



Diseño de un Ciclo Binario para una Planta Geotérmica en la Región del Magdalena Medio

Design of a Binary Cycle for a Geothermal Power Plant in the Magdalena Medio Region

Julián Ramírez-Fonseca¹, Oscar Ochoa-Álvarez²

¹Grupo de Estudios y Aplicaciones en Ingeniería Mecánica (GEAMEC), Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Santo Tomás, Colombia. Bogotá D.C. julian.ramirezf@usantotomas.edu.co

²Grupo de Estudios y Aplicaciones en Ingeniería Mecánica (GEAMEC), Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Santo Tomás, Colombia. Bogotá D.C. oscarochoa@usantotomas.edu.co

Recibido: dd mes aaaa. Aceptado: dd mes aaaa. Versión final: dd mes aaaa

Resumen

Por todas las dificultades que representa el uso de las energías convencionales entre ellas los problemas ambientales, el hombre se ha volcado en la búsqueda de energías renovables. Una muy prometedora fuente de energía limpia es la energía geotérmica. Esta consiste en el aprovechamiento de las altas temperaturas que se logran en el interior de la tierra a nivel superficial. Colombia posee un gran potencial de energía geotérmica por el gran número de pozos geotérmicos que existen. Entre las regiones más prometedoras esta la del Magdalena Medio. El presente estudio pretende dar una solución a las necesidades energéticas del municipio de Barrancabermeja que se calculan alrededor de 10 MW. Aprovechando la cercanía del río Magdalena, este se utilizó como sumidero de calor. Se determinó una temperatura aprovechable de los pozos existentes. Se hizo una preselección de 17 sustancias referenciadas en la literatura científica, de las cuales se seleccionaron 5 para realizar un análisis de Ciclos Rankine Binarios iterando con uno, dos y tres intercambiadores de calor mediante el uso del software Cycle-Tempo. Estos análisis arrojaron que para uno, dos y tres intercambiadores de calor la mejor sustancia con respecto a los parámetros de eficiencia térmica, flujo másico de agua de refrigeración y flujo másico de sustancia de trabajo es el Amoniaco. El Iso-pentano y el Propano son las mejores opciones considerando como parámetro de selección la menor cantidad de agua de refrigeración tomada del río.

Palabras clave: energía geotérmica; pozos geotérmicos; ciclo Rankine orgánico; ciclo binario; gradiente geotérmico.

Abstract

For all the difficulties that the use of conventional energies represents, including environmental problems, humankind has turned to the search for renewable energies. A very promising source of clean energy is geothermal energy. This consists of taking advantage of the high temperatures that are achieved inside the earth at the surface level. Colombia has great potential for geothermal energy due to the large number of geothermal wells that exist. Among the most promising regions is Magdalena Medio. This study aims to provide a solution to the energy needs of the municipality of Barrancabermeja, which are calculated around 10 MW. Taking advantage of the proximity of the Magdalena River, it was used as a heat sink. A usable temperature of the existing wells was determined. A preselection of 17 substances referenced in the scientific literature was made, of which 5 were selected to perform a Binary Rankine Cycle analysis iterating with one, two and three heat exchangers by using the Cycle-Tempo software. These analyzes showed that for one, two and three heat exchangers the best substance with respect to the parameters of thermal efficiency, mass flow of cooling water and mass flow of working substance is Ammonia. Iso-pentane and Propane are the best options considering as a selection parameter the least amount of cooling water taken from the river.

Keywords: geothermal energy; geothermal wells; organic Rankine cycle; binary cycle; geothermal gradient.

1. Introducción

Debido al calentamiento global, el cual es causado por las excesivas emisiones de gases de efecto invernadero generado por la actividad antropogénica, así como la reducción de disponibilidad de los combustibles fósiles, el aumento del precio de los combustibles obtenidos del petróleo y la dependencia energética de los países a los escasos recursos energéticos convencionales [1]; la industria junto con los investigadores se ha visto obligada a buscar y encontrar diferentes fuentes de energía alternativas, renovables, eficientes y sustentables para la generación de energía eléctrica.

Las tecnologías renovables como fuentes limpias de energía y el uso óptimo de estos recursos minimiza los impactos ambientales, produce un mínimo de desechos secundarios y es sostenible en función de las necesidades económicas y sociales actuales y de la sociedad futura [2]. Las tecnologías de energía renovable brindan una excelente oportunidad para mitigar la emisión de gases de efecto invernadero y la reducción del calentamiento global mediante la sustitución de fuentes de energía convencionales [2]. Las fuentes de energía renovable (RES sigla en inglés de Renewable Energy Sources) suministran el 14% del total de la demanda energética mundial [3]. Las RES incluyen a la biomasa, la energía hidroeléctrica, la geotérmica, la solar, la eólica y la marina [2].

Muchas de las energías renovables como la geotérmica, en el transcurso del tiempo se han venido desarrollando alrededor del mundo. La energía geotérmica que se refiere a la “gran cantidad de energía térmica generada por la desintegración radiactiva en el interior de la tierra” [4]; se ha venido implementando en alrededor de 24 países en el mundo, sumando 11.000 MW de capacidad instalada [5].

En términos generales, hoy en día se utilizan tres tecnologías principales para producir electricidad a partir de depósitos geotérmicos, estas que se pueden clasificar dependiendo del tipo de yacimiento con el cual estén operando, si es de baja, media o alta entalpía.

