



\*Foto tomada por: Julián Andrés Ortiz González

## **Estudio de aprovechamiento de energía proveniente de los pozos programados en el proyecto geotérmico Macizo Volcánico del Ruiz – CHEC Grupo EPM**

**Informe final de la investigación realizada en el marco de las convocatorias de Minciencias, 848 de 2019 y 869 de 2020. Este es un trabajo conjunto entre empresa pública y entidades de educación superior, que a través de la creación de un grupo multidisciplinar, quieren aportar en el desarrollo de la geotermia en Colombia.**

**Junio 2021**

# Estudio de aprovechamiento de energía proveniente de los pozos programados en el proyecto geotérmico Macizo Volcánico del Ruiz – CHEC Grupo EPM

Julián Andrés Ortiz González

julian.ortiz@contratista.chec.com.co (J. A. O. González)

Central Hidroeléctrica de Caldas SA ESP– CHEC grupo EPM

## Resumen

En julio de 2021, se inició una investigación para estudiar los diferentes usos que puede tener el fluido geotérmico proveniente de los pozos que van a ser perforados dentro del proyecto geotérmico en el Macizo Volcánico del Ruiz, Valle de Nereidas y algunos enfoques para facilitar el desarrollo de este propósito. Esta iniciativa se enmarca dentro de la convocatoria 848 de Minciencias, la cual le otorgó recursos a la CHEC para su desarrollo. De esta manera, a continuación, se realiza una descripción de los resultados obtenidos durante este trabajo, las conclusiones más relevantes y algunas propuestas de trabajos futuros que pueden aportar en el camino para el aprovechamiento de la energía geotérmica en Colombia.

## Introducción

La energía geotérmica es una Fuente no Convencional de Energía Renovable (FNCER) que se puede definir como: la energía térmica generada y almacenada en la Tierra, proveniente de la formación original del planeta (20%) y de la desintegración radiactiva de algunos minerales (80%) [1]. En este sentido, los aprovechamientos de la geotermia se pueden clasificar por profundidad o temperatura del recurso. En la Figura 1 se presenta un diagrama de esta clasificación [2].

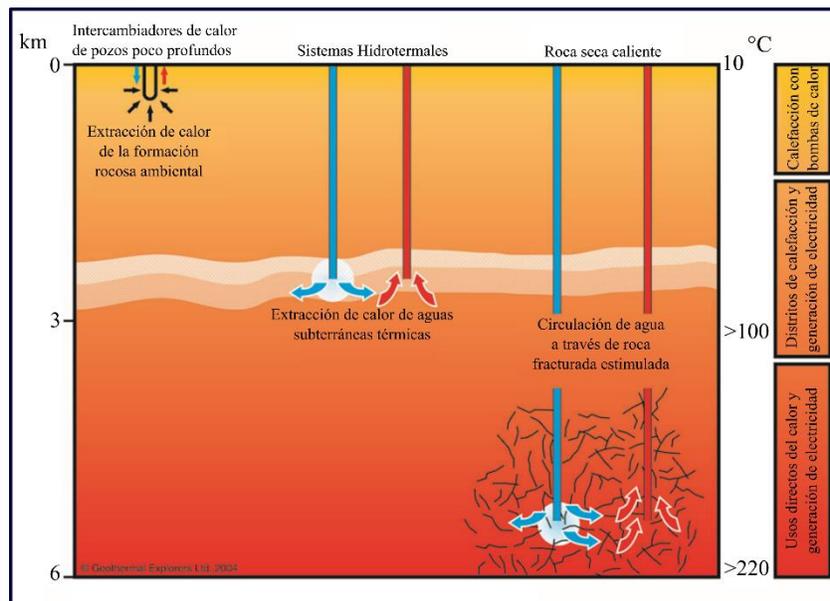


Figura 1: Tipos de tecnologías para el aprovechamiento de la energía geotérmica dependiendo de la profundidad (Fuente [2]).

Como se observa en la Figura 1, al clasificar los aprovechamientos geotérmicos por profundidad tenemos tres tipos [2]:

- Someros o de baja profundidad (< 500 m) donde se aprovecha la temperatura estable del subsuelo a través de intercambiadores de calor y bombas de calor.
- Profundidad media (> 1500 m), se buscan formaciones geológicas que alberguen reservorios hidrotermales, con un fluido geotérmico que pueda ser implementado en procesos de producción de electricidad y en usos directos del calor.
- Recursos a gran profundidad (> 4000 m), donde se busca una formación rocosa a alta temperatura que, al ser sometida a un proceso de fractura y estimulación, pueda ser usada para calentar un fluido de trabajo, que alimenta usos directos del calor o procesos de generación de electricidad.

Al observar esta clasificación, podemos encuadrar el proyecto geotérmico en el Macizo Volcánico del Ruiz como un aprovechamiento de profundidad media, en donde se busca un yacimiento hidrotermal viable, para alimentar procesos de generación eléctrica y usos directos del calor. Este tipo de proyectos geotérmicos cuando se usan para generación de electricidad, tienen unas ventajas que los hacen destacarse por encima de otras FNCER, como los son la energía solar y la energía eólica. A continuación, se presentan algunas de estas ventajas [3].

