo de la operación.

Esta fase dura 8-14 meses, tras conseguir la financiación necesaria, se procede a realizar el primer sondeo profundo. Los datos obtenidos permiten establecer las características definitivas del yacimiento, las cuales se supusieron en la fase I.

Tipos de sondeos

Las perforaciones realizadas tanto en la investigación como en la construcción de la central se denominan sondeos. Estas operaciones se tratan de las más costosas de toda instalación geotérmica. Para una profundidad baja/media se utiliza la misma tecnología que para pozos de agua, para profundidades altas, la usada en exploraciones petrolíferas. Existen tres tipos básicos de sondeos empleados en geotermia:

- A percusión o mediante cable: un trépano colocado en la punta va perforando las rocas. Este tipo de sondeo es el más recomendable para perforar diámetros grandes en durezas medias y bajas, aunque también puede con tierras fracturadas y duras. Alcanza profundidades medias.

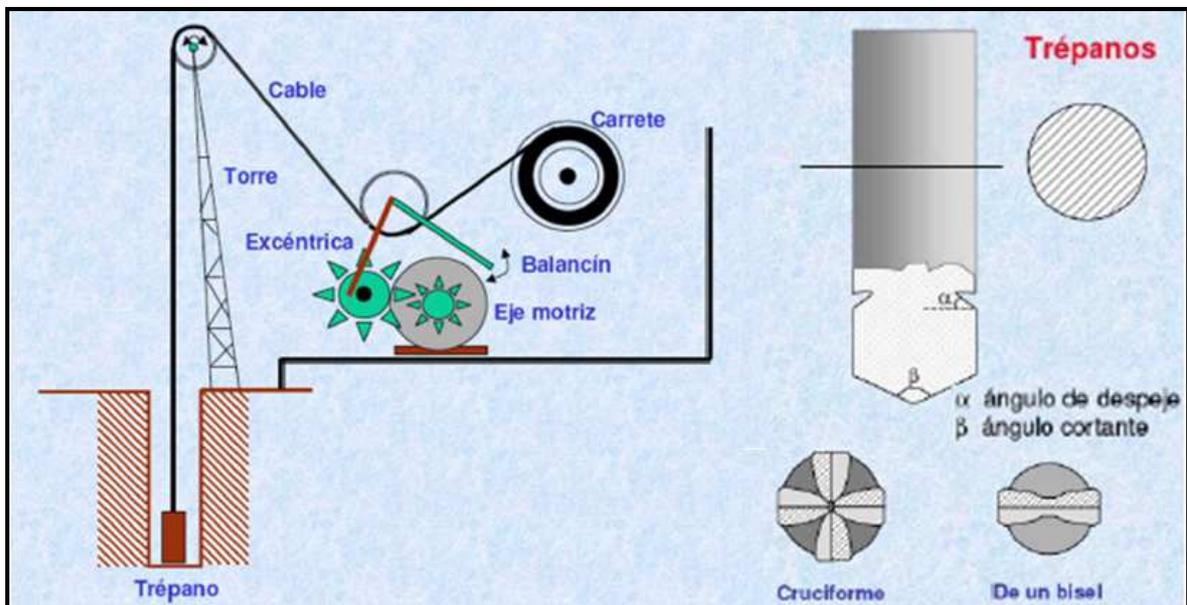


Ilustración 26. Funcionamiento de perforación por percusión y detalle de trépanos.

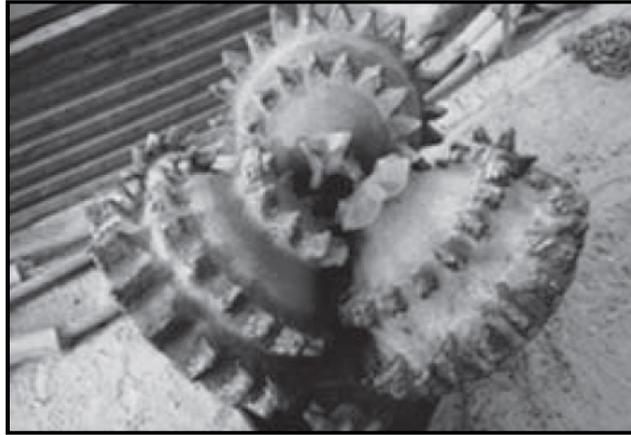


Ilustración 27. Detalle de trépano cruciforme o de estrella. Muy común en sondeos.

- A rotación: en este caso, la roca es perforada por compresión y/o corte de un trépano con conos dentados. Existen dos tipos de sondeo por rotación:
 - Circulación directa: en este tipo de perforación se emplea lodo como fluido de trabajo, algunas de sus funciones son: llevar el detritus del fondo a la superficie, refrigerar y lubricar el trépano y varillaje, impermeabilizar las paredes... para ello es importante tener controlados ciertos parámetros del lodo, como el ph, densidad y viscosidad.

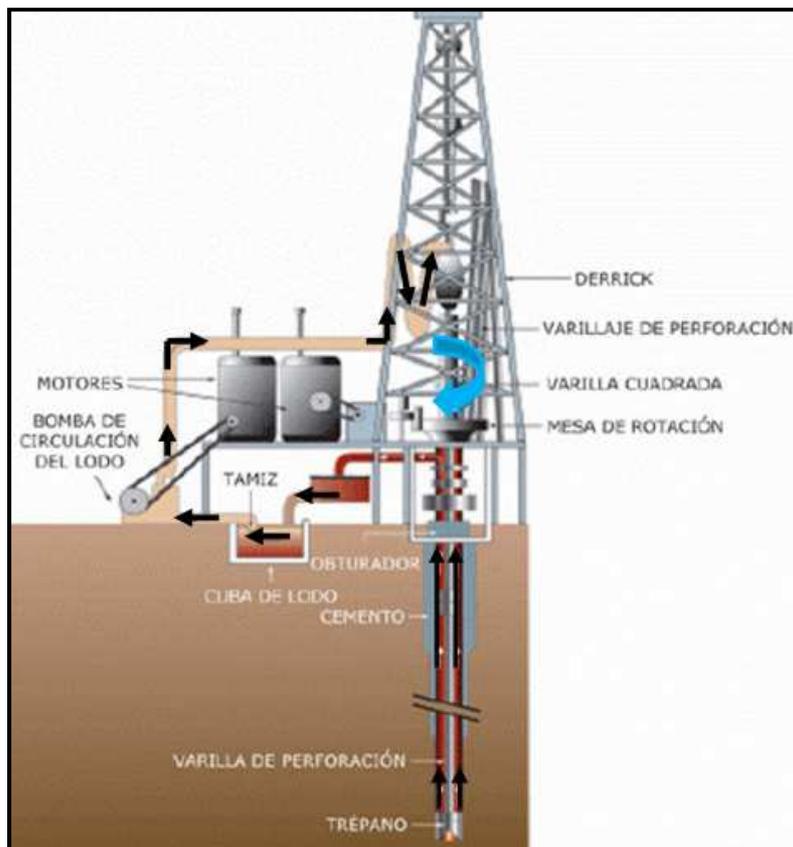


Ilustración 28. Esquema del funcionamiento de sondeo a rotación por circulación directa.

- Circulación inversa: este tipo de perforación es muy similar a la directa, pero el sentido del flujo del fluido es inverso, es decir, entra por las paredes y sale por el varillaje, de esta forma el detritus no llega a tocar la pared del pozo y se consigue una columna litológica muy buena. Este sondeo es especialmente útil para grandes diámetros y perforaciones profundas.

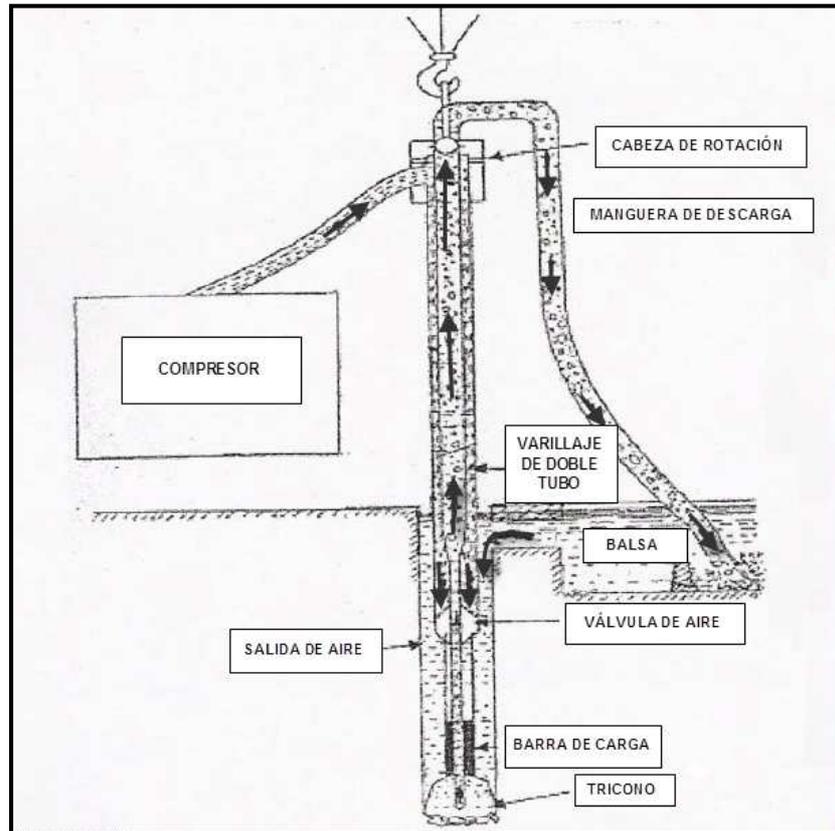


Ilustración 29. Esquema del funcionamiento de perforación por rotación inversa.

- A roto-percusión: la perforación se consigue combinando la compresión por rotación, y el golpeo de la boca de corte de un martillo neumático sobre la roca. Es importante controlar los siguientes parámetros: peso sobre el tallante (elemento cortante), velocidad de rotación, nivel de engrase del martillo y la velocidad con que el fluido sube debe ser de 15 a 35 m/s. Los compresores más empleados son los de tornillo, de 20-25 bares y 25 a 30 m³/min. Hay dos tipos de roto-percusión:
 - Martillo en cabeza: tanto la percusión como la rotación son realizados en la superficie y se transmiten al sondeo por la espiga.
 - Martillo en fondo: la rotación se produce en la superficie, mientras que la percusión, sobre la roca. Estos sondeos pueden ser de rotación directa o inversa.

- La perforación de martillo en fondo con rotación directa aporta una buena calidad del muestreo, es adecuado para perforar materiales consolidados que no se derrumben y rocas duras, consigue profundidades de hasta 400 m, tiene una velocidad de rotación del varillaje de 10-20 rpm, frecuencia de percusión de 10/20 impactos/s y su espacio anular es de 2-3". Son más económicos que los de inversa.
- La perforación de martillo en fondo con rotación inversa consigue una excelente calidad del muestreo litológico, además de una buena columna litológica, pues no hay contacto del detritus con la pared. Al no consumir grandes cantidades de aire, resulta ideal para conseguir grandes diámetros de pozo (17.5-26"), hasta profundidades de 800-1000 m y rocas duras. El requisito es que los terrenos deben ser consolidados.

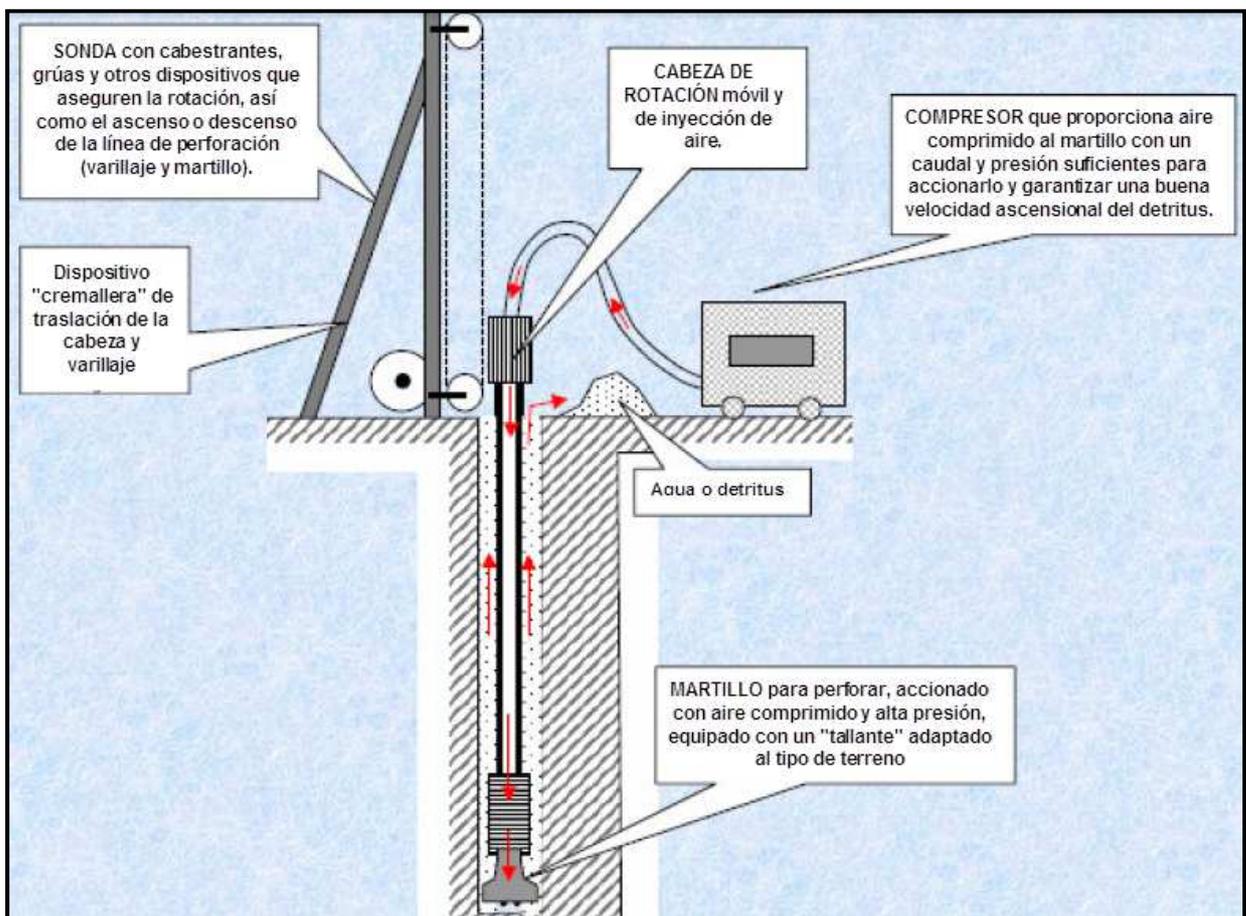


Ilustración 30. Funcionamiento y componentes de sondeo por roto-percusión directa con cabeza en fondo.

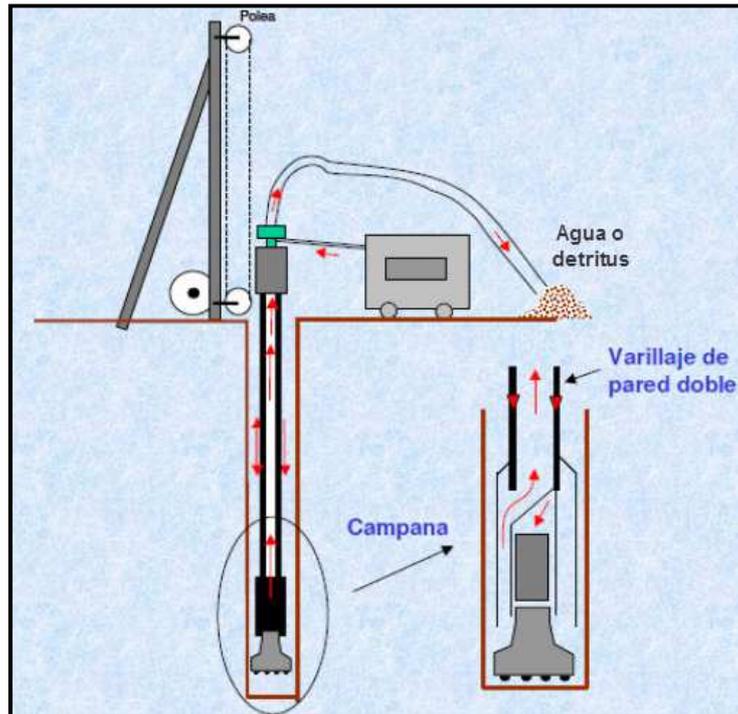


Ilustración 31. Funcionamiento de sondeo por roto-percusión inversa con cabeza en fondo.

Si tenemos en cuenta la dirección de perforación, se habla de sondeos verticales, horizontales e inclinados. Lo normal en la explotación de acuíferos profundos es comenzar una perforación vertical y luego continuar con una cierta inclinación, mediante una técnica de perforación dirigida, hasta llegar a la profundidad del acuífero requerida.

La perforación por rotación y roto-percusión son las más comunes, pudiendo ser a su vez con recuperación de testigo, o testiguera, y sin recuperación de testigo, también llamada a polvo o “destroza”.

Estas técnicas son las más comunes, actualmente existen otras en desarrollo, como la perforación por proyectiles, “Projectile Drilling”, la perforación química, “Chemical Drilling”, la perforación por estalación, “Spallation Drilling” y la perforación láser, “Laser Drilling”.

Características de las perforaciones

Durante las perforaciones, en los equipos se producen grandes problemas de corrosión:

- Química: por las sales minerales.
- Galvánica: debido a las corrientes eléctricas.
- Bacteriológica: debido a las microbacterias, como tiobacilos aeróbicos y lactobacilos anaeróbicos, responsables de grandes daños a tuberías de acero y hierro.

Además, las altas temperaturas y la alta concentración de sales pueden dañar seriamente los equipos durante las perforaciones, por lo que los útiles empleados deben estar protegidos. Una vez que se han creado los pozos de extracción y reinyección de fluido geotérmico, se procede al entubado. Dado que los tubos están en contacto con el fluido geotérmico y la gran mayoría se encuentran en el subsuelo, los materiales empleados deben aguantar las condiciones extremas de presión, temperatura, corrosión y seísmos, para evitar fugas tanto en los tubos como en las uniones. Reparar una fuga en pozos tan profundos es de gran dificultad y supone un gran coste económico.

Gestión del yacimiento geotérmico

Al finalizar el ciclo en las centrales geotérmicas de ciclo abierto, si el fluido geotérmico tiene poca concentración de sales minerales, éste puede desecharse en la superficie, ya que no supone un peligro ambiental. Por el contrario, si el fluido geotérmico es rico en sales, o la eliminación del fluido puede suponer el agotamiento del acuífero, es necesario reinyectarlo en el yacimiento, con el fin de rellenarlo y así repetir el ciclo. Una vez que el fluido enfriado regresa al acuífero, se produce una perturbación térmica debida a una expansión de un frente frío que se propaga concéntricamente. A lo largo de los años, este frente frío acaba llegando al pozo de extracción, lo que provoca una disminución de la temperatura a la que se extrae el fluido.

Es posible saber en qué momento se producirá este fenómeno, gracias a modelos matemáticos basados en datos físicos de la explotación, dimensiones del acuífero, porosidad de las rocas, capacidad calorífica, caudal de extracción y distancia entre pozo de extracción y reinyección.

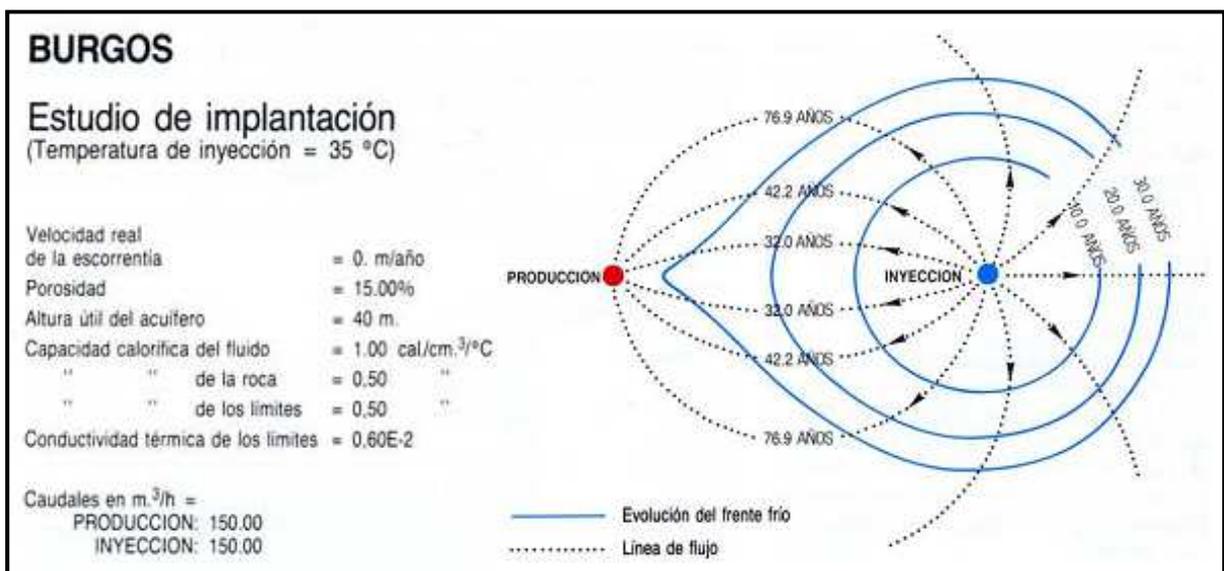


Ilustración 32. Ejemplo de estudio de implantación en Burgos.

A la hora de instalar el circuito de reinyección, es necesario hacer un estudio previo del acuífero y del sentido de flujo, para inyectar el agua fría aguas abajo del pozo de extracción. La mayoría de expertos coinciden en separar los pozos de extracción y reinyección a un mínimo de un kilómetro.

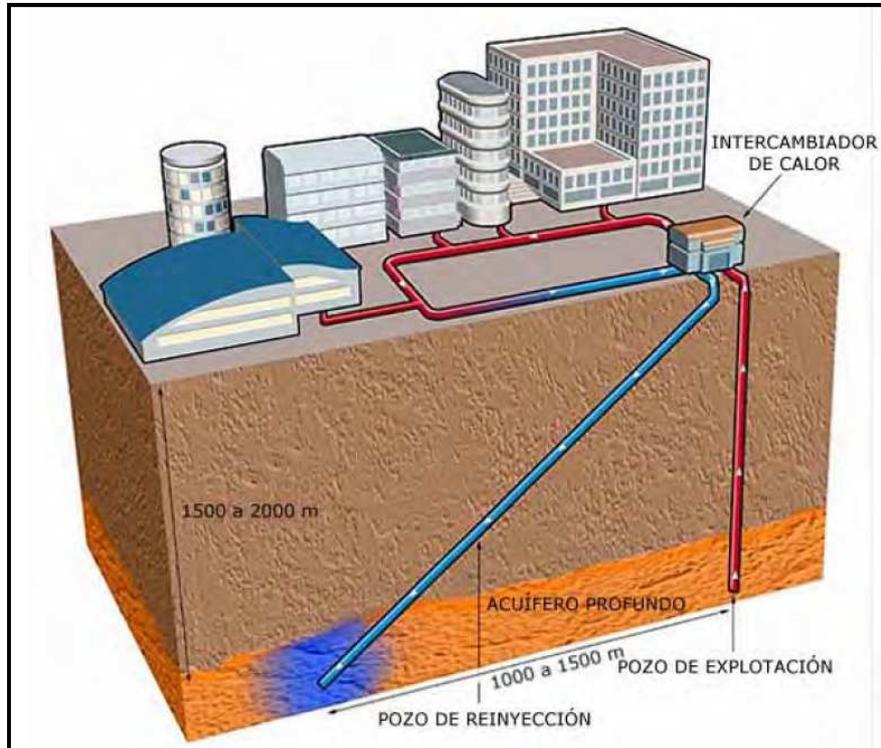


Ilustración 33. Ejemplo de separación entre pozos de explotación y reinyección para evitar el enfriamiento del agua extraída.

Aplicaciones de la geotermia

Yacimientos de baja y muy baja entalpía

El calor obtenido de estos yacimientos es empleado para uso directo. Las aplicaciones más comunes son las siguientes:

- Piscinas, baños y balnearios: se emplean yacimientos con temperaturas que van desde los 30 hasta los 90 °C. Algunos de los países más destacados que emplean esta energía en piscinas y balnearios son: Francia, Alemania, Inglaterra y Japón.
- ACS y climatización de edificios: los países que más uso hacen de esta tecnología son Polonia, Hungría, Rumanía, Turquía, Japón, China, EEUU e Islandia. Destaca Reikiavik con un sistema de calefacción que abastece a unas 200.000 personas. El

fluido extraído del subsuelo debe estar entre los 20 y 120 °C. En el caso de calefacción por suelo radiante, las temperaturas oscilan entre los 40 y 70 °C.

- Calefacción en invernaderos: gracias a este tipo de instalaciones es posible cultivar especies en zonas donde no se podría al aire libre, debido a las bajas temperaturas. O bien, cultivarlas no sólo en ciertas temporadas, sino durante todo el año. Destacan países como Australia, Nueva Zelanda, medio oeste norteamericano y de oriente. En el cultivo de hongos, las temperaturas extraídas del acuífero son de 30-80 °C. Los invernaderos calefactados por el suelo requieren de yacimientos entre los 40-70 °C, mientras que los calefactados por aire, de 60-110 °C.
- Piscifactorías y crianza de animales: el uso del calor del subsuelo permite criar especies como carpas, barbos, camarones, esturiones, langostas, cangrejos, mejillones, truchas... que requieren de una temperatura constante del agua para su crecimiento. De esta forma, se reduce la pesca indiscriminada en ríos y océanos. También pueden criarse animales como caimanes, tortugas, nutrias, castores, de los que se obtienen carne y piel. En este tipo de granjas, estas especies alcanzan tamaños mucho mayores, y las aguas están mucho más controladas en cuanto a contaminación. Destacan las granjas de caimanes en Colorado. Las temperaturas del subsuelo deben estar entre los 30 y 60 °C.
- Deshielo: la geotermia también puede usarse para derretir el hielo de carreteras, aceras y suelos urbanos. Para ello se usan temperaturas del subsuelo de 60 a 90 °C. En este uso destaca EEUU.

Yacimientos de media entalpía

El uso de los yacimientos de media entalpía tiene fines tanto alimenticios como industriales.

En el sector alimentario destaca el aprovechamiento para el secado de productos agrícolas y pescados, con temperaturas del acuífero que van desde los 80 hasta los 140 °C. También puede emplearse los yacimientos de 120-150°C en las fábricas para alimentos en conserva.

En el sector industrial se aprovechan acuíferos de 90 a 180°C para usos como: lavado de lana y tintes, secado de productos industriales, refrigeración por absorción, extracción de sustancias químicas, destilación de agua dulce, recuperación de metales, evaporación de soluciones concentradas, fabricación de pasta de papel, refrigeración por absorción con amoníaco y secado de madera entre otras aplicaciones.

Este tipo de yacimientos también se emplea en la producción eléctrica a través de ciclos binarios, en los que gracias a un circuito secundario, puede producirse electricidad a partir de temperaturas menores que el resto de plantas geotérmicas.

En la siguiente ilustración, pueden verse los porcentajes de consumo de energía geotérmica para uso directo.

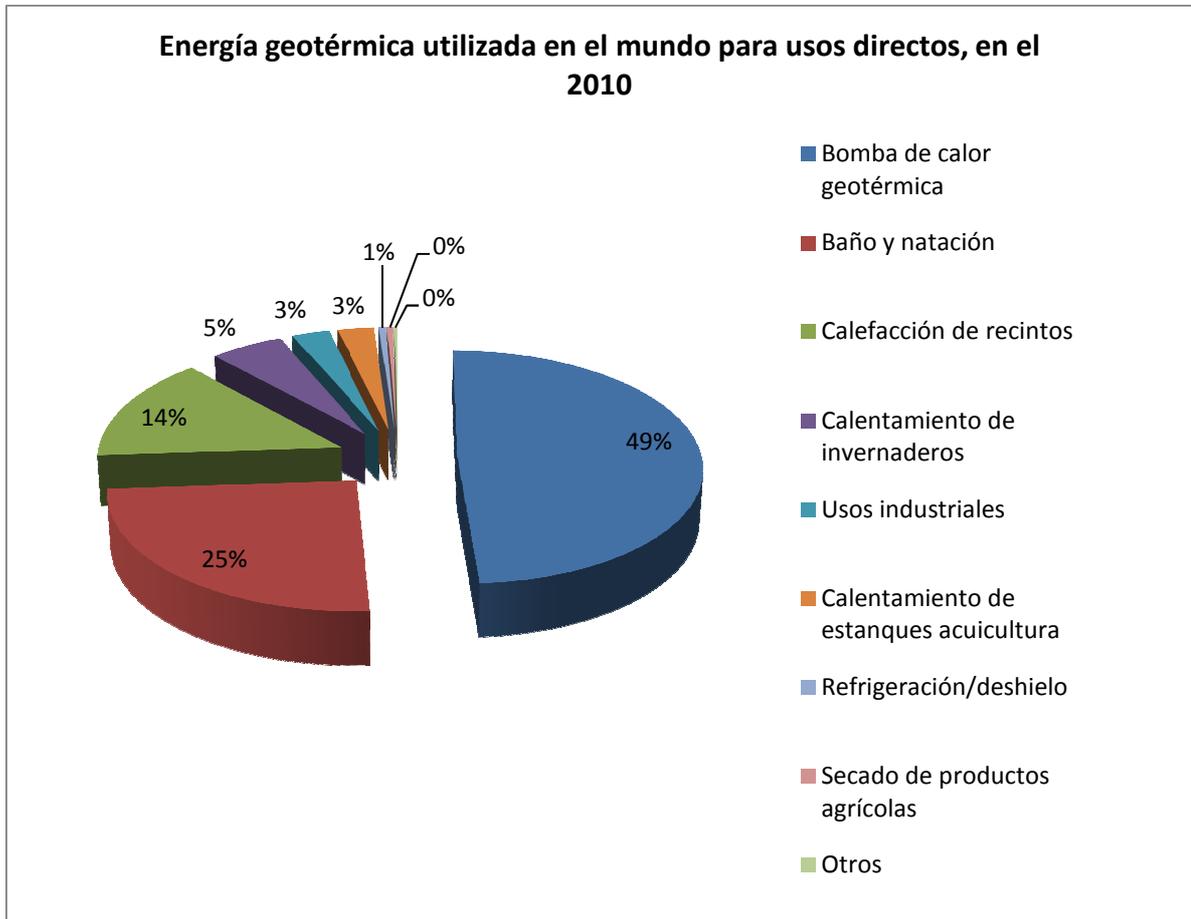


Ilustración 34. Porcentajes de consumo de energía geotérmica en el mundo para usos directos.

Yacimientos de alta entalpía

Este tipo de yacimientos es utilizado para obtener energía eléctrica a partir de centrales geotérmicas. La temperatura necesaria para poder producir electricidad es a partir de unos 120 °C.

Ciclos para centrales geotérmicas

La explotación de los recursos geotérmicos para la producción eléctrica se lleva a cabo en centrales geotérmicas, que hacen pasar el calor del fluido geotérmico por una turbina. Una vez extraído el calor del fluido, éste regresa al acuífero, o bien en determinadas ocasiones, se desecha en la superficie.

Tipos de ciclos usados en centrales geotérmicas

Si prestamos atención a las características del fluido de trabajo podemos establecer varios tipos de centrales:

- **Centrales flash o de vapor húmedo:**

Este tipo de centrales son las más frecuentes, ya que el fluido geotérmico contenido en los yacimientos de alta entalpía suele ser una mezcla de vapor seco y gotas de agua (también conocida como vapor húmedo). Una vez captado el fluido, se procede a la separación del vapor del agua líquida, normalmente mediante un separador centrífugo, pues en caso de impactar las gotas de agua a tan alta presión en los álabes de las turbinas, produciría un excesivo desgaste en ellos, provocando una ruptura prematura.

El vapor obtenido se manda a la turbina de alta presión, o a la zona de alta de turbinas multietapa, mientras que el agua líquida separada es eliminada (se devuelve al acuífero), o bien se utiliza en instalaciones secundarias mediante la técnica de cascada, como se verá en el apartado siguiente. Por lo que la electricidad obtenida en este tipo de centrales es producto únicamente del vapor obtenido.

Destacan las centrales flash en yacimientos de Imperial Valley y Salton Sea (EEUU), Reikiavik (Islandia) y Cerro Prieto (México). Todos estos yacimientos son de alta entalpía, con una temperatura entre los 180 y más de 300 ° C.

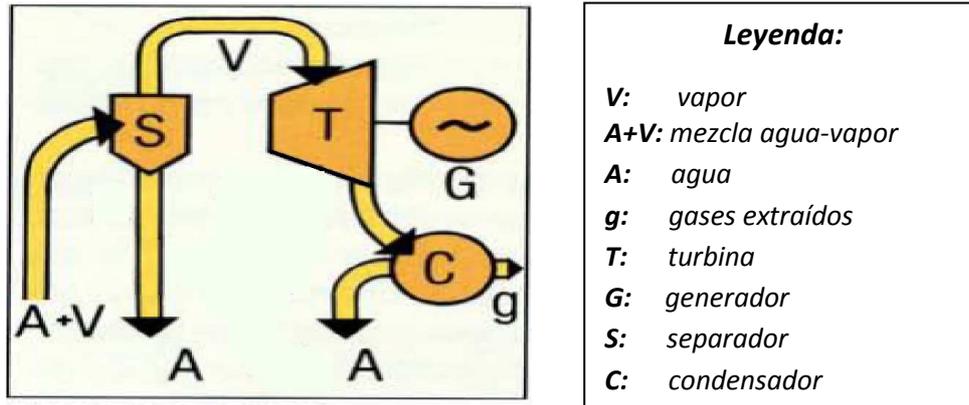


Ilustración 35. Ciclo básico de central flash.

Existe otra alternativa a las centrales de vapor húmedo, este tipo de centrales se denomina doble flash. Tras captar la mezcla de vapor y agua líquida se procede a su separación, con lo que el vapor se manda a la turbina de alta presión, o a la zona de alta de turbinas multietapa, al igual que en las centrales flash, la diferencia radica en que con el agua líquida separada se procede a una separación de vapor a baja presión, y se envía posteriormente a las turbinas de baja presión, o bien a la zona de baja de turbinas multietapa. Posteriormente, el agua líquida se reinyecta en el acuífero. Con el fin de obtener la máxima producción, este último paso puede repetirse tantas veces como lo permita la entalpía del agua separada.

Al igual que en las centrales flash, en vez de reinyectar en el acuífero el agua líquida obtenida tras la última separación, puede emplearse para otras instalaciones, mediante la técnica de cascada.