Las plantas de vapor seco o de vapor dominante utilizan como recurso el vapor proveniente de los yacimientos geotérmicos, en donde este no se encuentra totalmente mezclado con el agua. Se caracteriza por extraer vapor a temperaturas con rangos de 180 a 185°C y 0.8 a 0.9 MPa.

En las plantas tipo *single flash* el agua del yacimiento se extrae a más de 210 °C y se expande en una fase de evaporación flash, en donde un porcentaje de la misma se evapora instantáneamente por medio de un separador

de vapor y se lleva a la turbina, y el agua sobrante se reinyecta en el acuífero [6].

En las plantas tipo *doble flash* se aumenta el rendimiento añadiendo una segunda etapa de vaporización que vaporiza una parte del líquido que sale de la primera etapa [6].

Los ciclos binarios son utilizados cuando la temperatura del fluido de los yacimientos es menor de 210°C, en donde el delta de las temperaturas es demasiado bajo para poder emplear los otros tipos de métodos. En estas se emplea un intercambiador de calor para el sistema de conversión energía, en el cual participan dos fluidos, el primero que es la fuente térmica y el segundo responsable del ciclo de generación de energía.

Actualmente las centrales de ciclo binario son las más destacadas en la utilización de energía geotérmica para generar electricidad. “En Julio de 2004 había 155 unidades en operación, generando 27 4 MW de electricidad en 16 países. Sin embargo, a pesar de constituir el 33% de todas las unidades geotérmicas en operación en el mundo, las plantas de ciclo binario generan solamente el 3% de la energía eléctrica total” [7].

“En Colombia la producción de energía primaria proviene de la hidroelectricidad, por la abundancia de agua en la mayoría de las zonas del país, y en un segundo lugar de los combustibles fósiles (petróleo, gas y carbón)” [8], cuyas reservas al pasar de los años, se han explotado abruptamente, causando impactos ambientales irreversibles en la fauna y flora de distintas regiones del país. Una alternativa frente a la reducción de las reservas de combustibles fósiles junto con su posible aumento de precio e impactos ambientales es la implementación del recurso de la energía geotérmica, que cuenta con gran disponibilidad en varias regiones del país, y no está siendo aprovechada en el momento.

En Colombia existe un gran potencial de energía geotérmica por el gran número de pozos con gradientes de temperatura aprovechables. “Actualmente Colombia cuenta con 4605 pozos, que fueron utilizados para la estimación del gradiente geotérmico en las diferentes zonas del país” [9]. “De acuerdo con Haraldsson G. (2013) y OLADE (2013), el potencial para desarrollo de generación eléctrica a partir del recurso geotérmico en Colombia por ahora se estima en el orden de 1 a 2 GW” [10].

En el presente artículo se muestra el diseño conceptual de un ciclo binario para la explotación de la energía geotérmica en la región del Magdalena Medio.

2. Metodología

2.1. Potencial térmico de la zona

Con base en el mapa preliminar de los gradientes geotérmicos de Colombia (ver Figura 1), se pueden observar múltiples regiones del país donde existe una gran variación de la temperatura del suelo con respecto a la profundidad, lo cual indica una alta disponibilidad de energía geotérmica. Según el estudio que se realizó a través de pozos geotérmicos, una de las regiones más significativas es la del Magdalena Medio, por contar con 2329 pozos, con un gradiente promedio de 22.2 °C/km, tal y como se puede observar en la Tabla 1.[9]

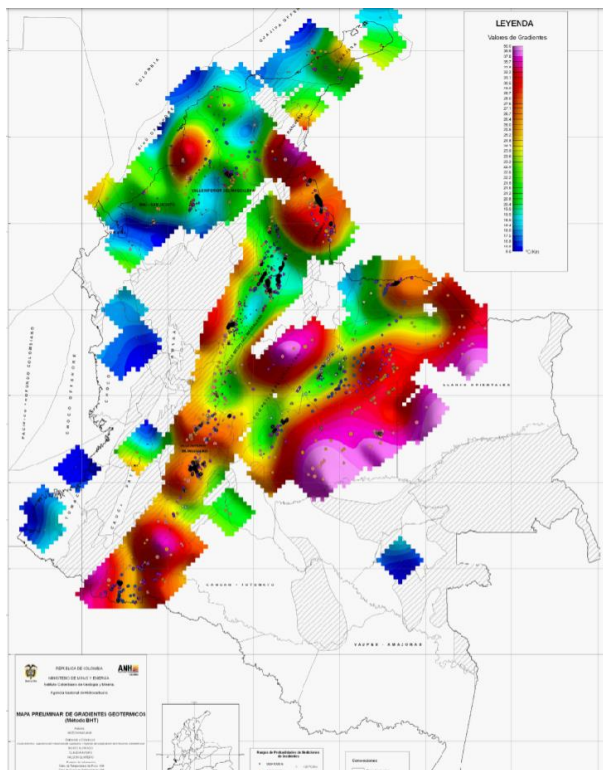


Figura 1. Mapa preliminar de gradientes geotérmicos de Colombia. Fuente: [11]

En esta región se tiene los datos de temperatura en función de la profundidad para múltiples pozos como se puede observar en la Figura 2. La región del Valle del Magdalena Medio posee cuencas de pozos con mayor número de datos a una profundidad de 2500 a 3000 metros de profundidad con una temperatura de 75°C a 80°C [11]. Por lo anterior, se decidió para el presente estudio tomar una temperatura promedio de aprovechamiento geotérmico de 80°C.