- A través de la geotermia se puede producir electricidad 24 horas al día y 7 días a la semana: Además de ser esencialmente ilimitada como muchas otras energías renovables, la energía geotérmica siempre está disponible. No se ve afectada por si es de día o de noche como la energía solar, y no depende de la temporada, el clima o las condiciones meteorológicas como la energía eólica y solar. En promedio, una planta de energía geotérmica producirá energía durante unas 8600 horas al año, mientras que en las plantas solares el promedio es de unas 2000 horas al año. Por tanto, podemos describir la tasa de producción de energía geotérmica como constante, al menos a corto o mediano plazo.
- Tiene un bajo uso del suelo: A diferencia de las majestuosas extensiones de grandes turbinas eólicas y paneles fotovoltaicos, las plantas de energía geotérmica solo requieren cantidades modestas de espacio. En los hogares, la bomba de calor es aproximadamente del tamaño de un electrodoméstico, mientras que, en las plantas más grandes, los componentes más grandes son las torres de enfriamiento, seguidas de las turbinas. En ciertos casos, las plantas pueden tener un impacto visual en el paisaje, pero los diseños arquitectónicos más nuevos están mitigando este problema.
- Es una energía silenciosa: Al menos mientras funcionan a plena capacidad, las plantas de energía geotérmica producen niveles de ruido insignificantes e imperceptibles. Durante la fase de construcción de las plantas, incluidas las excavaciones, es inevitable una cierta cantidad de ruido, pero una vez que se completa la construcción, se reduce bastante.

- Crea un número récord de puestos de trabajo: según datos presentados por ENEL, para la misma potencia instalada, la geotermia genera más empleo indirecto que cualquier otro tipo de renovable. En términos de cifras, se traduce en 34 puestos de trabajo por MW, son más que los 19 creados por la energía eólica y los 12 por la energía fotovoltaica.
- Proporciona más energía para la misma potencia nominal: Debido a que la entrega es constante, la energía geotérmica puede funcionar a plena capacidad sin interrupciones (solo parado por mantenimiento). Esto significa que la cantidad de energía resultante será el equivalente a la potencia multiplicada por las horas de generación. Esto es muy diferente a los sistemas fotovoltaicos, hidroeléctricos y eólicos, que rara vez funcionan a plena capacidad. Entonces se produce más energía para la misma potencia nominal.
- Permite el doble reciclaje: La energía geotérmica optimiza los recursos. Por un lado, las plantas tienen componentes que se pueden recuperar y reutilizar al final del ciclo de vida de la instalación. Por otro lado, durante la operación, los flujos se organizan de tal manera que el calor que no se pueda utilizar inmediatamente vuelva al circuito a través de las tuberías de vapor que alimentan la planta, lo que ayuda a ahorrar energía. Sin olvidar el enfoque de aprovechamiento en cascada, en donde con la energía que no es usada para generación de electricidad, se alimentan usos directos del calor.
- Las plantas son duraderas, seguras y fiables: Tanto las plantas domésticas como las de gran escala tienen una vida útil media muy larga, de hasta 80 a 100 años. Se trata de una longevidad extraordinaria en comparación con una caldera doméstica, que normalmente dura unos 15 años. El hecho de que no haya combustibles involucrados también significa que no hay riesgo de incendio, y alrededor del mundo se adquirió una larga experiencia con este tipo de sistemas, lo que garantiza una excelente confiabilidad.
- Requiere muy poco mantenimiento: Particularmente cuando se trata de uso doméstico, las plantas geotérmicas no requieren ningún mantenimiento especial. Al ser sistemas cerrados, la presión del fluido en la tubería se autorregula, y el número de elementos eléctricos y mecánicos que pueden averiarse también es muy reducido.
- Más ventajas para el hogar: Además de proporcionar aire acondicionado en verano y calefacción en invierno, la energía geotérmica tiene muchas otras ventajas cuando se utiliza en el hogar. Por ejemplo, reduce el consumo total de energía entre un 30 y un 70% porque también puede hacer el trabajo de una caldera, es decir, calentar agua para su uso en la cocina y el baño.

Bajo este marco se encuadra el proyecto geotérmico en el Macizo Volcánico del Ruiz, buscando materializar esta iniciativa, para poder aprovechar todas estas ventajas. Con esto en mente, se vio la necesidad de estudiar las diferentes posibilidades para el aprovechamiento geotérmico dentro del proyecto, ya sean para generación de electricidad o usos directos del calor, y así potenciar y viabilizar la realización del mismo.