Como consecuencia, la potencia eléctrica producida en el generador de estas plantas será mayor que en las centrales tipo flash, además del rendimiento del ciclo, ya que se produce un mayor aprovechamiento del fluido geotérmico.

Un ejemplo de este tipo de plantas se encuentra en Wairakei, Nueva Zelanda.

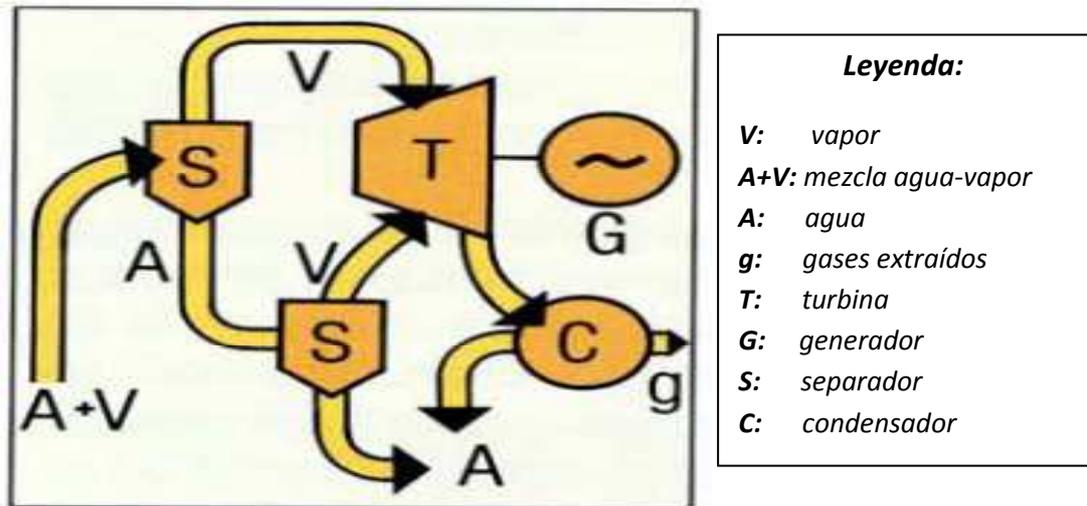


Ilustración 36. Ciclo básico de central tipo doble flash.

Una parte fundamental en las centrales de vapor húmedo es el tratamiento del vapor, pues cuanto más limpio se encuentre, menos dañará al conjunto de turbinado. Para ello, se dispone de: un separador inicial, cuya misión consiste en aislar el vapor del líquido, dispositivos de goteo por las tuberías donde circula el vapor y un filtro de limpieza. Además, en ciertas ocasiones, se procede a lavar el vapor con objeto de aumentar su pureza.

- **Centrales de vapor seco:**

Este tipo de plantas obtienen la energía a partir de yacimientos que contienen únicamente vapor saturado o ligeramente sobrecalentado (vapor seco), por lo que son las centrales más económicas y las que tienen el ciclo más simple. Una vez extraído el fluido geotérmico, se limpia y circula por una turbina, que por medio de un generador obtiene la electricidad. El motivo por el que no se han construido más centrales de vapor seco es la escasa existencia de este tipo de yacimientos, ya que sólo se han descubierto cinco en todo el planeta donde resulte rentable: Wairakei (Nueva Zelanda), Matsukawa (Japón), Kamojang (Indonesia), Lardarello (Italia) y The Geysers y Cove Fort (EEUU). Mediante el pozo de extracción se obtiene el vapor del subsuelo a más de 200° C y hasta 35 bares de presión, que ingresa directamente en la turbina. Se trata del tipo de central geotérmica más antigua que existe.

Existen distintos ciclos para este tipo de centrales:

- Ciclo directo sin condensación: se trata del ciclo de vapor seco más barato y simple en cuanto a coste de la planta, el vapor procedente del subsuelo, una vez que ha pasado por las turbinas,

escapa directamente al ambiente. Su eficiencia es muy baja, ya que puede consumir fácilmente el doble de vapor por kW producido que un ciclo que utilice condensador. Suele utilizarse en plantas piloto, en pequeños suministros locales o como pequeñas centrales de punta. La utilización de este ciclo es obligatorio cuando la cantidad de gases incondensables es superior al 50%, o los gases totales superan el 10%, por el alto coste que supondría separar estos gases en condensadores.

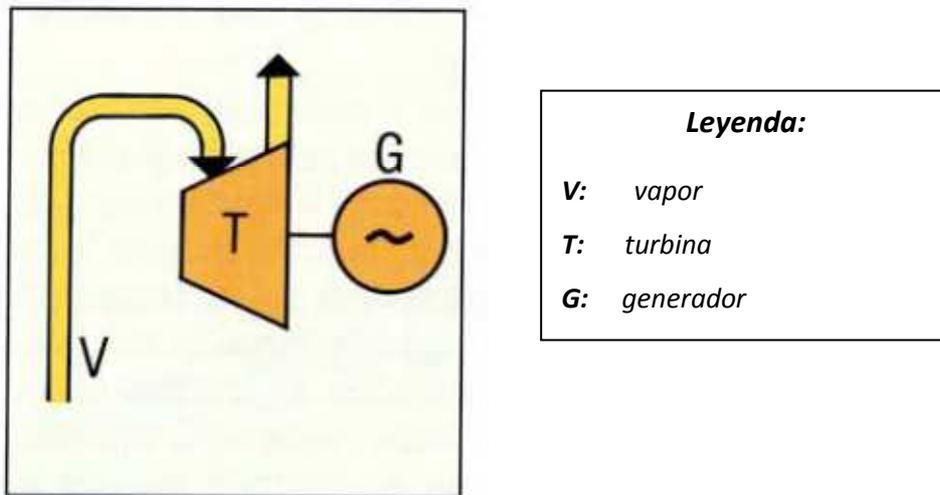
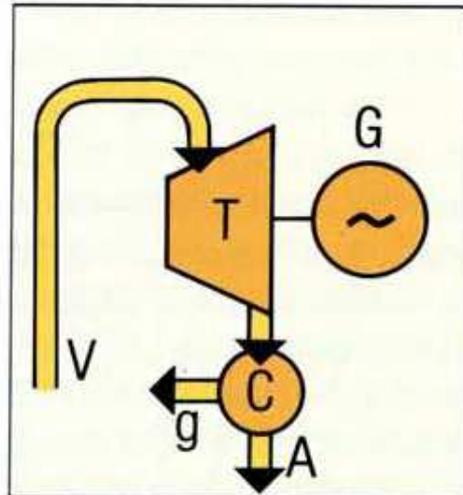


Ilustración 37. Ciclo directo sin condensación de una central de vapor seco.

- Ciclo directo con condensación: se trata del ciclo de vapor seco más común. En este ciclo, tras hacer circular el vapor del yacimiento por la turbina, es conducido a un condensador, donde el vapor es condensado y se extraen los gases que contiene. Destacan las centrales localizadas en las regiones de Matsukawa (Japón), The Geysers (EEUU) y Larderello (Italia).

**Leyenda:**

V:	<i>vapor</i>
A:	<i>agua</i>
g:	<i>gases extraídos</i>
T:	<i>turbina</i>
G:	<i>generador</i>
C:	<i>condensador</i>

Ilustración 38. Ciclo directo con condensación de una central de vapor seco.

- Ciclo indirecto con condensación y recuperación de aguas mineralizadas: Este tipo de ciclo surgió para evitar el paso por la turbina de los gases extraídos del yacimiento con un elevado nivel de corrosión, pues provocaba el deterioro de los álabes. En su lugar, el vapor corrosivo cedía su calor a un vapor limpio, que era el que pasaba por la turbina. Los minerales que más se recuperaban eran ácido bórico y amoníaco. A pesar del descenso energético tan significativo que producía este ciclo en comparación con uno directo, el valor de los minerales recuperados lo hacía competitivo. Hoy en día, gracias al desarrollo de nuevos materiales utilizados en las turbinas, y de obtención de minerales, no es necesario utilizar este tipo de ciclo. Dejó de utilizarse a partir de la segunda mitad del siglo XX, su uso destacó sobre todo en la central de Larderello, en Italia.

Las centrales de vapor seco deben disponer de un dispositivo que permita retirar partículas de gran tamaño, un centrifugador para las de pequeño tamaño y el condensado, puntos para evacuar el fluido condensado a lo largo de los conductos y un filtro que se encargue de los sólidos más pequeños y disueltos.

- **Centrales de ciclo binario:**

Estas centrales se utilizan en yacimientos de entalpía media, de 100 a 150° C, de rocas calientes (HDR), o bien en yacimientos que contienen un fluido con alta salinidad, en los que si se utilizara un ciclo abierto, se produciría corrosión en las turbinas al pasar el fluido por ellas. El ciclo binario emplea un ciclo de Rankine cerrado en el que por medio de intercambiadores, el fluido geotérmico aporta calor a un fluido binario, que pasa a estado vapor y es el que circula por las

turbinas y condensadores de la central. Tras el turbinado, este fluido binario es condensado y enviado de vuelta al intercambiador para repetir el ciclo. En yacimientos de fluido geotérmico con al menos 200 cal/kg puede emplearse como fluido binario agua, sin embargo, si tiene menos entalpía deben emplearse fluidos con menor punto de ebullición, como freones, isopropanos o isobutanos entre otros.

Al igual que un ciclo Rankine, pueden diseñarse distintas configuraciones de un ciclo binario, simple, con regeneración... Algunas de las centrales de ciclo binario más relevantes son las de Steamboat Spring en Nevada (EEUU), Mammoth Pacific, en California y The Huka Geothermal Power Plant, en Nueva Zelanda.

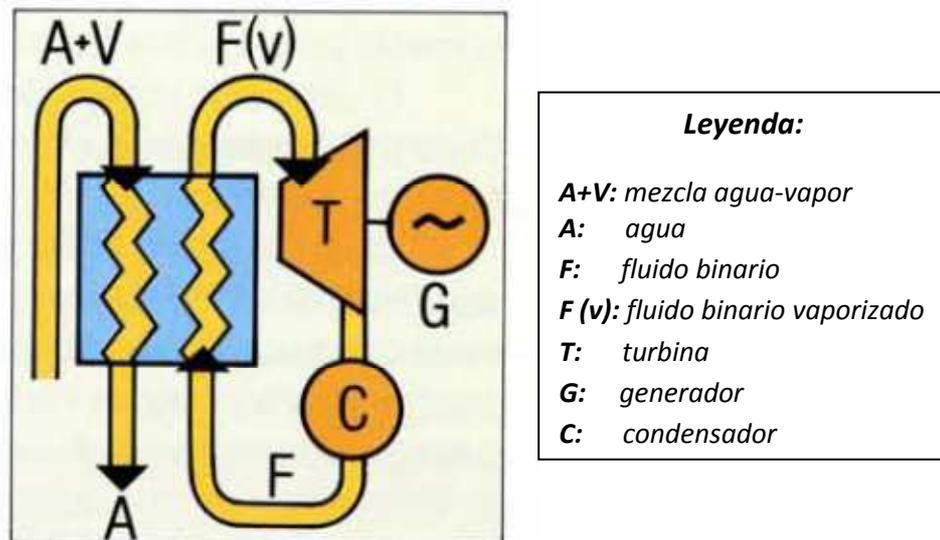


Ilustración 39. Ciclo binario básico.

Gracias a este tipo de centrales, resulta económicamente rentable la generación eléctrica a partir de yacimientos de media entalpía y de rocas calientes, pero para ello debe seguirse un proceso Orgánico Rankine (ORC, Organic Rankine Cycle) o Kalina:

- Proceso Orgánico de Rankine (ORC): Este tipo de ciclo emplea como fluido secundario un fluido orgánico, caracterizado por un bajo punto de ebullición y altas presiones de vapor a baja temperatura. En comparación con un ciclo Rankine simple, un ciclo binario con fluido orgánico ofrece las mismas prestaciones en un espacio más reducido, debido a las características de dicho fluido. La evolución de estos ciclos a lo largo de los años, ha permitido poder explotar en la actualidad yacimientos desde 75 °C con un rendimiento del 5.5% a 180°C al 12%.

El ORC presenta un gran inconveniente, y es la escasa flexibilidad que presenta al cambio de las variables del fluido geotérmico, como la temperatura, que en ocasiones sólo es posible saber con exactitud tras realizar el pozo de extracción.

Destacan las centrales de Landau en Alemania, Soultz- sous-Forêts en Francia, y la de Simbach-Braunau en Austria, ésta última con una temperatura de fluido geotérmico de 80 °C.

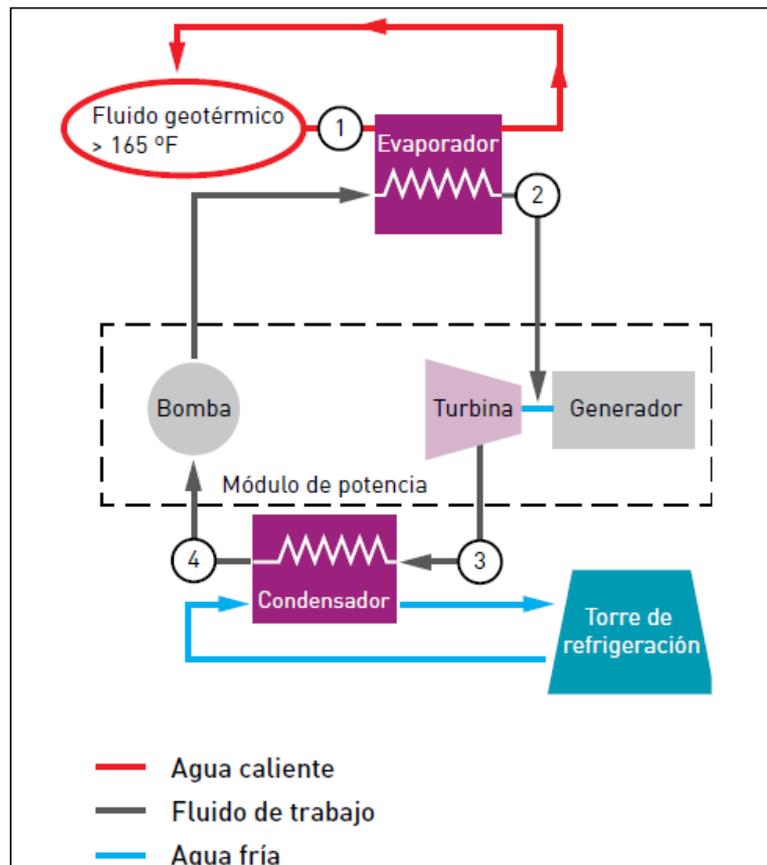


Ilustración 40. Esquema de funcionamiento de un ciclo orgánico de Rankine.

- Proceso Kalina: En este ciclo se utiliza como fluido secundario una mezcla de 2 productos químicos, suele emplearse agua y amoníaco, en unas proporciones variables para permitir que el fluido cambie de fase a unas condiciones de temperatura y presión concretas, de esta forma se consigue una mayor adaptación a la variación de temperatura del fluido geotérmico.

El funcionamiento es igual que el ORC, sin embargo, éste ofrece una mayor flexibilidad por la posibilidad de variar las proporciones del fluido secundario. Los rendimientos alcanzados en

estas plantas son superiores a las de fluido orgánico, van desde el 8.5% de un yacimiento de 80 °C hasta el 12% en los de 160 °C.

Destacan la central de ciclo Kalina situada en Unterhaching, Alemania, y en Husavik, en Islandia.

- **Centrales de ciclo combinado:**

Este tipo de centrales mezclan la tecnología de las plantas tipo flash y de las de ciclo binario. La máxima potencia la alcanzan en los yacimientos con vapor a alta presión.

En estos ciclos, el vapor extraído del subsuelo se conduce al conjunto de turbinado, donde se genera la potencia eléctrica, y de donde sale una mezcla de líquido y vapor, posteriormente, cede calor a un fluido secundario en un intercambiador y se reinyecta en el acuífero. El fluido secundario pasa a estado vapor, y genera electricidad tras el paso por las turbinas. Después se condensa y se bombea para repetir el ciclo.

Es posible variar el ciclo anterior, mezclando una central tipo doble flash y binario, aumentando la potencia obtenida, aunque también se produce un aumento del coste de instalación y mantenimiento de equipos, pues hacen falta más equipos.

El inconveniente que presentan estas centrales es el posible agotamiento prematuro del yacimiento, pues el agua es reinyectada a menor temperatura que en otros tipos de centrales, por lo que hace falta llevar un estricto control.

La planta Puna Geo Venture, en Hawai utiliza este tipo de ciclo desde 1991.

- **Centrales híbridas:**

La ventaja de estas centrales es la combinación de energía geotérmica con otras fuentes de energía, por lo que puede aumentarse la temperatura de vapor, y así mejorar la producción de potencia, en la actualidad existen varias combinaciones: biomasa, energía solar, recursos geopresurizados (emplean geotermia + gas natural), y centrales en producción de cascada.

A continuación puede verse la cantidad de potencia instalada por tipo de central y la evolución de MWe producidos en centrales geotérmicas a lo largo de la historia:

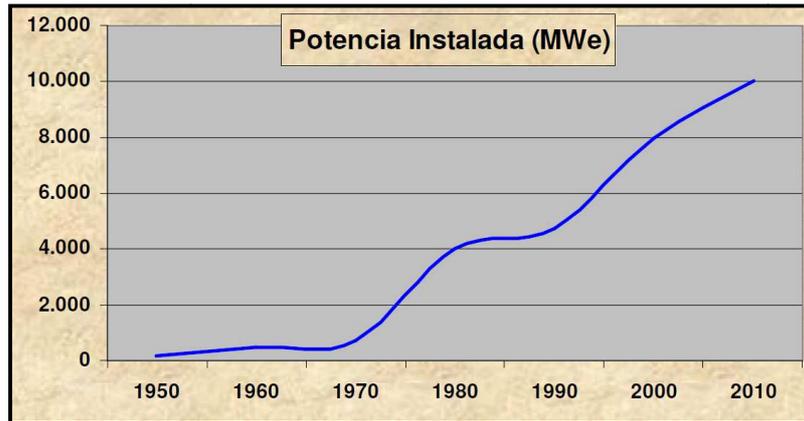


Ilustración 41. Evolución de la potencia instalada en centrales geotérmicas a lo largo de la historia.

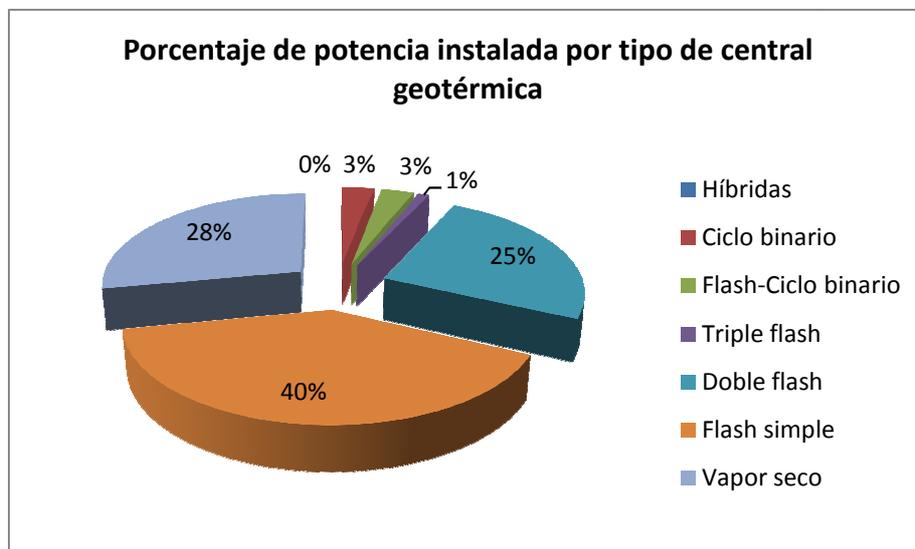


Ilustración 42. Distribución de tipos de centrales geotérmicas en el mundo.

Optimización en ciclos de centrales geotérmicas

Es posible optimizar el ciclo de las centrales geotérmicas, las técnicas actuales son:

- **Instalación de una bomba en el pozo de reinyección:**

Puede obtenerse electricidad adicional mediante la instalación de una bomba al final de dicho pozo. Tras completar el ciclo de la central, si el fluido geotérmico no es desechado en la superficie debe ser reinyectado en el acuífero, mediante la instalación de una bomba e invirtiendo el giro de los álabes, ésta se transforma en un generador, mediante el cual puede obtenerse electricidad de igual forma que

en una central hidroeléctrica, con la salvedad de que la altura es mucho mayor, puede llegar a unos 4000 m de caída.

Este proyecto presenta grandes inconvenientes, en primer lugar, no es posible realizarlo en cualquier yacimiento, porque tras el paso por la bomba, el fluido pierde presión y temperatura, lo que puede provocar la alteración y agotamiento prematuro del acuífero. En segundo lugar, los materiales de las bombas a instalar necesitan aguantar unas condiciones extremas, además la corrosión producida por el fluido. Por último, en el caso de avería de la bomba, resulta una misión muy compleja y altamente cara su reparación/sustitución, además durante esta tarea debería pararse el ciclo, lo que supondría grandes pérdidas económicas.

- **Uso en cascada:**

Tras pasar por el grupo de turbinas de la central geotérmica, el fluido del subsuelo puede presentar unas temperaturas atractivas para uso directo. En ese caso, en vez de reinyectarse al acuífero, se le hace pasar por las instalaciones deseadas. Este proyecto supone un gran ahorro, pues se reduce el número de sondeos a realizar comparado con los que habría que hacer en el caso de instalaciones no conectadas. Cabe destacar que este proyecto es utilizado en la actualidad con excelentes resultados.

Este uso presenta grandes inconvenientes, por una parte, reinyectar el fluido a tanta diferencia de temperatura con respecto a la extracción puede provocar un agotamiento precoz del acuífero, lo que supone daños ambientales y económicos. Por otra, la central geotérmica y las instalaciones deben estar muy próximas, ya que conforme aumenta la distancia, también la pérdida de calor del fluido.

Destaca la instalación en cascada en Klamat Falls, en Oregon, EEUU. En esta planta, se extrae fluido a una temperatura de 200 °C, saliendo de la central a unos 150 °C, a continuación se desvía en paralelo a una planta de refrigeración y alimenticia, el fluido sale a 100 °C y alimenta, también paralelamente, a unos invernaderos y conjunto de apartamentos, a modo de calefacción. Finalmente, el fluido a 50 °C sirve para calentar el agua de una piscifactoría, tras ello, se reinyecta en el acuífero a unos 20 °C.

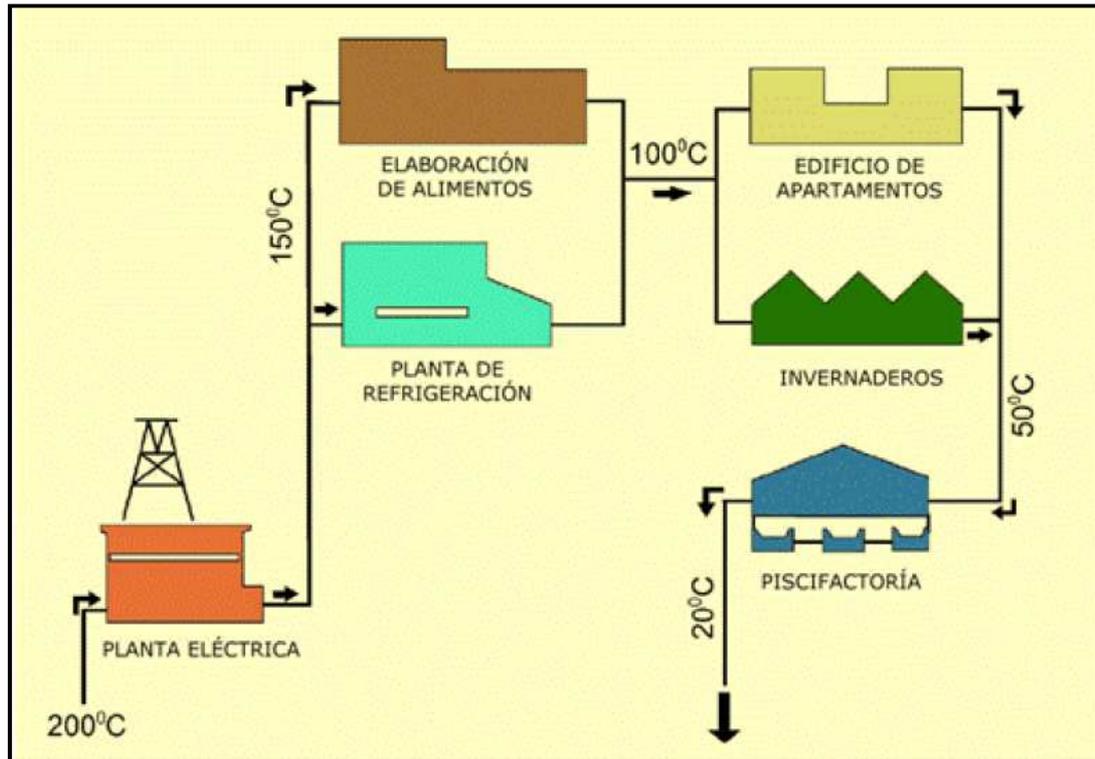


Ilustración 43. Esquema del circuito en cascada de la instalación geotérmica en Klamath Falls, en Oregon.

Explotación de los recursos geotérmicos de baja entalpía

A la hora de poder aprovechar la energía calorífica contenida en los yacimientos de baja y muy baja entalpía hay que prestar especial atención a los siguientes factores: caudal del fluido, temperatura y calidad del agua (sobre todo en cuanto a salinidad). El caudal y temperatura determinan las dimensiones del circuito, la calidad del agua define el tipo de explotación y esquema del ciclo, además la temperatura también establece la aplicación que se le dará al calor extraído del fluido geotérmico. En el caso de que el agua geotérmica tenga menos de 4-5 gramos de sal por litro puede utilizarse en la superficie mediante un ciclo abierto, en caso contrario, que suele ser lo normal, debe emplearse un circuito cerrado, en el que mediante un intercambiador de calor, el fluido geotérmico ceda calor al fluido que se utilizará en la superficie (bien para climatización o consumo), ya que la alta salinidad puede resultar corrosiva en la instalación. Este tipo de explotación en la que se requiere sondeos de extracción e inyección se denomina explotación por dobletes. El intercambiador empleado suele ser de placas y de titanio, para reducir el efecto corrosivo.

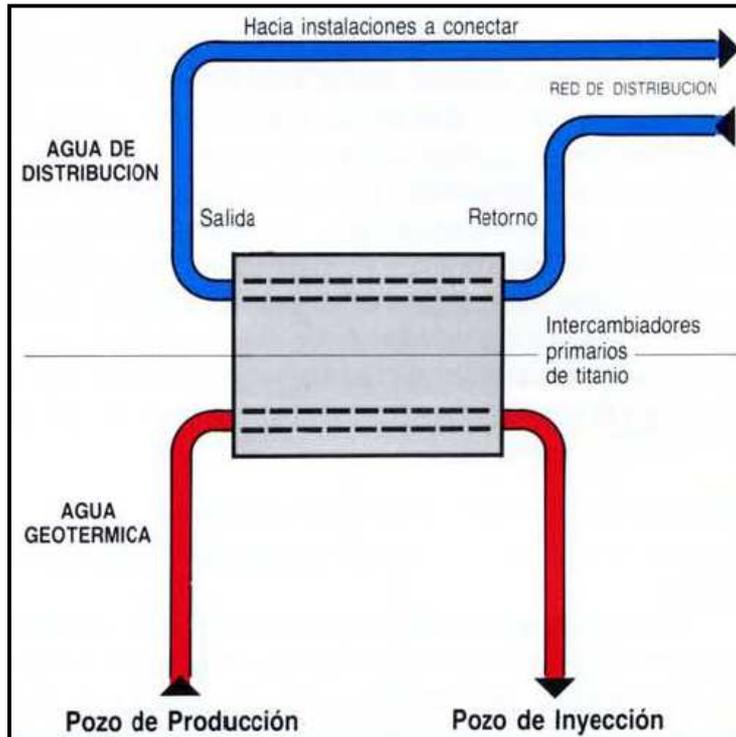


Ilustración 44. Ciclo básico de utilización de energía geotérmica de baja/muy baja entalpía.

Características de la energía geotérmica

Ventajas de la geotermia frente a otras fuentes de energía

Debido a la incesante búsqueda de fuentes renovables que sustituyan al petróleo, carbón y gas natural, la energía geotérmica es una buena opción que puede solucionar los aspectos negativos que los combustibles fósiles plantean. Presenta las siguientes ventajas:

- Se trata de una energía renovable. A pesar de que la Tierra se enfría constantemente, lo hace a un ritmo de unos 120°C cada mil millones de años, este enfriamiento se puede suponer lo suficientemente lento como para asegurar calor del subsuelo para muchas generaciones futuras, y por tanto, para considerar a la energía geotérmica como un recurso inagotable.

La vida de la explotación de un yacimiento suele durar 30-40 años, durante este tiempo, la temperatura de la zona del subsuelo explotada desciende algunos grados, sin embargo, tras el período de explotación, se desinstala la planta para que el suelo regrese a su temperatura inicial. En explotaciones destinadas a climatización, en verano se inyecta calor al subsuelo procedente de la superficie, por lo que en estos yacimientos la pérdida de temperatura es nula o prácticamente nula.

- Energía limpia. Al no quemar combustibles para producir electricidad puede decirse que prácticamente no genera gases contaminantes. Para las explotaciones destinadas a calefacción, ACS y demás, únicamente necesitan electricidad para alimentar los compresores, bombas de calor y ventiladores. En el uso en viviendas, si comparamos la emisión de CO₂ al año con el gasoil, electricidad y gas natural, en el caso de utilizar recursos geotérmicos se contamina mucho menos. Si se utiliza directamente el calor extraído del subsuelo, las emisiones saldrían prácticamente nulas. Si comparamos los sistemas de refrigeración geotérmicos con los de aire acondicionado, los geotérmicos emplean menor cantidad de refrigerante y están sellados en fábrica, por lo que nunca o casi nunca hay que recargarlos, de esta forma se evita en gran medida la destrucción de la capa de ozono que provocan los sistemas de aire acondicionado.

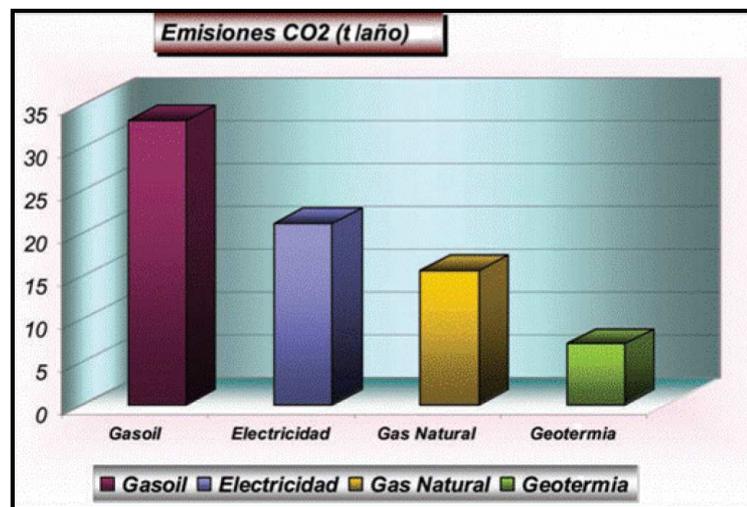


Ilustración 45. Cantidades de CO₂ emitidas al año en la climatización de una vivienda-tipo de 150 m².

En el caso de las centrales geotérmicas, sí que existen emisiones de CO₂ y SO₂, pero en cantidades mucho más reducidas que otras plantas de producción de electricidad. Las menos contaminantes son las de ciclo binario, ya que al emplear fluidos secundarios, el fluido que escapa a la atmósfera es vapor de agua. En el resto de centrales, las partículas en suspensión y arenas se filtran y secan para depositarlos en un lugar apropiado. Algunas partículas se tratan de minerales, zinc, sílice o azufre, que tras separarlos del fluido pueden venderse.

	NO _x (g/kWh)	SO ₂ (g/kWh)	CO ₂ (g/kWh)
CARBÓN	2	4.7	996
PETRÓLEO	1.8	5.5	760
GAS NATURAL	1.3	0.1	551
PLANTA FLASH	0	0.1	27
PLANTA BINARIA/FLASH	0	0	0
PLANTA BINARIA	0	0	0

Tabla 6. Emisiones en g/kWh emitidas en distintas centrales de producción eléctrica.

- Impacto ambiental reducido. Las instalaciones geotérmicas destinadas para las viviendas son mucho más pequeñas que las instalaciones que consumen combustibles fósiles, ya que el grueso de la instalación se encuentra bajo tierra.

En el caso del espacio ocupado por las centrales geotérmicas, también es mucho más reducido que las centrales nucleares o de carbón, de hasta unas 15 veces menor. Esto es debido a que este tipo de centrales no consume combustible para la producción de electricidad, por lo que no se necesitan espacios para su transporte ni almacenamiento, y como su fuente de energía se encuentra bajo la superficie, no ocupa superficie terrestre. Al ocupar un área menor que sus otras rivales, se evita la construcción de presas y tala de grandes áreas de bosque, lo que contribuye a una conservación del medio ambiente.

- Energía rentable. La instalación de un sistema geotérmico en viviendas resulta inicialmente más costosa que un sistema de fuel-oil o gas natural, sin embargo, el rendimiento es notablemente superior, y los costes de mantenimiento, menores. Si en una casa se instala calefacción mediante geotermita, existe un ahorro entre el 30 y 70% de energía, ya que no consume combustibles fósiles. Si se implanta refrigeración, el consumo eléctrico es menor, ya que estos sistemas son más eficaces que los usados comúnmente, además el consumo eléctrico en las horas pico de demanda es menor porque el equipo usado es menos potente. En cuanto a climatización el ahorro ronda el 20-50% de energía, comparado con los sistemas de climatización tradicionales. La amortización del equipo se produciría a corto-medio plazo.

La construcción de una central geotérmica obliga a una costosa inversión inicial, que a lo largo de los años de explotación se verá amortizada. Lo más llamativo del coste de estas plantas, es la cantidad económica que se requiere para realizar las fases de exploración de yacimientos, aunque no difiere mucho de los invertidos en búsquedas de yacimientos minerales y petrolíferos.

En comparación con centrales que emplean combustibles fósiles, los costes de la instalación de una central geotérmica son:

Tipo de central	Coste de la instalación de una central geotérmica (%)
Central de gas natural	150
Central de fuel oil	120
Central de carbón de alta calidad	100
Central de carbón pobre	50

Tabla 7. Coste de una central geotérmica comparada con otro tipo de centrales.