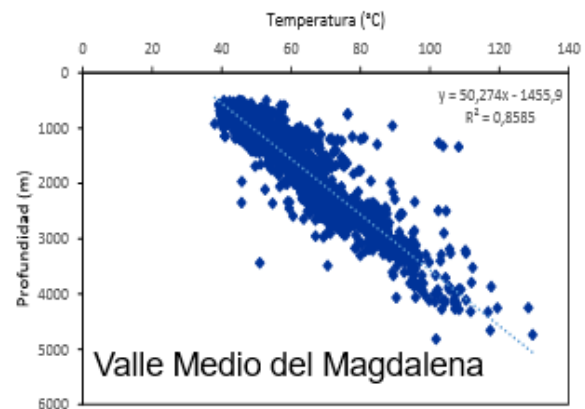


Figura 2. Variación de temperatura en función de la profundidad. Fuente: [9]

2.2. Requerimiento energético de la región

Para el estudio se escogió Barrancabermeja, el cual es un municipio que no tiene un gran usufructo económico, y cuyos habitantes se ven afectados económicamente por el valor del kilovatio el cual es uno de los más costosos de Colombia [12]. Los ciudadanos de este municipio tienen necesidad de consumir altas cantidades de energía eléctrica, esto en relación con el uso de elementos eléctricos con el fin de poderse aclimatar y refrigerar los alimentos. El promedio de consumo residencial urbano en los estratos 1,2 y 3 está alrededor de 239.7 KWh [13]; el cual es bastante elevado al compararse con el consumo promedio de los demás municipios cercanos de la región.

El número de clientes del sistema eléctrico fue tomado de un informe presentado por Superservicios (Superintendencia de servicios públicos Domiciliarios) el cual presenta 68006 clientes. Este valor se redondea a 70000 clientes suscritos al municipio de Barrancabermeja en el año 2018 [12].

Luego de hallar el número de clientes en el 2018 y saber que el consumo promedio de los estratos 1, 2 y 3 es de 101,44 kWh-mes/cliente [12]; se puede estimar el valor total de energía necesaria que tendría que suministrar la planta que se aproxima a 10 MW.

2.3. Gradiente térmico para el ciclo termodinámico

Habiendo definido la temperatura promedio de aprovechamiento geotérmico en 80°C, se procedió a definir el sumidero de calor y la temperatura de este para establecer los límites de temperatura del ciclo.

Tabla 1. Gradientes geotérmicos aparentes estimados para cuencas sedimentarias de Colombia.

Cuenca	No. de Pozos	Gradiente mínimo (°C/km)	Gradiente máximo (°C/km)	Gradientes	Porcentaje (%)	Gradiente promedio (°C/km)	Rango de profundidad (m) para mediciones de temperatura
				>40°C/Km	>40°C/Km		
Valle Medio del Magdalena	2329	6,9	65,4	17,0	0,7	22,2	500-4816
Llanos Orientales	861	8,2	59,4	59,0	6,9	29,8	515-6276
Valle superior del Magdalena	479	11,2	59,4	20,0	4,1	27,4	516-4019
Catatumbo	398	14,9	54,0	9,0	2,3	28,1	503-3441
Caguan – Putumayo	194	5,0	64,6	4,0	2,1	29,9	530-3702
Valle inferior del Magdalena	137	9,5	31,4			22,4	705-4267
Cordillera Oriental	113	13,5	53,2	6,0	5,3	26,6	568-5823
Sinú – San Jacinto	54	14,4	60,5	2,0	3,7	26,9	518-3967
Guajira	17	15,2	24,3			20,9	1212-2961
Area no prospectiva (ANP) ⁽¹⁾	7	16,2	139,6				759-5239
Cesar Ranchería	6	22,7	43,7			28,0	565-3371
Choco	4	14,0	18,2			16,6	1982-4734
Urabá	3	14,4	25,4			18,2	616-3688
Cauca-Patía	2	15,0	25,0				1532-3091
Tumaco	2	15,1	18,4				2374-4355

Fuente: MAPA PRELIMINAR DE GRADIENTES GEOTÉRMICOS DE COLOMBIA [9].

Tabla 2. Propiedades de sustancias.