## Convocatoria de Minciencias 848

En la búsqueda de recursos para poder investigar los diferentes usos que se le podría dar al fluido geotérmico que se espera encontrar en el proyecto del Macizo Volcánico del Ruiz, en 2019, la CHEC junto con la Universidad Autónoma de Manizales UAM, presentaron una propuesta para la convocatoria: “Programa de Estancias Postdoctorales en entidades del SNCTeI 848”. El título de esta propuesta es: “Estudio de aprovechamiento de energía proveniente de los pozos programados en el proyecto geotérmico Macizo Volcánico del Ruiz – CHEC Grupo EPM”. El objetivo de esta convocatoria fue facilitar la vinculación de profesionales colombianos con título de doctorado a entidades del Sistema Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación a través del desarrollo de estancias postdoctorales. De esta manera en 2020, el proyecto presentado por la CHEC fue aprobado por Minciencias, recibiendo 96 millones de pesos colombianos para la vinculación por un año del Doctor Julián Andrés Ortiz González [4]. A partir de esto, se trabajó en la investigación de formas de potenciar el proyecto geotérmico en el Macizo Volcánico del Ruiz, con tecnologías y enfoques para la generación de electricidad, usos directos del calor a partir de las actividades socio económicas del área de influencia del proyecto y diferentes fuentes de financiación y mitigación de riesgo. Además de esto, este proyecto permitió la vinculación de varios estudiantes de ingeniería como practicantes en el proyecto, que se sumaron al trabajo del beneficiario de la convocatoria 848 como responsable de la investigación, siempre de la mano y con el apoyo de los profesores de la UAM y de los miembros de la CHEC, que fueron parte activa en la evaluación y presentación de los resultados.

En la Tabla 1 se presenta una lista con los miembros del proyecto que participaron activamente de su desarrollo.

Tabla 1: Miembros del equipo de trabajo que participaron durante el desarrollo del proyecto.

Miembro del equipo	Organización	Entidades
Julián López Palacio	Líder proyecto geotérmico CHEC	
Laura Gómez Giraldo	Profesional CHEC	
Mónica Osorio Jiménez	Profesional CHEC	
Julián Andrés Ortiz González	Estancia postdoctoral CHEC	
William Fernando López Candela	Profesor UAM	
Gabriel Hernando Cadavid Marín	Profesor UAM	
Ricardo José Hernández Rolón	Practicante UAM, 2021-I	
Juan Sebastián Pulgarin González	Practicante UAM, 2021-I	
Luisa Fernanda Román González	Practicante UdeC, 2021-I	
Laura Taborda Giraldo	Practicante UAM, 2020-II	
Alexander Cardona Valencia	Practicante UAM, 2020-II	
Camila María Barragán Jacksson	Practicante UdeC, 2020-II	
Juan José Tamayo García	Practicante UN, 2020-II	
Laura María Sánchez Marulanda	Practicante UAM, 2020-I	
Juan Sebastián Franco Sánchez	Practicante UAM, 2020-I	
Natalia García Beltrán	Practicante UdeC, 2020-I	
Edgar Fernando Marín Ramírez	Aspirante Maestría UAM/UAO	

Ya con el proyecto estructurado y en desarrollo, se presentó a la convocatoria para “Proyectos que Aspiran a Obtener Beneficios Tributarios por Inversión CTEI 869 de 2020”. Después de pasar por el proceso de evaluación requerido, el Minciencias otorgó el visto bueno para que las actividades desarrolladas en el marco de esta investigación recibieran los beneficios de esta convocatoria.

También es necesario mencionar a todos los colaboradores, tanto de la CHEC como de la UAM, que apoyaron de alguna forma la realización de esta investigación, por sus labores administrativas y de coordinación, que facilitaron en gran medida el trabajo de los miembros del proyecto.

La hoja de ruta para el desarrollo de la investigación se encuentra plasmada en el documento: “Propuesta: Estudio de aprovechamiento de energía proveniente de los pozos programados en el proyecto geotérmico Macizo Volcánico del Ruiz –CHEC Grupo EPM”. Los objetivos propuestos en este documento se muestran a continuación.

### **Objetivo general**

Presentar un estudio de desarrollo y adaptación de tecnología para generación de electricidad y aprovechamiento de la energía geotérmica proveniente de los pozos programados del proyecto geotérmico Macizo Volcánico del Ruiz –CHEC Grupo EPM.

### **Objetivos específicos**

- Estudiar las diversas alternativas de adquisición o montaje de plantas modulares de pequeña escala para generación de electricidad con energía geotérmica en los pozos programados del proyecto geotérmico Macizo Volcánico del Ruiz –CHEC Grupo EPM.
- Estudiar las posibilidades de aprovechamiento de la energía residual del proyecto geotérmico de la CHEC en el Valle de Nereidas, Villamaría, Caldas.
- Simular los diversos escenarios optimistas y pesimistas para aprovechamiento primario y secundario del fluido geotérmico para analizar la viabilidad técnica y económica del proyecto y desarrollar una propuesta de inversión atractiva para la empresa CHEC grupo EPM.

Por este camino, en este documento se muestran los resultados obtenidos en cumplimiento a los objetivos planteados. Cabe resaltar que también se indican los informes, en donde se pueden consultar los detalles de cada parte de la investigación que fue realizada.