- **Eficiencia energética.** Los sistemas de calefacción y climatización geotérmicos requieren de bombas menos potentes que los convencionales, debido a que extraen calor del subsuelo, que se encuentra a mayor temperatura que el ambiente. Si el edificio a climatizar se encuentra en una zona con grandes variaciones de temperatura, el rendimiento de los sistemas tradicionales decae considerablemente en comparación con los geotérmicos. Por lo general, un sistema geotérmico es capaz de producir una cantidad de energía térmica, o frigorífica, dos a cuatro veces superior a la eléctrica que consume.

Gracias a estas características, las bombas de calor geotérmicas han sido calificadas por la Agencia de Protección Medioambiental de EEUU como la tecnología de enfriamiento y calefacción más eficiente del mercado.

- **Fuente de energía sostenible.** Los recursos geotérmicos, al encontrarse bajo tierra, ofrecen energía calorífica constante las 24 horas al día durante 365 días al año, es decir, es independiente de la climatología, caudal de río... y de la hora a la que nos encontremos, lo que resulta muy ventajoso frente al resto de energías renovables, puesto que permite obtener una cantidad de electricidad constante.
- **Accesible para todos.** Otra gran ventaja frente al resto de energías renovables y combustibles fósiles es su posible acceso para todo el mundo. Ciertas energías renovables necesitan fuentes de energía que no se encuentran en todas las zonas, como la eólica, el viento no sopla en todos los lugares con la suficiente velocidad como para que resulte económico instalar molinos, sin embargo, la energía geotérmica se encuentra en todo el territorio de nuestro planeta. Las tecnologías actuales permiten aprovechar esta energía, desde muy baja hasta alta entalpía, por lo que sería posible que todos los hogares dispusieran de climatización y/o electricidad.

- Desarrollo socioeconómico. Según diversas investigaciones, puede decirse que la extracción de energía a partir de recursos renovables genera mayor número de puestos de trabajo que los dedicados a combustibles fósiles, tanto en la construcción de la planta como en la explotación y mantenimiento. Además los trabajos dedicados a energía geotérmica son estables, de gran calidad, diversificados y de larga duración, según la Geothermal Energy Association (GEA) de EEUU.

Los yacimientos geotérmicos de media y alta temperatura suelen encontrarse en zonas rurales o poco pobladas, por lo que su explotación en estas zonas proporciona una gran oferta de empleo, lo que contribuye a un desarrollo de estas áreas, normalmente más desfavorecidas.

	Fase de construcción e instalación (trabajos/MW)	Fase de operación y mantenimiento (trabajos/MW)
Geotermia	4	1.7
Gas natural	1	0.1

Tabla 8. Comparación de número de trabajos por MW producido en centrales geotérmicas y de gas natural.

- Desarrollo de la agricultura. Debido a la energía geotérmica, puede plantearse la fabricación de invernaderos que permitan cultivar cosechas en cualquier época del año, aunque las temperaturas exteriores no lo permitan. Las ventajas de la geotermia como climatización sobre los sistemas convencionales hace que resulte rentable. Gracias a esto, pueden obtenerse ciertos productos en cualquier época del año, lo que mejora la capacidad productiva del país.
- Disminución de la sobrexplotación pesquera. El uso de la geotermia en piscifactorías reduce la necesidad de pesca de las especies criadas.
- Consumo en la superficie de extracción. La energía extraída del subsuelo debe utilizarse sobre el área que cubre la perforación, o en un área cercana. Esto se debe sobre todo a la alta cantidad de desperdicios y pérdidas de energía que se produce cuando el fluido se transporta grandes distancias. De esta forma, se evita construir conductos que transporten el fluido y alteren el medio ambiente.
- Bajo coste en el mantenimiento de la planta. A diferencia de otras centrales, las geotérmicas son más económicas de mantener.
- Las plantas geotérmicas presentan una gran eficiencia a cargas parciales, además de una regulación fácil.

- Pueden instalarse unidades modulares cercanas a la planta geotérmica para que suministren potencia adicional, en el caso de tener que incrementar la producción eléctrica por picos de demanda.

Inconvenientes de la geotermia frente a otras fuentes de energía

La energía geotérmica también tiene aspectos negativos que hay que evaluar:

- Contaminación de aguas próximas. El agua extraída del acuífero y los fluidos empleados en la perforación contienen una serie de minerales y sustancias como mercurio, boro o arsénico, que en cantidades considerables, y en caso de eliminar el fluido geotérmico en la superficie, puede causar una contaminación del agua cercana. Si los conductos de inyección y extracción tienen grietas o fugas, este fluido puede escapar a capas superiores al acuífero, y después filtrarse en ríos y lagos cercanos, lo que provocaría un gran desastre ecológico.

Para evitar este problema, es necesario realizar un análisis continuo del ciclo de potencia, para ver si existen grietas, y si las hay, saber su tamaño para valorar una posible reparación. También es necesario revisar periódicamente la composición del fluido en centrales que descargan en la superficie.

- Desmoronamiento del terreno. En las ocasiones en que el agua del acuífero geotérmico no se reinyecte, porque por sus características pueda ser evacuada o aprovechada en la superficie, la velocidad de extracción será superior a la de inyección de agua de forma natural por las aguas subterráneas, lo que puede producir una compactación de las rocas que forman el acuífero, y con ello un hundimiento del terreno.

Debe controlarse el caudal de extracción, ya que debe haber un equilibrio. Los estudios realizados sobre el acuífero tienen que asegurar su no desmoronamiento en caso de pérdida de presión.

- Contaminación sonora. Las perforaciones necesarias para investigar los yacimientos y para hacer los pozos de extracción e inyección son muy ruidosas.

Si el terreno sobre el que se realizan perjudica a poblaciones cercanas o a la fauna local, deben tomarse medidas para disminuir este ruido, normalmente mediante contenedores de vapor y silenciadores.

- Contaminación visual. En la mayoría de los casos, las zonas donde se sitúan las centrales geotérmicas son áreas paisajísticas y/o con gran número de visitantes, ya

sea por el atractivo entorno, o porque existen géiseres, aguas termales, volcanes de fango...

- Posibilidad de seísmos. Si la central geotérmica se encuentra en una zona altamente sísmica, la reinyección del fluido al acuífero puede provocar terremotos que dañen la planta o los circuitos de la instalación, lo que facilita la aparición de grietas por donde escapan fluidos. Es un caso similar y relacionado con el desmoronamiento del terreno.

Con el fin de evitar esta situación debe controlarse la presión a la que se reinyecta el fluido geotérmico.

- Posibilidad de erupciones hidrotermales. Las probabilidades que se produzcan son mínimas. Se producen por un aumento de la presión en el acuífero, que provoca que el vapor contenido en él empuje las capas superiores, provocando su salida a presión en la superficie, donde aparece un cráter.

Mantener el acuífero a una presión fija reduce las probabilidades que se produzca.

- Escapes provocados por un desnivel del terreno. Normalmente las plantas geotérmicas se encuentran en terrenos con desniveles y accidentados, esto puede favorecer los deslizamientos de materiales sobre el suelo. En el caso que caigan sobre las cabezas de los pozos o en las tuberías provocaría escapes del fluido.

Una estabilización de las pendientes, durante la fase de construcción de la planta, evita los accidentes por deslizamiento, aunque puede reducir la riqueza visual del entorno.

- Recuperación del yacimiento demasiado lento. Un gran inconveniente de la energía geotérmica a gran escala es el plazo de recuperación del yacimiento. Durante la fase de explotación, 3 o 4 décadas, la temperatura del acuífero desciende unos grados en comparación con su temperatura inicial, mientras que desde que se deja de explotar, la recuperación de esta temperatura inicial puede llegar a ser de siglos. Este es, quizás, el mayor inconveniente de este tipo de extracciones, pues puede provocar una gran alteración en la flora, y por consecuencia, en la fauna de la región.

Realizar un estudio riguroso a la hora de decidir la distancia entre pozos de reinyección y extracción, puede evitar o reducir este problema medioambiental, además de un problema de agotamiento térmico anticipado.

- No accesible para todos económicamente. El coste que supone la instalación de equipos geotérmicos de baja y muy baja entalpía hace que muchas familias no

puedan disponer de esta energía, aunque sus hogares se encuentren en zonas idóneas para su uso. Este es un problema de todas las fuentes renovables.

- Pozos difíciles de reparar. No es frecuente el deterioro de un pozo de la planta, sin embargo cuando se produce, es un gran inconveniente, ya que además de la gran inversión que requiere y de la complejidad de la reparación, hay que añadir las pérdidas económicas que se producen, pues durante el arreglo es necesario que se detenga el ciclo.
- Rendimiento más bajo que las centrales competidoras, entre el 11 y 13%.

Panorama a nivel nacional de la geotermia

Historia de la geotermia en España

La estructura geológica del suelo español posee grandes indicios de la existencia de recursos geotérmicos importantes en el subsuelo. Algunos de estos indicios son:

- Gran cantidad de manifestaciones termales, en especial en la costa mediterránea.
- Movimientos sísmicos continuos, aunque bien la inmensa mayoría no son perceptibles por el ser humano.
- La mayoría de cadenas montañosas del territorio español son de eras recientes, formadas a partir de una actividad tectónica que hoy en día continua desarrollándose.
- Elevado flujo de calor en la zona de Levante.
- Volcanismo reciente y actual en las regiones de Canarias, Olot, Ciudad Real y sureste de la península.

Debido a estos indicios, y a la crisis energética de 1973, a principios de los años setenta comenzó a desarrollarse una investigación del subsuelo español, con el objetivo de conocer los recursos geotérmicos que ofrecía.

Ninguno de estos resultados sirvió para realizar proyectos, debido en parte a falta de financiación, de planificación y costes energéticos similares con otras fuentes de energía. Tan sólo se desarrollaron proyectos destinados a balnearios.

Sin embargo, con el paso de los años, se emprendieron distintos proyectos, en el año 2005 la potencia instalada para obtener calor del subsuelo era de 22.28 MW. Ésta energía se destinó a invernaderos y algunas viviendas, sólo había instaladas unas 300 bombas de calor. A finales de 2009, la potencia aumentó hasta los 80-100 MW.

En el 2014 la potencia instalada es de sólo 150 MW, debido principalmente a falta de financiación por parte del gobierno, y al espectacular crecimiento que han experimentado otras fuentes renovables, como la eólica y solar. Cabe añadir que España no produce electricidad a partir de la geotermia, sin embargo, tiene acordado con la Unión Europea producir al menos 50 MW para 2020.

En cuanto a baja y media entalpía, destaca el uso de la geotermia para invernaderos, como los situados en Cartagena (Murcia), Mazarrón (Murcia) y Zújar (Granada), y para balnearios, como los de Lugo, Montbrió del Camp, Arnedillo (La Rioja), Sierra Alamilla (Granada)...

Potencial de la geotermia en España

- **Geotermia de muy baja y baja entalpía**

En la geotermia de muy baja entalpía, el suelo español resulta idóneo para la climatización de los hogares, ya que debido a la radiación que recibe, permite una temperatura a poca profundidad superior a la de otros países europeos, además esta absorción de calor se ve favorecida en muchas zonas que poseen escasa vegetación, pocas lluvias y corta temporada de nieve. En la siguiente figura puede verse la temperatura media del subsuelo español en distintas épocas del año, a unos 15 m la temperatura es de unos 20° C durante todo el año, lo que resulta bastante atractivo para la climatización, sobre todo si nos comparamos con nuestros vecinos europeos, que emplean este tipo de climatización a temperaturas mucho menores a la misma profundidad.

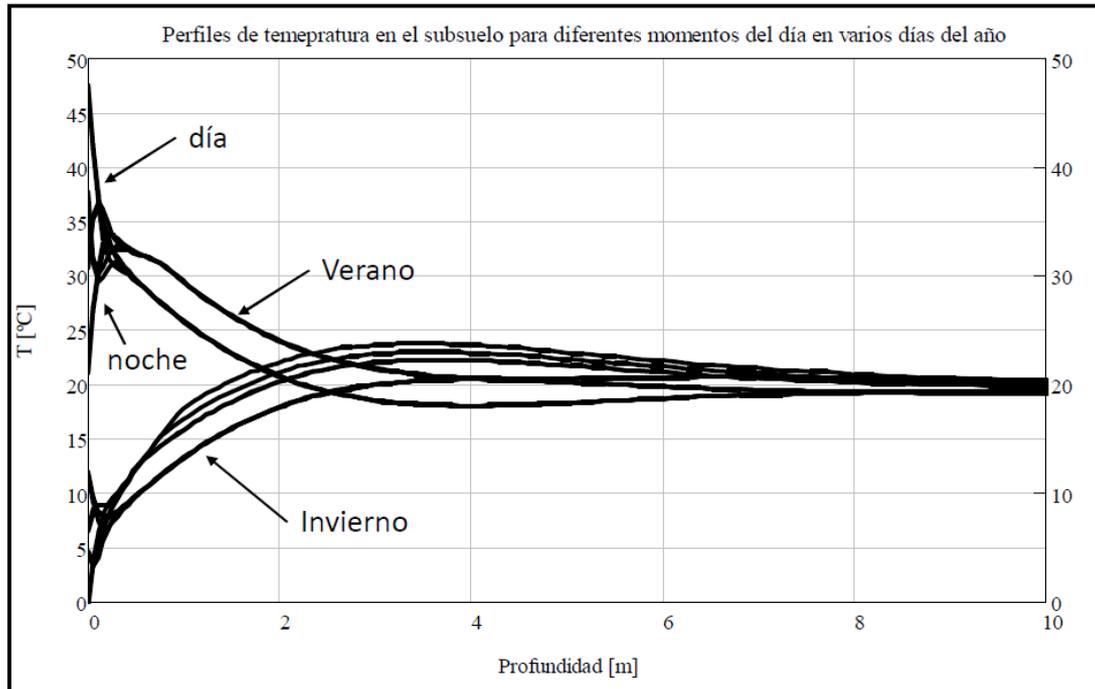


Ilustración 46. Evolución de la temperatura media del subsuelo español en diferentes momentos del día y estaciones.

Para encontrar yacimientos de baja entalpía y zonas permeables en el subsuelo español, debemos perforar unos 1500-2500 m en zonas con gradiente geotérmico normal, y unos 1000 m en gradiente anómalo. En España, estos yacimientos se sitúan en tres grandes bloques: grandes cuencas sedimentarias y zonas de cordilleras y depresiones de éstas.

- Grandes cuencas sedimentarias. Existen 5 grandes cuencas:
 - Cuenca del Duero. Con una temperatura de 60 a 80 °C en una profundidad que va de 1200-2000 m. El agua destaca por su gran salinidad.
 - Cuenca del Ebro. Tiene temperaturas de 50 a 100°C, entre los 1000 y 3000 m, sin embargo, a más de 4000, las temperaturas ascienden a más de 150°C.
 - Cuenca Tajo-Mancha-Júcar. Presenta unas variaciones de 60 a 90°C a profundidades de 1000 a 3000m. El agua tiene grandes variaciones de salinidad.
 - Cuenca del Guadalquivir. El rango de temperaturas va hasta unos 70°C, por lo que su potencial no es muy relevante, sin embargo, en las zonas del límite subbético, a unas profundidades superiores a los 3000 m se encuentra fluido geotérmico a más de 150 °C, por lo que esta zona podría considerarse de media temperatura.

- Cuenca Norte-Cantábrica. En esta región pueden encontrarse yacimientos de 40 a 90 °C a unos 500-3000 m bajo la superficie.
- Cordilleras:
 - Cordilleras Costero-Catalanas. En estas cordilleras existen fallas de borde, con un fluido geotérmico de baja o media salinidad, y a unos 60-90 °C entre los 500 y 2000 m bajo tierra. y aguas termales que superan los 60 °C en la superficie. Algunos estudios creen que puede haber fluido a más de 120 °C.
 - Cordilleras Béticas. Contiene gran cantidad de almacenes de distinta profundidad y temperatura, y fallas y fracturas, que conectan los almacenes más profundos con los más superficiales. La temperatura varía de 60 a 90 °C, desde los 1000 a 2500 m.
- Galicia y otras zonas de Salamanca y Cáceres. En estas zonas pueden encontrarse almacenes de fluido geotérmico a unos 50-90 °C en profundidades de 500 a 2000 m. Sin embargo, en regiones como Lugo, Ourense, Molgas y Rio Caldo, entre otros, se alcanzan temperaturas de 130 °C a esas profundidades. Además se estima que puede haber almacenes de 200 °C a unos 4000-5000 m, aunque de muy poca permeabilidad, por lo que el calor debería extraerse mediante técnicas EGS.

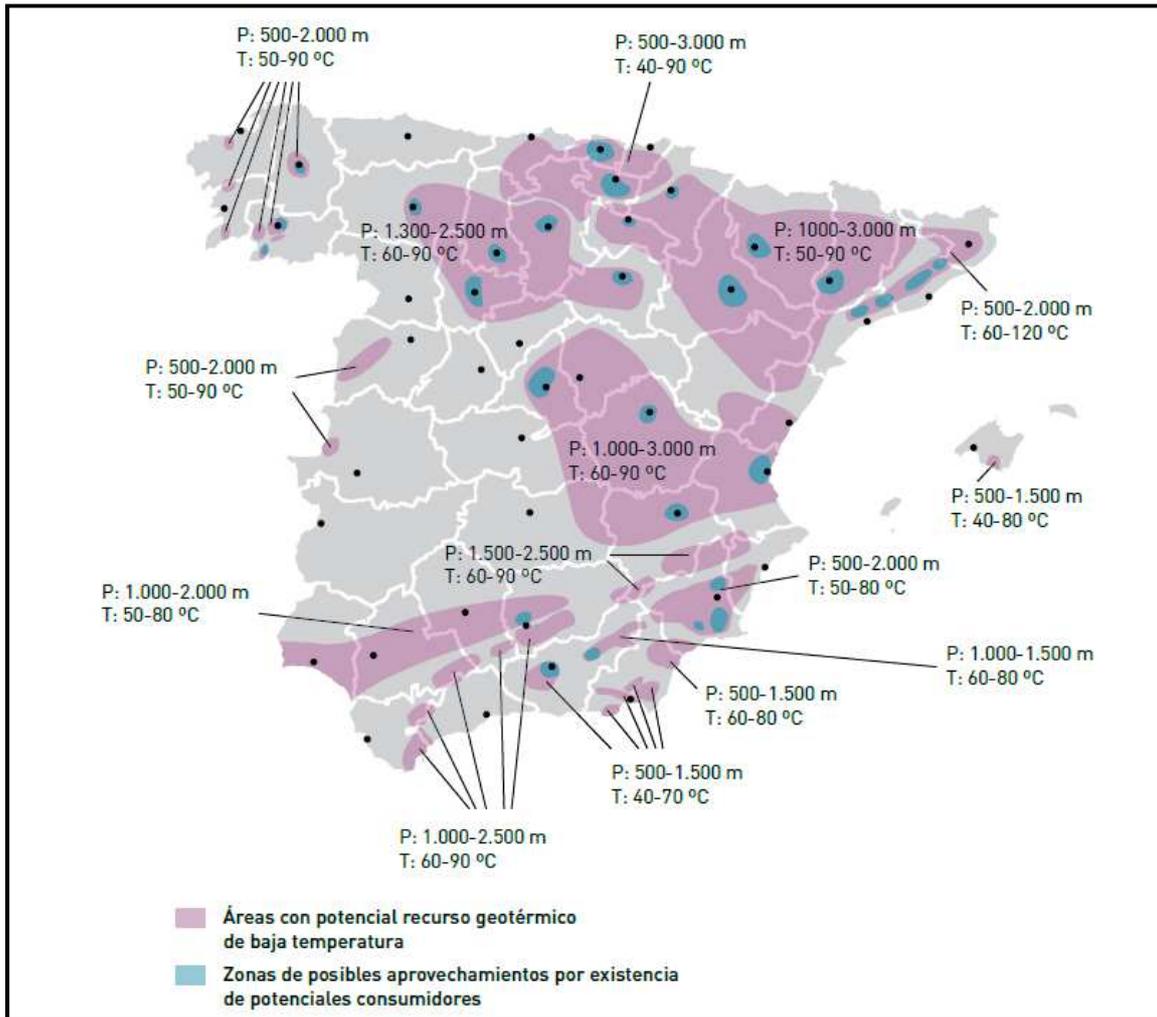


Ilustración 47. Recursos de baja temperatura y posibles aprovechamientos en España.

- **Geotermia de media entalpía**

Estos yacimientos están en el rango de 100-150 °C, se sitúan a unos 3500-4000 m en áreas con gradiente normal en cuencas sedimentarias, y a unos 2000 m en gradiente anómalo en áreas volcánicas.

También existen regiones donde, debido a la información geológica de los alrededores, es posible que a unas profundidades de 3500-5000 m haya acuíferos permeables de media entalpía (áreas con potencial recurso geotérmico de media temperatura):

- Zona del País Vasco, la Rioja, Burgos, Huesca, Navarra y Zaragoza. Abundan los materiales permeables mesozoicos con una temperatura de 100-120 °C a unos 3500-5000 m.

- Norte de la cuenca de Madrid-Guadalajara y depresión del Guadalquivir. A unos 3500-4000 m pueden encontrarse acuíferos de media entalpía, aprovechables mediante la tecnología actual.
- Región bética de Murcia y sur de Alicante. A más de 2500 m se ha encontrado un gradiente geotérmico anómalo, lo que puede ser muy útil para producción eléctrica.

Hay regiones donde las prospecciones y estudios geológicos realizados aseguran con mayor probabilidad la existencia de acuíferos de media entalpía:

- Jaca-Sabiñanigo. Yacimiento de unos 170-180 °C a unos 3500-4500 m.
- Cuenca de Madrid. Debido a la escasa permeabilidad, podría extraerse calor a 140 °C y 3400 m de profundidad mediante EGS.
- Lebrija. Posee rocas permeables a 150 °C en unos 3500 m.
- Cuenca de Granada-Lanjarón. Existen regiones permeables con temperaturas de 100-120 °C a unos 1500-2500 m.
- Sierra de Alhamilla. Hay acuíferos de mármol de unos 100 °C a 1000-1500 m de la superficie.
- Región de La Selva-Vallés y Pirineo Axial. Algunas fallas alcanzan los 110-130 °C a unos 1500-2000 m.
- Ciertas áreas de Galicia, Salamanca y Extremadura. Existen zonas puntuales de 110- 130 °C a unos 1500-2000m, entre los yacimientos de baja entalpía.

- **Geotermia de alta entalpía**

En este tipo de geotermia entran sólo los yacimientos de más de 150 °C asociados a zonas volcánicas, por lo que sólo se localizan en las islas Canarias.

Se han realizado estudios en las islas de La Palma y Lanzarote, descubriéndose yacimientos de más de 300 °C. El motivo de tan alta temperatura es que el tipo de fluido contenido en el acuífero, es aire con abundante CO₂, y se encuentra cercano a una cámara de magma. Por lo tanto, estos recursos pueden considerarse como HDR.

En Tenerife se han realizado investigaciones más exhaustivas, estimando recursos de hasta 220°C, sin embargo, los escapes de fluido de los acuíferos analizados interfieren con los de otro somero de agua fría, impidiendo la extracción de calor mediante las técnicas actuales. Investigaciones más recientes, ven probable la existencia de techos impermeables de acuíferos de alta entalpía, a 1500-2000 m, aunque aún no se ha confirmado.

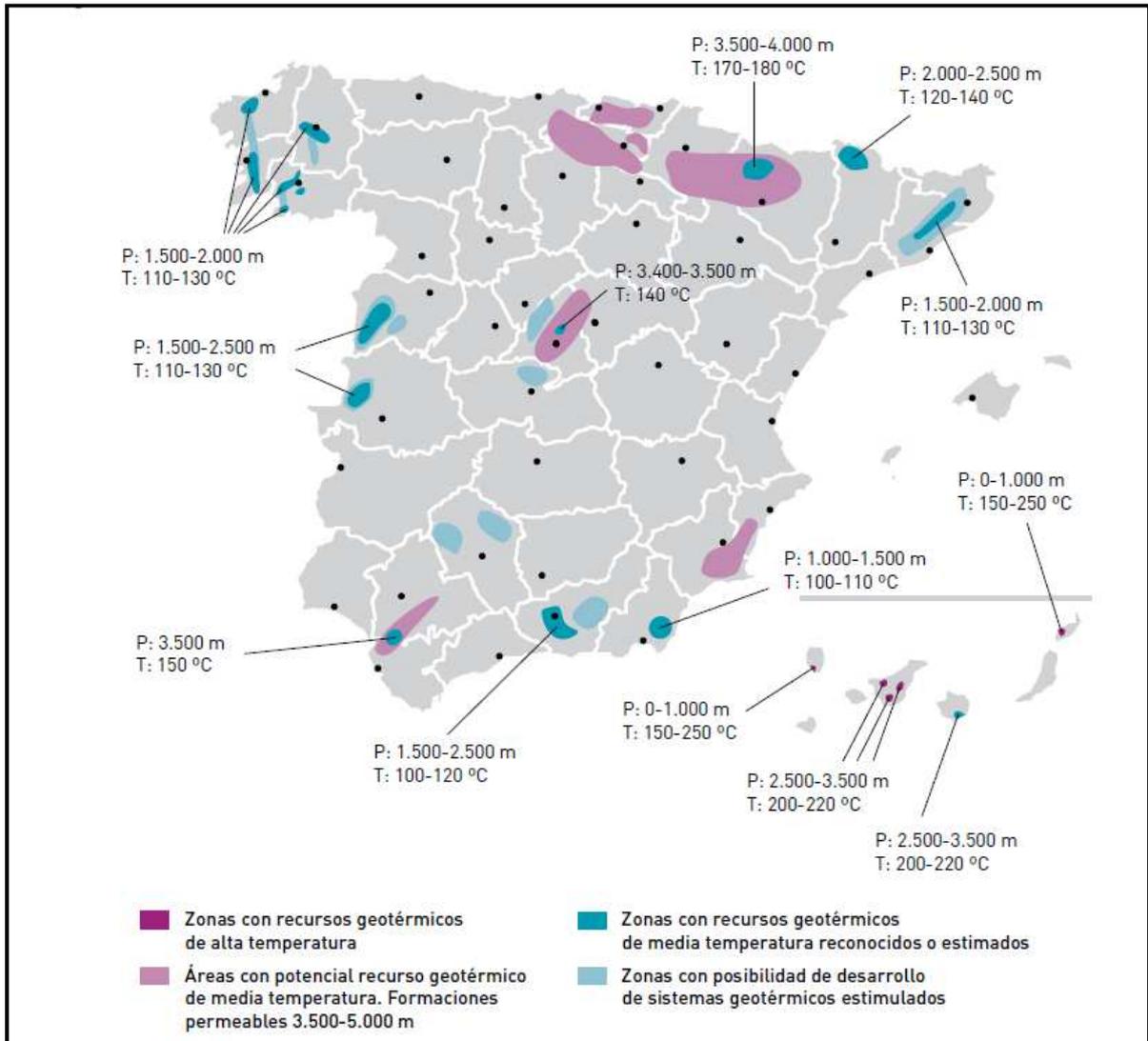


Ilustración 48. Recursos de media y alta temperatura y posibles aprovechamientos en España.

No desarrollo de la geotermia en España

A pesar de las características del subsuelo español, este tipo de energía no se ha llegado a desarrollar. Los motivos más destacados son los siguientes:

- **Clima:** España cuenta con distintos climas en función de la zona donde nos encontremos: inviernos suaves y veranos cálidos en la costa mediterránea, andaluza y Baleares, estaciones con temperaturas suaves en la costa cantábrica y Galicia, y temperaturas cálidas y constantes durante todo el año en Canarias. Debido al clima, los períodos de calefacción son más cortos que en el resto de Europa, y la refrigeración, excluyendo el incremento de ventas que se ha

producido en los últimos 5 años de aire acondicionado, se trata de un bien no tan necesario del cual puede prescindirse en la mayoría de las regiones.

- Límite de exportación: los principales fabricantes de bombas de calor de Suecia, Alemania, Francia, Italia y EEUU mayoritariamente, han llegado al límite en su fabricación estos últimos años, debido a la gran demanda de pedidos del norte y centro de Europa, lo que ha provocado que países no habituales como España fueran atendidos posteriormente.
- Ahorro en hipotecas: tanto los compradores de viviendas como los vendedores, han preferido pagar menos de hipoteca y no instalar sistemas geotérmicos en sus nuevas casas, a optar por un sistema de energía mucho más limpio y que, a la larga ahorra mucho más dinero.
- Poca financiación: a pesar de ser una fuente renovable y capaz de proporcionar igual o más energía que cualquier otra, la energía geotérmica no ha encontrado el apoyo que si lo han tenido otras, como la solar y eólica, para su financiación. Últimamente, casas de nueva construcción sí que cuentan con más apoyo para poder instalar bombas de calor geotérmicas.
- Falta de reglamentación: Tanto instaladores, empresas de sondeos, y posibles clientes han tenido que demorar en exceso o rechazar sus planes de instalar sistemas geotérmicos por falta de reglamentación en nuestro país.

El crecimiento de la geotermia en España es posible, algunos factores que lo posibilitarían son:

- Crear un marco legal estable y conocido.
- Dar apoyo a I+D+i.
- Formar equipos de profesionales que puedan incorporar el ámbito de la geotermia a las normas y códigos ya existentes.
- Dar a conocer las características de este tipo de energía a la sociedad, ya que para la mayoría es prácticamente inexistente.
- Subvencionar la mayor parte de las perforaciones por el Gobierno.

Primeras centrales geotérmicas españolas

- **Guadix**

Actualmente está prevista la construcción de una planta geotérmica de ciclo binario, de alta entalpía en la región de Guadix, Granada, con una generación prevista de 10 MW y una vida útil de cerca de 30 años.

Se calcula que dará cobertura eléctrica a 5000 viviendas de las cercanías, por lo que hay que perforar unos 3500 m hasta llegar a unos 220 °C. Ello supondrá un coste de unos 30 millones de euros, y está previsto construirse en dos años.

Este proyecto se inició en 2012 por las empresas de Bleninser y Ciclo Binario, por lo que se trata de la primera central en nuestro país que obtendrá electricidad a partir de energía geotérmica, sin embargo, aunque estaba previsto que las obras finalizaran en el 2014, éstas aún no han terminado.

- **Güímar**

A principios de 2014, el municipio de Güímar, Tenerife, firmó un acuerdo con la empresa Arllen Development para construir una central geotérmica de alta entalpía, junto a una depuradora de aguas residuales y desaladora de agua de mar.

Este proyecto dará unos 100 puestos de trabajo a la región y se prevé que comience a funcionar en el 2018, tras acabar todos los estudios necesarios en el 2016.

La tecnología a emplear será la de HDR, ya que no existe fluido geotérmico que captar. A su vez se empleará un circuito en cascada, aprovechando el calor sobrante. Este calor será utilizado para transformar el agua del mar en potable, mediante vaporización en una desaladora, y también para alimentar una depuradora de aguas residuales, para conseguir agua para la agricultura de la zona.

CÁLCULOS

5. MODELIZACIÓN DE CENTRAL GEOTÉRMICA Y ESTUDIO DE DIFERENTES TECNOLOGÍAS

Planteamiento

Las páginas siguientes muestran una modelización del ciclo de dos tipos de tecnologías para centrales geotérmicas. Con esta modelización se pretende lograr la mejor configuración para la futura central que se instalará en Granada, a partir de las condiciones de un yacimiento de alta entalpía real en dicha región, y a partir de ahí, ver las diferencias entre ambos ciclos.

Las dos tecnologías elegidas son un ciclo binario y uno de evaporización súbita o flash, ya que el yacimiento contiene agua saturada a unos 220 °C.

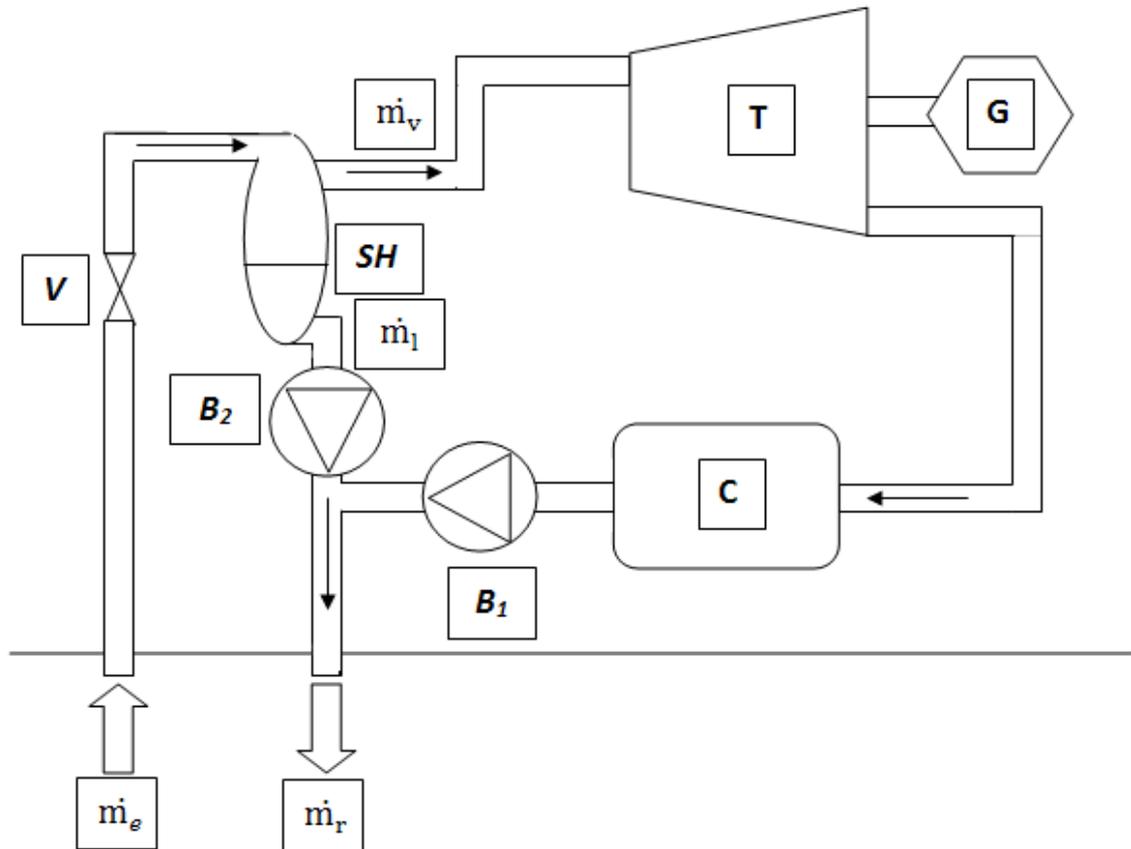
También se muestra un estudio donde se variarán las condiciones de entrada del fluido geotérmico, con el objetivo de ver cómo afectan estas condiciones a la hora de elegir la tecnología a instalar.