Sustancia	Toxicidad	Flamabilidad	ODP	GWP	Ciclo Rankine Ideal Simple			
					η (%)	\dot{m} ($\frac{kg}{s}$)	p_L (kPa)	p_H (kPa)
Agua	Ninguna	Ninguna	0	-	11,1	36,217	5,641	38,649
Amoniaco (R-717)	Alta	Levemente	0	1,00	10,5	86,332	1.350,000	3.709,000
Alcohol Propílico (Propanol)	Alta	Muy Alta	-	48,00	10,8	109,288	5,007	40,200
Isopentano	Alta	Muy Alta	0	4 ± 2	13,1	146,827	19,395	121,789
Butano	Baja	Muy Alta	0	4,00	12,5	156,030	91,571	387,485
Etano (R-170)	Alta	Muy Alta	12 ± 3	-	9,5	238,597	2.490,290	4.769,470
R-502	Baja	Nula	0,25	4,66	10,5	504,913	1.762,520	676,094
Octano	Alta	Muy Alta	-	-	10,2	244,155	3,199	19,459
Heptano	Alta	Muy Alta	-	-	10,	245,273	9,786	48,196
Hexano	Alta	Muy Alta	0	-	10,2	249,921	30,586	120,491
Pentano	Baja	Muy Alta	0	11,00	10,1	259,076	98,301	323,169
Propano (R-290)	Baja	Muy Alta	0	3,00	9,8	264,879	993,443	2.312,530
R-c318	Baja	-	0	10300	14,7	372,129	650,286	75,734
R-134a	Baja	No inflamable	0	1300	10,3	420,034	467,333	1374,33
Propileno	Baja	Muy Alta	12 ± 3	-	9,4	262,726	1.050,670	2.278,320
R-22	Baja	Ninguna	0,05	1,76	8,6	491,865	693,061	1.477,140
R-12	Ligera-Baja	Ninguno	1	10200	9,7	642,612	648,210	1.590,370

Fuente: elaboración propia.

Se determinó como sumidero de calor el río Magdalena, el cual presenta una temperatura de entre 25°C a 30°C [14]-[15]. Para el presente proyecto se tomará el límite superior como caso más crítico de temperaturas del sumidero de calor. Siguiendo lo establecido en la normatividad ambiental de Colombia, se estableció 40°C como límite de temperatura de descarga, y como diferencia máxima de 5°C entre la toma y la descarga del agua de refrigeración [16]. En la Figura 4 se resumen las temperaturas de fuente y sumidero de calor, y potencia requerida del ciclo termodinámico.

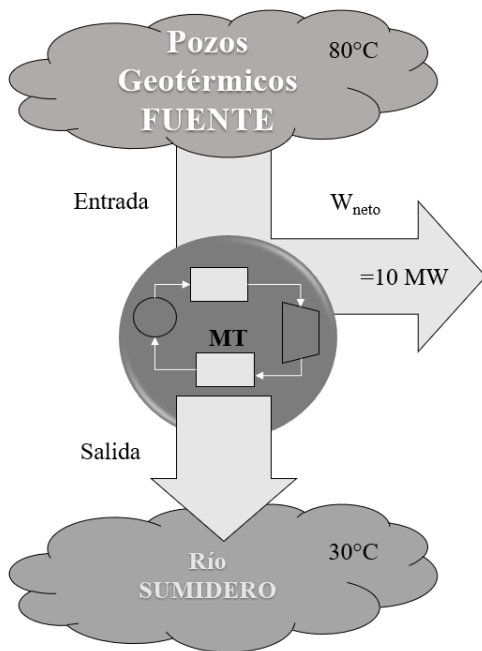


Figura 4. Esquema general de una máquina térmica.
Fuente: elaboración propia.

Para definir la localización de la planta se tuvieron en cuenta tres aspectos importantes, los cuales dependerán de la localización de los pozos, la localización del río Magdalena y la localización del municipio de Barrancabermeja. Se planteó en el siguiente orden de importancia:

1. Localización de los pozos: Se le dio la mayor importancia a la localización de los pozos geotérmicos, la planta geotérmica se situará lo más cerca posible a estos con el fin de perder la menor cantidad de calor en la tuberías que conectan los pozos a la planta.
2. Localización del río Magdalena: La distancia de la planta al río Magdalena debe ser la mínima posible para disminuir la cantidad de energía requerida y los costos asociados con el transporte del agua de refrigeración.

3. Localización del municipio: La localización del municipio se tomó como último criterio dado que las pérdidas de energía por transmisión eléctrica a alto voltaje son menores que las de los tres ítems anteriores.

Partiendo de los mapas Geotérmicos [2] la localización aproximada de la planta sería 6°57'58.0"N 73°53'51.5"W, la cual se encuentra a una distancia aproximada de 800 m del río Magdalena y a una distancia de 13 km del municipio de Barrancabermeja. Esta localización es aproximada ya que se requieren estudios específicos del orden ambiental, político, socioeconómico y cultural que salen del alcance de este estudio.

2.4. Selección de la sustancia de trabajo

Para la selección de la sustancia de trabajo se tomaron 17 utilizadas en ciclos Rankine orgánicos utilizados en plantas geotérmicas a nivel mundial [7].

Como primeros criterios de selección se tomaron la toxicidad, la flamabilidad, el OPD (*Ozone Depletion Potential*) y el GWP (*Global Warming Potential*), con objetivo de abarcar aspectos relevantes a la seguridad y salubridad de los operarios en planta, y aspectos de afectación al medio ambiente (Ver Tabla 2).

Con cada una de las sustancias se calculó un ciclo Rankine orgánico ideal simple, donde se tomó una diferencia de temperatura entre el fluido de trabajo y el medio con el que intercambia calor de 5°C. Así, la máxima temperatura del ciclo se estableció en 75°C y la temperatura de operación del condensador en 35°C.

En la Tabla 2 se pueden observar la eficiencia térmica, el flujo másico de la sustancia de trabajo, y las presiones de alta y de baja del ciclo termodinámico. En todos los casos se construyó un ciclo donde las temperaturas máxima y mínima fueran 75°C y 35°C respectivamente, y una potencia generada de 10 MW.

