

## Panorama Preliminar para la Construcción de una Planta de Energía Geotérmica en el Macizo Volcánico del Ruiz

J. A. ORTIZ GONZÁLEZ <sup>1</sup>, M. A. MAYORGA BETANCOURT <sup>2</sup>



<sup>1</sup>JULIÁN ANDRÉS ORTÍZ GONZÁLEZ

Ingeniero mecánico de la Escuela Colombiana de Carreras Industriales, participó como ponente en el primer congreso de energía sostenible, maneja diversos software CAD (computer-aided design) y FEA (finite element analysis). Correo electrónico: jaog16o8@hotmail.com.

<sup>2</sup>I. Q. M.Sc. MANUEL ALEJANDRO MAYORGA BETANCOURT

Ingeniero Químico y Magister en Ingeniería – Ingeniería Química de la Universidad Nacional de Colombia, con énfasis en bioprocesos. Ha sido docente universitario de la Escuela Colombiana de Carreras Industriales -ECCI-, experto en el área de térmicas (termodinámica, transferencia de calor, etc.). Correo electrónico: alejo\_mayorga@yahoo.com..



### RESUMEN

En este artículo se recopilan los principales datos de los estudios realizados en el territorio colombiano sobre su potencial geotérmico, los cuales han servido de punto de partida para la realización de cálculos termodinámicos preliminares, por parte de varios autores, que buscan probar la prefactibilidad básica de la construcción de una planta de energía geotérmica en el territorio nacional.

**Palabras clave:** Entalpía, Geotérmica, Planta eléctrica, Tasa Interna de Retorno, Valor Presente Neto.

## ABSTRACT

In this article the main data collected from studies in Colombian territory on its geothermal potential, which has served as a starting point for conducting preliminary conceptual designs by several authors, who seek to prove the basic feasibility construction of a geothermal power plant in the country.

**Keywords:** Enthalpy, Electric plant, Geothermal, Internal Rate of Return, Net Present Value.

## INTRODUCCIÓN

Cuando se analiza la forma en la que está creciendo la sociedad, es evidente la crisis energética y ecológica que se avecina, ya que la mayoría de las tecnologías que están en funcionamiento, se alimentan de fuentes no renovables, las cuales son extremadamente contaminantes y lesivas para los ecosistemas.

Todo esto genera la necesidad de implementar nuevas soluciones para la generación de energía, basadas en una filosofía de desarrollo sostenible y producción limpia, que impulse el progreso de la industria, brindándole bienestar a la humanidad, sin destruir la naturaleza [1, 2].

Es por esta razón que la energía geotérmica se ha convertido en una tecnología muy atractiva, ya que al perforar los yacimientos subterráneos de agua a alta temperatura (100-350°C), se extrae el fluido, que por medio de un conjunto de turbogenerador, produce electricidad de manera limpia y eficiente, sin la necesidad de utilizar ningún combustible adicional [3, 4, 5].

Actualmente hay una capacidad instalada

de 8884,8 MW, en plantas de energía geotérmica a nivel mundial [6], de tal manera que en lugares como Islandia representa el 26.2% de toda la energía generada [7] y según el MIT (Massachusetts Institute of Technology) de Estados Unidos, hay disponibles en el planeta alrededor de 13000 ZJ de energía geotérmica, de los cuales son aprovechables, con las tecnologías disponibles 2000 ZJ, siendo el consumo mundial al año de electricidad 0.5 ZJ [8], por lo tanto, si se profundizara más en este campo, se supliría la demanda energética, sin tener que utilizar otros medios aparte de la geotermia.

Observando los datos en el panorama local, la situación es muy prometedora, gracias a que Colombia esta ubicada en el Cinturón de Fuego del Pacífico (lugar donde chocan las placas tectónicas), lo que genera extensas zonas volcánicas en la superficie, en las cuales se forman los yacimientos de agua a alta temperatura, apropiados para la explotación de la energía geotérmica [9, 10]. A pesar de todo, aun no se ha construido ninguna central eléctrica de este tipo en Colombia, desaprovechando una gran oportunidad para suplir las necesidades energéticas de la región.