Para este análisis, las tecnologías empleadas son también ciclo binario y evaporación súbita, pero se variarán la temperatura y del estado de vapor del fluido geotérmico en la extracción.

A continuación se detalla el esquema de los diferentes ciclos a estudiar y los parámetros de los elementos de los que se compone cada central.

Central tipo flash y doble flash

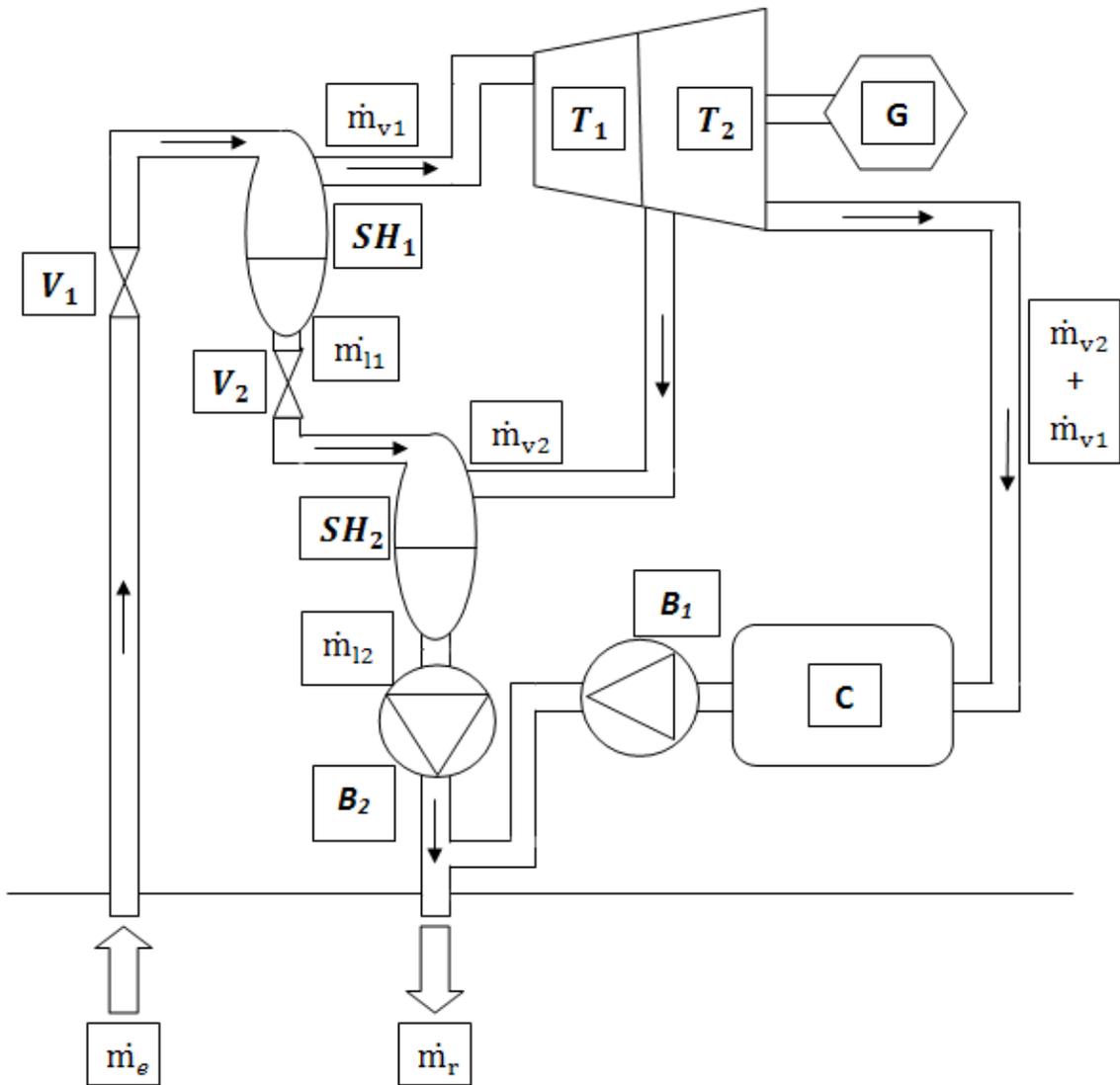
La configuración básica para el ciclo de una central flash es la siguiente:



G: Generador de potencia eléctrica.	\dot{m}_e: Caudal de extracción del fluido geotérmico
T: Turbina.	\dot{m}_r: Caudal de reinyección del fluido geotérmico
C: Condensador.	\dot{m}_v: Caudal de vapor saturado.
V: Válvula de expansión.	\dot{m}_1: Caudal de líquido saturado.
SH: Separador de humedad.	
B₁: Bomba 1.	
B₂: Bomba 2.	

Ilustración 49. Esquema de central flash simple.

Este ciclo puede mejorar su eficiencia añadiendo un segundo separador y una segunda turbina, dando lugar al ciclo doble flash. Las centrales que incorporan este ciclo de potencia son más caras y complejas que las anteriores, sin embargo, pueden conseguir hasta un 15-25% más de potencia que las de tipo flash simple, con las mismas condiciones de fluido geotérmico. Esta es la configuración para la central flash doble:



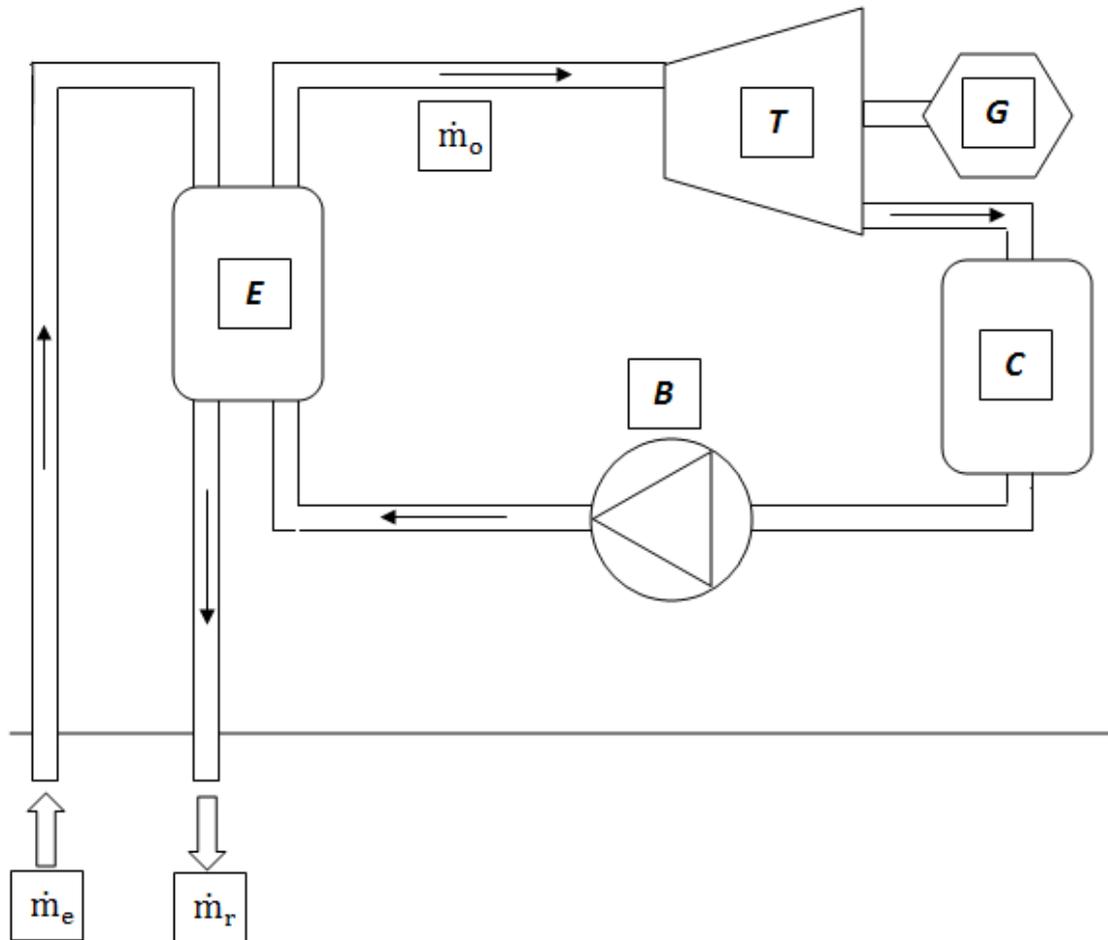
G: Generador de potencia eléctrica.	\dot{m}_e: Caudal de extracción del fluido geotérmico
T₁: Conjunto de turbinas de alta presión.	\dot{m}_r: Caudal de reinyección del fluido geotérmico
T₂: Conjunto de turbinas de baja presión.	\dot{m}_{v1}: Caudal de vapor saturado al salir de SH ₁ .
C: Condensador.	\dot{m}_{l1}: Caudal de líquido saturado al salir de SH ₁ .
V₁: Válvula de primera expansión.	\dot{m}_{v2}: Caudal de vapor saturado al salir de SH ₂ .
V₂: Válvula de segunda expansión.	\dot{m}_{l2}: Caudal de líquido saturado al salir de SH ₂ .
SH₁: Primer separador de humedad.	
SH₂: Segundo separador de humedad.	
B₁: Bomba 1.	
B₂: Bomba 2.	

Ilustración 50. Esquema de una central doble flash simple.

Central de ciclo binario

Este tipo de centrales puede presentar diferentes configuraciones. Para el presente proyecto se han estudiado las siguientes:

La configuración del ciclo de una central de ciclo binario básico es:



G: Generador de potencia eléctrica.

T: Conjunto de turbinas.

C: Condensador.

B: Bomba.

E: Evaporador.

m_e: Caudal de extracción del fluido geotérmico

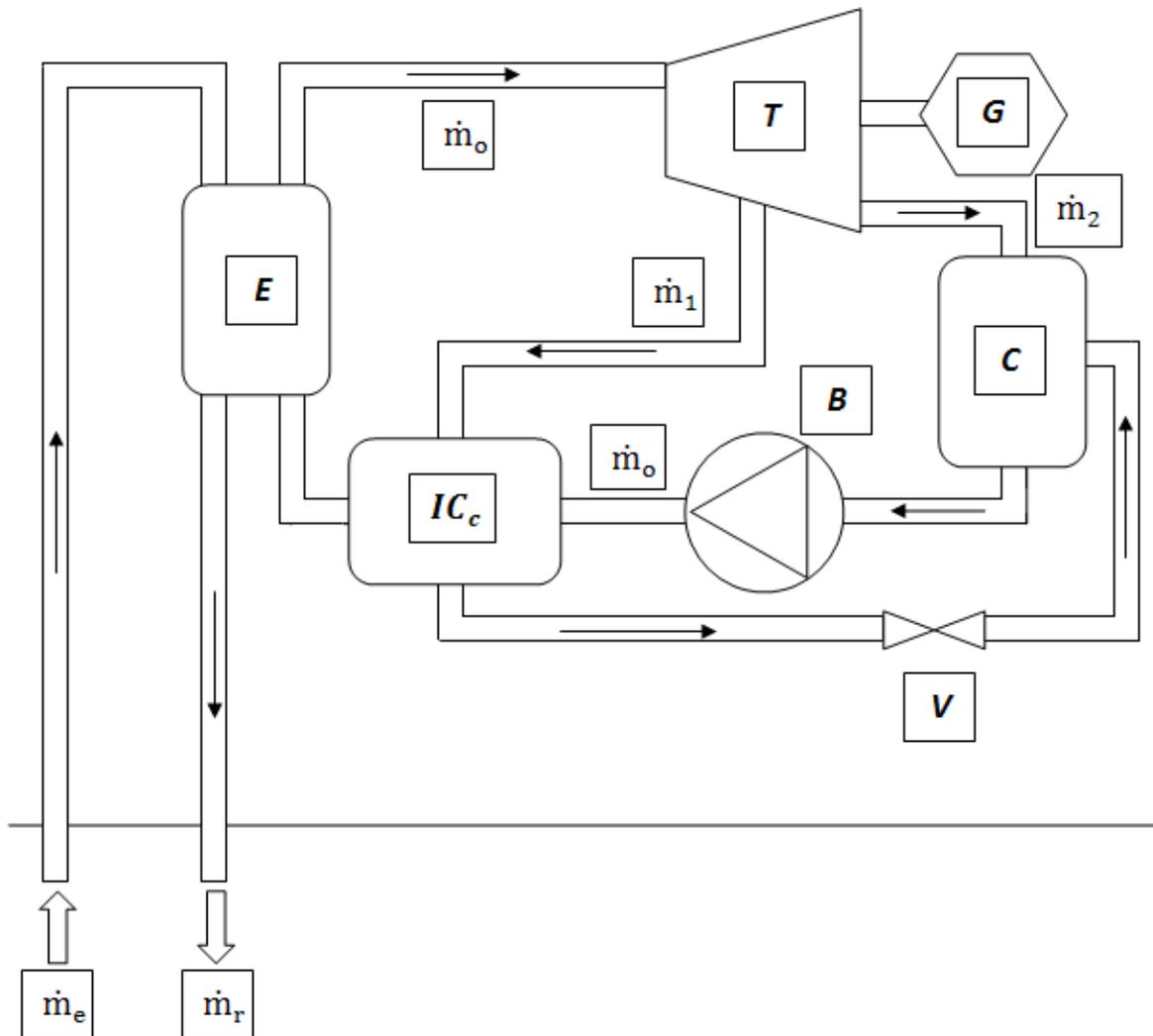
m_r: Caudal de reinyección del fluido geotérmico

m_o: Caudal del fluido orgánico.

Ilustración 51. Esquema de central de ciclo binario simple.

Sin embargo, a priori, puede mejorarse la eficiencia de la central mediante una regeneración, tanto con un intercambiador cerrado como abierto.

El esquema seguido por un ciclo de regeneración con intercambiador cerrado y purga es el siguiente:

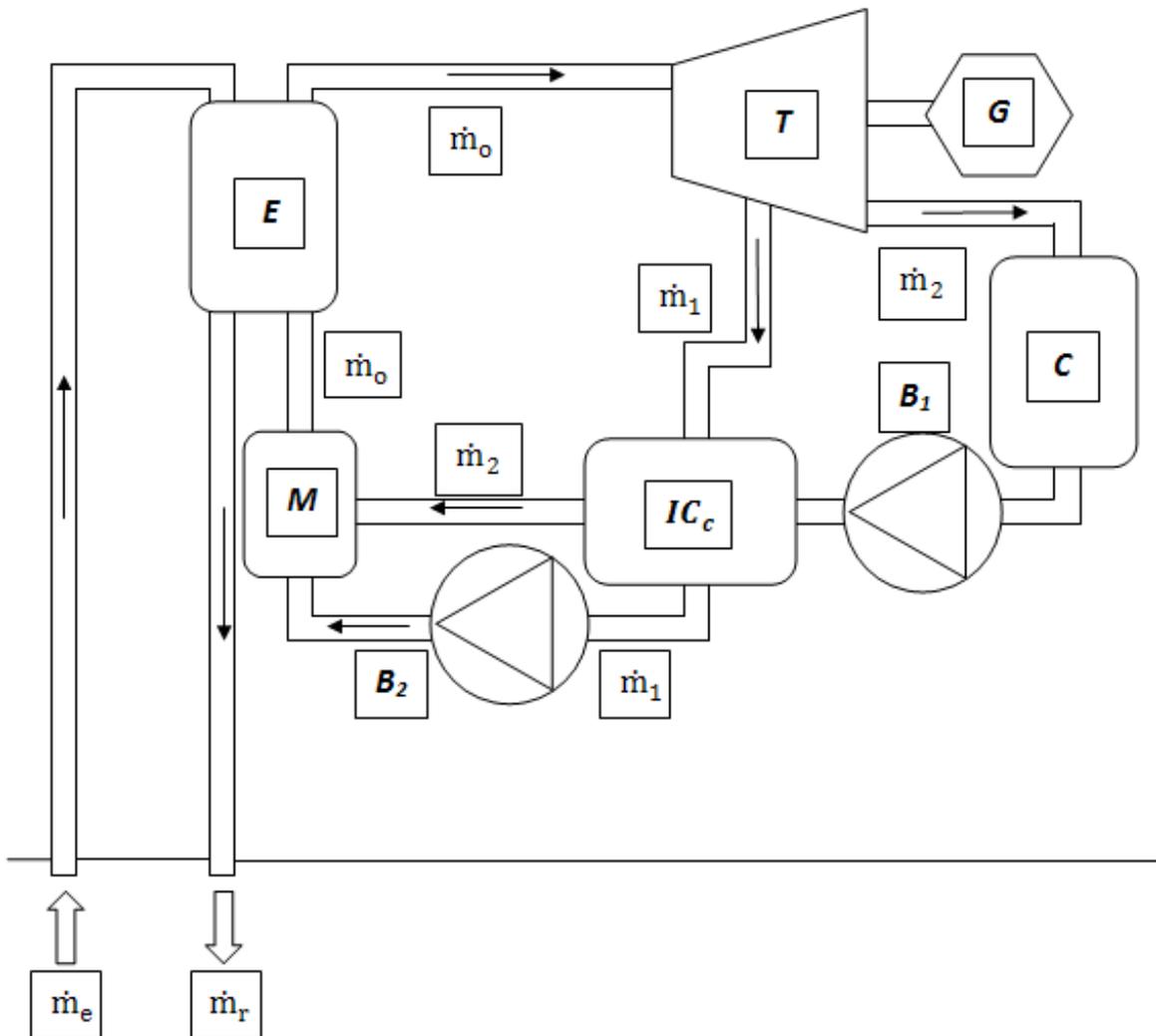


G: Generador de potencia eléctrica.	\dot{m}_e: Caudal de extracción del fluido geotérmico
T: Conjunto de turbinas.	\dot{m}_r: Caudal de reinyección del fluido geotérmico
IC_c: Intercambiador de calor cerrado.	\dot{m}_o: Caudal del fluido orgánico.
C: Condensador.	\dot{m}_1: Caudal de fluido orgánico del sangrado.
B: Bomba.	\dot{m}_2: Caudal del fluido orgánico que sale de la turbina.
V: Válvula de expansión.	
E: Evaporador.	

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

Ilustración 52. Esquema de central de ciclo binario con regeneración y purga.

El esquema seguido por un ciclo de regeneración con intercambiador cerrado y bombeo es el siguiente:



G: Generador de potencia eléctrica.

T: Conjunto de turbinas.

IC_c: Intercambiador de calor cerrado.

C: Condensador.

B₁: Bomba 1.

B₂: Bomba 2.

E: Evaporador.

M: Mezclador.

\dot{m}_e : Caudal de extracción del fluido geotérmico

\dot{m}_r : Caudal de reinyección del fluido geotérmico

\dot{m}_o : Caudal del fluido orgánico.

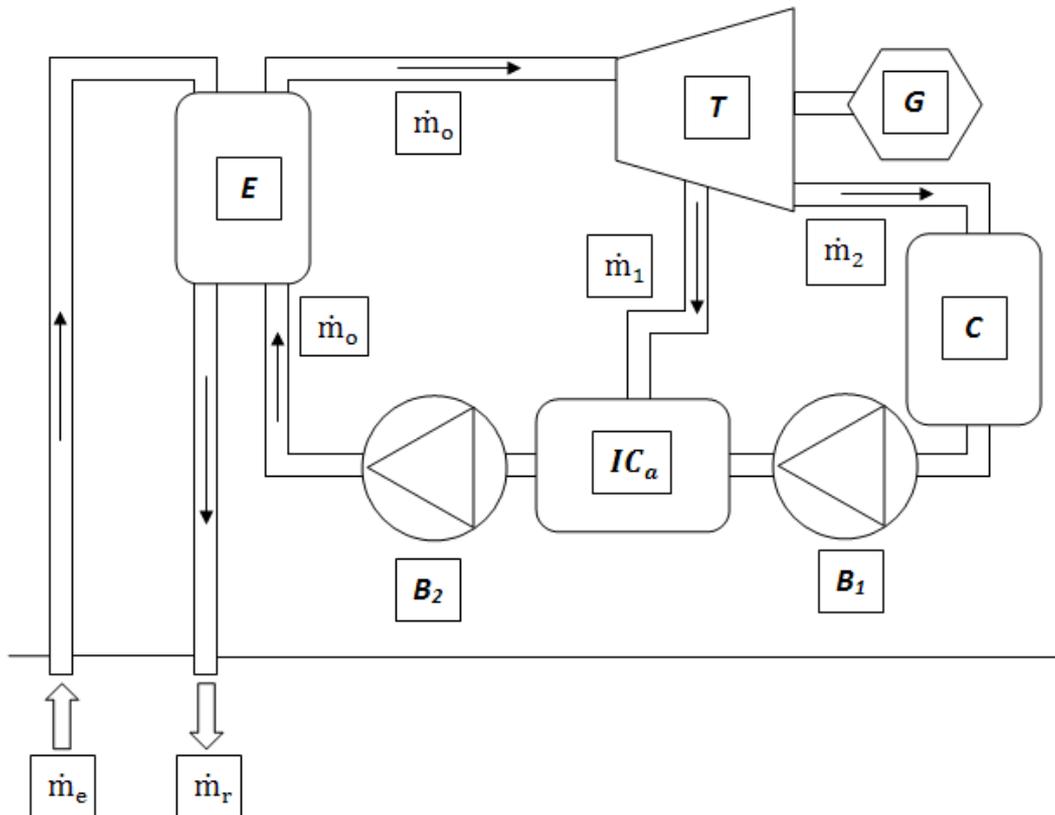
\dot{m}_1 : Caudal de fluido orgánico del sangrado.

\dot{m}_2 : Caudal del fluido orgánico que sale de la turbina.

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

Ilustración 53. Esquema de central de ciclo binario con regeneración y bombeo.

El esquema de un circuito de regeneración con intercambiador abierto es:



G: Generador de potencia eléctrica.

T: Conjunto de turbinas.

IC_a: Intercambiador de calor abierto.

C: Condensador.

B₁: Bomba 1.

B₂: Bomba 2.

E: Evaporador.

\dot{m}_e : Caudal de extracción del fluido geotérmico

\dot{m}_r : Caudal de reinyección del fluido geotérmico

\dot{m}_o : Caudal del fluido orgánico.

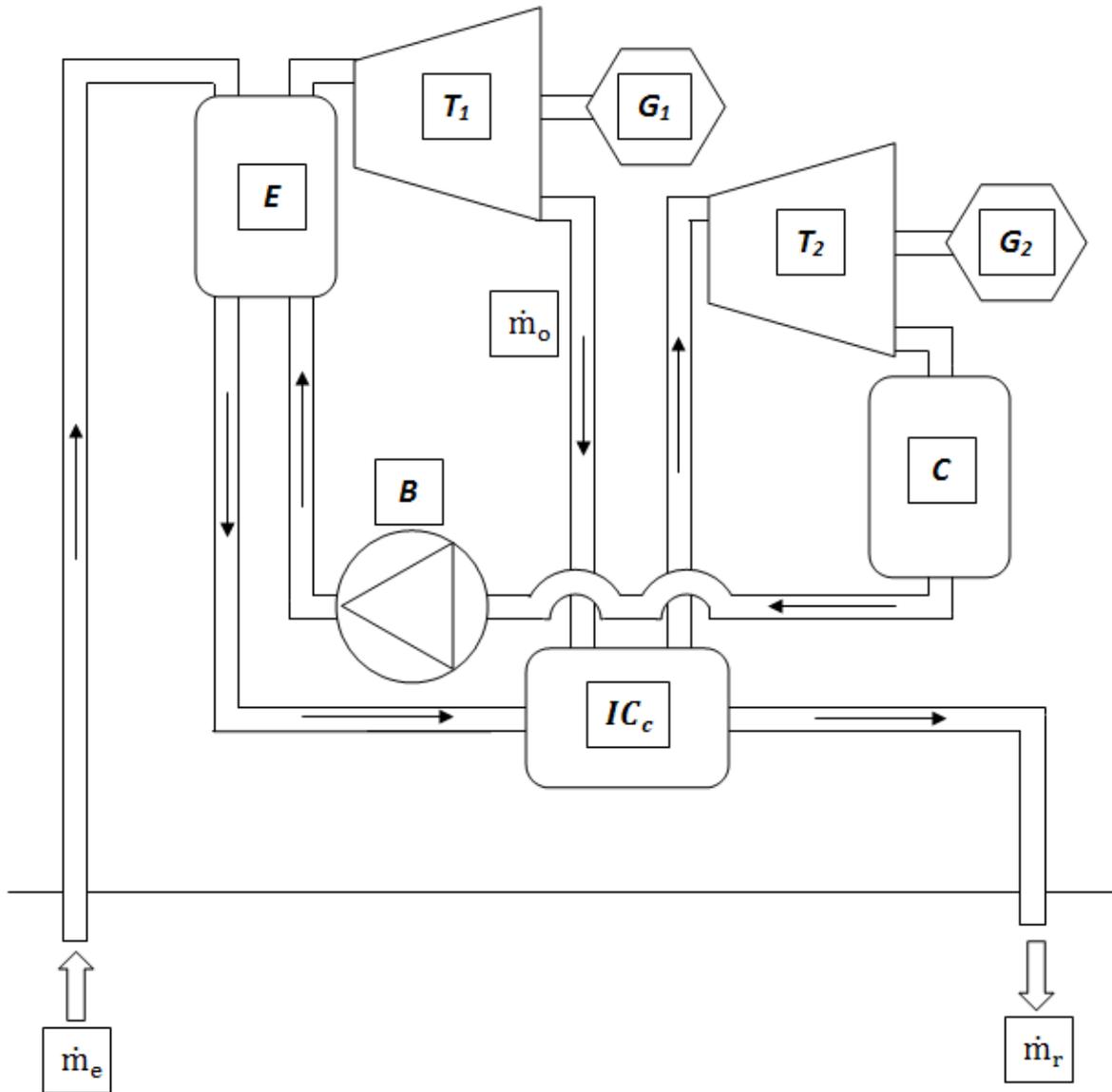
\dot{m}_1 : Caudal de fluido orgánico del sangrado.

\dot{m}_2 : Caudal del fluido orgánico que sale de la turbina.

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

Ilustración 54. Esquema de central de ciclo binario de regeneración con intercambiador abierto.

Un circuito con recalentamiento también puede mejorar las características de la central, por lo que debe tenerse en cuenta:



- | | |
|---|--|
| G₁ : Primer generador de potencia eléctrica. | m_e : Caudal de extracción del fluido geotérmico |
| G₂ : Segundo generador de potencia eléctrica. | m_r : Caudal de reinyección del fluido geotérmico |
| T₁ : Conjunto de turbinas de alta presión. | m_o : Caudal del fluido orgánico. |
| T₂ : Conjunto de turbinas de baja presión. | |
| IC_c : Intercambiador de calor cerrado. | |
| C : Condensador. | |
| B : Bomba. | |
| E : Evaporador. | |

Ilustración 55. Esquema de central de ciclo binario con recalentamiento.

Ecuaciones utilizadas en la obtención de resultados

A continuación se muestra el equipo del que se compone este tipo de centrales, junto a las operaciones que permiten realizar el análisis de cada ciclo.

El criterio de signos seguido tanto para el cálculo de la potencia como del calor es:

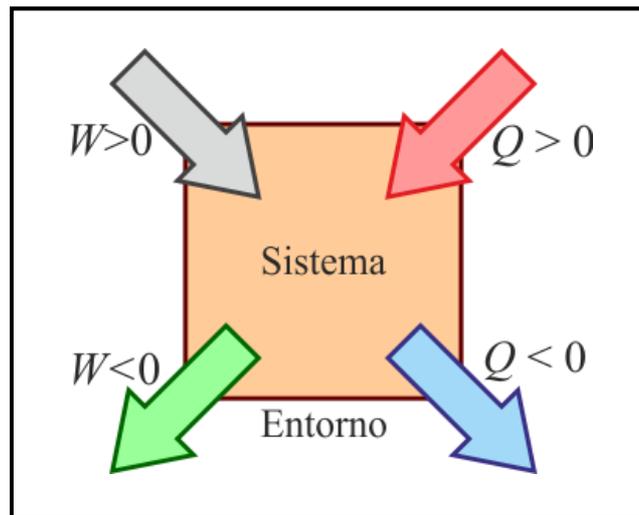


Ilustración 56. Criterio de signos adoptado.

- **Turbina**

A efectos de cálculo, se suponen las hipótesis de: régimen de proceso estacionario, sistema adiabático y energía cinética y potencial despreciables. Por lo que el trabajo y rendimiento generados por una turbina de vapor quedan de la forma siguiente:

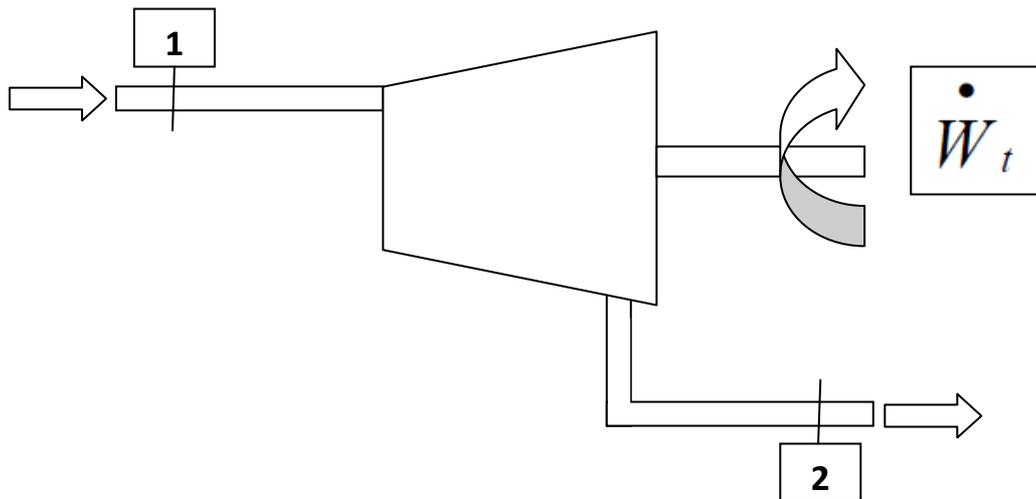


Ilustración 57. Representación simplificada de una turbina.

$$\frac{dE}{dt} = \dot{Q} - (\dot{W}_t) + \dot{m}_1 \left(h_1 + \frac{1}{2} \cdot v_1^2 + g \cdot z_1 \right) - \dot{m}_2 \left(h_2 + \frac{1}{2} \cdot v_2^2 + g \cdot z_2 \right)$$

$$0 = 0 - \dot{W}_t + \dot{m}_1 (h_1 + 0 + 0) - \dot{m}_2 (h_2 + 0 + 0)$$

$$\dot{W}_t = \dot{m}_1 (h_1) - \dot{m}_2 (h_2)$$

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

$$\dot{W}_t = \dot{m} (h_1 - h_2) \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:

- \dot{W}_t : Es la potencia generada por el conjunto de turbinas.
- \dot{m} : Es el caudal que circula por el conjunto de turbinas.
- h_1 : Es la entalpía del fluido de entrada al conjunto de turbinas.
- h_2 : Es la entalpía del fluido de salida del conjunto de turbinas.

Puede resultar más cómodo calcular la potencia de la turbina a partir de su eficiencia isentrópica (η_t):

$$\dot{W}_t = \dot{m} \cdot \eta_t \cdot (h_1 - h_{2s}) \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde h_{2s} es la entalpía del fluido al salir de la turbina en el caso de que ésta fuera isentrópica. Puede calcularse conociendo la presión en el punto 2 y la entropía del punto 1.

Igualando Ec. 1 con Ec. 2 puede obtenerse η_t :

$$\eta_t = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}} \quad (\text{Ec. 3})$$

A medida que el fluido circula por la turbina, ésta reduce su rendimiento, ya que la mezcla va aumentando su humedad. Si en la salida hay vapor sobrecalentado o saturado, no se producirán pérdidas de rendimiento, sin embargo, si hay mezcla de vapor y líquido, la calidad de vapor en la salida será menor, y por consiguiente, el rendimiento se verá afectado.

Las ecuaciones anteriores pertenecen a una turbina que opera con vapor sobrecalentado en la entrada. El rendimiento real de una turbina que opera en régimen saturado, puede acercarse más a la realidad a partir de la teoría formulada por Baumann:

"Los test han demostrado que cuando el vapor que circula por un escalonamiento de turbina está húmedo, la eficiencia del escalonamiento se reduce. Asumiendo que la eficiencia sigue una curva continua cuando se representa frente a la entropía, tanto para vapor sobrecalentado como para vapor húmedo, la eficiencia variará un 1 % por cada variación de un 1 % en la humedad".

Con lo que esta eficiencia puede aproximarse con la media entre la eficiencia en el punto de entrada y la eficiencia en el punto de salida. Puede verse en la Ec. 6:

$$\eta_w = \frac{\eta_t + \eta_2}{2} \quad (\text{Ec. 4})$$

$$\eta_2 = \eta_t - (x_1 - x_2) \quad (\text{Ec. 5})$$

Sustituyendo Ec. 5 en Ec. 4:

$$\eta_w = \frac{\eta_t + \eta_t - (x_1 - x_2)}{2}$$

$$\eta_w = \eta_t - \frac{(x_1 - x_2)}{2} \quad (\text{Ec. 6})$$

Donde:

- η_w : Es la eficiencia media de la turbina. La que se empleará en los cálculos.
- η_t : Es la eficiencia de la turbina considerando el fluido como vapor, es decir, en el punto de entrada.
- η_2 : Es la eficiencia de la turbina en el punto de salida, es decir, una vez contabilizadas todas las disminuciones por humedad.
- x_1 : Es la calidad del vapor en la entrada de la turbina.
- x_2 : Es la calidad del vapor en la salida de la turbina.

Por lo que para calcular la potencia a partir de la eficiencia en un ciclo donde la salida es una mezcla de vapor y líquido:

$$\dot{W}_w = \dot{m} \cdot \eta_w \cdot (h_1 - h_{2s}) \quad (\text{Ec. 7})$$

- **Condensador**

En el condensador, el fluido caliente que circula por su interior cede el calor necesario, a un fluido que se encuentra a menor temperatura, para pasar a líquido saturado,. Las hipótesis para calcular este calor son: régimen estacionario, no se ejerce trabajo sobre el sistema y las energías cinética y potencial se consideran despreciables.