### **Estimaciones de las propiedades del recurso del yacimiento geotérmico en el Macizo Volcánico del Ruiz-Valle de Nereidas**

El primer paso dentro de esta investigación, fue la recopilación de todos los estudios realizados hasta la fecha dentro del proyecto, para obtener las propiedades estimadas del recurso geotérmico en el macizo Volcánico del Ruiz. En este sentido, uno de los insumos más importantes es el modelo geotérmico conceptual que se muestra en la Figura 2.

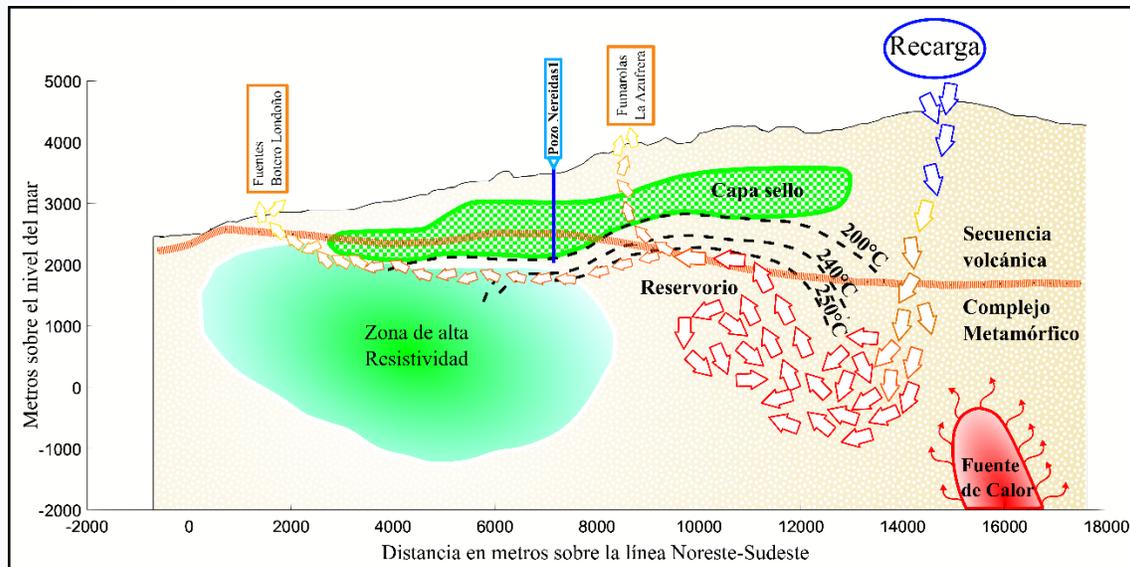


Figura 2: Vista en perfil NO-SE del modelo geotérmico conceptual integrado del Valle de Nereidas (adaptado a partir de los datos de [5]).

De esta manera, se pudo determinar que los últimos estudios indican que en el proyecto del Macizo Volcánico del Ruiz el yacimiento puede llegar a alimentar una planta de Flash simple con turbina de condensación de 65MWe. Esto, con un fluido geotérmico que se encontraría como líquido saturado, a una temperatura que oscila entre 240 y 260°C. En este mismo sentido, se estima que cada pozo puede tener un flujo de masa que está entre 50 y 75 Kg/s [6]. Históricamente, estos datos han sido confirmados por empresas independientes, ya que, en un estudio anterior Dewhurst Group presentó estimativas similares que fueron usadas para dimensionar una planta de 25 MW [7]. En la Figura 3 se presentan los parámetros más importantes de los cálculos de Dewhurst Group (Figura 3a) y los resultados de LaGeo (Figura 3b) respectivamente.

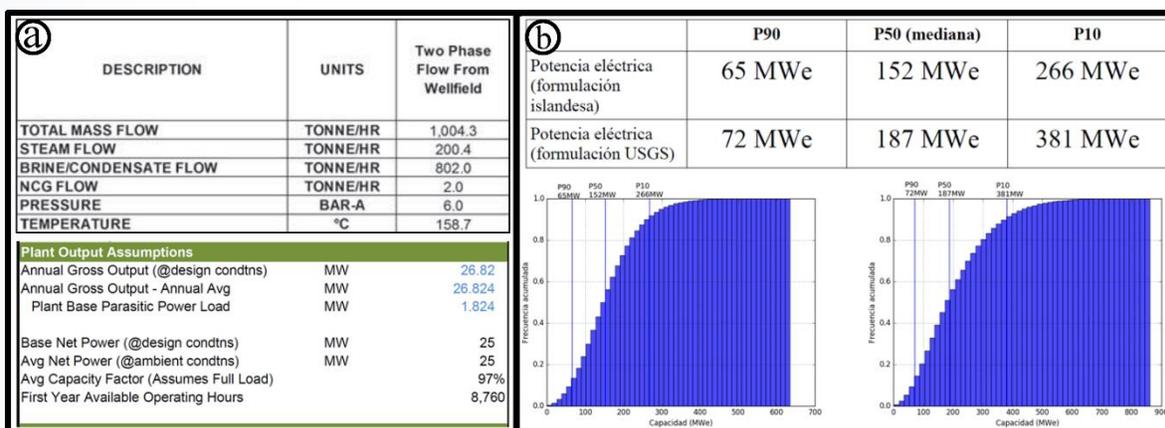


Figura 3: (a) Propiedades del fluido estimadas por Dewhurst Group, para el campo geotérmico en el Macizo Volcánico del Ruiz (fuente [7]). (b) Estudio realizado por LaGeo: Distribución acumulada de probabilidad para el cálculo de potencial del recurso. Izquierda: formulación islandesa, derecha: formulación USGS (fuente [5]).