De las 17 sustancias de trabajo preseleccionadas, se seleccionaron cinco: Amoniaco, Iso-Pentano, Butano, Propano y R-134a, que cumplieran con las mejores especificaciones requeridas respecto a mayor eficiencia térmica, menor flujo másico requerido por la sustancia de trabajo, menor impacto ambiental (GWP u ODP), menor inflamabilidad y toxicidad. También con guía de varios documentos en donde dichos fluidos de trabajo son empleados frecuentemente en diseños de ciclos binarios para plantas geotérmicas. Según el profesor Pedro Fernández Díez en su libro de energía geotérmica recomienda como fluido de trabajo un hidrocarburo de peso molecular o un hidrocarburo fluorado, como por

ejemplo el Isopentano y Propano [17]. Los tesisistas Pinedo C. y Ramírez E en su tesis sobre el análisis y evaluación del potencial geotérmico para una central de ciclo binario, de una serie de fluidos estudiados, dentro de las que están Amoniaco, Butano, R-134a, Isopentano y Propano, ellos concluyen que la sustancia más apta como fluido de trabajo es el Isopentano por su bajo punto de ebullición (28 °C) y por poseer características robustas resistentes a bruscos cambios de presión y temperatura, entre otras propiedades [7]. Hofer M y otros en su artículo sobre la modernización de un ciclo Rankine orgánico utilizando sistemas termales solares recomiendan como elección el Butano como fluido de trabajo [18]. También Bonilla J. y otros colaboradores en su tesis basada en Diseño de un Ciclo Binario para una planta geotérmica en donde se utiliza el Isopentano y el R-134a como fluidos de trabajo [19]. Mburo M. en su artículo sobre la utilización de la energía geotérmica menciona que el Isopentano es el fluido de trabajo más frecuentemente utilizado en Plantas geotérmicas de ciclo Binario [18]. Cárcamo E. y Rivera A. en su tesis Diseño conceptual de un sistema híbrido de simple flash - binario para una planta geotérmica emplean como fluidos de trabajo el R-134a y el Isopentano [20].

3. Resultados

Con las cinco sustancias seleccionadas se iteraron tres sistemas de ciclos binarios típicos para plantas geotérmicas, los cuales son con uno, dos y tres intercambiadores de calor [6]-[7]-[17]-[20]. Las Figuras 5, 6 y 7 muestran los diagramas de equipos de los ciclos geotérmicos para uno, dos y tres intercambiadores.

Tabla 3. Desempeño del ciclo termodinámico con cada sustancia implementando un intercambiador de calor.

Sustancia de trabajo	Flujo másico agua refrigeración	Flujo másico agua yacimiento	Flujo másico sustancia trabajo	Eficiencia Térmica
	kg/s	kg/s	kg/s	%
Amoniaco	6.158,81	691,18	78,51	11,08
Butano	6.828,50	1.044,76	418,20	6,32
Iso-Pentano	11.363,81	1.687,76	683,06	3,99
Propano	5.939,53	909,09	408,29	6,74
R-134a	7.680,13	4.041,89	1.049,20	5,28

Fuente: elaboración propia.

Como se puede observar en la Tabla 3 si se usa un intercambiador de calor, el amoniaco genera 11,08% de eficiencia térmica, por encima de las demás sustancias, de igual manera es el que menos flujo másico requiere de agua para la extracción de calor geotérmico. Así mismo, es la sustancia de trabajo que requiere menor flujo másico

(78,51 kg/s) para poder generar la potencia requerida. Utilizando Propano se requiere un flujo másico de agua de refrigeración menor que si se utilizara Amoniaco, sin embargo, solo se logra una eficiencia térmica de 6.74%.

Comparando el Amoniaco y el Propano con el uso de dos intercambiadores de calor (Ver Tabla 4) se observa que el Amoniaco disminuye levemente su eficiencia térmica mientras que el Propano la aumento de 6.74% a 7.14%. También cabe destacar que, con el uso de dos intercambiadores de calor, el flujo másico requerido de agua de refrigeración del Amoniaco disminuye significativamente pasando de 6.158 kg/s a 3.740,23 kg/s. De igual manera el propano disminuye considerablemente el flujo másico de agua para la extracción de calor geotérmico de 909.09 kg/s a 289.98 kg/s. El R-134a con el uso de dos intercambiadores mejoró notablemente en todos los requerimientos, sobre todo en cuanto a la eficiencia térmica que paso de 5.28% a 8.09%. El Iso-Pentano fue el fluido de trabajo que tuvo peor desempeño de los 5 fluidos preseleccionados en cuanto a eficiencia térmica y flujos másicos requeridos para operar la planta.

Tabla 4. Desempeño del ciclo termodinámico con cada sustancia implementando dos intercambiadores de calor.

Sustancia de trabajo	Flujo másico agua refrigeración	Flujo másico agua yacimiento	Flujo másico sustancia trabajo	Eficiencia Térmica
	kg/s	kg/s	kg/s	%
Amoniaco	3.740,23	691,16	79,41	10,96
Butano	6.844,21	218,46	413,93	6,31
Iso-Pentano	11.500,14	313,35	665,37	3,95
Propano	5.574,42	289,98	383,72	7,14
R-134a	4.400,07	1.156,60	633,51	8,09

Fuente: elaboración propia.

Tabla 5. Desempeño del ciclo termodinámico con cada sustancia implementando tres intercambiadores de calor.