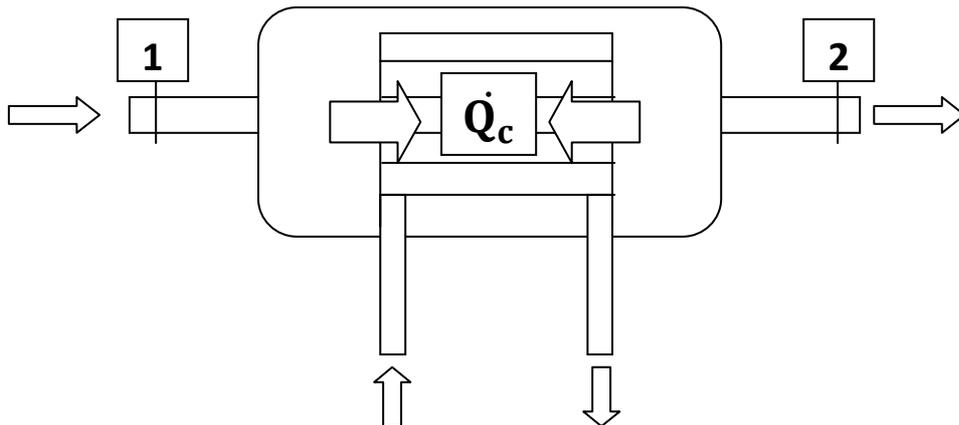


Ilustración 58. Representación simplificada de un condensador.

Se analiza la corriente que circula por las secciones 1-2, es decir, la del fluido geotérmico o refrigerante, según corresponda:

$$\frac{dE}{dt} = \dot{Q}_c - \dot{W} + \dot{m}_1 \left(h_1 + \frac{1}{2} \cdot v_1^2 + g \cdot z_1 \right) - \dot{m}_2 \left(h_2 + \frac{1}{2} \cdot v_2^2 + g \cdot z_2 \right)$$

$$0 = \dot{Q}_c - 0 + \dot{m}_1 (h_1 + 0 + 0) - \dot{m}_2 (h_2 + 0 + 0)$$

$$\dot{Q}_c = \dot{m}_2 (h_2) - \dot{m}_1 (h_1)$$

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

$$\dot{Q}_c = \dot{m}(h_2 - h_1) \quad (\text{Ec. 8})$$

Donde:

- \dot{Q}_c : Es el calor cedido por el fluido caliente, y a su vez, absorbido por el frío.
- \dot{m} : Es el caudal de fluido caliente que circula por el condensador.
- h_2 : Es la entalpía de salida del fluido caliente.
- h_1 : Es la entalpía de entrada del fluido caliente.

Al meter los datos en la Ec. 8, el calor saldrá con signo negativo, esto significa que es calor cedido por el fluido que circula por 1-2, según el criterio de signos adoptado previamente.

• Válvulas de expansión

Cuando el fluido geotérmico circula por una válvula de expansión, se libera presión, lo que provoca que se expanda, con lo que parte del fluido pasa a fase vapor, que posteriormente, y tras separarlo de la parte líquida, se hace pasar por la turbina, generando la potencia requerida.

La finalidad de instalar una válvula de expansión en un circuito binario de regeneración, es la de igualar la presión del sangrado de la turbina de alta presión con el caudal que sale de la de baja, para que puedan ser mezclados posteriormente en el condensador.

Las hipótesis a aplicar en las ecuaciones de la termodinámica son: régimen estacionario, proceso adiabático, no se ejerce trabajo sobre el sistema y las energías cinética y potencial se consideran despreciables.

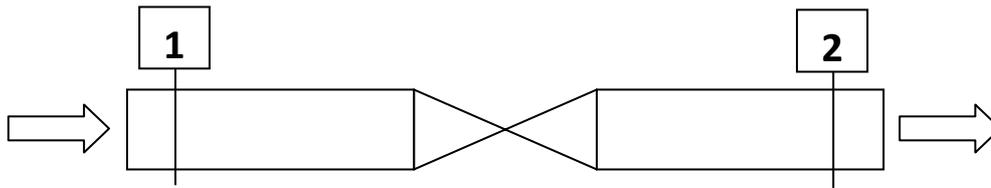


Ilustración 59. Representación simplificada de una válvula de expansión.

$$\frac{dE}{dt} = \dot{Q}_c - \dot{W} + \dot{m}_1 \left(h_1 + \frac{1}{2} \cdot v_1^2 + g \cdot z_1 \right) - \dot{m}_2 \left(h_2 + \frac{1}{2} \cdot v_2^2 + g \cdot z_2 \right)$$

$$0 = 0 - 0 + \dot{m}_1 (h_1 + 0 + 0) - \dot{m}_2 (h_2 + 0 + 0)$$

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

$$h_1 = h_2 \quad (\text{Ec. 9})$$

Donde:

- h_1 : Es la entalpía de entrada del fluido a la válvula.
- h_2 : Es la entalpía de salida del fluido de la válvula.

- **Separador de humedad**

Se trata del equipo encargado de separar la parte vapor de la parte líquida, a partir de una mezcla saturada líquido-vapor. Existen muchos tipos de separadores, sin embargo, el funcionamiento es común en todos: la mezcla saturada entra en el separador, que mediante la acción de la gravedad y la fuerza centrífuga, es separada. El vapor saturado es conducido posteriormente a la turbina, y el líquido saturado bien es reinyectado al subsuelo, o bien es conducido a una segunda válvula de expansión.

La figura siguiente representa el esquema simplificado de un separador de humedad, el punto 1 es la entrada, es decir, mezcla saturada de vapor y líquido, el 2 es la salida del vapor saturado, y el 3 la del líquido saturado.

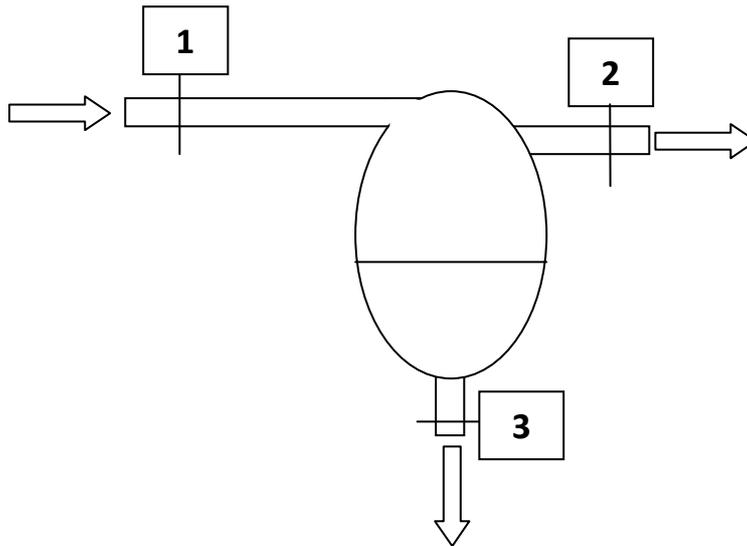


Ilustración 60. Representación simplificada de un separador de humedad.

El caudal de vapor saturado y líquido saturado puede calcularse a partir de la ecuación de conservación de la masa:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 + \dot{m}_3$$

En la salida 2 circula todo el caudal de vapor que contiene el fluido de entrada:

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_1 \cdot x_1 \quad (\text{Ec. 10})$$

De igual forma, el caudal de la salida 3, que es líquido saturado, $x_3 = 0$, será la diferencia entre el caudal de entrada y el de vapor saturado:

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_1 \cdot (1 - x_1) \quad (\text{Ec. 11})$$

Siendo:

- \dot{m}_1 : caudal de la mezcla que entra al separador.
- \dot{m}_2 : caudal de vapor saturado que sale del separador.
- \dot{m}_3 : caudal de líquido saturado que sale del separador.
- x_1 : Calidad del vapor en la entrada del separador.

- **Bomba**

Una bomba permite aumentar la presión del fluido que circula por su interior. Las hipótesis de cálculo para estos dispositivos son: régimen estacionario, proceso adiabático y las energías cinética y potencial se consideran despreciables.

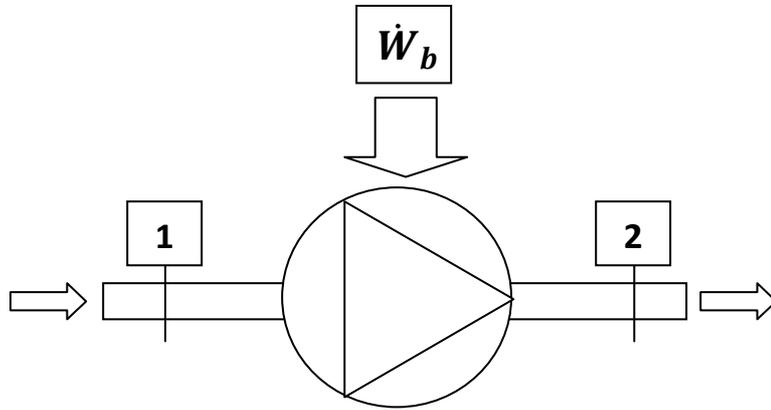


Ilustración 61. Representación simplificada de una bomba.

Por lo que el trabajo realizado por una bomba y su rendimiento quedan de la forma siguiente:

$$\frac{dE}{dt} = \dot{Q} - (-\dot{W}_b) + \dot{m}_1 \left(h_1 + \frac{1}{2} \cdot v_1^2 + g \cdot z_1 \right) - \dot{m}_2 \left(h_2 + \frac{1}{2} \cdot v_2^2 + g \cdot z_2 \right)$$

$$0 = 0 + \dot{W}_b + \dot{m}_1(h_1 + 0 + 0) - \dot{m}_2 (h_2 + 0 + 0)$$

$$\dot{W}_b = -\dot{m}_1(h_1) + \dot{m}_2 (h_2)$$

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

$$\dot{W}_b = \dot{m}(h_2 - h_1) \quad (\text{Ec. 12})$$

Es importante resaltar que en este caso, el trabajo ejercido por la bomba lleva un signo negativo, ya que se ejerce sobre el sistema.

La eficiencia isentrópica de la bomba será (η_b):

$$\dot{W}_b = \dot{m} \cdot \eta_b \cdot (h_{2s} - h_1) \quad (\text{Ec. 13})$$

Donde h_{2s} es la entalpía del fluido al salir de la bomba en el caso de que ésta fuera isentrópica. Igualando Ec. 12 con Ec. 13 puede obtenerse η_b :

$$\eta_b = \frac{h_2 - h_1}{h_{2s} - h_1} \quad (\text{Ec. 14})$$

Donde:

- η_b : Es el rendimiento de la bomba.
- h_2 : Es la entalpía de salida del fluido de la bomba.
- h_1 : Es la entalpía de entrada del fluido de la bomba.
- h_{2s} : Es la entalpía de salida del fluido de la bomba si esta fuera isentrópica.

- **Intercambiador de calor abierto**

Este tipo de intercambiador se emplea para mezclar dos corrientes de fluido a distinta temperatura e igual presión, de tal forma que en la salida circula una única corriente a una temperatura y presión determinada.

Las hipótesis de trabajo asumidas en las ecuaciones de la termodinámica son: régimen estacionario, proceso adiabático (ya que el intercambio de calor es entre las dos corrientes, no entre el sistema y el exterior), trabajo ejercido sobre el intercambiador nulo, y energía cinética y potencial despreciable.

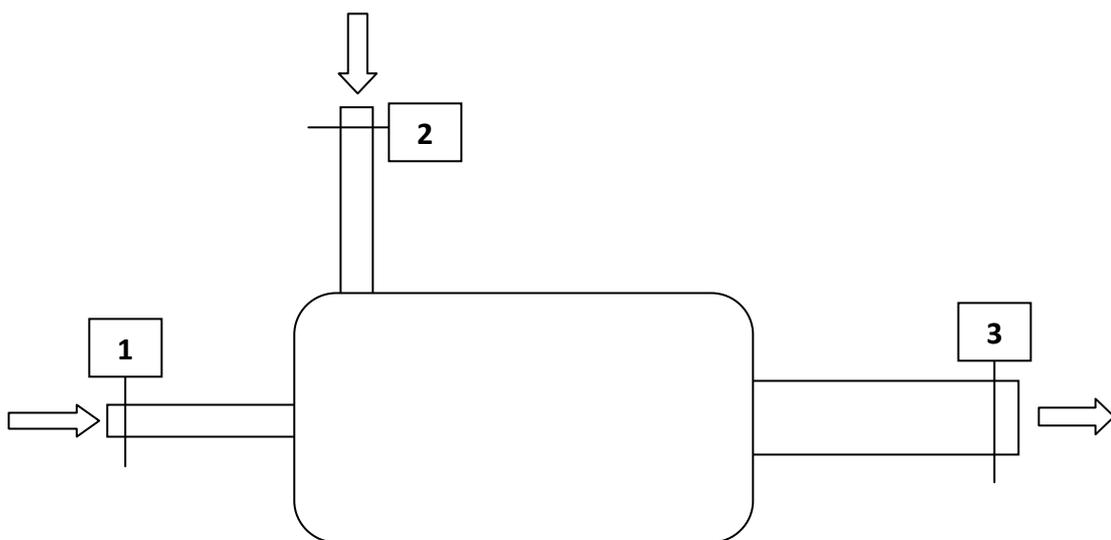


Ilustración 62. Representación simplificada de un intercambiador de calor abierto.

$$\frac{dE}{dt} = \dot{Q} - (\dot{W}) + \dot{m}_1 \left(h_1 + \frac{1}{2} \cdot v_1^2 + g \cdot z_1 \right) + \dot{m}_2 \left(h_2 + \frac{1}{2} \cdot v_2^2 + g \cdot z_2 \right) - \dot{m}_3 \left(h_3 + \frac{1}{2} \cdot v_3^2 + g \cdot z_3 \right)$$

$$0 = 0 - 0 + \dot{m}_1(h_1 + 0 + 0) + \dot{m}_2(h_2 + 0 + 0) - \dot{m}_3(h_3 + 0 + 0)$$

$$\dot{m}_1(h_1) + \dot{m}_2(h_2) = \dot{m}_3(h_3)$$

Como: $\dot{m}_3 = \dot{m}_2 + \dot{m}_1$

$$\dot{m}_1(h_1) + \dot{m}_2(h_2) = \dot{m}_2 + \dot{m}_1(h_3) \quad (\text{Ec. 15})$$

Donde:

- \dot{m}_1 : Es el caudal del fluido de entrada por la sección 1.
- \dot{m}_2 : Es el caudal del fluido de entrada por la sección 2.
- \dot{m}_3 : Es el caudal que sale por la sección 3. Es la suma de los dos anteriores.
- h_1 : Entalpía del fluido que entra por la sección 1.
- h_2 : Entalpía del fluido que entra por la sección 2.
- h_3 : Entalpía del fluido que sale por la sección 3.

- **Intercambiador de calor cerrado y evaporador**

Un intercambiador de calor cerrado es un elemento que permite transferir el calor de un fluido a otro, sin que ambos entren en contacto. Tanto los precalentadores como los evaporadores son intercambiadores de calor.

En los esquemas presentados anteriormente, el fluido geotérmico cede parte de su calor al refrigerante por medio del precalentador y evaporador, representados conjuntamente por un intercambiador, de ésta forma el refrigerante permite llegar a un estado de vapor sobrecalentado al entrar en la turbina, consiguiendo, en la mayoría de ocasiones, mejores prestaciones que en los ciclos flash y doble flash.

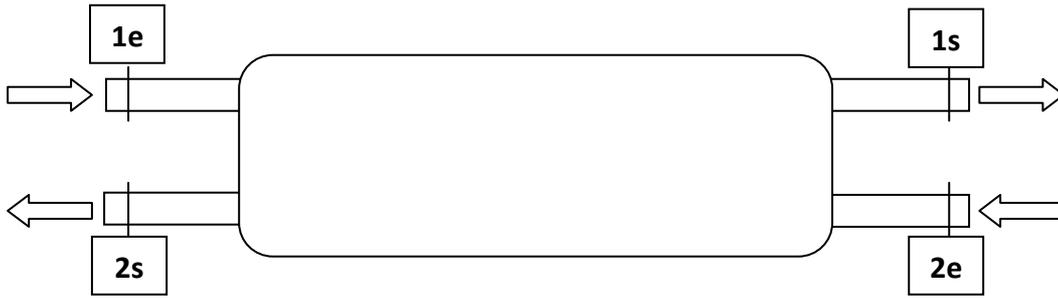


Ilustración 63. Representación simplificada de un intercambiador de calor cerrado.

Para aplicar la ecuación de la termodinámica, es necesario aplicar las hipótesis de: régimen estacionario, proceso adiabático (ya que el calor es cedido de un fluido a otro, no al ambiente, trabajo ejercido nulo y energía cinética y potencial nula.

$$\frac{dE}{dt} = \dot{Q} - (\dot{W}) + \dot{m}_{1e} \left(h_{1e} + \frac{1}{2} \cdot v_{1e}^2 + g \cdot z_{1e} \right) - \dot{m}_{1s} \left(h_{1s} + \frac{1}{2} \cdot v_{1s}^2 + g \cdot z_{1s} \right) +$$

$$+ \dot{m}_{2e} \left(h_{2e} + \frac{1}{2} \cdot v_{2e}^2 + g \cdot z_{2e} \right) - \dot{m}_{2s} \left(h_{2s} + \frac{1}{2} \cdot v_{2s}^2 + g \cdot z_{2s} \right)$$

$$0 = 0 - 0 + \dot{m}_{1e} (h_{1e} + 0 + 0) - \dot{m}_{1s} (h_{1s} + 0 + 0) +$$

$$+ \dot{m}_{2e} (h_{2e} + 0 + 0) - \dot{m}_{2s} (h_{2s} + 0 + 0)$$

En un intercambiador de calor cerrado, el caudal de cada corriente no varía:

$$\dot{m}_{1e} = \dot{m}_{1s} = \dot{m}_1$$

$$\dot{m}_{2e} = \dot{m}_{2s} = \dot{m}_2$$

$$\dot{m}_1 (h_{1e} - h_{1s}) = \dot{m}_2 (h_{2s} - h_{2e}) \quad (\text{Ec. 16})$$

Si analizáramos cada corriente por separado, nos quedaría:

$$\dot{Q}_1 = \dot{m}_1 (h_{1s} - h_{1e})$$

$$\dot{Q}_2 = \dot{m}_2 (h_{2s} - h_{2e})$$

Donde:

- \dot{Q}_1 : Es el calor cedido por el fluido que entra a mayor temperatura (corriente 1e-1s).
- \dot{m}_1 : Es el caudal del fluido que va por el circuito 1e-1s.
- h_{1s} : Es la entalpía del fluido a la salida por la sección 1s.

- h_{1e} : Es la entalpía del fluido a la entrada por la sección 1e.
- Q_2 : Es el calor absorbido por el fluido que entra a menor temperatura (corriente 2e-2s).
- \dot{m}_2 : Es el caudal del fluido que va por el circuito 2e-2s.
- h_{2s} : Es la entalpía del fluido a la salida por la sección 2s.
- h_{2e} : Es la entalpía del fluido a la entrada por la sección 2e.

El calor del fluido 1 sale negativo, esto es, calor cedido al otro fluido.

El calor del fluido 2 sale positivo, ya que es calor que absorbe del fluido 1, lo que se corresponde con el criterio de signos escogido.

- **Prestaciones de la central geotérmica**

Para poder comparar la eficiencia de las distintas tecnologías, es necesario calcular la potencia neta y el calor total cedido por el fluido geotérmico:

$$\dot{W}_{NETA} = \dot{W}_t + \dot{W}_b \quad (\text{Ec. 17})$$

$$\dot{Q}_{TOTAL} = \dot{m}_e \cdot h_e - \dot{m}_r \cdot h_r$$

Como: $\dot{m}_e = \dot{m}_r = \dot{m}$

$$\dot{Q}_{TOTAL} = \dot{m} \cdot (h_e - h_r) \quad (\text{Ec. 18})$$

Donde:

- \dot{W}_{NETA} : la potencia neta generada en la central.
- \dot{W}_t : la potencia total generada por las turbinas.
- \dot{W}_b : la potencia total consumida por las bombas.
- \dot{Q}_{TOTAL} : calor total que el fluido geotérmico transfiere a la central.
- \dot{m}_e : caudal de extracción del yacimiento geotérmico.
- h_e : entalpía a la que se extrae el fluido del yacimiento.
- \dot{m}_r : caudal de reinyección del yacimiento geotérmico.
- h_r : entalpía a la que se reinyecta el fluido al yacimiento.

En los ciclos considerados, la potencia neta de la central (\dot{W}_{NETA}) será igual a la total generada por las turbinas (\dot{W}_t) más la total consumida por las bombas (\dot{W}_b , que tendrá signo negativo), ya que no se considera la potencia consumida por el equipo de refrigeración ni de los equipos de extracción y reinyección del fluido geotérmico.

La eficiencia de los ciclos analizados queda de la siguiente forma:

$$\eta_{central} = \frac{\dot{W}_{NETA}}{\dot{Q}_{TOTAL}} \quad (\text{Ec. 19})$$

Hipótesis y consideraciones para los cálculos

Hipótesis asumidas

A continuación se detallan las hipótesis asumidas para el cálculo de cada configuración de los ciclos, así como el método seguido para el cálculo y optimización de cada uno, y los resultados obtenidos. Se ha utilizado el software TermoGraf como apoyo para situar cada punto en el diagrama de los ciclos binarios, y Cyclepad para las centrales flash y doble flash.

Las hipótesis que se han considerado para cada diseño son las siguientes:

- El fluido geotérmico en la extracción se supone agua líquida saturada, ya que, el fluido suele ser una mezcla de vapor y líquido, y desconocemos el porcentaje de vapor que contiene. Al considerarlo como líquido saturado, estamos analizando la situación más desfavorable que nos podemos encontrar.
- La temperatura de extracción será de 220°C para la elección de la mejor configuración para la central de Granada.
- Para comparar las tecnologías flash y de ciclo binario, se han elegido unas temperaturas viables para la producción de electricidad, 100°C, 220°C y 300°C, con el fluido geotérmico como líquido saturado y $x=0.6$.
- No se tienen en cuenta las pérdidas de presión, ni las que se producen en los dispositivos, ni en los conductos, por ello no hace falta instalar bombas a la extracción ni reinyección a los pozos.
- El rendimiento de las turbinas y las bombas es del 85%. No se tiene en cuenta la regla Banner.
- Con el objetivo de mantener la producción de electricidad de la planta durante muchos años, la temperatura de reinyección del fluido geotérmico será de 180°C como mínimo, para conservar el yacimiento. Sin embargo, para la comparación entre una planta flash y otra de ciclo binario, la temperatura de reinyección varía.
- Las turbinas y las bombas se consideran adiabáticas.
- Los condensadores e intercambiadores de calor se consideran isobáricos.
- Los separadores de humedad en las centrales flash y doble flash permiten separar totalmente el vapor del líquido, obteniendo unos porcentajes de vapor en las dos salidas de $x=0$ y $x=1$.

- El fluido de refrigeración que absorbe calor en el condensador es independiente, y no entra en contacto, con el fluido de los ciclos calculados.
- El caudal de fluido geotérmico será de 100 kg/s, con el objetivo de preservar el acuífero durante más tiempo.
- La optimización se ha realizado para obtener la máxima potencia neta posible.
- La presión máxima alcanzada en el ciclo será de 40 bar, ya que es el valor máximo de funcionamiento que suelen alcanzar los intercambiadores de calor en la industria.
- Los equipos empleados aguantan perfectamente las condiciones máximas de presión y temperatura a las que están sometidos.

Selección del fluido de trabajo

En este apartado se seleccionará un fluido orgánico de trabajo para la central de ciclo binario. Para ello, el fluido debe tener unas buenas propiedades termodinámicas, así como un escaso/nulo impacto ambiental.

Una de las propiedades a destacar de los refrigerantes, es la pendiente positiva de la curva del vapor en el diagrama T-s, esta curva hace que la salida de las turbinas sea vapor sobrecalentado y no mezcla, lo que pasaría si se usara agua. La pendiente positiva permite que el rendimiento de las turbinas del ciclo binario no se vea disminuido por la regla de Banner.

Hace algunas décadas se utilizaba el refrigerante R12 para algunos ciclos de Rankine con refrigerante, sin embargo, desde que se descubrió su alto nivel de destrucción de la capa de ozono, se prohibió su uso, y pasó a sustituirse por el R-134A. El "Ozone Depletion Potential" es una medida del nivel de destrucción de la capa de ozono, siendo 1 el máximo y 0 el mínimo. El refrigerante R12 tiene asignado un ODP de 1.

El fluido orgánico que se utilizará en las centrales de ciclo binario es el isopentano, a continuación se adjuntan sus características y las del refrigerante R12, para comparar:

Fluido	Punto Fusión (°C)	Punto Ebullición (°C)	Temperatura Crítica (°C)	Presión Crítica (bar)
R-12	-158	-29.75	111.97	41.36
Isopentano	-160	28	187.8	34.1

Tabla 9. Características termodinámicas del isopentano y R-12.

Fluido	Toxicidad (ppm)	Inflamabilidad	Ozone Depletion Potential (ODP)	Global Warning Potential (GWP) (kg CO ₂)
R-12	1000	No inflamable	1	4500
Isopentano	No tóxico	Inflamable	0	3

Tabla 10. Características de seguridad y medioambientales del isopentano y R-12.

El “Global Warming Potential” hace referencia al número de veces que un fluido es capaz de absorber más calor que otro de referencia (en este caso CO_2).

El isopentano es utilizado en muchas centrales geotérmicas de ciclo binario, destacan la de Raft River, Heber, Soda Lake Plant 1, Steamboat y Stillwater en Estados Unidos, y Wabuska en Japón.

Central para un yacimiento en Granada

En primer lugar, se muestran los resultados obtenidos para elegir la mejor configuración de una central geotérmica en un yacimiento con agua como fluido geotérmico, a 220°C y en un estado de líquido saturado, con una temperatura de reinyección mínima de 180°C .

Central flash

Para esta configuración de la planta, los parámetros a diseñar son: la temperatura de salida tras el paso por la válvula de expansión y la presión de salida de la turbina.

El esquema y el diagrama seguidos por el ciclo flash pueden verse en la ilustración 64 y 65.

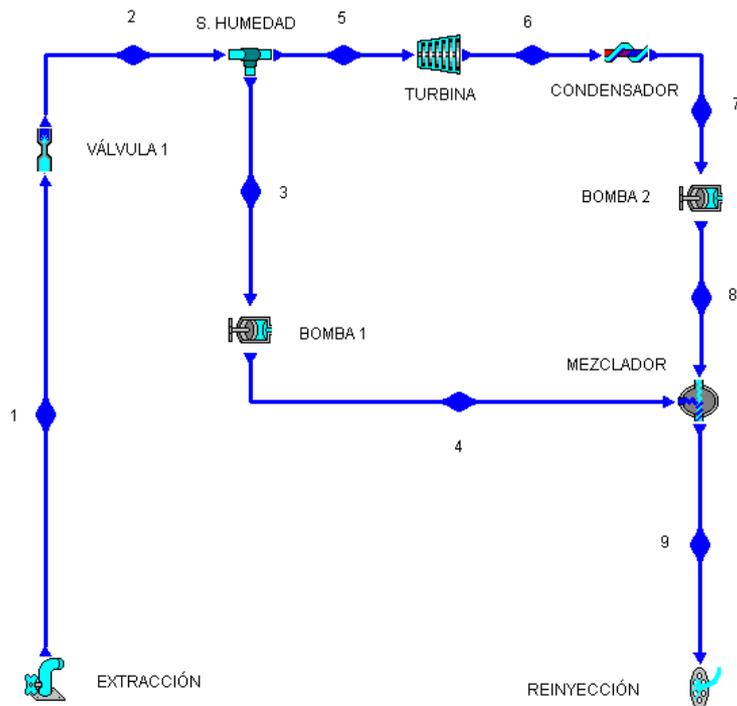


Ilustración 64. Esquema ciclo central flash.

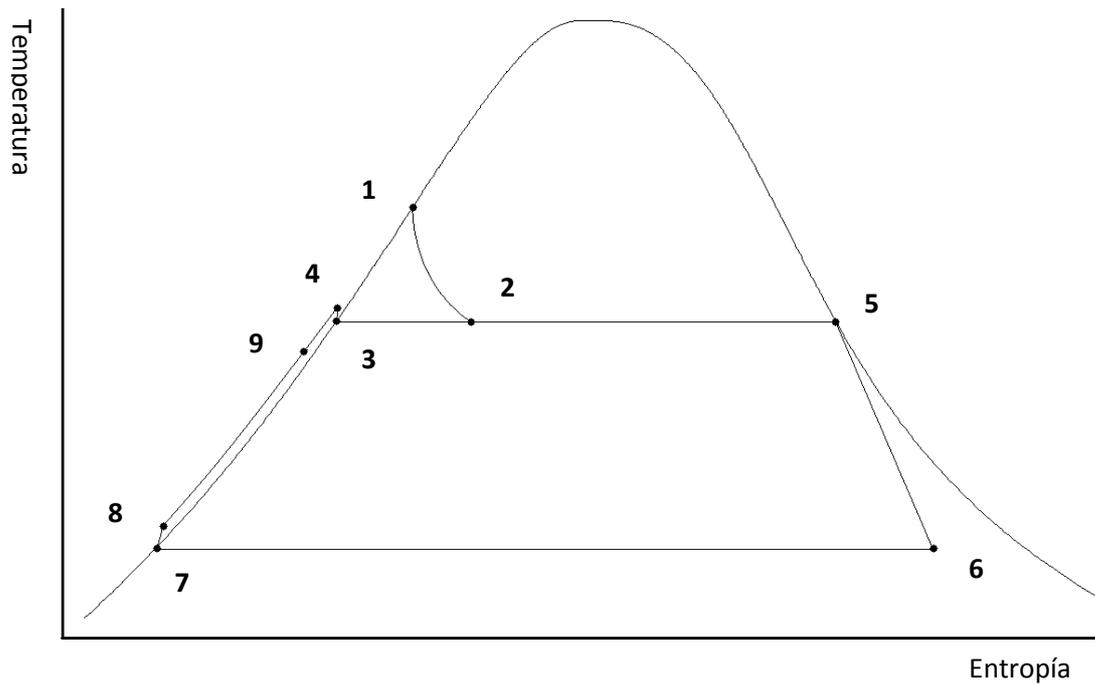


Ilustración 65. Diagrama T-s ciclo central flash.

El cálculo de los parámetros para cada punto del ciclo se obtiene con el diagrama T-s o tablas, del agua, pero para ello es necesario conocer al menos dos, a continuación se resume la forma de hallar estos dos parámetros:

- En 1 se obtienen a partir del estado y temperatura del fluido de extracción.
- La válvula de expansión es isoentálpica (ver Ec. 9), por lo que se conoce la entalpía en 2, que junto a una temperatura de salida, que debemos seleccionar, pueden hallarse los parámetros de 2.
- El separador de humedad separa la corriente de entrada en una de vapor saturado ($x=1$, punto 5) y otra de líquido saturado ($x=0$, punto 3), en las mismas condiciones de presión y temperatura. Para conocer el caudal de cada corriente, basta con aplicar la Ec. 10 y 11.
- Para el punto 6, debe fijarse una presión. El otro parámetro que puede calcularse es la entalpía, a partir de la Ec. 3.
- Para el punto 7, se sabe que el condensador es isóbaro, y su salida es líquido saturado ($x=0$), por lo que se conoce su presión y estado del vapor.
- Para el punto 8, debe tenerse en cuenta que su presión será la misma que la de extracción del fluido, con el fin de que se puede reinyectar en el mismo yacimiento. Con la Ec. 14, puede sacarse su entalpía.
- En 4 se tiene la presión conocida (la misma que el punto 8), la entalpía se obtiene con la Ec. 14.

- La entalpía en 9 se obtiene con la Ec. 15 y la presión será la misma que la de extracción del fluido.
- Si la temperatura de salida fuera menor a la mínima, deben repetirse los cálculos variando los parámetros a diseñar (aparecen nombrados al principio del apartado).

El proceso seguido para la optimización es el siguiente:

- En primer lugar, se fija la presión de salida de la turbina, ésta será 0.01 bar, para conseguir la máxima potencia posible.
- En segundo lugar, se coloca una temperatura de salida de la válvula baja.
- En tercer lugar, si la temperatura de reinyección del fluido geotérmico al yacimiento es menor a la temperatura de reinyección mínima, se vuelve al paso dos con una temperatura mayor.
- Si tras poner la máxima temperatura tras la válvula no se alcanza la temperatura mínima de reinyección, debe aumentarse la presión de salida de la turbina.

Durante este desarrollo, se ha observado que:

- Un aumento de la temperatura de salida tras la válvula aumenta la temperatura de reinyección del fluido. Sin embargo baja tanto la potencia neta como la eficiencia.
- Un descenso de la presión de salida de la turbina provoca mayor potencia neta, y un descenso de temperatura del fluido en la reinyección. Sin embargo compensa que en la turbina se produzca la mayor diferencia posible de presión, por ello se pone 0.01 bar.
- Aumentar el caudal de fluido aumenta la eficiencia y la potencia neta de la central, se ha seleccionado un caudal de 100 kg/s fijo para poder comparar, por lo que sólo se variaría este parámetro si necesitara que la planta diera una potencia determinada.

En la tabla 28 del Anexo 1 pueden verse las mejores configuraciones para distintas temperaturas.

En la tabla 11 aparecen los parámetros de temperatura, presión, estado, caudal, entalpía y entropía para cada punto del ciclo flash con las mejores prestaciones obtenidas.

	Presión (bar)	Temperatura (°C)	Entalpía (kJ/kg)	Caudal (kg/s)	Entropía (kJ/kgK)	Estado fluido
1	23.18	220	943.5	100	2.52	Líquido saturado (x=0)
2	11.69	186.8	943.5	100	2.53	Mezcla (x=0.0755)
3	11.69	186.8	793.4	92.45	2.21	Líquido saturado (x=0)
4	23.18	194.1	832.6	92.45	2.22	Líquido comprimido
5	11.69	186.8	2783	7.55	6.53	Vapor saturado (x=1)
6	0.01	6.97	1972	7.55	7.04	Mezcla (x=0.782)
7	0.01	6.97	29.27	7.55	0.1058	Líquido saturado (x=0)
8	23.18	7.08	32.04	7.55	0.1073	Líquido comprimido
9	23.18	180	772.2	100	2.06	Líquido comprimido

Tabla 11. Parámetros para cada punto de la central tipo flash.

En la tabla 12 aparecen las características de potencia, calor, eficiencia y temperatura de reinyección del fluido para el ciclo flash.

	Temperatura reinyección (°C)	Potencia turbinas (kW)	Potencia bombas (kW)	W neto (kW)	Q total (kW)	Eficiencia (%)
FLASH	180	6119	-3651.93	2467.07	17950	17.74

Tabla 12. Características de la central tipo flash.

Central Doble Flash

En este caso, los parámetros a variar son: la temperatura de salida tras el paso por la válvula de expansión 1 y las presiones de salida de la turbina de alta y baja presión.

El esquema y el diagrama seguido por el ciclo flash pueden verse en la ilustración 66 y 67.