Con toda esta información fue creado un campo geotérmico hipotético, donde se calcularon el flujo de masa y las temperaturas requeridas, para generar las potencias estimadas (Figura 3), respetando los intervalos de temperatura, caudal y presión esperados. En este caso se usó una estructura de cálculo termodinámico como la que presenta el profesor Ronald DiPippo en su libro [8]. Luego, mediante un proceso iterativo de equilibrio de masas y energías, se calcularon las características de cada pozo, siempre respetando los intervalos de flujo de masa y temperatura. Basados en datos de la literatura, se adoptó la función cuadrática para darle forma a las curvas de pozo [9]. Este protocolo se programó en una planilla de Excel.

Cada pozo con su curva de producción estimada, cumple con las condiciones del fluido que se piensa encontrar en la zona. En la Figura 4 se presentan las curvas de producción que fueron estimadas para el campo geotérmico hipotético.

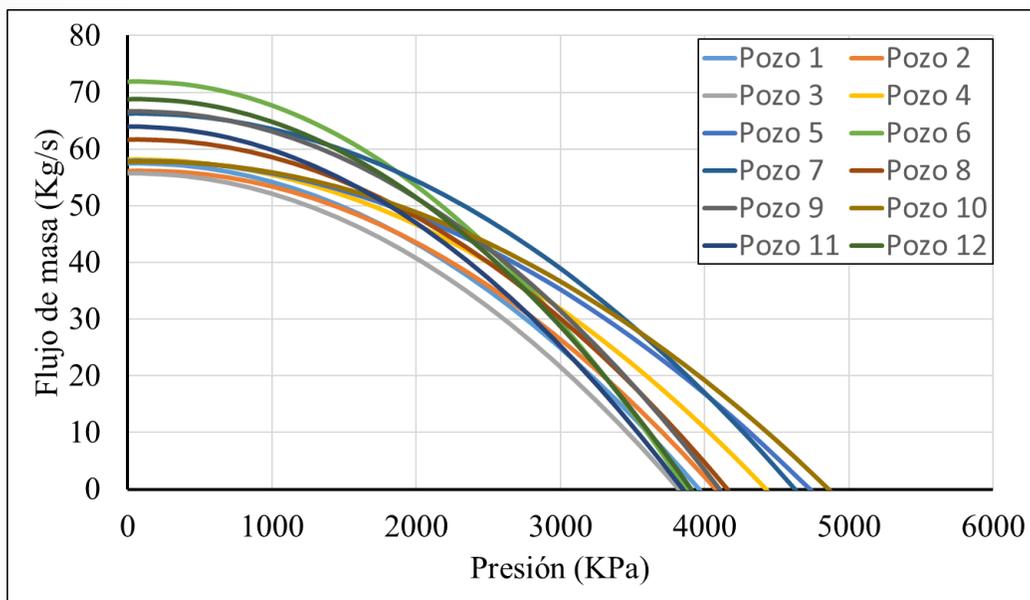


Figura 4: Curvas de producción de los 12 pozos, calculadas para el campo geotérmico hipotético.

Ya con el campo geotérmico hipotético de 12 pozos productores estimado, fue posible comenzar la evaluación técnica y económica de los diferentes escenarios de generación de electricidad y usos directos del calor. Para más detalles sobre las propiedades estimadas del recurso geotérmico en el Macizo Volcánico del Ruiz se pueden consultar los siguientes documentos generados durante esta investigación:

- Propiedades del fluido geotérmico
- Diferentes escenarios de generación de electricidad en el proyecto geotérmico
- Características adecuadas para la planta de producción de electricidad
- Wellhead power plants, an option to enhance the “Macizo Volcánico del Ruiz” Geothermal Project.

## Escenarios de generación de electricidad

A partir de las propiedades estimadas del fluido geotérmico, se pudieron escoger los ciclos termodinámicos que podrían ser usados para generar electricidad en el proyecto. En la Figura 3 se muestran los ciclos termodinámicos que fueron usados en los cálculos; (a) Flash simple con turbina de contra presión, (b) Flash simple con turbina de condensación, (c) Flash doble con condensador y (d) Binaria de alta entalpía. Siendo estos los ciclos que se consideraron como los más adecuados para las características esperadas del fluido geotérmico [8, 10-12].