Sustancia de trabajo	Flujo másico agua refrigeración	Flujo másico agua yacimiento	Flujo másico sustancia trabajo	Eficiencia Térmica
	kg/s	kg/s	kg/s	%
Amoniaco	3.972,44	3.742,98	84,24	10,37
Butano	6.246,39	3.664,63	376,31	6,94
Iso-Pentano	11.536,35	426,10	660,52	3,94
Propano	6.122,89	2.930,54	375,92	7,51
R-134a	4.979,31	4.014,96	633,51	8,09

Fuente: elaboración propia.

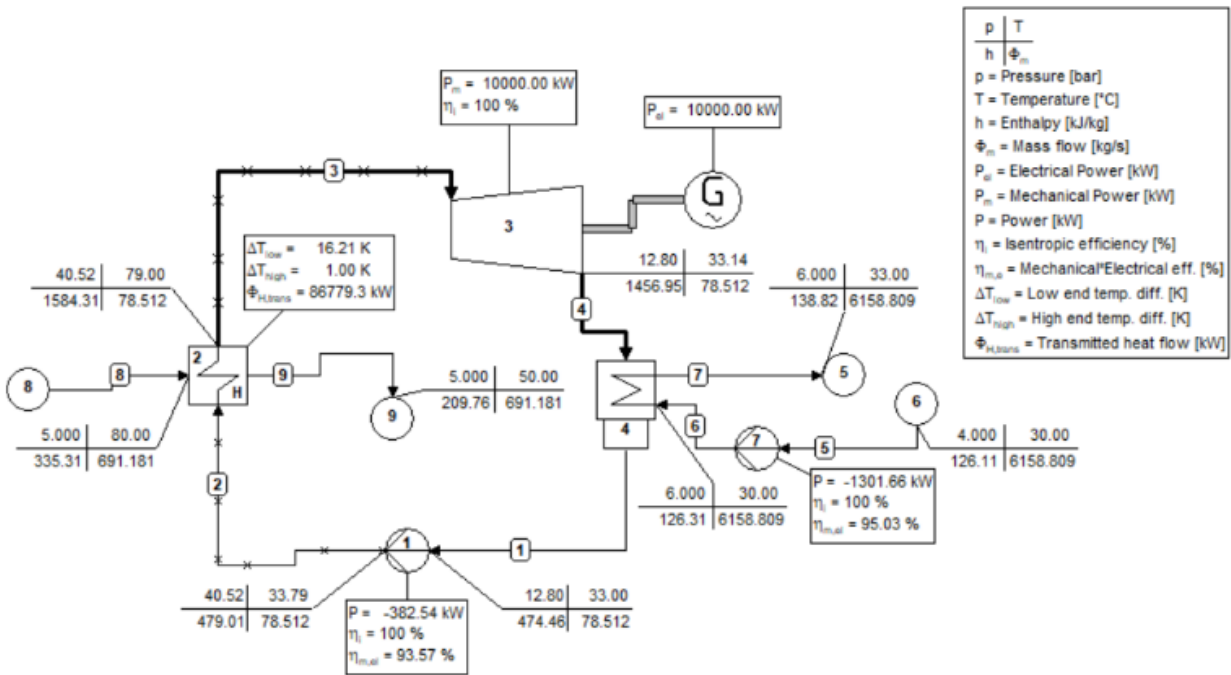


Fig. 5. Diagrama de equipos de la planta geotermica con un intercambiador de calor