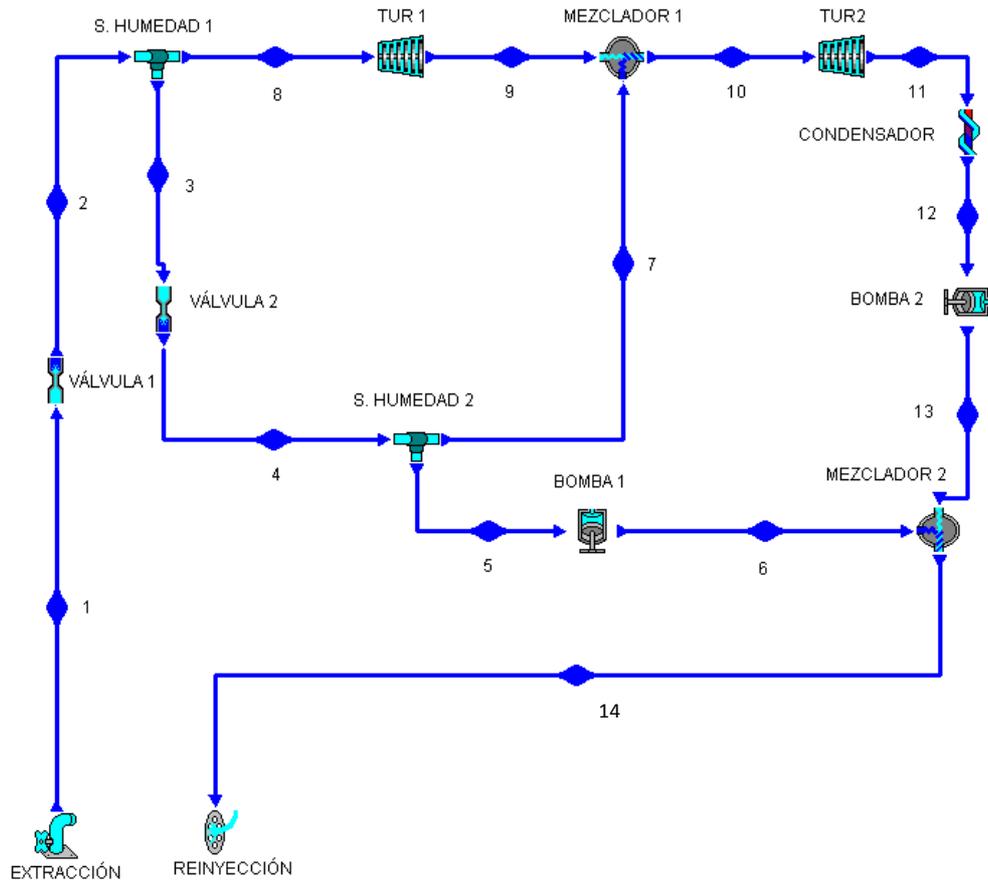


Ilustración 66. Esquema ciclo central doble flash.

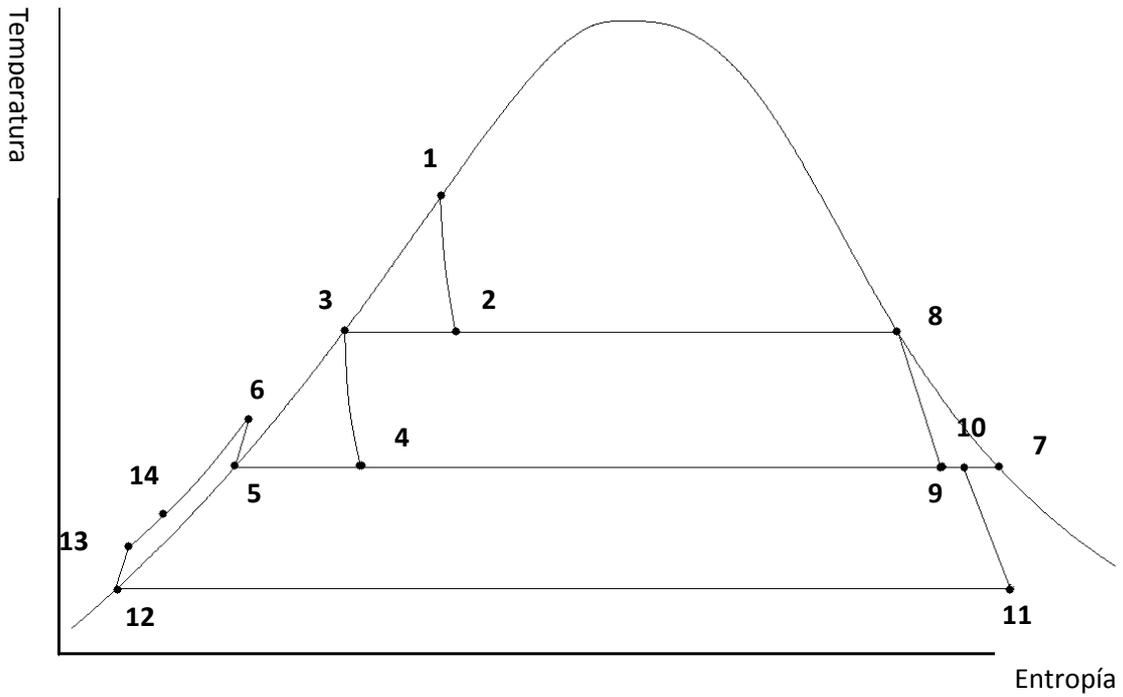


Ilustración 67. Diagrama T-s ciclo central doble flash.

El cálculo de los parámetros para cada punto del ciclo, al igual que en el caso flash, se obtienen con el diagrama T-s o tablas, del agua, la forma de hallar dos parámetros para cada punto es la siguiente:

- En 1 se obtienen a partir del estado y temperatura del fluido de extracción.
- La válvula de expansión es isoentálpica (Ec. 9), por lo que se conoce la entalpía en 2, que junto a una temperatura de salida, que debemos seleccionar, pueden hallarse los parámetros de 2.
- El separador de humedad separa la corriente de entrada en una de vapor saturado ($x=1$, punto 8) y otra de líquido saturado ($x=0$, punto 3), en las mismas condiciones de presión y temperatura. Para conocer el caudal de cada corriente, basta con aplicar la Ec. 10 y 11.
- Para el punto 9, debe fijarse una presión de salida de la turbina. El otro parámetro que puede calcularse es la entalpía, a partir de la Ec. 3.
- En 4, por ser la salida de una válvula, se conoce su entalpía (la misma que 3). La presión también se conoce, será la misma que la de la salida de la segunda turbina, que se debe elegir, ya que es una condición necesaria para que pueda mezclarse posteriormente el caudal 7 con 9.
- El estado de vapor del punto 5 y 7 será el mismo que en 3 y 8, ya que son las salidas de un separador de humedad. La presión en 5 y 7 será la de la salida de la primera turbina de vapor. El caudal del punto 5 y 7 se obtiene con Ec. 10 y 11.
- La presión en 6 será la misma que en 13 y 14, es decir, la de la extracción, pues el fluido debe reinyectarse a la misma presión. La entalpía en 6 se calcula con la Ec. 14.
- En el punto 10 se tiene la presión, la misma que la de la salida de la primera turbina, por lo que su entalpía se halla con la Ec. 15, a partir de las corrientes de 7 y 9, ya calculadas.
- Para poder calcular los parámetros en 11, hay que fijar previamente la presión de salida de la segunda turbina, luego se aplica la Ec 3.
- Para el punto 7, se sabe que el condensador es isóbaro, y su salida es líquido saturado ($x=0$), por lo que se conoce su presión y estado del vapor.
- Los parámetros en 11 se hallan de igual forma que en 6.
- La forma de conocer los parámetros en 14 es igual que la de 10.
- Si la temperatura de salida fuera menor a la mínima, deben repetirse los cálculos variando los parámetros a diseñar (temperatura de salida tras el paso por la válvula de expansión 1 y presiones de salida de las turbina de alta y baja presión).

El proceso seguido para la optimización es el siguiente:

- Primero, se determina la presión de salida de la turbina de baja presión, será 0.01 bar, al igual que en la tecnología flash.
- Segundo, se selecciona una temperatura de salida de la válvula 1.

- Tercero, se selecciona una presión de salida de la turbina 1.
- Cuarto, se varía la presión de salida de la primera turbina, para ver cómo afecta al ciclo, dejando fija la presión de salida de la turbina 2 y la temperatura de salida de la válvula 1. Si no se alcanza la temperatura de reinyección mínima, esta presión debe aumentar.
- Una vez que se escoge la presión de salida que proporciona más potencia, se varía la temperatura de salida de la primera válvula, para ver cómo afecta al ciclo.

Durante este desarrollo, se ha observado que:

- La temperatura de reinyección del fluido geotérmico depende mayoritariamente de la diferencia de presiones entre la entrada a la turbina 1 y la salida de la turbina 2.
- Un descenso de la presión de salida de la segunda turbina provoca mayor potencia neta, y un descenso de temperatura del fluido en la reinyección. Sin embargo compensa que en las turbinas se produzca la mayor diferencia posible de presión, por ello se pone 0.01 bar para la salida de la segunda, al igual que en el ciclo flash.
- Aumentar la temperatura de salida de la primera válvula, aumenta la temperatura de reinyección, pero no tanto como la presión de las turbinas, por lo que en primer lugar debe ajustarse las presiones.
- Un aumento de la temperatura de salida tras la válvula 1 aumenta la eficiencia y la potencia neta del ciclo. Por lo que conviene ponerla lo más alta posible.

En la tabla 34 del Anexo 1 se muestran las mejores configuraciones para distintas temperaturas.

En la tabla siguiente pueden verse los parámetros de temperatura, presión, estado, caudal, entropía y entalpía para cada punto del ciclo doble flash con las mejores prestaciones obtenidas.

	Presión (bar)	Temperatura (°C)	Entalpía (kJ/kg)	Caudal (kg/s)	Entropía (kJ/kgK)	Estado fluido
1	23.18	220	943.5	100	2.52	Líquido saturado (x=0)
2	17.23	205	943.5	100	2.52	Mezcla (x=0.0357)
3	17.23	205	875	96.43	2.38	Líquido saturado (x=0)
4	11.68	186.8	875	96.43	2.38	Mezcla (x=0.0411)
5	11.68	186.8	793.2	92.47	2.20	Líquido saturado (x=0)
6	23.18	194.1	832.5	92.47	2.22	Líquido comprimido
7	11.68	186.8	2783	3.96	6.53	Vapor saturado (x=1)
8	17.23	205	2795	3.57	6.39	Vapor saturado (x=1)
9	11.68	186.8	2731	3.57	6.42	Mezcla (x=0.9738)
10	11.68	186.8	2759	7.53	6.48	Mezcla (x=0.9876)
11	0.01	6.97	1956	7.53	6.98	Mezcla (x=0.7756)
12	0.01	6.97	29.27	7.53	0.11	Líquido saturado (x=0)
13	23.18	7.08	32.04	7.53	0.11	Líquido comprimido
14	23.18	180	772.3	100	2.06	Líquido comprimido

Tabla 13. Parámetros para cada punto de la central tipo doble flash.

A continuación se presentan las características de potencia, calor, eficiencia y temperatura de reinyección del fluido para la mejor configuración del ciclo doble flash.

	Temperatura reinyección (°C)	Potencia turbinas (kW)	Potencia bombas (kW)	W neto (kW)	Q total (kW)	Eficiencia (%)
DOBLE FLASH	180	6273	-3654.89	2618.11	17950	14.59

Tabla 14. Características de la central tipo doble flash.

Central ciclo binario básico

En el caso de un ciclo binario básico, las variables que podemos modificar directamente son: la temperatura de entrada a la turbina, presiones de entrada y salida de la turbina y caudal del refrigerante.

El esquema y diagramas seguidos por el ciclo binario básico aparecen en la ilustración 68, 69 y 70.

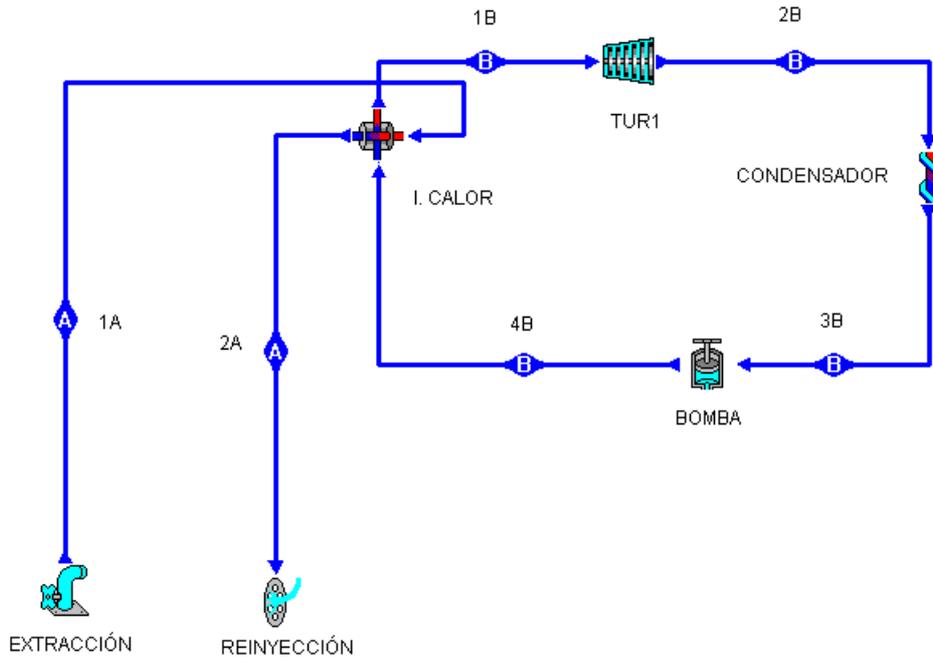


Ilustración 68. Esquema ciclo binario básico.

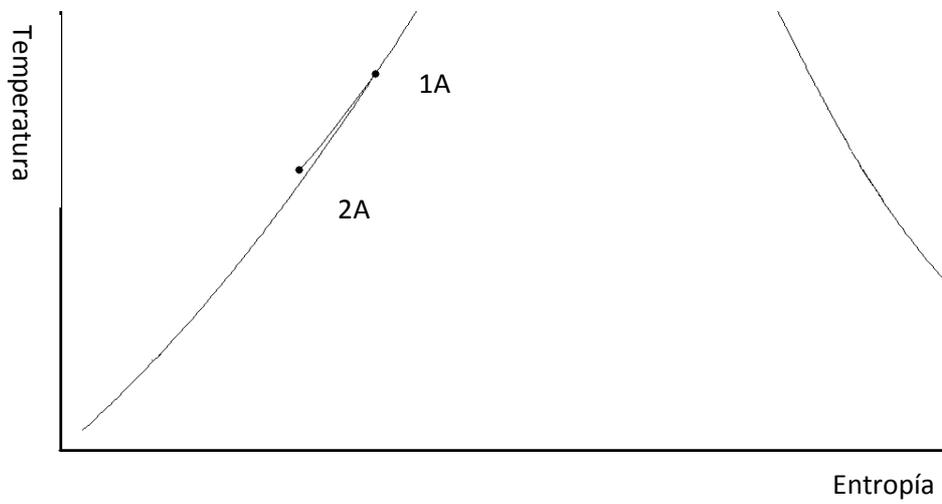


Ilustración 69. Diagrama T-s ciclo binario básico para el fluido geotérmico.

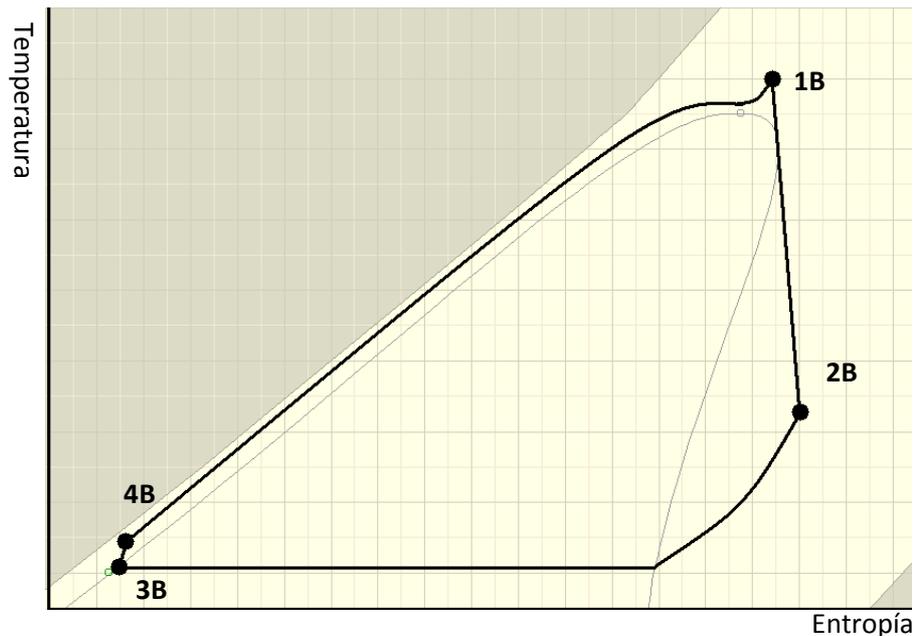


Ilustración 70. Diagrama T-s ciclo binario básico para isopentano.

Los parámetros para cada punto del ciclo se obtienen a partir del diagrama T-s del isopentano, proporcionado a partir del software Termograf. Para hallarlos, es necesario conocer al menos dos en cada punto, que se calculan de la forma siguiente:

- En el punto 1B, se fija la temperatura y presión de entrada a la turbina.
- En 2B se conoce la presión, que es la de la salida de la turbina, la cual hay que seleccionar. Con la Ec. 3 se obtiene la entalpía. Hay que tener cuidado que la recta 1B-2B no toque la curva de saturación, pues se produciría un descenso del rendimiento de la turbina.
- Para 3B, se sabe que la salida de un condensador es líquido saturado, por lo que el estado de vapor es nulo ($x=0$). Además los condensadores son isóbaros, por lo que la presión de 3B es la misma que en el punto 2B, es decir, la que se ha escogido.
- 4B se calcula a partir de la Ec. 14. La presión en este punto es la misma que a la entrada de la turbina, escogida en el primer paso, ya que el intercambiador de calor es isóbaro.
- Para diseñar el caudal de isopentano que circulará por el ciclo Rankine binario, debe tenerse en cuenta las entalpías de entrada y salida del fluido geotérmico, y su caudal (100kg/s). Las entalpías de entrada y salida pueden obtenerse a partir del diagrama T-s o tablas del agua, conociendo la temperatura y el estado de vapor en la entrada, y la temperatura y presión (igual que la presión en la entrada) en la salida. Posteriormente, se introducen los datos en la Ec. 16, y se obtiene el caudal de refrigerante.

Se ha seguido el siguiente proceso para optimizar la central de ciclo binario básico para el isopentano:

- Se determina la presión en la salida de la turbina, será 0.05 bar, ya que es el valor que más potencia neta genera.
- Se selecciona una temperatura y presión de entrada a la turbina.
- A continuación se varía la presión y la temperatura de entrada a la turbina, y se calcula el caudal, potencia neta y eficiencia. Se selecciona la configuración que ofrezca mejores prestaciones

Durante este desarrollo, se ha observado que:

- Un aumento en la presión de salida de la turbina permite un mayor caudal de refrigerante, lo que a priori, supondría un aumento en la potencia generada por las turbinas, sin embargo, es más efectivo poner una presión de salida baja.
- Temperaturas y presiones lo más altas posibles en la entrada de la turbina proporciona mayores prestaciones del ciclo.
- Mientras que en la tecnología flash y doble flash el caudal permanece constante y la temperatura de reinyección es lo que varía, en el ciclo binario el caudal cambia según el calor cedido por el fluido geotérmico, que es fijo.

En la tabla 35 del Anexo 1 se muestran las mejores configuraciones para distintas temperaturas.

En la tabla siguiente puede verse los parámetros de temperatura, presión, estado, caudal, calidad del vapor y entalpía para cada punto del ciclo binario básico con mejores prestaciones.

	Presión (bar)	Temperatura (°C)	Entalpía (kJ/kg)	Caudal (kg/s)	Entropía (kJ/kgK)	Estado fluido
1 A	23.18	220	943.5	100	2.52	Líquido saturado (x=0)
2 A	23.18	180	763.8	100	2.14	Líquido comprimido
1 B	39	219	806.65	22.59	2.16	Vapor sobrecalentado
2 B	0.05	70.183	570.1	22.59	2.28	Vapor sobrecalentado
3 B	0.05	-37.27	5.38	22.59	0.02	Líquido saturado (x=0)
4 B	39	-36.15	12.10	22.59	0.03	Líquido comprimido

Tabla 15. Parámetros para cada punto de la central de ciclo binario básico.

En la tabla 16 pueden verse las características de potencia, calor, eficiencia y temperatura de reinyección del fluido para el ciclo binario simple ya optimizado.

	Temperatura reinyección (°C)	Potencia turbinas (kW)	Potencia bombas (kW)	W neto (kW)	Q total (kW)	Eficiencia (%)
C. B. BÁSICO	180	4542.47	-129.06	4413.41	17950	24.59

Tabla 16. Características de la central de ciclo binario básico.

Central de ciclo binario con regeneración y purga

En un ciclo binario con regeneración y purga, los parámetros modificables directamente son: la temperatura y presión de entrada a la primera turbina, presiones de entrada y salida de la segunda turbina, caudal de sangrado y caudal del refrigerante.

El esquema y el diagrama seguido por este tipo de ciclo binario pueden verse en la ilustración 69, 71 y 72.

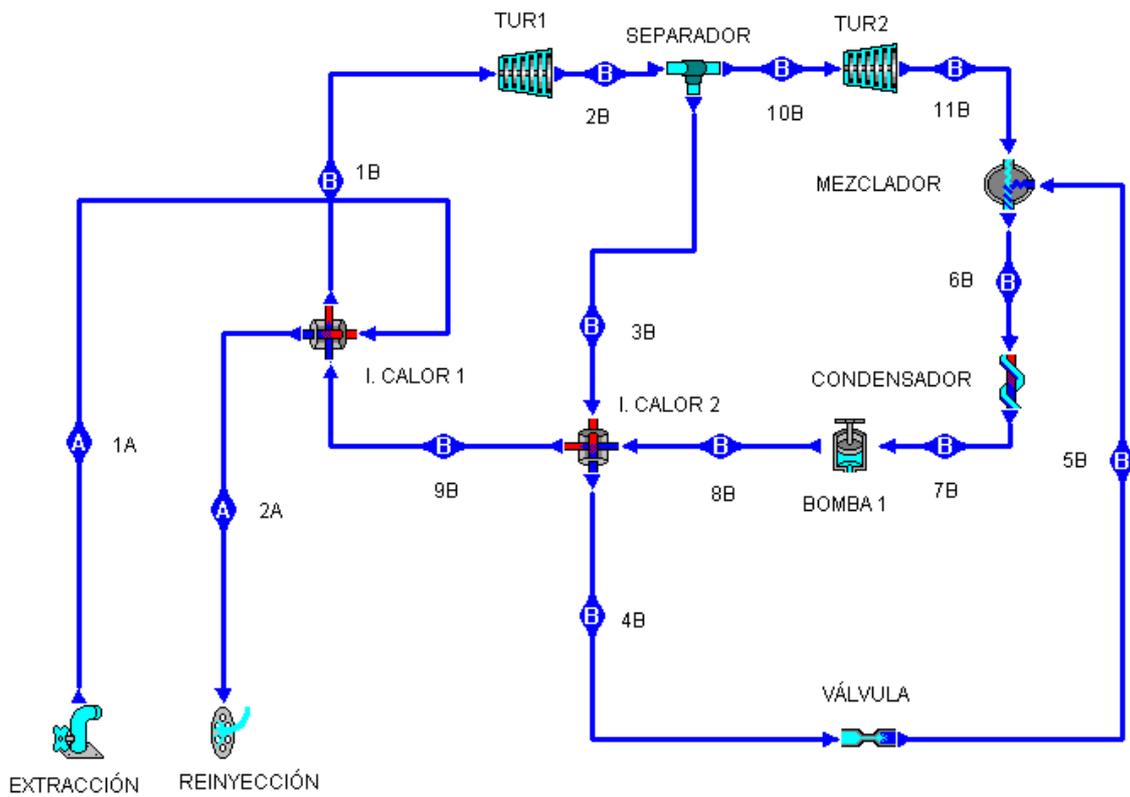


Ilustración 71. Esquema ciclo binario de regeneración con purga.

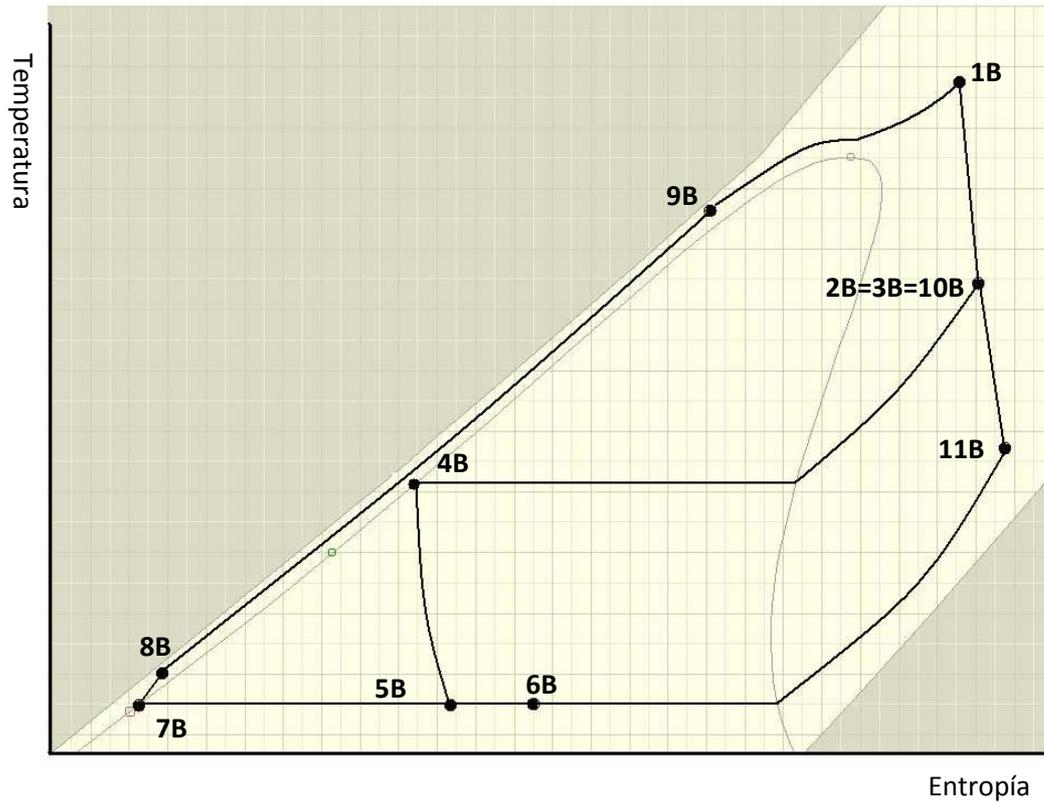


Ilustración 72. Diagrama T-s ciclo de regeneración con purga para isopentano.

Los parámetros para cada punto del ciclo, se obtienen a partir del diagrama T-s del software Termograf. Para hallarlos, es necesario conocer al menos dos en cada punto, que se calculan de la forma siguiente:

- En el punto 1B, se fija la temperatura y presión de entrada a la turbina.
- En 2B se conoce la presión, que es la de la salida de la primera turbina, que hay que escoger. Con la Ec. 3 se obtiene la entalpía.
- El punto 3B y 10B tienen las mismas características termodinámicas que 2B, sin embargo el caudal que circula por ellos no es el mismo. El caudal de sangrado es una variable que se elige. Para facilitar los cálculos posteriores, el caudal que circula por estos puntos se expresará de la forma siguiente:

$$\dot{m}_{3B} = \dot{m}_{refrig} \cdot sangrado \quad (Ec. 20)$$

$$\dot{m}_{10B} = \dot{m}_{refrig} \cdot (1 - sangrado) \quad (Ec. 21)$$

Donde:

- \dot{m}_{3B} es el caudal que circula por el punto 3B
- \dot{m}_{10B} es el caudal que circula por el punto 10B
- \dot{m}_{refrig} es el caudal de refrigerante total.
- *sangrado* es el porcentaje de caudal de sangrado elegido.

- Tras asignar una presión al punto 11B, la entalpía de este punto puede sacarse a partir de la Ec. 3.
- El segundo intercambiador de calor actúa como un condensador para la corriente caliente (para el caudal de sangrado que viene del punto 3B), por lo que su salida es líquido saturado, y sabiendo que es isobárico, se conocen la presión y estado de vapor ($x=0$) para 4B.
- En 5B hay la misma presión que en la salida de la segunda turbina (requisito necesario para que el sangrado pueda mezclarse posteriormente con el resto de caudal), y la misma entalpía que en 4B, ya que las válvulas son isoentálpicas.
- El mezclador utilizado para juntar las dos corrientes es isobárico, por lo que la presión en 6B es la misma que en 5B y 11B, es decir, la de la salida de la segunda turbina. La entalpía puede calcularse, sin conocer el caudal de refrigerante, metiendo la Ec. 20 y 21 en la Ec. 15:

$$\dot{m}_{3B}(h_{5B}) + \dot{m}_{10B}(h_{11B}) = \dot{m}_{6B}(h_{6B})$$

$$\dot{m}_{refrig} \cdot sangrado \cdot (h_{5B}) + \dot{m}_{refrig} \cdot (1 - sangrado) \cdot (h_{11B}) = \dot{m}_{refrig} \cdot (h_{6B})$$

$$sangrado \cdot (h_{5B}) + (1 - sangrado) \cdot (h_{11B}) = h_{6B}$$

Donde:

- h_i es la entalpía en el punto i.
- La salida del condensador es líquido saturado, y al ser isobárico, se conoce la presión (la de la salida de la segunda turbina) y estado del vapor ($x=0$) en 7B.
- La presión en 8B será la misma que a la entrada de la primera turbina, ya que los dos intercambiadores de calor son isobáricos. La entalpía en este punto se halla mediante la Ec. 14.
- En 9B se conoce la presión (la misma que la de entrada a la primera turbina). La entalpía se halla mediante la Ec. 16, operando de igual forma que para hallar 6B:

$$\dot{m}_{refrig} \cdot sangrado \cdot (h_{3B} - h_{4B}) = \dot{m}_{refrig} \cdot (h_{9B} - h_{8B})$$

$$sangrado \cdot (h_{3B} - h_{4B}) = (h_{9B} - h_{8B})$$

- Por último, queda por calcular el caudal de isopentano que circula por el circuito, \dot{m}_{refrig} . Para ello, se hace uso de la Ec. 16, aplicada de la forma siguiente:

$$\dot{m}_g (h_{1A} - h_{2A}) = \dot{m}_{refrig} (h_{1B} - h_{9B})$$

Donde:

- \dot{m}_g es el caudal de fluido geotérmico (100kg/s).
- h_{1A} y h_{2A} son las entalpías en la extracción y reinyección del fluido (conocidas al saber el estado de vapor y temperatura de 1 A y la presión (la misma que en 1 A) y temperatura de 1 B).
- h_{1B} y h_{9B} son valores calculados anteriormente.

Se ha seguido el siguiente método de optimización:

- En primer lugar se fija la presión de salida de la segunda turbina a 0.05 bar, ya que así se obtiene mayor potencia neta.
- Posteriormente se asigna una presión de salida de la primera turbina, y un sangrado de la mitad de caudal del refrigerante.
- Después se escoge una temperatura y presión de entrada a la primera turbina, y se calcula el caudal de refrigerante y las prestaciones del ciclo. Se varían estos dos parámetros dejando el resto intactos, y se seleccionan los que den mayor potencia neta.
- Con la temperatura y presión seleccionadas en el paso anterior, se varía la presión de entrada a la segunda turbina. Al igual que antes, se calculan las prestaciones y se escoge la presión más adecuada.
- Por último, se varía el sangrado, y tras hallar el caudal y prestaciones para distintos valores, se selecciona el mejor.

Durante la optimización, se ha observado lo siguiente:

- Una presión de salida de la segunda turbina muy baja (0.05 bar) aumenta la potencia neta del ciclo, por lo que compensa ponerla, a pesar de que el caudal de refrigerante sea menor.
- Un aumento tanto de la temperatura como de la presión de entrada a la turbina 1 mejora las prestaciones del ciclo, tanto la potencia como la eficiencia, por lo que estos valores deben ser los más altos posibles.
- Una presión de salida de la primera turbina baja mejora bastante la eficiencia y la potencia neta de la central, por lo que este valor deberá ser bajo, a pesar de rebajar el caudal de refrigerante.
- Las prestaciones más altas se consiguen con un alto porcentaje de sangrado, cuanto más alto sea este valor, menos potencia se genera en la segunda turbina, sin embargo, se ha comprobado que cuanto más caudal circule por el sangrado y más baja sea la presión de salida de la primera turbina, más potencia y eficiencia se produce en el ciclo. Por lo que el efecto de la segunda turbina es casi nulo.

Las mejores configuraciones para distintos parámetros pueden observarse en la tabla 40 del Anexo 1.

En la tabla siguiente pueden verse los parámetros de temperatura, presión, estado, caudal, calidad del vapor y entalpía para cada punto de la regeneración con purga con mejores prestaciones.

	Presión (bar)	Temperatura (°C)	Entalpía (kJ/kg)	Caudal (kg/s)	Entropía (kJ/kgK)	Estado fluido
1 A	23.18	220	943.5	100	2.52	Líquido saturado (x=0)
2 A	23.18	180	763.8	100	2.14	Líquido comprimido
1 B	39	219	806.649	60.36	2.16	Vapor sobrecalentado
2 B	2	136.44	698.78	60.36	2.203	Vapor sobrecalentado
3 B	2	136.44	698.78	59.76	2.203	Vapor sobrecalentado
4 B	2	49.17	196.596	59.76	0.71	Líquido saturado (x=0)
5 B	0.05	-37.27	196.596	59.76	0.83	Mezcla (x=0.4884)
6 B	0.05	-37.27	200.3	60.36	0.85	Mezcla (x=0.4979)
7 B	0.05	-37.27	5.38	60.36	0.02	Líquido saturado (x=0)
8 B	39	-36.15	12.1	60.36	0.03	Líquido comprimido
9 B	39	160.31	509.26	60.36	1.52	Líquido comprimido
10 B	2	136.44	698.78	0.60	2.203	Vapor sobrecalentado
11 B	0.05	68.45	566.88	0.60	2.27	Vapor sobrecalentado

Tabla 17. Parámetros para cada punto de la central de regeneración con purga.

En la tabla 18 están las características de potencia, calor, eficiencia y temperatura de reinyección del fluido para la mejor configuración de la regeneración con purga.