Debido a esto, se ha recopilado la información mas importante de los estudios sobre energía geotérmica que se han realizado en Colombia, para observar el potencial nacional y dar a conocer las oportunidades que existen para la implementación de esta tecnología en el país.

## 1. TECNOLOGÍAS GEOTÉRMICAS PARA LA GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD

Cuando se piensa evaluar un yacimiento geotérmico para la generación de electricidad por medio de energía geotérmica, se debe tener en cuenta el principal parámetro para evaluar si un yacimiento es apropiado para la generación de electricidad o no, este parámetro es la entalpía, la cual ha sido estimada por algunos autores basándose en la temperatura del fluido, como se muestra en la siguiente tabla [3, 11]:

Entalpía	Muffler y Cataldi 1978	Rybach y Stegena 1988	Benderitter y Cormy 1990	Hochstein 1990
Baja	< 90°C	< 150°C	< 100°C	< 125°C
Media	90-150°C	---	100-200°C	125-225°C
Alta	> 150°C	> 150°C	> 200°C	> 225°C

Tabla 1. Entalpía del recurso dependiendo de la temperatura. Fuente: Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), Utilización de la Energía Geotérmica.

Según este parámetro, se dice que solo los recursos con alta y media entalpía son adecuados para la generación de electricidad

y teniendo en cuenta que las características suelen variar de un yacimiento a otro, se han desarrollado diferentes sistemas dependiendo de la temperatura y la fase en la que se encuentra el fluido [11, 6]. Con esto en mente, a continuación se muestran las principales tecnologías para la generación de electricidad por medio de energía geotérmica:

### 1.1 Central de vapor seco

En este tipo de planta se extrae el fluido en fase vapor del yacimiento, a una temperatura mayor o igual a 150°C, para ser filtrado e inyectado en el conjunto del turbogenerador en donde se produce electricidad. Luego, dependiendo del tipo de montaje, el fluido puede liberarse a la atmosfera por contrapresión o ser condensado y reinyectado en el pozo. Cabe resaltar que el sistema mas recomendable es el de condensador reinyección, ya que con este se garantiza el carácter renovable del recurso, al tener una tasa de equilibrio, por restablecimiento del pozo [12, 13].

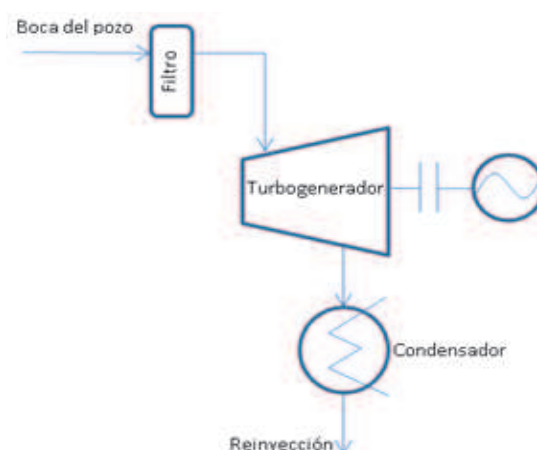


Fig. 1. Central de vapor seco.

## 1.2 Central tipo flash

Con este tipo de tecnología se extrae el fluido como una mezcla saturada de líquido-vapor, a una temperatura mayor o igual a  $150^{\circ}\text{C}$ , para ser pasada por un separador ciclónico el cual permite reinyectar la parte líquida y envía el vapor para ser utilizado en el conjunto del turbogenerador. Se pueden utilizar sistemas con varios separadores y turbinas de múltiples etapas, para aprovechar mucho más la energía que se le extrae al fluido (todo depende del criterio costo-beneficio del montaje). Finalmente se envía el fluido a un condensador para convertirlo completamente en líquido y ser reinyectado en el pozo [14, 15].

