

POTENCIAL PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA DE BAJA ENTALPÍA EN COLOMBIA: UN CASO DE ESTUDIO

Juan José Gómez Malagón¹
Margarita Rosa Flórez Morón¹
Erik Giovany Montes Paez¹
Camilo Andrés Guerrero Martín²

¹Universidade Industrial de Santander

²Universidade Federal do Rio de Janeiro

DOI: 10.47168/rbe.v26i3.572

Recebido em: 12.07.2020

Aceito em: 18.08.2020

RESUMEN

La seguridad energética es una necesidad de cualquier país y un aspecto fundamental e imprescindible para emerger del subdesarrollo. Países de la región de América Latina, como es el caso de Colombia, no cuentan con la capacidad de generar energía para satisfacer la demanda de sus territorios y, por lo tanto, se ven en la obligación de importar este recurso de países vecinos como lo es Ecuador. Es por lo que surge la necesidad de diversificar la matriz energética del país a partir de la implementación de nuevas técnicas y/o procesos de generación de electricidad, como es el caso de estudio, mediante sistemas de energía geotérmica de baja entalpía. De esta manera, este proyecto consiste en la evaluación de exploración y producción de esta energía en Colombia teniendo en cuenta las condiciones geológicas del territorio y los aspectos técnicos para el desarrollo de un pozo geotérmico de vapor de baja entalpía.

Palabras-clave: Energía geotérmica, Potencial geológico, Vapor de baja entalpía, Colombia.

ABSTRACT

Energy security is a necessity for any country and a fundamental and essential aspect to emerge from underdevelopment. Countries in the Latin American region, as is the case of Colombia, do not have the capacity to generate energy to meet the demand in their territories and, therefore, they are forced to import this resource from the neighboring countries, such as Ecuador. That is why the need arises to diversify the country's energy matrix from the implementation of new techniques or electricity generation processes, such as the case study, using low

enthalpy geothermal energy systems. In this way, this project consists of assessing the exploration and production of this energy in Colombia taking into account the geological conditions of the territory and the technical aspects for the development of a low-enthalpy steam geothermal well.

Keywords: Geothermal energy, Geological potential, Low enthalpy steam, Colombia.

1. INTRODUCCIÓN

La seguridad energética, el desarrollo sostenible, la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero, principalmente CO₂, y la creación de sistemas eficientes a nivel energético, ha sido el fundamento bajo el cual, a lo largo de los últimos años, la sociedad ha implementado nuevas políticas ambientales y económicas en el marco de la creciente necesidad de ajustar los procesos productivos y de consumo que existen en la actualidad para, de esta manera, garantizar la protección, preservación y/o cuidado del medio ambiente y, además, la llegada de este recurso a todo un territorio donde su aprovechamiento ocurra de una forma equitativa, de carácter independiente y contribuya en la diversificación de la matriz energética, descentralizando y ofreciendo nuevas alternativas, para el caso de estudio, en Colombia.

Zonas no interconectadas (ZNI) de alrededor 52%, problemas de suficiencia energética y un sistema centralizado en recursos hidroeléctricos (fuente del 70% de la generación eléctrica) que presentan limitaciones relacionadas con las condiciones climáticas, son algunos de los retos energéticos que hoy día enfrenta Colombia. La ubicación geográfica de este país permite evaluar la posibilidad de explotar recursos energéticos diferentes como lo es la generación eléctrica a partir de yacimientos geotérmicos.

La energía geotérmica consiste en el aprovechamiento del calor generado en la corteza terrestre y que, por procesos de conducción y convección a partir de la interacción roca – fluido y gracias a condiciones geológicas, puede dar lugar a un yacimiento geotérmico que, mediante técnicas de exploración, perforación y producción, análogas al sistema extractivo de crudo y gas, puede ser llevado a superficie para finalmente, en centrales geotérmicas, convertirse en energía eléctrica.