	Temperatura reinyección (°C)	Potencia turbinas (kW)	Potencia bombas (kW)	W neto (kW)	Q total (kW)	Eficiencia (%)
C. B. R. PURGA	180	5602.02	-344.83	5257.19	17950	29.29

Tabla 18. Características de la central de regeneración con purga.

Ciclo binario de regeneración con bombeo

En un ciclo binario con regeneración y bombeo, los parámetros a seleccionar son: la temperatura y presión de entrada a la primera turbina, presiones de entrada y salida de la segunda turbina y caudal de sangrado y del refrigerante.

El esquema y los diagramas seguidos por este tipo de ciclo binario pueden verse en la ilustración 69, 73 y 74.

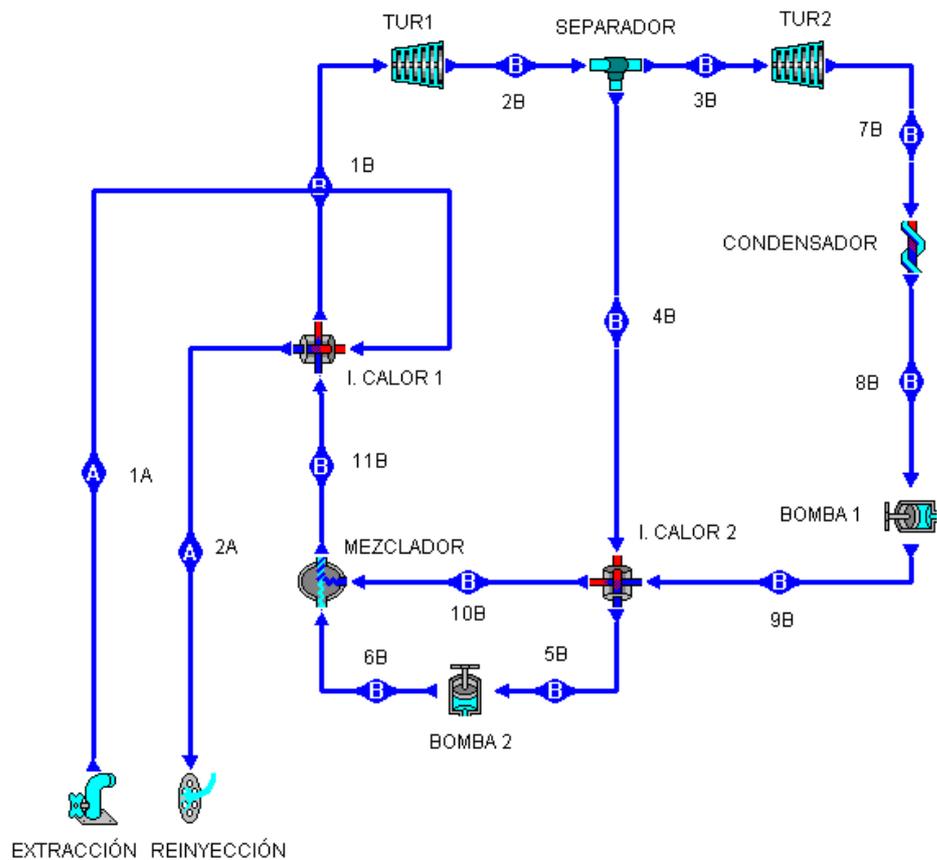


Ilustración 73. Esquema ciclo binario de regeneración con bombeo.

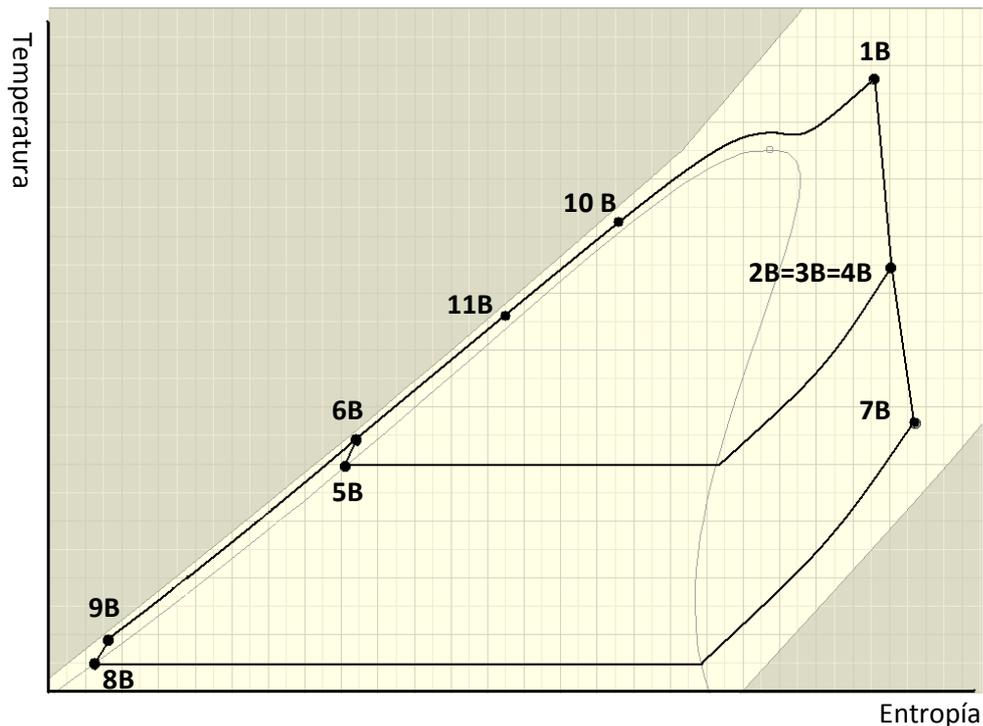


Ilustración 74. Diagrama T-s ciclo de regeneración con bombeo para isopentano.

Los parámetros para cada punto del ciclo, se obtienen a partir del diagrama T-s del software Termograf. La manera de calcularlos es muy similar a la de la regeneración con purga, como puede verse:

- En el punto 1B, se fija la temperatura y presión de entrada a la turbina.
- En 2B se conoce la presión, que es la de la salida de la primera turbina, la cual hay que escoger. Con la Ec. 3 se obtiene su entalpía.
- El punto 3B y 4B se calcula de igual forma que en la regeneración con purga, así como el caudal que circula por ellos.
- Tras asignar una presión al punto 7B, la entalpía de este punto puede sacarse a partir de la Ec. 3.
- La salida del condensador es líquido saturado, y al ser isobárico, se conoce la presión (la de la salida de la segunda turbina) y estado del vapor ($x=0$) en 8B.
- La presión en 9B será la misma que a la entrada de la primera turbina, ya que los dos intercambiadores de calor son isobáricos, al igual que el mezclador. La entalpía en este punto se halla mediante la Ec. 14.
- El segundo intercambiador de calor actúa como un condensador para la corriente caliente (para el caudal de sangrado que viene del punto 4B), por lo que su salida es líquido saturado, y sabiendo que es isobárico, se conocen la presión y estado de vapor ($x=0$) para 5B.
- En 6B hay la misma presión que en 10B, que es la misma que en la entrada de la primera turbina, ya que para que el caudal que circula por el sangrado pueda juntarse con el resto, ambas corrientes deben estar a la misma presión. La entalpía en 6B se halla con la Ec. 14.

- La presión en 10 B será la misma que la de entrada de la primera turbina. Su entalpía se halla de forma análoga a la regeneración con purga, a partir de la Ec. 16:

$$\dot{m}_{refr} \cdot sangrado(h_{4B} - h_{5B}) = \dot{m}_{refr} \cdot (1 - sangrado)(h_{10B} - h_{9B})$$

$$sangrado(h_{4B} - h_{5B}) = (1 - sangrado)(h_{10B} - h_{9B})$$

$$\frac{sangrado(h_{4B} - h_{5B})}{1 - sangrado} + h_{9B} = h_{10B}$$

- Para poder calcular la entalpía en 11 sin conocer el caudal de refrigerante que circula por el ciclo, se procede de igual forma que en la regeneración con purga. En este caso, el caudal que circula por 6B es $\dot{m}_{refrig} \cdot sangrado$, mientras que el que circula por 10B es $\dot{m}_{refrig} \cdot (1 - sangrado)$. Al meter los datos en la Ec. 16 queda:

$$\dot{m}_{refr} \cdot sangrado \cdot h_{6B} + \dot{m}_{refr} \cdot (1 - sangrado)h_{10B} = \dot{m}_{refr} \cdot h_{11B}$$

$$sangrado \cdot h_{6B} + (1 - sangrado)h_{10B} = h_{11B}$$

La presión en el punto 11 es la misma que 10B y 6B, pues el mezclador es isobárico.

- El caudal de isopentano que circula por el circuito, \dot{m}_{refrig} , se halla de forma idéntica que en la regeneración con purga.

Se ha seguido el mismo método de optimización que en la regeneración con purga.

Durante la optimización, se ha observado lo siguiente:

- Una presión de salida de la segunda turbina muy baja (0.05 bar) aumenta la potencia neta del ciclo, por lo que compensa ponerla, a pesar de que el caudal de refrigerante sea menor.
- Un aumento tanto de la temperatura como de la presión de entrada a la turbina 1 mejora las prestaciones del ciclo, tanto la potencia como la eficiencia, por lo que estos valores deben ser los más altos posibles.
- Una presión de salida de la primera turbina baja mejora bastante la eficiencia y la potencia neta de la central, por lo que este valor deberá ser bajo, a pesar de rebajar el caudal de refrigerante.
- Al igual que en la regeneración con purga, las prestaciones más altas se consiguen con un alto porcentaje de sangrado, sin embargo, si se asigna un sangrado demasiado alto (0.99), la entalpía en ciertos puntos sale del orden de decenas de miles (kJ/kg), lo que es impensable.

En la tabla 41 del Anexo 1 se muestran las mejores configuraciones para distintas temperaturas.

En la tabla siguiente se observan la temperatura, presión, estado, caudal, calidad del vapor y entalpía para cada punto de la regeneración con bombeo con mejores prestaciones.

	Presión (bar)	Temperatura (°C)	Entalpía (kJ/kg)	Caudal (kg/s)	Entropía (kJ/kgK)	Estado fluido
1 A	23.18	220	943.5	100	2.52	Líquido saturado (x=0)
2 A	23.18	180	763.8	100	2.14	Líquido comprimido
1 B	39	219	806.649	49.46	2.16	Vapor sobrecalentado
2 B	2	136.44	698.78	49.46	2.203	Vapor sobrecalentado
3 B	2	136.44	698.78	20.98	2.203	Vapor sobrecalentado
4 B	2	136.44	698.78	28.48	2.203	Vapor sobrecalentado
5 B	2	49.17	196.596	28.48	0.71	Líquido saturado (x=0)
6 B	39	50.28	203.88	28.48	0.71	Líquido comprimido
7 B	0.05	68.45	566.88	20.98	2.27	Vapor sobrecalentado
8 B	0.05	-37.27	5.38	20.98	0.02	Líquido saturado (x=0)
9 B	39	-36.15	12.1	20.98	0.03	Líquido comprimido
10 B	39	208.567	765.36	20.98	2.07	Vapor sobrecalentado
11 B	39	134.64	428.47	49.46	1.33	Líquido comprimido

Tabla 19. Parámetros para cada punto de la central de regeneración con bombeo.

En la tabla 20 pueden verse las características de potencia, calor, eficiencia y temperatura de reinyección del fluido para la mejor configuración del ciclo de regeneración con bombeo.

	Temperatura reinyección (°C)	Potencia turbinas (kW)	Potencia bombas (kW)	W neto (kW)	Q total (kW)	Eficiencia (%)
C. B. R. BOMBEO	180	6480.76	-284.746	6196.014	17950	34.52

Tabla 20. Características de la central de regeneración con bombeo.

Ciclo binario de regeneración con intercambiador abierto

En este tipo de ciclo, los parámetros a escoger son: temperatura y presión de entrada a la primera turbina, presiones de entrada y salida de la segunda, caudal de sangrado y del refrigerante.

El esquema y los diagramas seguidos por este tipo de ciclo binario pueden verse en la ilustración 69, 75 y 76.

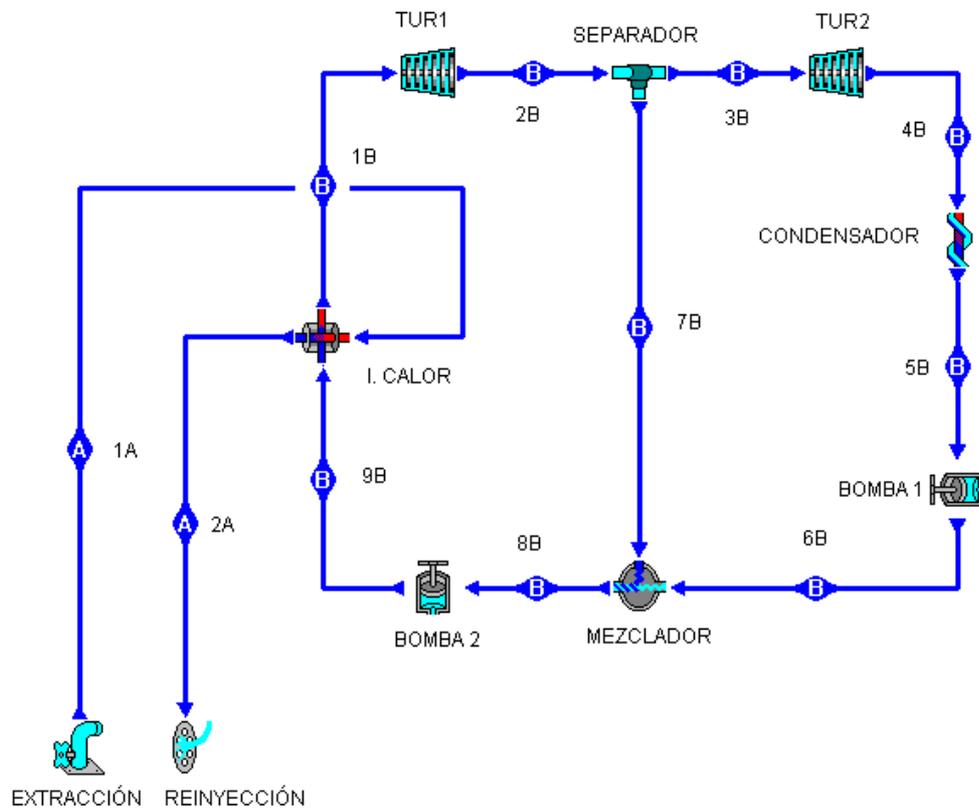


Ilustración 75. Esquema ciclo binario de regeneración con intercambiador abierto.

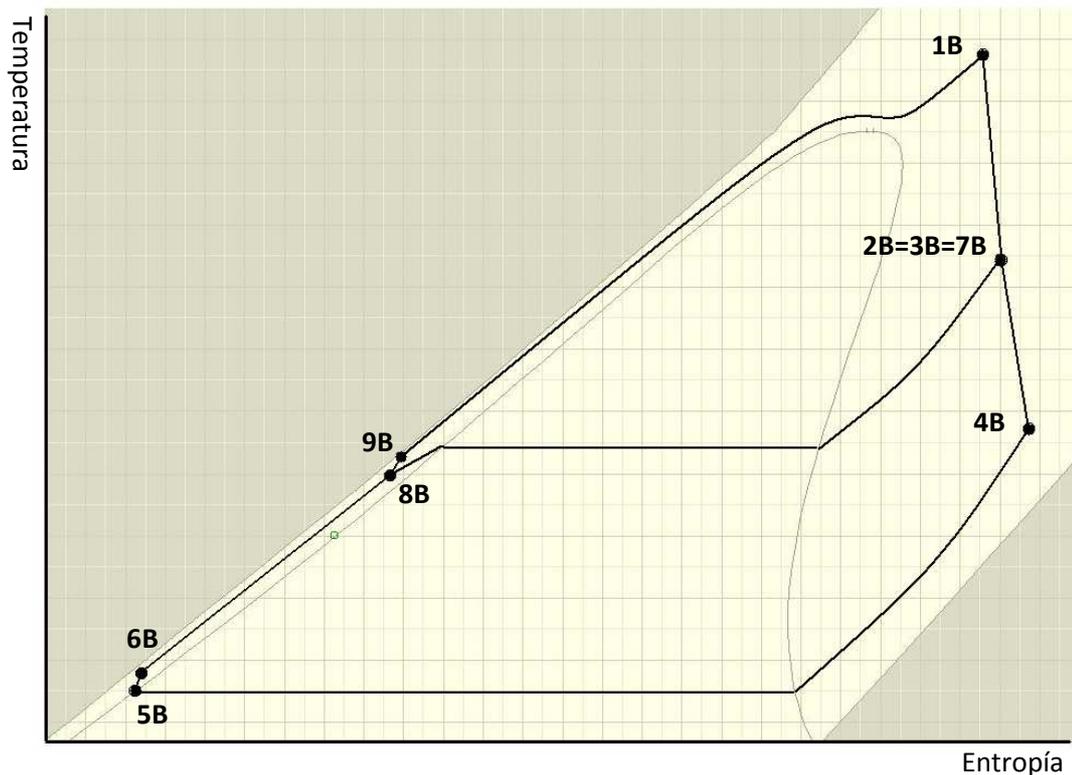


Ilustración 76. Diagrama T-s ciclo de regeneración con intercambiador abierto para isopentano.

Los parámetros de cada punto del ciclo, se obtienen a partir del diagrama T-s del software Termograf. La forma de hallar al menos dos de ellos es la siguiente:

- En el punto 1B, se fija la temperatura y presión de entrada a la turbina.
- En 2B se conoce la presión, que es la de la salida de la primera turbina, la cual hay que escoger. Con la Ec. 3 se obtiene su entalpía.
- Los puntos 3B y 7B tienen los mismos parámetros que 2B, ya que el separador sólo divide la corriente. Por tanto, sólo varía su caudal, que se calcula de igual forma que en la regeneración con purga y la regeneración con bombeo.
- Se asigna una presión al punto 4B, la entalpía de este punto puede sacarse a partir de la Ec. 3.
- En la salida del condensador (5B), se tiene el estado de vapor, es líquido saturado ($x=0$), y al ser isobárico, se conoce la presión (la de la salida de la segunda turbina).
- La presión en 6B debe ser la misma que la de la salida de la primera turbina, puesto que después se juntarán ambas corrientes en un mezclador. La entalpía se determina con la Ec. 14.
- En 8B se conoce la presión (el mezclador es isobárico), la misma que a la salida de la primera turbina. Su entalpía se calcula de igual forma que en el resto de regeneraciones, con la Ec. 16:

$$\dot{m}_{refr} \cdot sangrado \cdot h_{7B} + \dot{m}_{refr} \cdot (1 - sangrado)h_{6B} = \dot{m}_{refr} \cdot h_{8B}$$

$$sangrado \cdot h_{7B} + (1 - sangrado)h_{6B} = h_{8B}$$

- En 9B hay la misma presión que a la entrada de la primera turbina, ya que el intercambiador de calor es isobárico. La entalpía de este punto puede hallarse con la Ec. 14.
- El caudal de isopentano que circula por el circuito, \dot{m}_{refrig} , se halla de forma idéntica que en las regeneraciones anteriores.

Se ha seguido el mismo método de optimización que en la regeneración con purga.

Durante la optimización, se ha observado lo siguiente:

- Una presión de salida de la segunda turbina muy baja (0.05 bar) aumenta la potencia neta del ciclo, por lo que compensa ponerla, a pesar de que el caudal de refrigerante sea menor.
- Un aumento tanto de la temperatura como de la presión de entrada a la turbina 1 mejora las prestaciones del ciclo, tanto la potencia como la eficiencia, por lo que estos valores deben ser los más altos posibles.
- Una presión de salida de la primera turbina baja mejora bastante la eficiencia y la potencia neta de la central, por lo que este valor deberá ser bajo, a pesar de rebajar el caudal de refrigerante.
- Al igual que en la regeneración con purga, las prestaciones más altas se consiguen con un alto porcentaje de sangrado, sin embargo, si el caudal de sangrado es muy alto, la salida del mezclador cae en estado de mezcla, por lo que habría que usar un condensador para pasarlo a líquido saturado y luego poder elevar la potencia con una bomba (por ello el porcentaje de sangrado máximo, que permite que la salida del mezclador sea líquido comprimido, es 0.27).

Las mejores configuraciones para este tipo de regeneración aparecen reflejadas en la tabla 42 del Anexo 1.

En la tabla 21 se observan la temperatura, presión, estado, caudal, calidad del vapor y entalpía para cada punto de la regeneración con intercambiador abierto con mejores prestaciones.

	Presión (bar)	Temperatura (°C)	Entalpía (kJ/kg)	Caudal (kg/s)	Entropía (kJ/kgK)	Estado fluido
1 A	23.18	220	943.5	100	2.52	Líquido saturado (x=0)
2 A	23.18	180	763.8	100	2.14	Líquido comprimido
1 B	39	219	806.65	29.59	2.16	Vapor sobrecalentado
2 B	2	136.44	698.78	29.59	2.20	Vapor sobrecalentado
3 B	2	136.44	698.78	21.6	2.20	Vapor sobrecalentado
4 B	0.05	68.45	566.88	21.6	2.27	Vapor sobrecalentado
5 B	0.05	-37.27	5.38	21.6	0.02	Líquido saturado (x=0)
6 B	2	-37.21	5.71	21.6	0.02	Líquido comprimido
7 B	2	136.44	698.78	7.99	2.20	Vapor sobrecalentado
8 B	2	47.60	192.84	29.59	0.70	Líquido comprimido
9 B	39	48.71	200.09	29.59	0.70	Líquido comprimido

Tabla 21. Parámetros para cada punto de la central de regeneración con intercambiador abierto.

En la siguiente pueden verse las características de potencia, calor, eficiencia y temperatura de reinyección del fluido para la mejor configuración del ciclo binario de regeneración con intercambiador abierto.

	Temperatura reinyección (°C)	Potencia turbinas (kW)	Potencia bombas (kW)	W neto (kW)	Q total (kW)	Eficiencia (%)
C. B. R. I. ABIERTO	180	5135.45	-55.35	5080.1	17950	28.30

Tabla 22. Características de la central de regeneración con intercambiador abierto para isopentano.

Central de ciclo binario con recalentamiento

En este tipo de ciclo binario deben asignarse: temperatura y presión de entrada a la primera turbina, temperatura y presiones de entrada a la segunda turbina y caudal de refrigerante que circula por el ciclo.

El esquema y los diagramas seguidos por este tipo de ciclo pueden verse en la ilustración 77, 78 y 79.

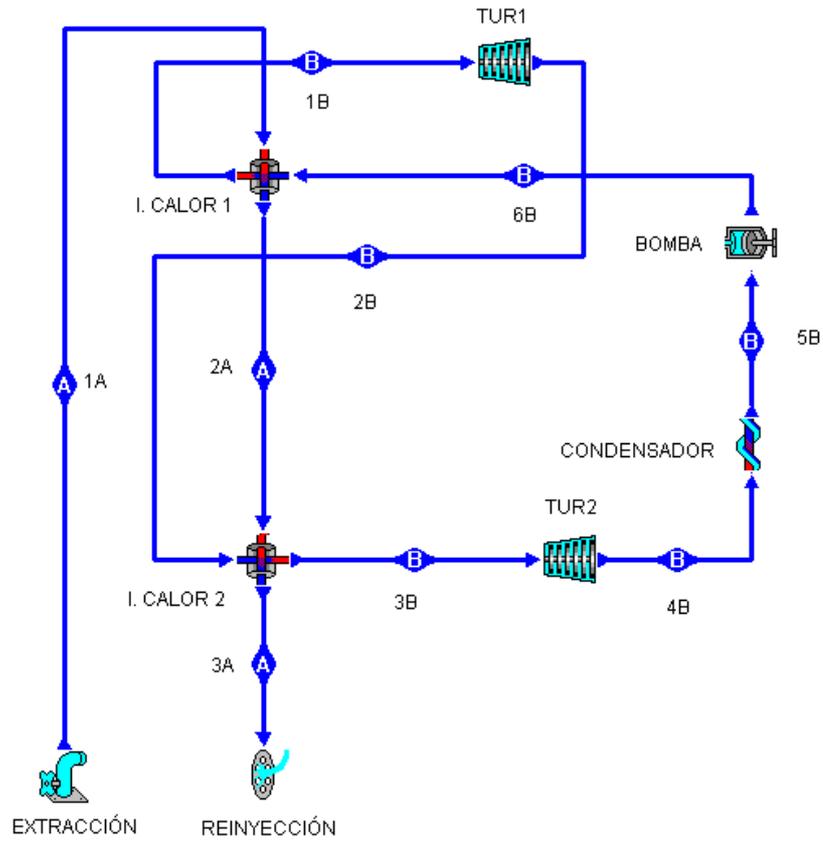


Ilustración 77. Esquema ciclo binario con recalentamiento.

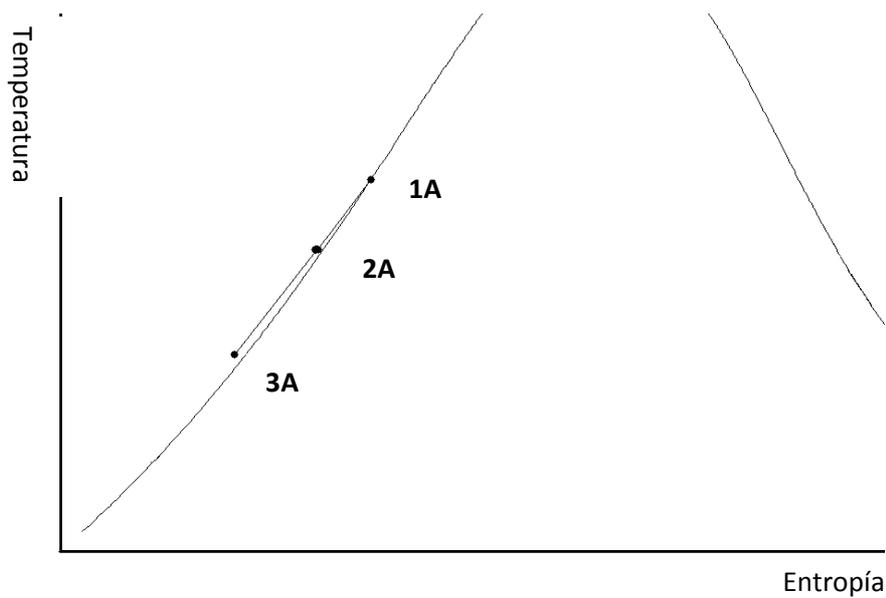


Ilustración 78. Diagrama T-s ciclo binario con recalentamiento para el fluido geotérmico.

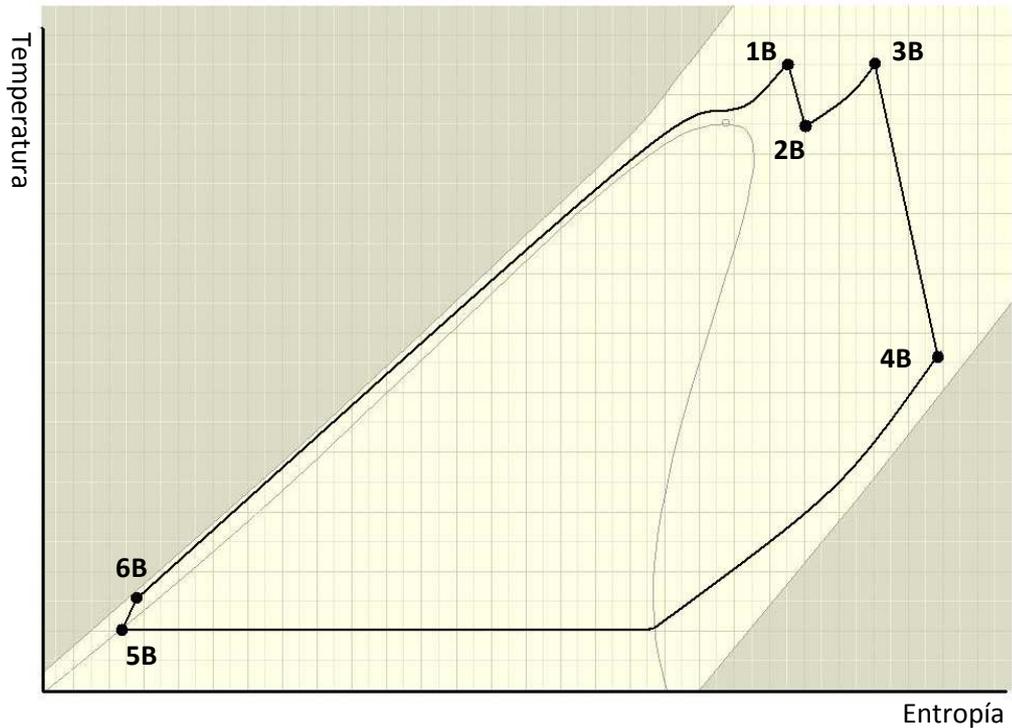


Ilustración 79. Diagrama T-s ciclo de recalentamiento para isopentano.

Los parámetros para cada punto del ciclo, se obtienen a partir del diagrama T-s del software Termograf. Este ciclo tiene varias formas de calcularse, una de ellas es la siguiente:

- Para comenzar, se asigna una presión y una temperatura de entrada a la primera turbina, con ello se obtienen los parámetros del 1B.
- Posteriormente, se selecciona un valor para la presión de salida de la turbina 1. La entalpía en el punto 2B se obtiene con la Ec. 3.
- El punto 3B tendrá la misma presión de salida que la turbina 1, ya que los intercambiadores son isóbaros. Debe darse una temperatura en este punto, que será menor que la del punto 2 A.
- Se selecciona una presión de salida de la segunda turbina, que junto a la Ec. 3, permiten calcular el resto de parámetros de 4B.
- En la salida del condensador hay líquido saturado ($x=0$), y es isóbaro (misma presión que en la entrada), por lo que se conoce la presión y estado de vapor de 5B.
- La presión de 6B será la de entrada a la primera turbina, pues el intercambiador de calor es isóbaro, y su entalpía puede determinarse con la Ec. 14.
- Para definir el caudal de isopentano que circulará por el ciclo, así como la entalpía del punto 2 A, debe aplicarse la ecuación de la termodinámica para cada intercambiador. Esto es mediante la Ec. 16:

$$\dot{m}_g (h_{1A} - h_{2A}) = \dot{m}_{refr} (h_{1B} - h_{6B})$$

$$\dot{m}_g (h_{2A} - h_{3A}) = \dot{m}_{refr} (h_{3B} - h_{2B})$$

Se obtiene un sistema de dos ecuaciones con dos incógnitas. Al despejar \dot{m}_{refr} en ambas expresiones e igualarlas, queda:

$$\frac{h_{1A} - h_{2A}}{h_{1B} - h_{6B}} = \frac{h_{2A} - h_{3A}}{h_{3B} - h_{2B}}$$

De donde se obtiene:

$$h_{2A} = \frac{h_{1A} + h_{3A} \cdot \frac{h_{1B} - h_{6B}}{h_{3B} - h_{2B}}}{1 + \frac{h_{1B} - h_{6B}}{h_{3B} - h_{2B}}}$$

$$\dot{m}_{refr} = \dot{m}_g \cdot \frac{h_{1A} - h_{2A}}{h_{1B} - h_{6B}}$$

El método de optimización seguido es:

- En primer lugar se fija la presión de salida de la segunda turbina a 0.05 bar, ya que así se obtiene una potencia neta mayor.
- Posteriormente se asigna una presión de salida de la primera turbina.
- Ahora se selecciona una temperatura y presión de entrada a la primera turbina. Se escoge una temperatura de salida del segundo intercambiador igual o casi igual a la de entrada a la primera turbina. Se varían estos tres parámetros dejando los otros dos fijos, y se seleccionan los que den mayor potencia neta.
- Con la temperatura y presión seleccionadas en el paso anterior, se varía la presión de entrada a la segunda turbina. Al igual que antes, se calculan las prestaciones y se escoge la presión más adecuada.

Durante el desarrollo de la optimización, se ha observado:

- Una presión de salida de la segunda turbina muy baja (0.05 bar) aumenta la potencia neta del ciclo, por lo que compensa ponerla, a pesar de que el caudal de isopentano sea menor.
- Un aumento tanto de la temperatura como de la presión de entrada a la turbina 1 mejora las prestaciones del ciclo, tanto la potencia como la eficiencia, por lo que estos valores deben ser los más altos posibles.
- Una presión de salida de la primera turbina alta mejora la eficiencia y la potencia neta de la central, sin embargo, hay que probar distintas presiones, ya que las prestaciones máximas no se generan en la presión más alta.
- Las máximas prestaciones se consiguen con la temperatura tras el primer intercambiador igual a la de entrada a la primera turbina, a pesar de que esta condición me rebaja el caudal de isopentano.
- Al poner una temperatura de entrada a la segunda turbina mayor que a la primera se obtienen menores prestaciones.

La tabla 43 del Anexo 1 contiene las mejores configuraciones para el ciclo binario con recalentamiento.

En la tabla siguiente se presentan la temperatura, presión, estado, caudal, calidad del vapor y entalpía para cada punto del recalentamiento con mejores prestaciones.

	Presión (bar)	Temperatura (°C)	Entalpía (kJ/kg)	Caudal (kg/s)	Entropía (kJ/kgK)	Estado fluido
1 A	23.18	220	943.5	100	2.52	Líquido saturado (x=0)
2 A	23.18	180.9	768	100	2.15	Líquido comprimido
3 A	23.18	180	763.8	100	2.14	Líquido comprimido
1 B	39	219	806.65	22.09	2.16	Vapor sobrecalentado
2 B	35	213.36	803.07	22.09	2.16	Vapor sobrecalentado
3 B	35	219	821.69	22.09	2.19	Vapor sobrecalentado
4 B	0.05	76.95	582.82	22.09	2.32	Vapor sobrecalentado
5 B	0.05	-37.27	5.38	22.09	0.02	Líquido saturado (x=0)
6 B	39	-36.15	12.1	22.09	0.03	Líquido comprimido

Tabla 23. Parámetros para cada punto de la central de ciclo binario con recalentamiento.

En la tabla 24 están las características de potencia, calor, eficiencia y temperatura de reinyección del fluido para la mejor configuración del ciclo binario con recalentamiento.

Cálculos

	Temperatura reinyección (°C)	Potencia turbinas (kW)	Potencia bombas (kW)	W neto (kW)	Q total (kW)	Eficiencia (%)
C. B. RECALEN.	180	4541.99	-126.13	4415.86	17950	24.60

Tabla 24. Características de la central de ciclo binario con recalentamiento para isopentano.