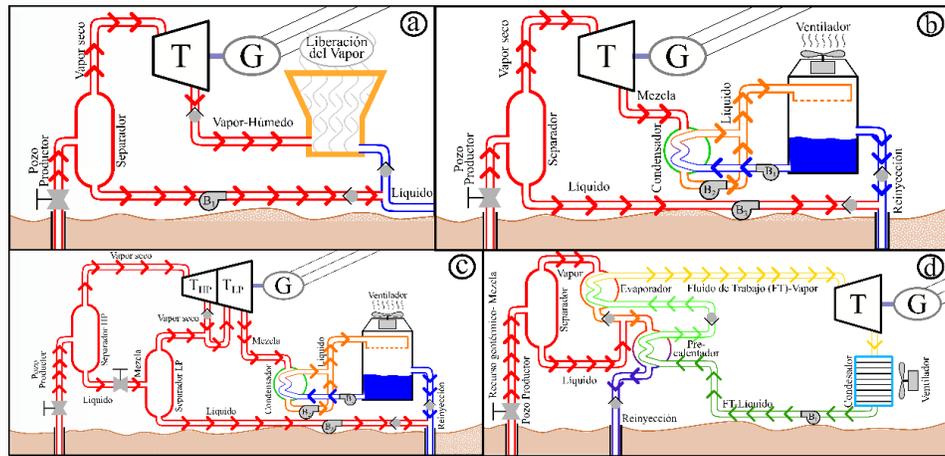


Figura 5: Ciclos termodinámicos; (a) Flash simple con turbina de contra presión, (b) Flash simple con turbina de condensación, (c) Flash doble con condensador y (d) Binaria de alta entalpía.

Además de esto, se aplicaron diferentes enfoques de desarrollo para el campo geotérmico. Primero, fueron analizados escenarios de plantas centrales, en donde los 12 pozos productores alimentan un sistema de generación centralizado, a través de una red vapor ductos. Segundo, plantas cabeza de pozo en donde cada pozo cuenta con su propio sistema de generación de electricidad y tercero, escenarios mixtos en donde se usan los dos enfoques, dependiendo de características geográficas o de desarrollo del proyecto. En la Tabla 2 se presenta la capacidad instalada total para cada tipo de sistema de generación dentro del enfoque seleccionado.

Tabla 2: Escenarios de generación de electricidad a partir de energía geotérmica con plantas centrales, sistemas de plantas de cabeza de pozo y configuraciones mixtas.

N°	Ciclo	Sistema de generación de electricidad	Potencia (MWe)
1	Fig. 6b	Planta central Flash simple con turbina de condensación (FSTC).	65
2	Fig. 6c	Planta central Flash doble con turbina de condensación (FDTC).	72
3	Fig. 6d	Planta central Binaria de alta entalpía (PBAE).	96.5
4	Fig. 6b	12 cabeza de pozo Flash simple con turbina de condensación (FSTC).	71
5	Fig. 6d	12 cabeza de pozo Binarias de alta entalpía (PBAE).	97.5
6	Fig. 6a	12 cabeza de pozo Flash simple turbina de contra presión (FSTCP).	35.6
7	Fig. 6b	Central FSTC junto con 1 cabeza de pozo FSTC en el primer pozo.	66.1
8	Fig. 6b, d	Central FSTC junto con 1 cabeza de pozo PBAE en el primer pozo.	68.2
9	Fig. 6b, a	Central FSTC junto con 1 cabeza de pozo FSTCP en el primer pozo.	63.2
10	Fig. 6b	Central FSTC junto con 3 cabeza de pozo FSTC.	66.4
11	Fig. 6b, d	Central FSTC junto con 3 cabeza de pozo PBAE.	73.3
12	Fig. 6b, a	Central FSTC junto con 3 cabeza de pozo FSTCP.	57.4
13	Fig. 6b	Ciclo combinado, central FSTC junto con central binaria clásica.	101

Como se muestra en la Tabla 2, cambiando la tecnología de generación de electricidad, se obtiene una potencia neta diferente a partir del mismo campo hipotético. Esto se evidencia, por ejemplo, con la planta central Flash doble y la central Binaria de alta entalpía, ya que estas dos consiguen extraer mayor cantidad de energía del fluido, cuando se comparan con la central Flash simple, pero son más costosas por los elementos adicionales que se usan en el proceso (ver Tabla 3) [10].

Una de las ventajas del uso de sistemas de plantas modulares, es que la presión en la cabeza del pozo se puede optimizar en cada caso, para aumentar la energía extraída del fluido [9]. Es por esta razón, que el sistema con 12 plantas modulares Flash simple con turbina de condensación, produce más electricidad que el sistema de planta central Flash simple con turbina de condensación, sin importar que parten del mismo principio de funcionamiento.

Ampliando el estudio, también fueron calculados los costos en los que se incurriría para implementar cada uno de los escenarios de generación dentro del proyecto. En la Tabla 3 se presenta el total del costo de la inversión (CAPEX) para cada escenario.

Tabla 3: CAPEX total para los diferentes escenarios de generación, incluyendo todos los rubros posibles.