De esta manera, a lo largo de este proyecto se presenta la evaluación del potencial geotérmico en Colombia considerando los factores que inciden la explotación de este tipo de energía, partiendo de la identificación de los principales sistemas geotérmicos de baja entalpía y, consecuentemente, el proceso de producción y las variables técnicas que se deben considerar para el aprovechamiento de este recurso. Asimismo, se evalúa la viabilidad económica de la ejecución

de esta naturaleza, utilizando el software GE-SAM (Geothermal Power - System Advisor Model) del National Renewable Energy Laboratory (NREL). Además de esto, se describen las oportunidades para hacer que las transferencias tecnológicas sean convenientes para cada una de las industrias del país.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Generalidades energía geotérmica

Conocer el mecanismo de generación de calor en la corteza terrestre es la base para entender el proceso de formación de los sistemas geotérmicos puesto que es allí donde inicia el ciclo de formación de este tipo de energía. De esta manera, tal como lo plantea Sáez (2012), se identifican los siguientes:

1. La descomposición de isótopos radioactivos presentes en la corteza: Uranio 235 (235U), Uranio 238 (238U), Torio 232 (232Th) y Potasio 40 (40K).
2. Calor inicial liberado durante la formación de la tierra.
3. Movimiento diferenciado entre placas que constituyen la tierra.
4. Liberación de calor como consecuencia de la cristalización del núcleo.

Así pues, debido a procesos físico-químicos, este calor viaja a través del subsuelo entrando en contacto con fluidos (agua y/o hidrocarburo) presentes en formaciones geológicas que estructuralmente no permiten la migración de estos. A partir de la interacción roca - fluido, y como consecuencia de fenómenos termodinámicos, se da un incremento en la temperatura dando lugar a un sistema que puede llegar a considerarse un yacimiento geotérmico económicamente explotable, dependiendo de la entalpía. Con base a esto, y de acuerdo con lo establecido por el código minero, en Francia, se establece la clasificación de los sistemas de la siguiente manera:

- Sistema Geotérmico de alta entalpía: asociado a temperaturas mayores a 150°C.;
- Sistema Geotérmico de media entalpía: asociado a temperaturas entre 90°C y 150°C;
- Sistema Geotérmico de baja entalpía: asociado a temperaturas entre 30°C y 90°C, e
- Sistema Geotérmico de muy baja entalpía: asociado a temperaturas menores a 30°C.

La identificación en superficie de estos sistemas está determinada a partir del gradiente geotérmico, definido como el incremento de la temperatura por unidad de profundidad, en este caso, del subsuelo. Un sistema geotérmico con un alto potencial está asociado a gradientes anormales, del orden de $100^{\circ}\text{C}/\text{km}$ a $200^{\circ}\text{C}/\text{km}$.

De esta manera, y tal como se presenta a continuación, se identifican las principales zonas con alto potencial de Colombia analizando las condiciones geológicas del subsuelo, fundamentalmente asociado al dinamismo de las placas tectónicas que lo conforman.

2.2 Evaluación geológica y tectónica de Colombia

La configuración geológica y tectónica del territorio colombiano está comprendida por la interacción entre las placas Cocos, Nazca, Caribe Suramericana y la microplaca Coiba. Este comportamiento da como resultado a nivel regional una gran variación en los tensores de tensión que crea provincias sismotectónicas separadas (Aguilera et al, 2019). Consecuentemente, se presenta el movimiento del bloque andino norte hacia el norte-nordeste que, dada sus condiciones de límites y la interacción con las placas aledañas, da como resultado regímenes sismotectónicos que cumplen un rol fundamental en la formación de los sistemas geotérmicos que se presentan a continuación.

2.3 Principales sistemas geotérmicos de Colombia

Colombia, tal como se ha mencionado, gracias a su configuración geotectónica presenta áreas geotérmicas con un alto potencial que permiten considerar la viabilidad de su explotación con el fin de satisfacer la demanda energética del país. Luego de aproximadamente 50 años de proyectos de investigación, se han podido establecer las siguientes zonas del territorio como posibles proyectos para, además de los comunes usos directos (ej. Aguas termales), generar electricidad.

En primer lugar, se encuentran las zonas asociadas a actividad volcánica: San Diego, complejo volcánico de Cerro Bravo - Cerro Machín, que incluyen al Nevado del Ruíz, Santa Rosa y Cerro Machín. Además, se encuentran Paipa, Azufral, Chiles – Cerro Negro y Dabeiba, según la Figura 1, adaptado de Aguilera et al. (2019).