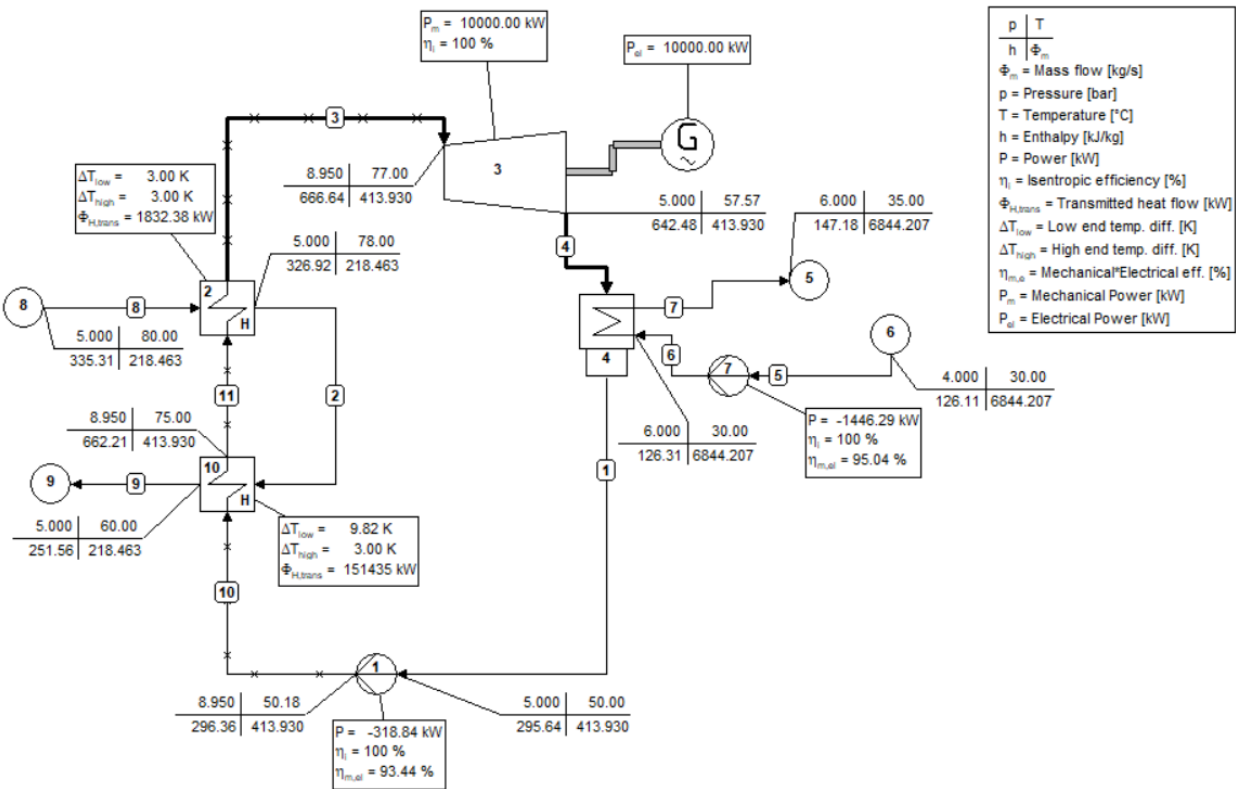


Fig. 6. Diagrama de equipos de la planta geotermica con dos intercambiadores de calor

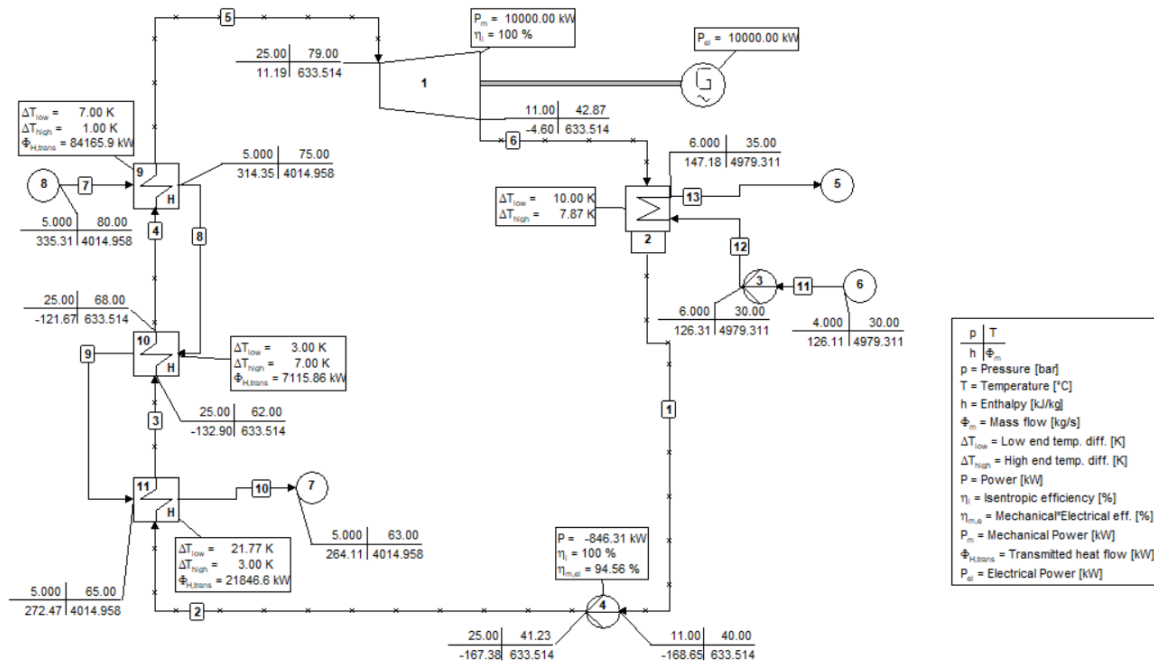


Fig. 7. Diagrama de equipos de la planta geotérmica con tres intercambiadores de calor.

Con tres intercambiadores de calor implementados en ciclo binario (Ver Tabla 5) se logra observar que los cinco fluidos de trabajo presentan un aumento considerable en cuanto al flujo másico proveniente de los yacimientos geotérmicos.

4. Conclusiones

Se realizó un estudio de las necesidades de la región y se identificó a Barrancabermeja como una de los municipios con mayor problemática energética en la región del Valle Magdalena Medio, y a partir de datos poblacionales y de consumo energético, se estableció que la capacidad necesaria de la planta es de 10 MW.

Se pudo observar a partir de los estudios realizados que en la región del Magdalena Medio existe un gradiente térmico en el subsuelo considerable, el cual se estimó que con los pozos perforados a media profundidad podrá suministrar un fluido a 80°C.

Para determinar un sumidero de calor, dado que la región se encuentra muy cercana al río Magdalena, se decidió utilizar este como sumidero y se estableció como temperatura máxima promedio en el año de 30°C.