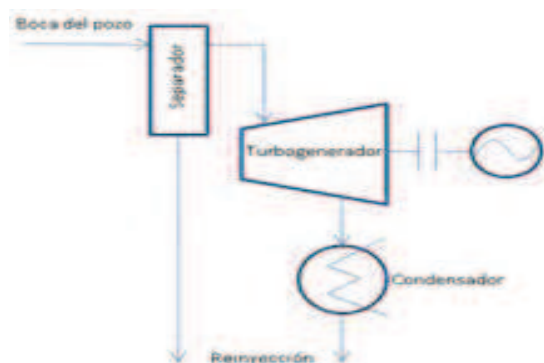


Fig. 2. Central tipo flash.

## 1.3 Central tipo binaria

Esta tecnología extrae el fluido en fase líquida del yacimiento, a temperaturas menores o iguales a  $150^{\circ}\text{C}$ , para pasarlo por un intercambiador de calor en el cual se le extrae la energía utilizando un fluido de trabajo con un punto de evaporación menor al del agua (clorofluorocarbonados, amoníaco, isobutano). Después de salir del intercambiador el fluido geotermal es reinyectado en el pozo. Por otro lado el

fluido de trabajo sale del intercambiador y se inyecta en el conjunto del turbogenerador produciendo electricidad, para luego ser convertido en líquido en el condensador y empezar el ciclo nuevamente [16, 17, 18].

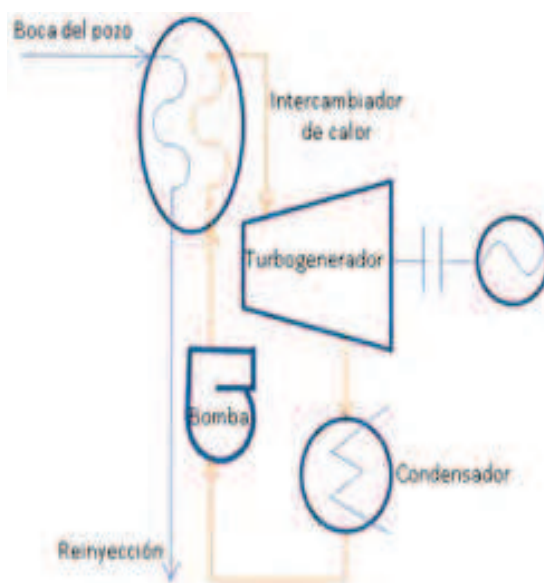


Fig. 3. Central tipo binaria.

## 1.4 Central de ciclo híbrido

En este tipo de plantas geotérmicas, se busca un mayor aprovechamiento de la energía que se le extrae al fluido, por medio de la combinación de las distintas

tecnologías, de tal forma que se pueden realizar montajes en los cuales se extrae el fluido en fase vapor del pozo, se pasa por un sistema de vapor seco y a la salida del turbogenerador se ingresa en un ciclo binario, para luego ser reinyectado. De esta manera se han implementado los siguientes tipos de plantas (este tipo de montajes dependen del criterio costo-beneficio) [19, 20]:

- Central de vapor seco-ciclo binario
- Central de flash simple-ciclo binario.
- Central integrada de simple y doble flash.
- Central geotérmica con combustible convencional de apoyo.

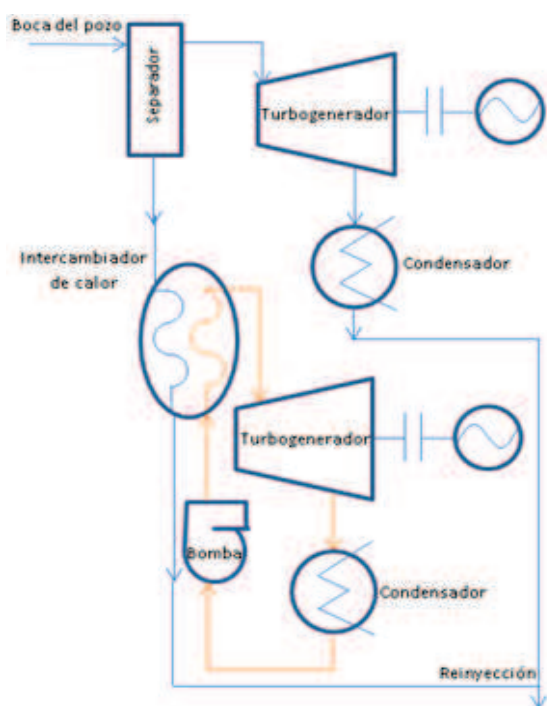


Fig. 4. Central de flash simple-ciclo binario.