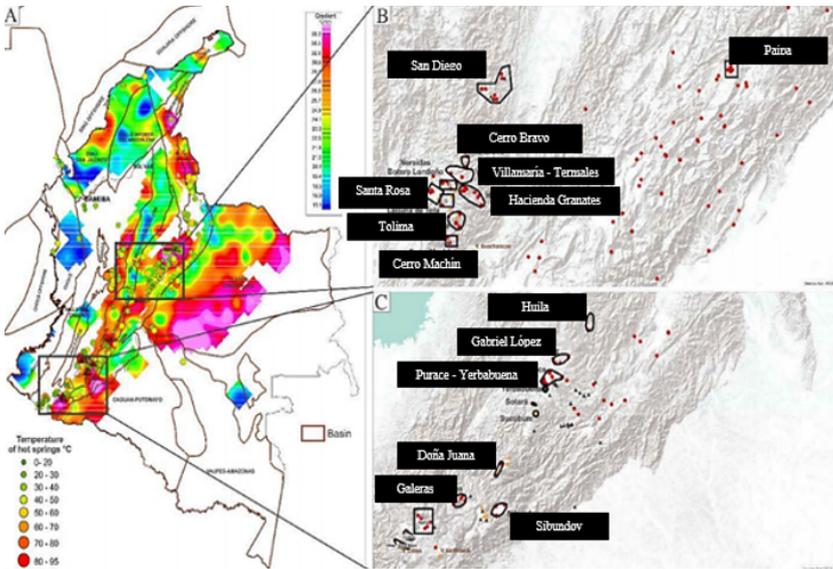


Figura 1 - A) Mapa de potencial geotérmico de Colombia, destacando las zonas con mayor potencial; B) Área correspondiente al sistema geotérmico de la región andina - central y, C) Área correspondiente a la región andina – suroccidental del país.

Estas áreas muestran un alto potencial para generación eléctrica, donde se destaca el VNR como la zona más estudiada del país. Cuenta con una geología fundamentada en depósitos de origen volcánico que se encuentran en contacto con el complejo de Cajamarca (Aguilera et al., 2019). De acuerdo con Velez et al., 2018, a través de un modelamiento numérico 2D de transferencia de calor y de conductividad térmica de la roca a escala del reservorio, fue posible estimar un potencial geotérmico entre 54 MWt y 130 MWt.

Asimismo, dentro de estas zonas se destaca Cerro Machín, con temperaturas de fluido geotérmico en reservorio cercanas a los 250°C, mediante la estimación con geotermómetros Na/K. Para modelos Entalpía – Sílice, se estima una temperatura de 245°C y, para el modelo Entalpía – Cloruros, una temperatura que puede llegar a los 300°C. La actividad geotérmica corresponde a descargas de agua y gas cerca al volcán, en ríos y corrientes. De acuerdo con Alfaro et al. (2002), las aguas termales propias de esta zona presentan altas concentraciones de bicarbonato y una temperatura de descarga estimada entre 40°C y 94°C.

Finalmente, dentro de este grupo, se encuentra el Chiles – Cerro Negro, ubicado en la cordillera occidental, en el departamento de Nariño. Para este caso, mediante la medición por geotermómetros de gas, se logró estimar una temperatura de yacimiento de alrededor de 230°C predominantemente asociada a rocas del terciario volcánico. La descarga de los fluidos geotérmicos allí presentes se relaciona con corrientes de alta concentración de (HCO_3^-) -1 a una distancia, tal como lo plantea Aguilera et al. (2019), de más de un kilómetro al este del volcán Chiles. Estudios realizados por la compañía nacional ISAGEN y por la compañía CELEC – EP (Corporación de Electricidad de Ecuador), se logró estimar un potencial geotérmico de 138 MW.

Por otro lado, se encuentran las zonas asociadas a cuencas sedimentarias con la estimación de un gradiente geotérmico máximo en el rango de 60-65°C/km correspondiente, y tal como se muestra a la Figura 1, a la cuenca de los Llanos Orientales. Actualmente, de acuerdo con Aguilera et al. (2019) las regiones con un estimado potencial geotérmico alto no han sido documentadas ni se ha registrado la medición directa de la temperatura. Sin embargo, tal como lo expone Alfaro et al. (2015), en el estudio de transferencia de calor en esta cuenca de Colombia, correspondiente en términos estratigráficos a una unidad del cenozoico, y basado en estudios del SGC (Servicio Geológico Colombiano), se cuenta con datos de 1660 pozos de la industria del petróleo y 104 corrientes que permiten establecer el comportamiento geotérmico de esta región del país.