A partir de sustancias utilizadas en ciclos Rankine Orgánicos en plantas geotérmicas existentes o

estudiadas, se hizo una preselección de 17. De estas se seleccionaron cinco: Amoniaco, Iso-Pentano, Butano, Propano y R-134^a, las cuales poseen bajos indicadores de contaminación ambiental medidos en el GWP y ODP. Al comparar el desempeño termodinámico de las 17 sustancias en un ciclo Rankine simple, las cinco seleccionadas se destacaron en mayor eficiencia térmica y menor flujo másico.

Con base en la literatura científica se pudo observar que los ciclos binarios suelen tener de uno o dos intercambiadores de calor entre el agua proveniente del yacimiento y la sustancia de trabajo del ciclo. En el presente proyecto se hizo un estudio con uno, dos y tres intercambiadores de calor empleando las cinco sustancias de trabajo seleccionadas.

Se pudo observar que para uno, dos y tres intercambiadores de calor el Amoniaco es la sustancia que permite mayores eficiencias térmicas, requiere la menor cantidad de flujo másico de sustancia de trabajo y de agua de refrigeración. No obstante, utilizando Iso-pentano o Propano el sistema requeriría menor cantidad de flujo másico de agua del yacimiento.

Referencias

- [1] J. Iván, F. Chejne-janna, and M. Garcia-pérez,

- “Fast pyrolysis of biomass : A review of relevant aspects . Part I : Parametric study Pirólisis rápida de biomásas : Una revisión de los aspectos relevantes . Parte I : Estudio paramétrico,” vol. 82, no. 192, pp. 239–248, 2015.
- [2] N. L. Panwar, S. C. Kaushik, and S. Kothari, “Role of renewable energy sources in environmental protection: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, no. 3, pp. 1513–1524, 2011, doi: 10.1016/j.rser.2010.11.037.
- [3] U. Nations, D. Programme, and U. Nations, *Energy, the Environment and Human Health*. .
- [4] L. Xia and Y. Zhang, “An overview of world geothermal power generation and a case study on China—The resource and market perspective,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 112, no. May, pp. 411–423, 2019, doi: 10.1016/j.rser.2019.05.058.
- [5] N. C. Marzolf, “Emprendimiento de la energía geotérmica en Colombia,” *Isagen S.a. Esp.*, pp. 25–42, 2007, [Online]. Available: https://publications.iadb.org/bitstream/handle/11319/6558/Energia_Geotermica_Colombia_7-1-14finalweb.pdf?sequence=1.
- [6] M. Mburu, “Geothermal Energy Utilisation,” *Explor. Geotherm. Resour.*, 2009.
- [7] C. F. PINEDO MINES and E. G. RAMIREZ PINTADO, “Universidad Nacional Del Santa Facultad De Ingeniería,” UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA , FACULTAD DE INGENIERIA, 2015.
- [8] J. J. Angulo, “Colombia y su potencial en fuentes de energía renovables - Invierta en Colombia,” *PROCOLOMBIA* , Dec. 21, 2018. <https://www.inviertaencolombia.com.co/noticias/1197-colombia-y-su-potencial-en-fuentes-de-energia-renovables.html> (accessed Mar. 09, 2020).
- [9] C. Ifaro Ingrid Alvarado Wilson Quintero Carlos Vargas Luis Alberto Briceño Bogotá, “MAPA PRELIMINAR DE GRADIENTES GEOTÉRMICOS DE COLOMBIA,” 2009.
- [10] UPME, *Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia*. 2015.
- [11] C. Alfaro, I. Alvarado, W. Quintero, V. Hamza, C. Vargas, and L. A. Briceño, “Mapa preliminar de Gradientes Geotérmicos de Colombia,” *XII Congr. Colomb. Geol.*, no. 1, pp. 1–24, 2009.
- [12] O. Cabrales Martinez and J. E. Mercado Díaz, “Ministerio de Minas y Energia,” no. 1, p. 3, 1997.
- [13] E. D. S. S. A. E. S. P, I. Hugo, and A. Acevedo, “Antecedentes / Cartera morosa,” p. 16, 2013.
- [14] Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca. CAR., *Formulación del Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca del Río Magdalena Vertiente Oriental del Departamento de Cundinamarca*. 2006, p. 43.
- [15] Alcaldía Municipal de Barrancabermeja, “Sistema hidrográfico municipio de Barrancabermeja,” p. 39, 2002, [Online]. Available: <https://goo.gl/vW73En>.
- [16] M. D. A. Y. D. S. MADS, “Resolución 631 de 2015,” *D. Of. No. 49.486 18 abril 2015*, vol. 2015, no. 49, p. 73, 2015, [Online]. Available: http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/d1-res_631_marz_2015.pdf.
- [17] P. Fernández Díez, *Energía geotérmica*. Redsauc Engineering Services, 2008.
- [18] F. Heberle, M. Hofer, and D. Brüggemann, “A Retrofit for Geothermal Organic Rankine Cycles based on Concentrated Solar Thermal Systems,” *Energy Procedia*, vol. 129, pp. 692–699, 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.09.148.
- [19] J. C. Bonilla Barrios, O. A. Meléndez Ramírez, E. G. Reyes Magaña, and L. A. Rivera Ardón, “Diseño Conceptual de un Ciclo Binario para una planta Geotérmica,” Universidad de El Salvador, 2013.
- [20] A. José, R. Calderón, and E. A. Cárcamo Palencia, “Diseño conceptual de un sistema híbrido integrado de simple flash - binario para una planta geotérmica,” UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD, 2016.