## 2. POTENCIAL GEOTÉRMICO COLOMBIANO

La ubicación de Colombia sobre el Cinturón de Fuego del Pacífico, genera una extensa zona volcánica sobre la superficie, la cual constituye un gran potencial geotérmico con más de trescientos yacimientos termales en todo el territorio nacional [21, 22], por lo que se desarrolló un mapa del potencial geotérmico, basado en varias perforaciones petroleras, que muestra la temperatura a 3 kilómetros de profundidad:

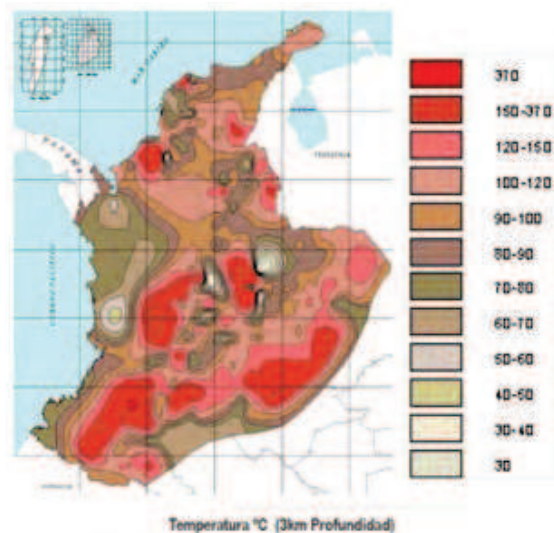


Fig. 5. Mapa del potencial geotérmico colombiano. Fuente: Sistema de Información de Eficiencia Energética y Energías Alternativas.

Ahora, es necesario tener en cuenta las principales características de un reservorio geotérmico, con las cuales se han analizado las zonas escogidas en los diferentes estudios realizados en Colombia [23]:

- Fuente de calor: Usualmente se presenta en zonas en donde aumenta la temperatura  $3^{\circ}\text{C}$  por cada 100 m de profundidad.
- Reservorio: Es una zona con un tipo de roca porosa que permite el almacenamiento del fluido.
- Sello: es un tipo de roca con baja permeabilidad que evita que el fluido se escape del reservorio.
- Reinyección: es una zona por la cual el reservorio se alimenta con fluido de forma natural.

Los estudios que se han hecho para evaluar la posible construcción de una planta de energía geotérmica para la producción de electricidad, se muestran a continuación:

## 2.1 Proyecto Chiles-Tufiño Cerro Negro (frontera colombo-ecuatoriana)

Entre 1986 y 1987 se realizaron estudios de prefactibilidad en esta zona, ejecutados por la empresa italiana AQUATER y amparados bajo un convenio binacional entre Colombia y Ecuador, con una inversión de 1.1 millones de dólares por parte del gobierno italiano. Estos estudios arrojaron resultados satisfactorios indicando la existencia de un reservorio geotérmico, con una temperatura que oscila entre 220-230°C y un potencial de generación entre 15 y 30 MW [24]. Actualmente se han retomado los estudios de prefactibilidad de manera conjunta, por parte de ISAGEN de Colombia y CELEC EP de Ecuador, los cuales están en la etapa de conformación de equipo técnico.