De esta manera, y basado en las temperaturas de fondo de pozo (BHT por sus siglas en inglés) se logró establecer una relación entre la geometría de la cuenca y la variación del gradiente geotérmico, obteniendo valores entre 8°C/km y 59°C/km con un promedio de 27,9°C/km que incrementa al este y al sur de la misma. Con base a esto, una vez identificadas las zonas con un alto potencial de este recurso en Colombia, se procede a evaluar el sistema de perforación, completamiento y finalmente, producción de un sistema geotérmico, específicamente, de vapor de baja entalpía.

2.4 Producción de un yacimiento geotérmico de vapor

En lo que corresponde a la producción de un yacimiento geotérmico, para el caso de estudio un yacimiento de vapor de baja entalpía, es fundamental identificar cómo está dado el sistema de producción, las variables a considerar y finalmente, los equipos en superficie que se deben utilizar para generar electricidad a partir de la recuperación de este recurso del subsuelo.

En primer lugar, es válido mencionar que el vapor como fluido geotérmico puede encontrarse en yacimiento en tres formas o bien, en tres fases dependiendo de las propiedades termodinámicas del sistema

en subsuelo, es decir, a las condiciones iniciales del reservorio. Dependiendo de la temperatura del recurso, en este caso, vapor, el sistema de explotación puede estar dado mediante cámaras flash, ciclos binarios o, para el caso de vapor saturado seco, éste puede suministrarse directamente a la turbina para la generación de electricidad.

En lo que corresponde al caso de estudio, se destacan los yacimientos de vapor saturado seco y se caracterizan por contar con propiedades termodinámicas (presión y temperatura) superiores a las condiciones de saturación. Por ende, estos yacimientos no producen líquido. Este fluido pasa, en superficie, a través de un secador para eliminar el contenido de agua y posteriormente se suministra a la turbina. Estos sistemas trabajan con flujos completos y, por ende, cuentan con una mayor capacidad de generación.

Barbier (2002) establece que geológicamente este tipo de yacimientos son similares a los de vapor húmedo, pero con una capacidad de transferencia de calor mayor. Previa investigación establecen que presentan bajas permeabilidades y que, además, composicionalmente cuentan con otros gases, principalmente CO_2 y H_2S .

Para la producción de los yacimientos asociados a este tipo de fluidos y consecuentemente para el caso de interés, los de vapor de baja entalpía, es importante considerar uno de los factores que mayor incidencia tiene en la recuperación de este recurso, el diseño y/o selección de la tubería de producción. Se debe seleccionar el diámetro apropiado para que no se presente una excesiva caída de presión entre la cara y la cabeza del pozo.

Una vez inicia la producción, por fenómenos físicos, en fondo de pozo se da una caída de presión que permite que el vapor del yacimiento suba a través de la tubería a superficie. En este punto, es fundamental considerar la densidad del fluido de interés: para valores bajos, el vapor fluye con mayor facilidad en comparación con un vapor de alta densidad, bajo las mismas condiciones de presión y temperatura. Sin embargo, y de acuerdo a Gupta et al. (2007), altas velocidades pueden llegar a causar daños a la tubería, especialmente aquellas que son mayores a 60 m/s. Generalmente, estas deben mantenerse en el rango de 20 a 50 m/s, incluso para tuberías cuyo diámetro es mayor a las que normalmente se instalan para producción. Asimismo, siguiendo con lo planteado por Gupta et al. (2007), el análisis de las caídas de presión a lo largo del sistema está también asociadas a la resistencia al flujo por fricción y los cambios de diámetro debido, principalmente, a las juntas de la tubería.

De esta manera, con base a los aspectos mencionados, se logró establecer una relación matemática para una presión dada y una longitud de tubería con el propósito de definir el radio de la tubería de producción para un sistema de vapor. Tal es el caso de Uchiyama y Matsuura (1970), que utilizaron la siguiente expresión para una de las

centrales geotérmicas de vapor más importantes del mundo, Matsukawa en Japón.

$$r = \frac{1}{2} \left(\frac{0,785 w v}{3600 U} \right)^{1/2} \quad (1)$$

Donde r es el radio interno de la tubería (ID, por sus siglas en inglés), w la cantidad de vapor de descarga, v volumen específico del vapor húmedo al 30% y U corresponde a la velocidad.