La tabla 25 ofrece un listado de las prestaciones obtenidas para las mejores configuraciones de cada tipo de central:

TIPO CENTRAL	W NETA (kW)	Q TOTAL (kW)	EFICIENCIA (%)
FLASH	2467.07	17950	13.74
DOBLE FLASH	2618.11	17950	14.59
C. BINARIO BÁSICO	4413.41	17950	24.59
C. B. R. PURGA	5257.19	17950	29.29
C. B. R. BOMBEO	6196.014	17950	34.52
C. B. R. I. ABIERTO	5080.1	17950	28.30
C. B. RECALENTAMIENTO	4415.86	17950	24.60

Tabla 25. Resumen prestaciones ofrecidas por cada central para una extracción de 220° C y líquido saturado.

Central geotérmica en función del yacimiento

En segundo lugar, se muestran los resultados obtenidos para las tecnologías flash y de ciclo binario simple, a tres temperaturas de extracción del fluido geotérmico, 100°C, 220°C y 330°C, y en distintos estados (líquido saturado y mezcla con 60% de vapor). Con estas variaciones se pretende averiguar cuándo debe utilizarse una tecnología u otra en función de las características del yacimiento geotérmico.

La temperatura de reinyección del fluido geotérmico para cada caso es:

- 82 °C para una extracción a 100°C, tanto para líquido saturado como la mezcla.
- 180 °C para una extracción a 220°C, tanto para líquido saturado como la mezcla.
- 220 °C para una extracción a 330 °C, tanto para líquido saturado como la mezcla.

El método de optimización es el mismo que el utilizado anteriormente. El caudal de fluido geotérmico es de 100 kg/s. El refrigerante empleado en el ciclo binario es isopentano.

Las observaciones encontradas anteriormente durante la optimización, para la central tipo flash y ciclo binario simple, se repiten aquí.

En el anexo 2 pueden verse los parámetros de temperatura, presión, estado, caudal, calidad del vapor y entalpía para los puntos de cada tipo de ciclo, y para los seis casos distintos de cada tecnología.

En la tabla 26 pueden verse las características de potencia, calor, eficiencia y temperatura de reinyección del fluido geotérmico para cada central y a distintas temperaturas para el estado de líquido saturado en la extracción.

	Temperatura reinyección (°C)	Potencia turbinas (kW)	Potencia bombas (kW)	W neto (kW)	Q total (kW)	Eficiencia (%)
FLASH (100°C)	82.09	1308	-6.94	1300.58	7540	17.25
BINARIO (100°C)	82	1569.78	-13.137	1556.64	7570	20.56
FLASH (220°C)	180	6119	-3651.93	2467.07	17950	13.74
BINARIO (220°C)	180	4542.47	-129.06	4413.41	17950	24.59
FLASH (330°C)	220.3	20458	-1210.6	19247	57680	33.37
BINARIO (330°C)	-	-	-	-	-	-

Tabla 26. Características de los dos tipos de centrales para las tres temperaturas estudiadas y fluido geotérmico en estado saturado en la extracción.

En la tabla 27 pueden verse las características de potencia, calor, eficiencia y temperatura de reinyección del fluido geotérmico para cada central y a distintas temperaturas para el estado de $x=0.6$ en la extracción.

	Temperatura reinyección (°C)	Potencia turbinas (kW)	Potencia bombas (kW)	W neto (kW)	Q total (kW)	Eficiencia (%)
FLASH (100°C)	82.42	8838	-35.12	882.88	142790	6.16
BINARIO (100°C)	82	29922.86	-1384.14	28538.72	142960	19.96
FLASH (220°C)	180	14006	-196	13810	129400	10.67
BINARIO (220°C)	180	32746.27	-929.93	31816.34	129400	24.59
FLASH (330°C)	220.4	29577	-1049.27	28527.73	126040	22.63
BINARIO (330°C)	-	-	-	-	-	-

Tabla 27. Características de los dos tipos de centrales para las tres temperaturas estudiadas y fluido geotérmico con $x=0.6$ en la extracción.

No es posible obtener unos resultados para la central de ciclo binario para 330°C en la extracción, ya que la presión del fluido geotérmico para esta temperatura, es muy superior a los 40 bar establecida como máxima que es capaz de aguantar un intercambiador de calor industrial.

Conclusiones

Yacimiento geotérmico en Granada

A la luz de los resultados obtenidos, la planta de ciclo binario y regeneración con bombeo es la tecnología que genera mejores resultados, en cuanto a eficiencia térmica y potencia neta, para el yacimiento situado en Granada, de 220 °C y líquido saturado.

Este tipo de central produce un 15% más de potencia neta y más del 5% de eficiencia que la regeneración con purga, la segunda con mayores resultados.

En la tabla 25 puede comprobarse que la tecnología de ciclo binario permite un mayor aprovechamiento del calor transferido, ya que este tipo de plantas (para este yacimiento) generan más potencia neta y más rendimiento, más del doble en algunos casos. Además la salida de las turbinas en los ciclos flash se produce en estado de mezcla, por lo que la potencia real sería algo menor. En cambio en los ciclos binarios, esto no se produce, por la pendiente positiva de la curva del vapor en el diagrama T-s.

Las regeneraciones empleadas permiten un aumento del caudal de refrigerante, comparado con el ciclo binario básico y de recalentamiento, para el mismo calor cedido por el fluido geotérmico. Esto se traduce en un aumento de las prestaciones.

Es importante señalar que el rendimiento obtenido es superior al que ofrecen las centrales geotérmicas reales, ya que los cálculos se han realizado sólo del ciclo de la planta, no se ha considerado el trabajo extra ejercido por las bombas de extracción y reinyección, que compensan las pérdidas de presión producidas en los conductos. Debido a la longitud de éstos (unos 3500 m en cada pozo), deben ser bastante altas.

Existen causas comunes en todos los ciclos que maximizan sus prestaciones, éstas son: poner la máxima temperatura y presión a la entrada de la primera turbina, limitadas por el fluido geotérmico y los intercambiadores de calor, y la presión más baja posible en la salida de la segunda, limitada por el fluido que circula por ella.

Central geotérmica en función del yacimiento

Los resultados calculados para una extracción del fluido en estado saturado, muestran para la central flash, un gran aumento en cuanto a potencia neta y eficiencia al llegar a los 330°C. Sin embargo, a temperaturas inferiores ofrecen prestaciones menores que la tecnología de ciclo binario.

La central de ciclo binario tiene un incremento proporcional a la temperatura en cuanto a potencia neta y rendimiento. Sin embargo, un yacimiento con líquido saturado a una temperatura alta, como unos 330 °C, no puede aprovecharse con un ciclo binario, ya que la presión del fluido geotérmico (128 bar para el caso propuesto), es muy superior a la máxima que pueden alcanzar los intercambiadores de calor industriales.

En cuanto al yacimiento con fluido geotérmico en mezcla de vapor y líquido, la tecnología de ciclo binario es la que más potencia produce a 100 y 220 °C, con un rendimiento también superior a la otra tecnología. Además conforme se aumenta la temperatura, aumentan la potencia y la eficiencia. Al llegar a 330 °C, la planta flash dobla su potencia y rendimiento, lo que supone un aumento muy considerable. El intercambiador de la central de ciclo binario no permite obtener potencia a partir de un yacimiento a tan alta presión.

A baja temperatura, las centrales de ciclo binario son mejores que las de tecnología flash, aprovechan mejor el calor y obtienen más potencia. Pero cuando la presión del yacimiento es elevada, este tipo de tecnología no puede trabajar, por lo que se emplean las plantas con evaporación súbita, que ven incrementadas sus prestaciones con la entalpía y las altas temperaturas.

En la mayoría de los casos, las centrales flash se emplean cuando el fluido geotérmico se encuentra a altas condiciones de presión y temperatura. No sólo por la limitación del intercambiador de calor, si no porque la mayoría de refrigerantes para ciclo Rankine binario, son inflamables e inestables al superar cierta temperatura, que ronda los 120-160°C.

CONCLUSIONES FINALES

6. CONCLUSIONES FINALES

La energía geotérmica se trata de una de las fuentes renovables menos utilizada, más desconocida y con mayor potencial hasta la fecha. Este tipo de energía, junto al uso de otras renovables, puede llegar a sustituir a la energía nuclear, petróleo y gas natural para la producción de electricidad, evitando los problemas que éstas ocasionan.

A baja escala, destaca su uso para la climatización de hogares, invernaderos, y diversas utilidades en la industria, sin embargo, para que resulte económicamente rentable para la producción de electricidad, son necesarias ciertas condiciones que no están presentes en todos los lugares. Esto, unido a un precio del petróleo y del gas todavía rentable y la falta de legislación y de apoyo por parte de los Gobiernos, hace que haya países que aún no produzcan electricidad a partir de la geotermia, como España.

Previo a la construcción de una central geotérmica, mediante prospecciones similares a la de los pozos petrolíferos y demás técnicas, deben realizarse una serie de estudios de la zona, relacionados con las características del terreno a perforar y las del yacimiento geotérmico. Posteriormente, en función de las condiciones del yacimiento, se elige el tipo de tecnología de la planta a construir, con el fin de obtener las máximas prestaciones, y se estima la amortización de la central y período de explotación del acuífero.

En nuestro país se han planteado numerosos proyectos para la producción eléctrica a partir de la energía geotérmica. Finalmente, por diversas razones, ninguno ha visto la luz. Actualmente existen dos, en Guadix y Güímar, aunque la falta de noticias en los últimos meses parece indicar que tampoco llegarán a finalizarse.

Con motivo del proyecto de la construcción de una central en Guadix, se han simulado diversos ciclos geotérmicos, a partir de las características del yacimiento de esta zona, con el objetivo de buscar la configuración que permita obtener mejores prestaciones. Tras analizar dos tipos de tecnologías, y diversas configuraciones para cada una, los mejores resultados los obtuvo un ciclo binario con regeneración por bombeo. Por lo que, en base a las hipótesis asumidas, una central de este tipo sería la mejor opción.

Posteriormente, se hizo un estudio del tipo de tecnología a emplear en función de las características del fluido geotérmico extraído. Las conclusiones obtenidas demostraron que la tecnología de ciclo binario permite obtener mejores prestaciones que la de tipo flash, pero a altas condiciones de presión y temperatura ésta no puede usarse, por lo que se instala una central flash, que ve aumentadas sus prestaciones cuanto más altas son las condiciones en el acuífero.

A pesar de los inconvenientes que la energía geotérmica plantea, debido a sus ventajas resulta una opción renovable más a considerar, desde su uso en hogares hasta la producción de electricidad. A gran escala no se trata de la fuente de energía definitiva, pues no puede hacerse depender toda la producción de electricidad de esta única fuente, ya que podrían producirse grandes desastres medioambientales, pero el uso y desarrollo de ésta y las demás

renovables, sí puede permitir la sustitución de centrales nucleares y de combustibles fósiles en el futuro.

En numerosos países no resulta muy rentable la construcción de centrales geotérmicas, sin embargo, pueden emplearse otras energías renovables como apoyo, como la solar, y construir una central híbrida, haciendo rentable la construcción. Esto puede aplicarse por ejemplo a España, un país que no destaca por la geotermia de alta entalpía, y por tanto, hace falta perforar demasiados metros para conseguir unas condiciones de fluido viables, pero sí por la radiación solar que recibe.

Aunque la energía geotérmica tiene un carácter limpio y renovable, a día de hoy no existe fuente de energía alguna que lo sea al 100%, por lo que el mayor avance que podemos lograr es evitar el consumo energético innecesario en nuestro día a día.

BIBLIOGRAFÍA

7. BIBLIOGRAFÍA

Para el desarrollo del presente Trabajo se han consultado diversas fuentes, algunas son:

- [1] Ibrahim Dincer, Marc A. Rosen. "EXERGY: Energy, Environment and Sustainable Development". Elsevier. Agosto 2012.

- [2] José Sánchez Guzmán, Laura Sanz López, Luis Ocaña Robles, Carmen M^a Roa Tortosa, M^a Carmen López Ocón. "Evaluación del potencial de energía geotérmica. Estudio Técnico PER 2011-2020". Madrid 2011.

- [3] Instituto Geológico y minero de España. "La energía geotérmica". Madrid, 1974.

- [4] Guillermo Llopis Trillo y Vicente Rodrigo Angulo. "Guía de la Energía Geotérmica". Madrid, 2010.

- [5] José Sánchez Guzmán. "Yacimientos Geotérmicos. Investigación y explotación". I Congreso de Energía Geotérmica en la Edificación y la Industria". Madrid, 2008.

- [6] Asociación Nacional de Ingenieros del ICAI, Universidad Pontificia Comillas. "Energía geotérmica: análisis y prospectiva". Madrid, 2012.

- [7] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, Instituto Geológico y Minero de España. "Manual de Geotermia". Madrid, 2008.

- [8] Hörmann Gruppe. "Geotermia Profunda, el proyecto Geretsried- De la mano con la ciudad".

- [9] Juan Franqueza Palacio. "Sondeos Geotérmicos". Madrid, 2013.

- [10] Apuntes de Master de Investigación en Ingeniería Industrial. "Avances en Energías Renovables, Energía Geotérmica". Universidad de Cantabria.

- [11] A.J. Morano Rodríguez, J.L. Guillén Viñas. "Sondeos Geotérmicos Profundos, II Congreso de Energía Geotérmica en la Edificación y la Industria".

- [12] Apuntes de Grado en Ingeniería Mecánica. "Instalaciones de Energías Renovables". UC3M.

- [13] Apuntes de Grado en Ingeniería Mecánica. "Equipos térmicos". UC3M.

- [14] Apuntes de Grado en Ingeniería Mecánica. "Ingeniería Térmica". UC3M.

Algunas de las webs consultadas son:

[14] www.usgeothermal.com

[15] www.rtknet.org

[16] http://www.powershow.com/view1/25b015ZDc1Z/Geothermal_Resources_powerpoint_ppt_presentation

[17] <http://www.eumed.net/rev/tlatemoani/06/rcm.htm>

[18] <http://www.rtve.es/noticias/20110314/energia-nuclear-aporta-electricidad-mundo-con-443-reactores-activos/416958.shtml>

[19] <http://www.energiasrenovables.ciemat.es/especiales/energia/index.htm>

[20] <http://www.20minutos.es/noticia/2102554/0/>

[21] <http://www.radiogranada.es/2012/06/27/la-primera-planta-geotermica-de-espana-se-instalara-en-el-termino-de-guadix/>

[22] es.wikipedia.org

También se ha consultado otros Proyectos Fin de Carrera de contenido relacionado.

ANEXOS

8. ANEXOS

Anexo 1

Temperatura tras pasar la válvula (°C)	Presión salida turbina (bar)	Temperatura reinyección (°C)	Caudal (kg/s)	W turbinas (kW)	W bombas (kW)	W neta (kW)	Q total (kW)	eficiencia (%)
200	0.01	195.3	100	3958	-2401.03	1556.97	10580	14.72
186.8	0.01	180	100	6119	-3651.93	2467.07	17130	14.40

Tabla 28. Resultados obtenidos para la central flash a partir de un yacimiento a 220°C y estado de líquido saturado.

Temperatura tras pasar la válvula (°C)	Presión salida turbina (bar)	Temperatura reinyección (°C)	Caudal (kg/s)	W turbinas (kW)	W bombas (kW)	W neta (kW)	Q total (kW)	eficiencia (%)
85	0.01	82.86	100	1260	-5.073	1254.93	7210	14.4
99	0.01	98.99	100	96.99	-70.84	12.15	430	6.08
84.3	0.01	82.09	100	1308	-7.414	1300.59	7540	17.25

Tabla 29. Resultados obtenidos para la central flash a partir de un yacimiento a 100°C y estado de líquido saturado.

Temperatura tras pasar la válvula (°C)	Presión salida turbina (bar)	Temperatura reinyección (°C)	Caudal (kg/s)	W turbinas (kW)	W bombas (kW)	W neta (kW)	Q total (kW)	eficiencia (%)
320	0.01	305.1	100	5028	-2315.84	2712.16	11400	23.79
293.3	0.01	270	100	14640	-6696.8	7943.2	34300	23.16

Tabla 30. Resultados obtenidos para la central flash a partir de un yacimiento a 330°C y estado de líquido saturado.

Temperatura tras pasar la válvula (°C)	Presión salida turbina (bar)	Temperatura reinyección (°C)	Caudal (kg/s)	W turbinas (kW)	W bombas (kW)	W neta (kW)	Q total (kW)	eficiencia (%)
219	5.1	180	100	14006	-196	13810	129400	10.67

Tabla 31. Resultados obtenidos para la central flash a partir de un yacimiento a 220°C y x=0.6.

Temperatura tras pasar la válvula (°C)	Presión salida turbina (bar)	Temperatura reinyección (°C)	Caudal (kg/s)	W turbinas (kW)	W bombas (kW)	W neta (kW)	Q total (kW)	eficiencia (%)
99	0.33	82.42	100	8838	-35.12	8802.88	142790	6.16

Tabla 32. Resultados obtenidos para la central flash a partir de un yacimiento a 100°C y x=0.6.

Temperatura tras pasar la válvula (°C)	Presión salida turbina (bar)	Temperatura reinyección (°C)	Caudal (kg/s)	W turbinas (kW)	W bombas (kW)	W neta (kW)	Q total (kW)	eficiencia (%)
329	2.8	220.4	100	29577	-1049.27	28527.7	126040	22.63

Tabla 33. Resultados obtenidos para la central flash a partir de un yacimiento a 330°C y x=0.6.

Temperatura tras pasar la válvula (°C)	Presión salida turbina 1 (bar)	Presión salida turbina 2 (bar)	Caudal (kg/s)	Temperatura reinyección (°C)	W bombas (kW)	W turbinas (kW)	W neta (kW)	Q total (kW)	eficiencia (%)
205	11.68	0.01	100	180	-3654.89	6273	2618.11	17950	14.59
195	11.7	0.01	100	180	-3648.86	6223.3	2574.44	17950	14.34
190	11.7	0.01	100	180	-3647.88	6163.64	2515.76	17950	14.01
209	11.68	0.01	100	180	-3654.90	6256.6	2601.7	17950	14.49
200	11.68	0.01	100	180	-3654.89	6268	2613.11	17950	14.56

Tabla 34. Resultados obtenidos para la central doble flash a partir de un yacimiento a 220°C y líquido saturado.

Temperatura entrada turbina (°C)	Presión entrada turbina (bar)	Caudal Refrigerante (kg/s)	Presión salida turbina (bar)	Temperatura reinyección (°C)	W turbina (kW)	W bomba (kW)	W neta (kW)	Q total (kW)	eficiencia (%)
125	6	27.36	0.05	180	3655	-23.72	3631.28	17950	20.22
125	4	27.1	0.05	180	3379.54	-15.67	3363.87	17950	18.74
125	11.954	28.3	0.05	180	4012.87	-49.63	3963.24	17950	22.08
180	11.954	23.337	0.05	180	3987.77	-40.90	3946.86	17950	21.99
219	39	27.45	1	180	3124.38	-168.84	2955.54	17950	16.47
219	39	22.59	0.05	180	4542.47	-129.06	4413.41	17950	24.59

Tabla 35. Resultados obtenidos para la central de ciclo binario básico a partir de un yacimiento a 220°C y líquido saturado.

Temperatura entrada turbina (°C)	Presión entrada turbina (bar)	Caudal Refrigerante (kg/s)	Presión salida turbina (bar)	Temperatura reinyección (°C)	W turbina (kW)	W bomba (kW)	W neta (kW)	Q total (kW)	eficiencia (%)
90	5.78	13.023	0.05	82	1518.34	-10.99	1507.35	7570	19.91
99	7.06	12.717	0.05	82	1569.78	-13.14	1556.64	7570	20.56
99	5	12.54	0.05	82	1486.44	-9.145	1477.3	7570	19.51

Tabla 36. Resultados obtenidos para la central de ciclo binario básico a partir de un yacimiento a 100°C y líquido saturado.

Temperatura entrada turbina (°C)	Presión entrada turbina (bar)	Caudal Refrigerante (kg/s)	Presión salida turbina (bar)	Temperatura reinyección (°C)	W turbina (kW)	W bomba (kW)	W neta (kW)	Q total (kW)	eficiencia (%)
329	39	50.71	0.05	220	14041.07	-289.56	13751.5	57830	23.78

Tabla 37. Resultados obtenidos para la central de ciclo binario básico a partir de un yacimiento a 330°C y líquido saturado.

Temperatura entrada turbina (°C)	Presión entrada turbina (bar)	Caudal Refrigerante (kg/s)	Presión salida turbina (bar)	Temperatura reinyección (°C)	W turbina (kW)	W bomba (kW)	W neta (kW)	Q total (kW)	eficiencia (%)
99	7.06	242.4	0.05	82	29922.86	-1384.14	28538.7	142960	19.97

Tabla 38. Resultados obtenidos para la central de ciclo binario básico a partir de un yacimiento a 100°C y x=0.6.

Temperatura entrada turbina (°C)	Presión entrada turbina (bar)	Caudal Refrigerante (kg/s)	Presión salida turbina (bar)	Temperatura reinyección (°C)	W turbina (kW)	W bomba (kW)	W neta (kW)	Q total (kW)	eficiencia (%)
219	39	60.11	0.05	180	32746.27	-929.93	31816.3	129400	24.59

Tabla 39. Resultados obtenidos para la central de ciclo binario básico a partir de un yacimiento a 220°C y x=0.6.

Temperatura entrada primera turbina (°C)	Presión entrada primera turbina (bar)	Presión entrada segunda turbina (bar)	Temperatura reinyección (°C)	Caudal Refrigerante (kg/s)	Caudal sangrado (kg/s)	Presión salida segunda turbina (bar)	W turbinas (kW)	W bombas (kW)	W neta (kW)	eficiencia (%)	Q total (kW)
200	39	10	180	32.65	16.32	0.05	3427.21	-186.5	3240.7	18.05	17950
219	39	10	180	29.94	14.97	0.05	3622.9	-171	3384	19.23	17950
219	30	10	180	29.25	14.63	0.05	3512.7	-128.7	3384	18.86	17950
219	39	20	180	27.82	13.9	0.05	3056.4	-158.9	2897.4	16.14	17950
219	39	5	180	31.53	15.77	0.05	4180.3	-180.2	4000.1	22.29	17950
219	39	2	180	33.03	16.51	0.05	4880.1	-188.7	4691.4	26.13	17950
219	39	2	180	27.88	8.36	0.05	4744	-159.3	4584.7	25.55	17950
219	39	2	180	45.69	36.56	0.05	5214.7	-261	4953.8	27.60	17950
219	39	2	180	22.73	0.23	0.05	4608.1	-129.9	4478.2	24.95	17950
219	39	2	180	60.36	59.76	0.05	5602	-344.8	5257.2	29.29	17950

Tabla 40. Resultados obtenidos para la central de ciclo binario con regeneración y purga a partir de un yacimiento a 220°C y líquido saturado.

Temperatura entrada primera turbina (°C)	Presión entrada primera turbina (bar)	Presión entrada segunda turbina (bar)	Temperatura reinyección (°C)	Caudal Refrigerante (kg/s)	Caudal sangrado (kg/s)	Presión salida segunda turbina (bar)	W turbinas (kW)	W bombas (kW)	W neta (kW)	eficiencia (%)	Q total (kW)
200	39	15	180	49.67	24.83	0.05	4928.7	-262.2	4666.5	26	17650
219	39	15	180	43.78	21.89	0.05	5007.2	-231.1	4776.2	26.6	17650
219	30	15	180	42.33	21.16	0.05	4787.8	-158	4629.8	26.23	17650
219	39	20	180	44.28	22.14	0.05	4865	-216.8	4648.2	25.9	17650
219	39	2	180	40.1	20.05	0.05	5925.6	-238.7	5986.9	31.68	17650
219	39	2	180	22.79	0.23	0.05	4619.3	-30.31	4589	25.57	17650
219	39	2	180	47.46	28.48	0.05	6480.8	-284.7	6196	34.52	17650

Tabla 41. Resultados obtenidos para la central de ciclo binario con regeneración y bombeo a partir de un yacimiento a 220°C y líquido saturado.

Temperatura entrada primera turbina (°C)	Presión entrada primera turbina (bar)	Presión entrada segunda turbina (bar)	Temperatura reinyección (°C)	Caudal Refrigerante (kg/s)	Caudal sangrado (kg/s)	Presión salida segunda turbina (bar)	W turbinas (kW)	W bombas (kW)	W neta (kW)	eficiencia (%)	Q total (kW)
200	30	15	180	46.65	22.83	0.05	4790.2	-116.1	4674.1	26.04	17950
219	30	15	180	42.37	21.18	0.05	4791.82	-109.2	4682.7	26.09	17950
219	39	15	180	43.84	21.92	0.05	4887.17	-150	4737.1	26.39	17950
219	39	30	180	44.9	22.45	0.05	4666.81	-137.9	4528.9	26.23	17950
219	39	2	180	29.59	7.99	0.05	5135.45	-55.4	5080.1	28.3	17950
219	39	37	180	22.82	0.99	0.05	4544.13	-122.6	4421.6	24.63	17950

Tabla 42. Resultados obtenidos para la central de ciclo binario con regeneración de intercambiador abierto a partir de un yacimiento a 220°C y líquido saturado.

Temperatura entrada primera turbina (°C)	Presión entrada primera turbina (bar)	Presión entrada segunda turbina (bar)	Temperatura reinyección (°C)	Caudal Refrigerante (kg/s)	Presión salida segunda turbina (bar)	Temperatura salida del segundo intercambiador (°C)	W turbinas (kW)	W bombas (kW)	W neta (kW)	eficiencia (%)	Q total (kW)
219	39	30	180	21.56	0.05	219	4518.96	-123.1	4395.9	21.49	17950
219	35	30	180	21.62	0.05	219	4491.45	-110.7	4380.8	24.41	17950
200	39	30	180	23.25	0.05	200	4520.7	-132.8	4387.9	24.44	17950
219	39	20	180	20.64	0.05	219	4499.64	-117.8	4381.8	24.41	17950
219	39	10	180	19.64	0.05	219	4418.57	-112.1	4306.4	23.99	17950
219	39	35	180	22.09	0.05	219	4541.99	-126.1	4415.9	24.60	17950
219	39	38	180	22.46	0.05	219	4542.97	-128.2	4414.7	24.59	17950
200	39	30	180	21.62	0.05	219	4502.47	-123.5	4379	24.4	17950

Tabla 43. Resultados obtenidos para la central de ciclo binario con recalentamiento a partir de un yacimiento a 220°C y líquido saturado.

Anexo 2

	Presión (bar)	Temperatura (°C)	Entalpía (kJ/kg)	Caudal (kg/s)	Entropía (kJ/kgK)	Estado fluido
1	1.01	100	419.1	100	1.31	Líquido saturado (x=0)
2	0.56	84.3	419.1	100	1.31	Mezcla (x=0.0288)
3	0.56	84.3	353	97.12	1.13	Líquido saturado (x=0)
4	1.01	84.31	353	97.12	1.13	Líquido comprimido
5	0.56	84.3	2650	2.88	7.55	Vapor saturado (x=1)
6	0.01	6.97	2196	2.88	7.84	Mezcla (x=0.8721)
7	0.01	6.97	29.27	2.88	0.11	Líquido saturado (x=0)
8	1.01	6.98	29.43	2.88	0.11	Líquido comprimido
9	1.01	82.09	343.7	100	1.1	Líquido comprimido

Tabla 44. Parámetros para cada punto de la central flash para 100°C y líquido saturado.

	Presión (bar)	Temperatura (°C)	Entalpía (kJ/kg)	Caudal (kg/s)	Entropía (kJ/kgK)	Estado fluido
1	1.01	100	1773	100	4.94	Mezcla (x=0.6)
2	0.98	99	1773	100	4.95	Mezcla (x=0.6012)
3	0.98	99	414.8	39.88	1.3	Líquido saturado (x=0)
4	1.01	99.16	415.6	39.88	1.3	Líquido comprimido
5	0.98	99	2674	60.12	7.37	Vapor saturado (x=1)
6	0.33	71.27	2527	60.12	7.44	Mezcla (x=0.9566)
7	0.33	71.27	298.3	60.12	0.97	Líquido saturado (x=0)
8	1.01	71.28	298.4	60.12	0.97	Líquido comprimido
9	1.01	82.42	345.1	100	1.1	Líquido comprimido

Tabla 45. Parámetros para cada punto de la central flash para 100°C y x=0.6.

	Presión (bar)	Temperatura (°C)	Entalpía (kJ/kg)	Caudal (kg/s)	Entropía (kJ/kgK)	Estado fluido
1 A	1.01	100	419.1	100	1.31	Líquido saturado (x=0)
2 A	1.01	82	343.4	100	1.10	Líquido comprimido
1 B	7.06	99	601.853	12.72	1.82	Vapor saturado (x=1)
2 B	0.05	3.79	456.63	12.72	1.92	Vapor sobrecalentado
3 B	0.05	-37.27	5.38	12.72	0.02	Líquido saturado (x=0)
4 B	7.06	-37.06	6.59	12.72	0.02	Líquido comprimido

Tabla 46. Parámetros para cada punto de la central de ciclo binario básico para 100°C y líquido saturado.

	Presión (bar)	Temperatura (°C)	Entalpía (kJ/kg)	Caudal (kg/s)	Entropía (kJ/kgK)	Estado fluido
1 A	1.01	100	1773	100	4.94	Mezcla (x=0.6)
2 A	1.01	82	343.3	100	1.10	Líquido comprimido
1 B	7.06	99	601.85	242.41	1.82	Vapor saturado (x=1)
2 B	0.05	3.79	456.63	242.41	1.92	Vapor sobrecalentado
3 B	0.05	-37.27	5.38	242.41	0.02	Líquido saturado (x=0)
4 B	7.06	-34.29	12.1	242.41	0.05	Líquido comprimido

Tabla 47. Parámetros para cada punto de la central de ciclo binario básico para 100°C y x=0.6.

	Presión (bar)	Temperatura (°C)	Entalpía (kJ/kg)	Caudal (kg/s)	Entropía (kJ/kgK)	Estado fluido
1	23.18	220	943.5	100	2.52	Líquido saturado (x=0)
2	11.69	186.8	943.5	100	2.53	Mezcla (x=0.0755)
3	11.69	186.8	793.4	92.45	2.21	Líquido saturado (x=0)
4	23.18	194.1	832.6	92.45	2.22	Líquido comprimido
5	11.69	186.8	2783	7.55	6.53	Vapor saturado (x=1)
6	0.01	6.97	1972	7.55	7.04	Mezcla (x=0.782)
7	0.01	6.97	29.27	7.55	0.1058	Líquido saturado (x=0)
8	23.18	7.08	32.04	7.55	0.1073	Líquido comprimido
9	23.18	180	772.2	100	2.06	Líquido comprimido
10	23.18	220	943.5	100	2.52	Líquido saturado (x=0)

Tabla 48. Parámetros para cada punto de la central flash para 220° C y líquido saturado.

	Presión (bar)	Temperatura (°C)	Entalpía (kJ/kg)	Caudal (kg/s)	Entropía (kJ/kgK)	Estado fluido
1	23.18	220	2058	100	4.78	Mezcla (x=0.6)
2	22.74	219	2058	100	4.78	Mezcla (x=0.6011)
3	22.74	219	938.9	39.89	2.51	Líquido saturado (x=0)
4	23.18	219.2	940.3	39.89	2.51	Líquido comprimido
5	22.74	219	2801	60.11	6.29	Vapor saturado (x=1)
6	5.1	152.6	2568	60.11	6.39	Mezcla (x=0.9138)
7	5.1	152.6	643.6	60.11	1.87	Líquido saturado (x=0)
8	23.18	152.9	646	60.11	1.87	Líquido comprimido
9	23.18	180	764	100	2.14	Líquido comprimido

Tabla 49. Parámetros para cada punto de la central flash para 220° C y x=0.6.

	Presión (bar)	Temperatura (°C)	Entalpía (kJ/kg)	Caudal (kg/s)	Entropía (kJ/kgK)	Estado fluido
1 A	23.18	220	943.5	100	2.52	Líquido saturado (x=0)
2 A	23.18	180	763.8	100	2.14	Líquido comprimido
1 B	39	219	806.65	22.59	2.16	Vapor sobrecalentado
2 B	0.05	70.183	570.1	22.59	2.28	Vapor sobrecalentado
3 B	0.05	-37.27	5.38	22.59	0.02	Líquido saturado (x=0)
4 B	39	-36.15	12.10	22.59	0.03	Líquido comprimido

Tabla 50. Parámetros para cada punto de la central ciclo binario básico para 220° C y líquido saturado.

	Presión (bar)	Temperatura (°C)	Entalpía (kJ/kg)	Caudal (kg/s)	Entropía (kJ/kgK)	Estado fluido
1 A	23.18	220	2058	100	4.78	Mezcla (x=0.6)
2 A	23.18	180	764	100	2.14	Líquido comprimido
1 B	39	219	806.65	162.86	2.16	Vapor sobrecalentado
2 B	0.05	70.18	571	162.86	2.28	Vapor sobrecalentado
3 B	0.05	-37.27	5.38	2162.86	0.02	Líquido saturado (x=0)
4 B	39	-36.15	12.1	162.86	0.03	Líquido comprimido

Tabla 51. Parámetros para cada punto de la central ciclo binario básico para 220° C y x=0.6.

	Presión (bar)	Temperatura (°C)	Entalpía (kJ/kg)	Caudal (kg/s)	Entropía (kJ/kgK)	Estado fluido
1	128.5	330	1525	100	3.55	Líquido saturado (x=0)
2	54.57	269.5	1525	100	3.6	Mezcla (x=0.2134)
3	54.57	269.5	1182	78.66	2.97	Líquido saturado (x=0)
4	128.5	272.1	1193	78.66	2.97	Líquido comprimido
5	54.57	269.5	2790	21.34	5.93	Vapor saturado (x=1)
6	0.01	6.97	1831	21.34	6.54	Mezcla (x=0.7254)
7	0.01	6.97	29.27	21.34	0.11	Líquido saturado (x=0)
8	128.5	7.58	44.4	21.34	0.11	Líquido comprimido
9	128.5	220.3	948.2	100	2.5	Líquido comprimido

Tabla 52. Parámetros para cada punto de la central flash para 330° C y líquido saturado.

	Presión (bar)	Temperatura (°C)	Entalpía (kJ/kg)	Caudal (kg/s)	Entropía (kJ/kgK)	Estado fluido
1	128.5	330	2209	100	4.68	Mezcla (x=0.6)
2	126.9	329	2.209	100	4.69	Mezcla (x=0.6003)
3	126.9	329	1518	39.97	3.54	Líquido saturado (x=0)
4	128.5	329.1	1521	39.97	3.54	Líquido comprimido
5	126.9	329	2669	60.03	5.45	Vapor saturado (x=1)
6	2.8	131.2	2176	60.03	5.67	Mezcla (x=0.7486)
7	2.8	131.2	551.6	60.03	1.65	Líquido saturado (x=0)
8	128.5	132.9	567.4	60.03	1.65	Líquido comprimido
9	128.5	220.4	948.6	100	2.5	Líquido comprimido

Tabla 53. Parámetros para cada punto de la central flash para 330° C y x=0.6.