N°	Sistema de generación de electricidad	CAPEX (USD)
1	Planta central Flash simple con turbina de condensación (FSTC).	301,407,558
2	Planta central Flash doble con turbina de condensación (FDTC).	309,246,481
3	Planta central Binaria de alta entalpía (PBAE).	441,756,212
4	12 cabeza de pozo Flash simple con turbina de condensación (FSTC).	336,018,589
5	12 cabeza de pozo Binarias de alta entalpía (PBAE).	435,569,994
6	12 cabeza de pozo Flash simple turbina de contra presión (FSTCP).	169,715,609
7	Central FSTC junto con 1 cabeza de pozo FSTC en el primer pozo.	305,146,252
8	Central FSTC junto con 1 cabeza de pozo PBAE en el primer pozo.	312,482,454
9	Central FSTC junto con 1 cabeza de pozo FSTCP en el primer pozo.	295,418,942
10	Central FSTC junto con 3 cabeza de pozo FSTC.	304,146,858
11	Central FSTC junto con 3 cabeza de pozo PBAE.	330,201,621
12	Central FSTC junto con 3 cabeza de pozo FSTCP.	269,498,619
13	Ciclo combinado, central FSTC junto con central binaria clásica.	361,738,019

Los valores de CAPEX presentados en la Tabla 3, contienen todos los rubros necesarios para la implementación de cada sistema. Con estos datos y la estimación de los costos de operación y mantenimiento, fueron realizadas proyecciones financieras para determinar el panorama de cada inversión. El tiempo de construcción de la planta se tomó como una variable, para analizar la sensibilidad de cada tipo de enfoque, a las demoras y contratiempos que se pueden presentar durante la ejecución de las obras. Esto quiere decir que solo hasta cumplirse este tiempo de construcción, la planta entra en operación y comienza a correr el tiempo de vida útil. En el caso de las plantas de cabeza de pozo, si se establece un tiempo de construcción por ejemplo de 2 años, significa que cada una de las doce plantas tuvo un tiempo de construcción individual de 2 meses (tiempo de construcción, dividido por la cantidad de plantas cabeza de pozo).

Para la proyección financiera se consideró una vida útil de planta de 30 años y un costo de venta de la electricidad de 67 USD/MWh, basándose en proyecciones conservadoras del mercado colombiano y estimativas internas de la empresa CHEC grupo EPM. Por lo tanto, en la Figura 6 se presenta una curva que muestra la variación del Valor Presente Neto (VPN), con el aumento del tiempo de construcción de la planta, para los escenarios de planta central y los escenarios de plantas modulares cabeza de pozo.

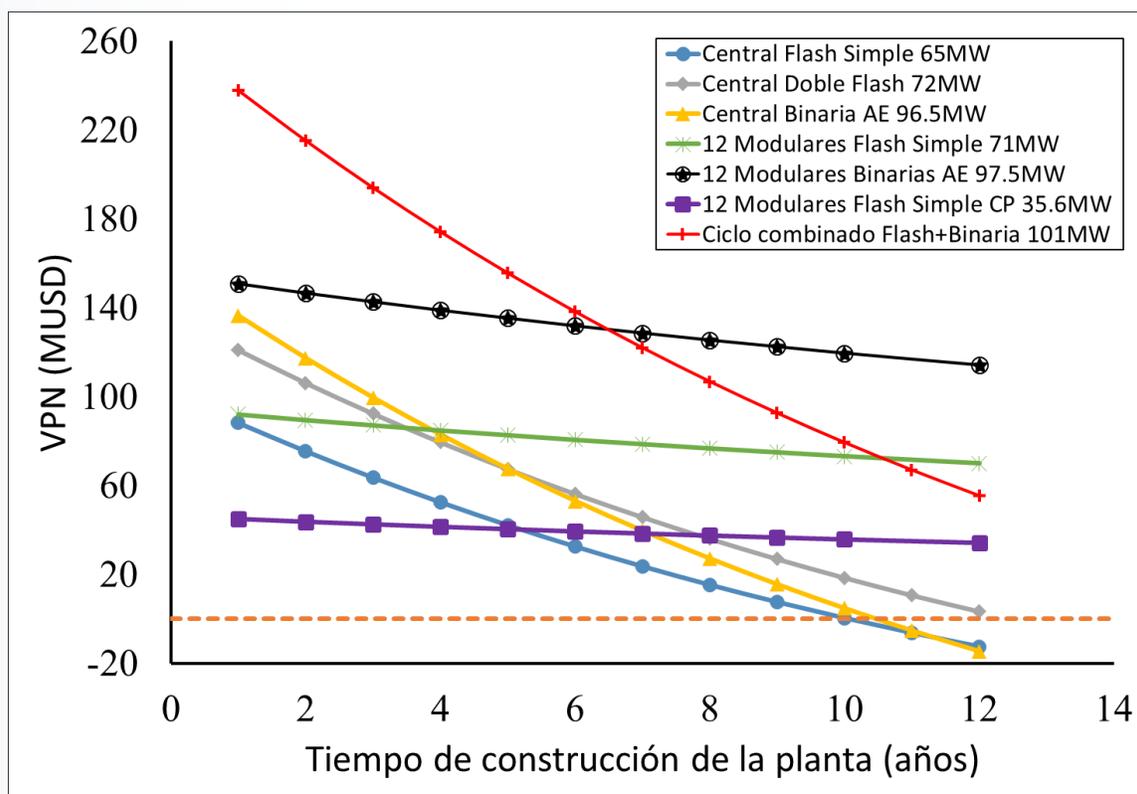


Figura 6: Comportamiento del VPN con la variación del tiempo de construcción para los escenarios con plantas centrales y con sistemas modulares.