## 2.2 Proyecto Azufral (departamento de Nariño)

En 1998 se designó como primera prioridad geotérmica la zona del volcán de Azufral, ya que esta zona cuenta con todas las características tectónicas presentes en un yacimiento geotérmico. Por tal motivo Instituto de Ciencias Nucleares y Energías Alternativas (INEA) logró obtener 4.5 millones de dólares en recursos del Japanese Fund, para determinar por medio de estudios geológicos el potencial geotérmico del Volcán Azufral, realizar perforaciones (hasta 3.000 m en total) y probar uno o varios pozos con unidades de 10 MW.

Este proyecto nunca pudo ser culminado, ya que en el año 2000 cuando se estaba

realizando la primera fase, fueron retirados los recursos aduciendo problemas de inseguridad y orden público [25].

## 2.3 Proyecto de Paipa (departamento de Boyacá)

En principio se consideró la posibilidad de la existencia de una sola zona volcánica entre los municipios de Paipa e Iza, lo que se descartó en el año de 1989 mediante estudios geológicos realizados por parte de ICEL y la Electrificadora de Boyacá, que separaron la zona en dos, designando el sector de Paipa como el de mayor potencial geotérmico, debido a la posibilidad de la presencia de un yacimiento geotérmico con una temperatura entre 52 y 172°C [26].

## 2.4 Proyecto Macizo Volcánico del Ruiz (departamentos de Caldas, Tolima y Risaralda)

En 1976 un grupo de expertos del ENEL (Ente Nazionale per la Energía Elettrica) de Italia en cooperación con la Central Hidroeléctrica de Caldas, realizaron estudios geológicos preliminares, que fueron el punto de partida para la investigación de 1983 [27], realizada por la compañía consultora GEOTÉRMICA ITALIANA, en la que se ejecutaron estudios geológicos en detalle, arrojando resultados satisfactorios suficientes para la ejecución de una perforación exploratoria por parte Design Power Genzl en 1997, con la que se extrajo fluido geotérmico con una temperatura de 200°C y se hallaron indicios de la existencia de un reservorio con una temperatura de 220 a 250°C, con un potencial de generación de 50 MW, que podría ser ubicado con la realización de

nuevos estudios [28].

Actualmente ISAGEN, conjuntamente con INGEOMINAS, COLCIENCIAS y la UNIVERSIDAD NACIONAL, están desarrollando investigaciones más detalladas en el área del Ruiz, para obtener una mayor precisión en los datos geocientíficos, que permitan ubicar futuras perforaciones con mayor acierto [29].

### 3. EVALUACIÓN TÉCNICA BÁSICA DE LA PLANTA

Con estos datos se han realizado algunos estudios con cálculos básicos de una planta, en los que se ha planteado de manera preliminar, la zona del Macizo Volcánico del Ruiz como la más promisoría para la construcción de una central geotérmica, tomando en cuenta que es el lugar que presenta la temperatura y el potencial de generación más altos.

Además de esto, según las características que han arrojado los estudios, se han hecho los cálculos de una central de flash simple, ya que se estima un recurso en fase de mezcla, con una temperatura mayor a 150°C [27]. Por lo tanto son necesarios los siguientes datos de entrada, estimados en los estudios mostrados anteriormente:

- Temperatura (T): 250°C [28]
- Presión (P): 3976.2 kPa [30]
- Calidad (x): 0.80 [27]

Con esta información se realizaron los cálculos termodinámicos de la planta (ciclo Rankine) [3, 31], basados en tres escenarios de potencia de 10, 20 y 50 MW, tomando

en cuenta la legislación colombiana para interconectarse a la red [32] y el potencial de generación estimado para este yacimiento [29]. Además de esto se deja como un dato de salida el caudal necesario para generar la potencia en cada uno de los tres escenarios.

Potencia de la central (MW)	10	20	50
Flujo vapor (kg/s)	17.38	34.76	76.91
Flujo mezcla (kg/s)	21.72	43.45	108.63

Tabla 2. Flujo de vapor necesario. Fuente: Estudio Técnico-Económico de una Planta Geotérmica en el Macizo Volcánico del Ruiz

Al analizar estos flujos de masa, se observa que están dentro del rango característico de los yacimientos naturales de aguas termales existentes en la zona [21], con lo cual se puede decir de manera preliminar, que en el Macizo Volcánico del Ruiz existe un gran potencial para construir una planta de energía geotérmica.