Otro aspecto a tener en cuenta en la producción de vapor son las pérdidas de calor. Estas pueden reducirse gracias a una cubierta aislada en la tubería que sin embargo llega a ser limitada. Además de esto, parte del vapor, a lo largo de la línea de producción, se condensa y, por ende, se hace necesaria la instalación de mangas, o bien, recipientes para el almacenamiento de este líquido ya que, de no controlarse, puede afectar el sistema, por ejemplo, por alto contenido de sal puede llegar a afectarse tanto la tubería como la turbina en superficie. En la producción de los yacimientos de vapor, las válvulas en cabeza de pozo se mantienen abiertas de manera controlada. En caso de que la presión en cabeza de pozo sea extraordinariamente alta, se requiere la instalación de un acelerador.

Gupta et al. (2007), establece que para determinar si hay suficiente vapor en la tubería a lo largo de la producción, se requiere la conexión de más de la cantidad mínima de pozos en la línea principal. Para el caso de exceso de vapor, se utiliza una válvula de ventilación que, además, permite regular las fluctuaciones relacionadas con los requisitos de descarga de este recurso en superficie. Asimismo, el sistema se controla mediante válvulas de seguridad que, en cabeza de pozo, no permiten aumentos en la presión con el fin de evitar que la integridad del pozo se vea afectada.

2.5 Facilidades de superficie y generación de electricidad

Una vez el vapor pasa del yacimiento a cabeza del pozo, se da inicio al proceso, para el caso de estudio, de la generación de electricidad mediante una planta. A continuación, se describen las unidades/facilidades de superficie que permiten que el calor del fluido geotérmico sea aprovechado.

En primer lugar, es fundamental destacar que el sistema en facilidades esta dado en función de la capacidad de generación eléctrica que tiene el fluido geotérmico, como se ha venido mencionando a lo largo de este trabajo de investigación. Este aspecto define si se deben instalar o no cámaras flash, condensadores, ciclos binarios o si el

fluido puede pasar directamente a la turbina para la generación de electricidad. Las propiedades termodinámicas son la herramienta que permiten analizar el comportamiento del proceso y, consecuentemente, definir si los fenómenos físicos involucrados en la generación de electricidad a partir de vapor saturado seco cumplen con los requerimientos para tener procesos eficientes y consecuentemente, rentables.

Con base a diferentes investigaciones, Chamorro et al. (2012) establece la eficiencia exergética como un parámetro fundamental y característico del funcionamiento de plantas de generación eléctrica. Para el caso de una planta de vapor seco se logra establecer la siguiente relación matemática, que permite calcular esta eficiencia.

$$\varphi_{VS} = \frac{n_{vs} * w}{e} \quad (2)$$

Donde n_{vs} corresponde a la eficiencia energética de la planta, generalmente asociada a un valor de 95%, w indica el trabajo específico por unidad de masa en la turbina y e corresponde a la exergía específica.

Asimismo, el comportamiento del sistema se puede describir a través de otras ecuaciones termodinámicas. Estas corresponden principalmente a el estado que Moya et al. (2018) denominan proceso de expansión de la turbina. Este proceso se representa en la figura 3, donde se muestra el comportamiento de la entropía (s) a lo largo de la producción del fluido geotérmico y en función, particularmente, del cambio en la temperatura en la entrada y salida de la turbina y en la salida del condensador.

$$w_t = h_1 - h_2 \quad (3)$$

$$n_t = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}} \quad (4)$$

$$\dot{W}_t = \dot{m}_s(h_1 - h_2) \quad (5)$$

$$\dot{W}_e = n_g \dot{W}_t \quad (6)$$

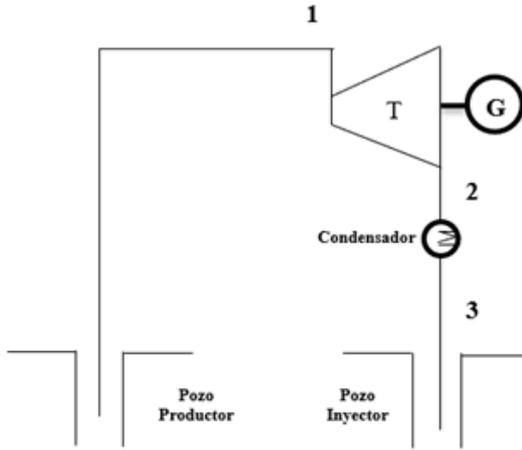


Figura 2 - Esquema simplificado de una planta de generación a partir de un yacimiento de vapor. T: Turbina, G: Generador.