### 4. EVALUACIÓN ECONÓMICA BÁSICA DE LA PLANTA

También ha sido analizada la viabilidad económica de este tipo de proyectos, ya que actualmente parámetros como la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el Valor Presente Neto (VPN), son fundamentales en la toma de decisiones de los inversionistas [33].

Por lo tanto, se planteó una proyección económica a 30 años, con un rendimiento anual del 90% (tomando en cuenta las paradas de la planta por mantenimiento y cualquier imprevisto que se pueda

presentar) [34, 35], para los tres tipos de plantas que se mostraron anteriormente, con un costo de venta de la energía de 119,84 pesos colombianos por kWh generado, que corresponde al precio promedio establecido en la bolsa de energía eléctrica, al día 31 de marzo de 2012 (este es el ente en el cual se realizan las ventas al por mayor de electricidad en Colombia) [36]. Además de esto fueron tomados los costos de capital, mantenimiento y operación (O&M), que se muestran en las tablas 4 y 5 [37], los cuales son muy similares a estudios realizados por otros autores de manera independiente [38, 39].

US\$ / kW			
Potencia (MW)	10	20	50
Equipo	2214	1743	1067
Obra civil	231	223	139
Ingeniería	456	346	201
Montaje	1169	1267	1396
<b>Total</b>	<b>4070</b>	<b>3579</b>	<b>2803</b>

Tabla 3. Costos de Capital, en US\$/kW, para Plantas Geotérmicas 2010. Fuente: The World Bank Group.

US\$ cents / kWh			
Potencia (MW)	10	20	50
Costo fijo O&M	1.30	1.35	1.01
Costo Variable O&M	0.48	0.45	0.34
<b>Total</b>	<b>7.07</b>	<b>6.38</b>	<b>4.81</b>

Tabla 4. Costos de Generación (US\$ cents/kWh) para Plantas Geotérmicas 2010. Fuente: The World Bank Group.

Finalmente, tomando la inflación estimada por el Banco de la Republica, del 4% para los próximos años [40], se obtuvieron los siguientes resultados del comportamiento económico y financiero de la

planta.

Potencia de la central (MW)	10	20	50
VPN (USD)	11.074.082	30.793.849	147.308.614
TIR (%)	8,65	10,17	15,37
Punto de equilibrio (años)	10	9	7

Tabla 5. Parámetros financieros del proyecto. Fuente: Estudio Técnico-Económico de una Planta Geotérmica en el Macizo Volcánico del Ruiz.

Si se toma el criterio del Valor Presente Neto, que dice que el proyecto es viable si este valor es positivo [33], se observa que la planta geotérmica es rentable, además, si se compara la Tasa Interna de Retorno con la tasa estimada por el Banco de la Republica para Colombia, que es de 5.9% [40], se confirma de manera preliminar, que los tres escenarios son una excelente opción de inversión.

## 5. CONCLUSIONES

Con el cálculo de tres centrales de flash simple, con unos parámetros de potencia de 10 MW, 20 MW y 50 MW, acordes a las propiedades encontradas en el Macizo Volcánico del Ruiz (250 °C en fase de mezcla) y un VPN positivo para los tres casos, se demuestra de manera preliminar, tanto la viabilidad técnica, como la factibilidad económica del proyecto. Quedó claro el gran potencial que tiene Colombia para el uso de la energía



geotérmica, con más de trescientas fuentes termales en todo el territorio nacional, demostrando, por medio de los estudios de prefactibilidad y una perforación exploratoria, la existencia de un yacimiento geotérmico de alta entalpía en el Macizo Volcánico del Ruiz, con una temperatura de 250°C en fase de mezcla, que aún no ha sido explotado, pero que podría convertirse en una excelente opción para la producción de electricidad.

Debido a que no existe una perforación para explotación en Colombia [28], se han utilizado distintos valores de potencia en la realización de los cálculos termodinámicos básicos, tomando una planta de 10 MW, otra de 20 MW y otra de 50 MW, los cuales requieren un flujo de vapor para la producción de energía de 17.38 kg/s, 34.76 kg/s y 76.91 kg/s, respectivamente para cada escenario, los cuales están dentro del rango de los flujos de masa de los yacimientos naturales de la zona, aportando algunas pruebas sobre la posible viabilidad técnica de este tipo de proyectos en el sector.

Por medio de los parámetros financieros, se aportaron datos preliminares sobre la factibilidad de la planta, mostrando la recuperación de la inversión inicial en un plazo de 7 años para la planta de 50 MW, otro de 9 años para la planta de 20 MW y otro de 10 años para la planta de 10 MW.

Además de esto, se observó un comportamiento exponencial en los costos de las plantas según la potencia generada, lo cual ha sido expresado por varios autores [41], de tal forma que a mayor capacidad de generación, menores son los costos

por kilovatio hora y mayores son los rendimientos financieros relativos, de tal forma que la planta de 50 MW tuvo una TIR de 15,37%, casi el doble que la TIR de 8,65% de la planta de 10 MW.

## REFERENCIAS

- [1] M. B. Bolker, M. E. Brooks, C. J. Clark, S. W. Geange, J. R. Poulsen, H. H. Stevens and S. S. White, "Generalized linear mixed models: a practical guide for ecology and evolution," *Trends in Ecology and Evolution*, vol. 24, pp. 130-133, 2009.
- [2] Banco Interamericano del Desarrollo (BID), "Proceedings," *World Geothermal Congress*, pp. 42-47, 2000.
- [3] L. Jutglar and J. Pous, *Energía Geotérmica*, CEAC, 2004.
- [4] Geothermal Energy Association, [Online]. Available: [www.geo-energy.org](http://www.geo-energy.org).
- [5] International Geothermal Association, [Online]. Available: [www.geothermal-energy.org](http://www.geothermal-energy.org).
- [6] Web Geothermal Data Base, [Online]. Available: <http://vmigg.iit.cnr.it/SpagoBI>.
- [7] Landsvirkjun, "Landsvirkjun," [Online]. Available: [LANDSVIRKJUN, www.landsvirkjun.com](http://www.landsvirkjun.com). [Accessed 9 mayo 2012].
- [8] Massachusetts Institute of Technology (MIT), "The Future of Geothermal Energy, Impact of Enhanced Geothermal Systems (EGS) on the United States in the 21st Century," pp. 220-230, 2006.
- [9] C. Alfaro, N. Bernal, G. Ramírez and R. Escobar, "Colombia, Country

Update," Proceedings World Geothermal Congress, vol. 1, pp. 46-49, 2000.

[10] Geo-Heat Center, [Online]. Available: <http://geoheat.oit.edu..>

[11] C. R. Chamorro, M. E. Mondéjar, R. Ramos, J. Segovia, M. C. Martín and M. A. Villamañán, "World geothermal power production status: Energy, environmental and economic study of high enthalpy technologies," *Energy*, vol. 42, pp. 13-18, 2012.

[12] Y. Sofyana, "Development of a New Simple Hydrostatic Equilibrium Model for Sustainable Evaluation in Geothermal Energy," *Energy Procedia*, vol. 14, pp. 205-210, 2012.

[13] Spirax Sarco, [Online]. Available: [www.spiraxsarco.com](http://www.spiraxsarco.com).

[14] S. Jalilinasrabadya, R. Itoi, P. Valdimarssonb, G. Saevarsdottirc and H. Fujii, "Flash Cycle Optimization of Sabalan Geothermal Power Plant Employing Exergy Concept," *Geothermics*, vol. 43, pp. 75-85, 2012.

[15] R. Tousif and B. Taslim, "Producing Electricity from Geothermal Energy," pp. 3-10, 2011.