Los números 1, 2 y 3 representan los estados mostrados en el diagrama T – s, Figura 3 (CHAMORRO et al., 2012)

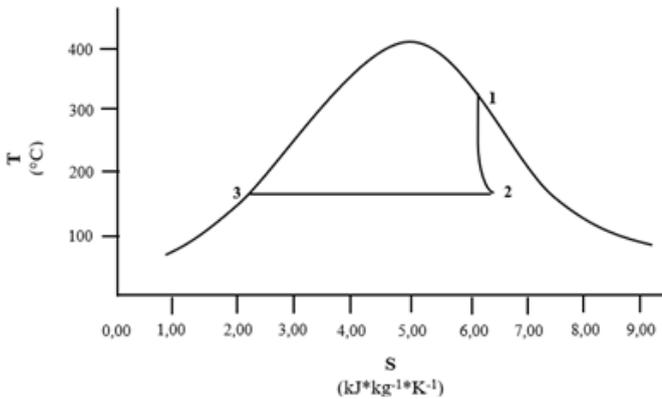


Figura 3 - Estados mostrados en diagrama T – s

3. CONCLUSIONES

Colombia, gracias a las condiciones geotectónicas que lo definen, es un país que cuenta con un alto potencial geotérmico. Esto permite establecer la importancia de desarrollar proyectos asociados a este tipo de energía, mediante las técnicas extractivas apropiadas que contribuyan en la reestructuración de la matriz energética y, además, en la búsqueda de la suficiencia energética.

De esta manera, es fundamental identificar los sistemas geotérmicos que se destacan a nivel mundial (Japón, Italia, Estados Unidos, Nueva Zelanda, etc.), para poder establecer vínculos académicos e investigativos con el fin de adquirir los conocimientos técnicos y de ingeniería necesarios para desarrollar este tipo de sistemas en un país como Colombia.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUILERA, P., et al. (2019, November). COLOMBIA—A GEOTHERMAL OPPORTUNITY. In Proceedings 41st New Zealand Geothermal Workshop (Vol. 25, p. 27).

ALFARO, C., ALVARADO, I., & MANRIQUE, A. (2015). Heat Flow Evaluation at Eastern Llanos Sedimentary Basin, Colombia. In Proceedings

BARBIER, E. (2002). Geothermal energy technology and current status: an overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 6(1-2), 3–65.

CHAMORRO, C. R., et al. (2012). World geothermal power production status: Energy, environmental and economic study of high enthalpy technologies. *Energy*, 42(1), 10–18.

GRINDLEY, G. W. (1970). Subsurface structures and relation to steam production in the Broadlands geothermal field, New Zealand. *Geothermics*, 2, 248-261.

GUPTA, H., & ROY, S. (2007). ASSESSMENT AND EXPLOITATION. *Geothermal Energy*, 121–164.

HANANO, M. (2003). Sustainable steam production in the Matsukawa geothermal field, Japan. *Geothermics*, 32(3), 311-324.

HIRAKAWA, S. (1982). Geothermal Field Development System. Offshore South East Asia Show.

INTANI, R. G., et al. (2020). Improving the conceptual understanding of the Darajat Geothermal Field. *Geothermics*, 83, 101716.

MORRIS, C. J., MROCZEK, E. K., & MISA, T. N. (2019). Geothermal steam condition performance monitoring. *Geothermics*, 81, 101-112.

MOYA, D., ALDÁS, C., & KAPARAJU, P. (2018). Geothermal energy: Power plant technology and direct heat applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 94, 889–901.

PHAIR, K. (2016). Direct steam geothermal energy conversion systems. *Geothermal Power Generation*, 291–319.

WHITING, R. L. (1974). *Drilling And Production Techniques In Geothermal Reservoirs*. SPE Deep Drilling and Production Symposium.

WHITING, R. L., & RAMEY, H. J. (1969). Application of Material and Energy Balances to Geothermal Steam Production. *Journal of Petroleum Technology*, 21(07), 893–900.