[16] R. Dipippo, "Second Law assessment of binary plants generating," *Geothermics*, vol. 33, pp. 565-583, 2004.

[17] J. L. Sierra, "Energía Geotérmica," pp. 12-15, 1998.

[18] C. Koroneos and D. Rovas, "Electricity from Geothermal Energy with the Kalina Cycle – An Exergy Approach," pp. 424-430, 2006.

[19] M. Astolfi, L. Xodo, M. C. Romano and E. Macchi, "Technical and economic analysis of a solar-geothermal hybrid plant based on an Organic Rankine Cycle," *Geothermics*, vol. 40, pp. 58-68, 2011.

[20] A. Kagel, D. Bates and K. Gawell, "A Guide to Geothermal Energy and the Environment," pp. 16-19, 2003.

[21] Colombia, Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), "Utilización de la Energía Geotérmica," pp. 7-13, 2003.

[22] Sistema De Información De Eficiencia Energética Y Energías Alternativas, [Online]. Available: [www.sizea.gov.co](http://www.sizea.gov.co).

[23] R. L. Hébert, B. Ledésert, D. Bartier, C. Dezayes, A. Genter and C. Grall, "The Enhanced Geothermal System of Soultz-sous-Forêts: A study of the relationships between fracture zones and calcite content," *Volcanology*, vol. 196, pp. 126-133, 2006.

[24] Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), "Proyecto geotérmico binacional Tufiño-Chiles-Cerro Negro," pp. 20-50, 2000.

[25] Colombia. Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), "Plan de Desarrollo para las Fuentes no Convencionales de Energía en Colombia," pp. 138-150, 2010.

[26] E. Ibarra, "Prefactibilidad de la Instalación de una Planta Geotérmica en el Área de Paipa-Iza (Boyacá-Colombia)," pp. 138-150, 1993.

[27] Geotérmica Italiana, "Investigación geotérmica, Macizo Volcánico del Ruíz. Fase II. Etapa A," pp. 60-79, 1983.

[28] Consorcio Energético CORPOEMA, "Volumen 2 – Diagnóstico de las Fuentes no Convencionales de Energía en Colombia," pp. 276-280, 2010.

[29] ISAGEN, "Proyecto Geotérmico Macizo Volcánico del Ruíz," pp. 2-10, 2010.

[30] M. Boles and Y. Cengel, *Termodinámica Apéndice 1*, Sexta ed., Mc

Graw Hill, 2009.

[31] J. A. Ortiz, Estudio Técnico-Económico de una Planta Geotérmica en el Macizo Volcánico del Ruiz, Bogotá, 2012, pp. 20-50.

[32] Colombia, Congreso de la República, "Ley 143: Régimen para la Generación, Interconexión, Transmisión, Distribución y Comercialización de Electricidad en el Territorio Nacional," pp. 12-32, 1994.

[33] R. Coss Bu, Análisis y evaluación de proyectos de inversión, Limusa, 2010.

[34] "Mitsubishi Heavy Industries," [Online]. Available: [www.mhi.co.jp/en](http://www.mhi.co.jp/en).

[35] Toshiba Power Systems, [Online]. Available: [www3.toshiba.co.jp/power/index3.htm](http://www3.toshiba.co.jp/power/index3.htm).

[36] Sistema de Información Eléctrico Colombiano, [Online]. Available: [www.siel.gov.co](http://www.siel.gov.co).

[37] The World Bank Group, , [Online]. Available: [www.worldbank.org](http://www.worldbank.org).

[38] S. Valgardur , "Investment cost for geothermal power plants," Geothermics, vol. 31, pp. 263-272, 2002.

[39] United States, National Geothermal Collaborative, "Benefits of Geothermal Energy," pp. 34-40, 2004.

[40] Banco de la República de Colombia, [Online]. Available: [www.banrep.gov.co](http://www.banrep.gov.co).

[41] O. Jaimovich, "Geotermia," pp. 12-15, 2007.

© 2009 Revista Colombiana de Física.  
Todos los derechos reservados.