Como muestra la Figura 6, los sistemas con planta central son más sensibles al aumento en el tiempo de construcción del sistema. De tal manera, que el sistema con planta central Flash simple con un tiempo de construcción de 3 años es viable, pero si el tiempo pasa a ser mayor a 10 años el proyecto se torna inviable ( $VPN < 0$ ). En contraste el sistema con plantas modulares cabeza de pozo Flash simple con turbina de condensación es viable durante todo el intervalo de tiempo que se presenta en la Figura 6 ( $VPN > 0$ ). Esto pasa porque en los sistemas centrales solo se reciben ingresos, hasta que todos los pozos han sido perforados y la planta ha sido construida. En cambio, en los sistemas modulares de cabeza de pozo, se puede comenzar a recibir ingresos por venta de electricidad, a partir de la instalación de una planta modular en el primer pozo productor, continuando con las demás obras y perforaciones en paralelo.

Continuando con el estudio, en la Figura 7 se presenta el mismo análisis de sensibilidad del VPN, dependiendo del tiempo de construcción, para los escenarios mixtos de generación de electricidad.

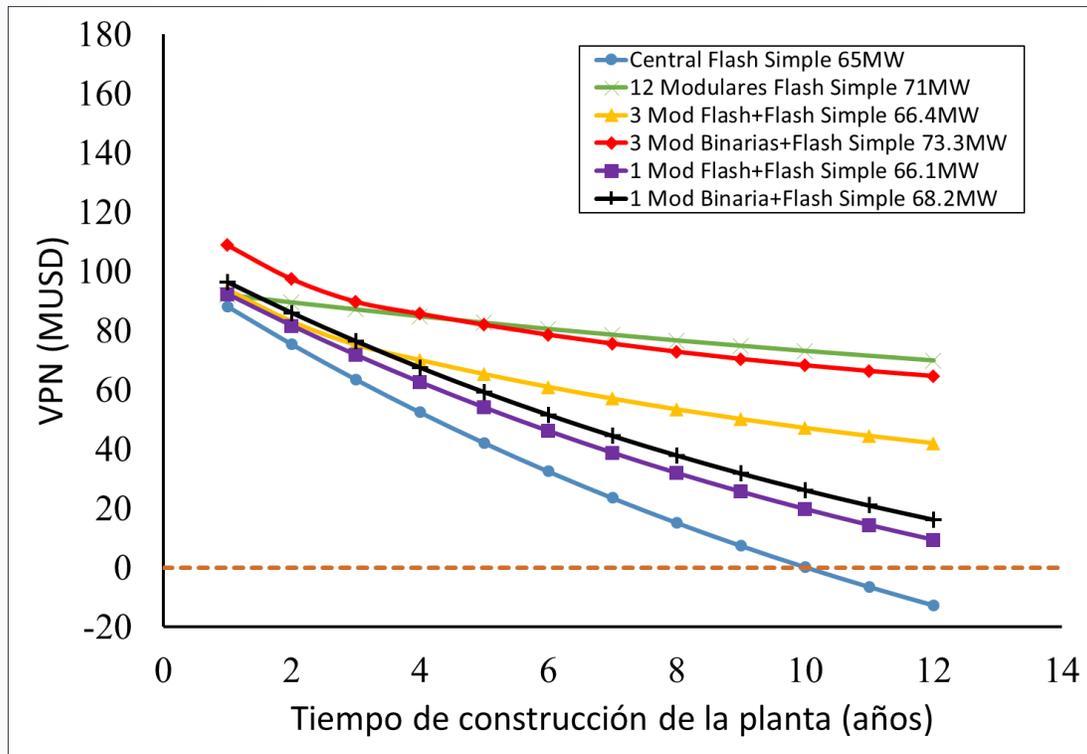


Figura 7: Comportamiento del VPN con la variación del tiempo de construcción, para los escenarios con sistemas mixtos, el sistema central con planta Flash Simple y sistema modular con plantas Flash simple con turbina de condensación.

Los resultados de la Figura 7 muestran como con la inclusión de plantas cabeza de pozo, al desarrollo del campo, se minimiza la sensibilidad que tienen los sistemas centrales al aumento en el tiempo de construcción. Por ejemplo, el escenario de planta central con 11 pozos y una planta modular, ambas Flash Simple, se mantiene viable durante todo el intervalo de tiempo mostrado en la figura ( $VPN > 0$ ), en contraste al escenario de una sola planta central Flash simple, que es inviable para tiempos de construcción mayores a 10 años.

Todos los escenarios de generación de electricidad presentados hasta aquí, parten del principio del aprovechamiento de todo el potencial geotérmico del campo. Sin embargo, para su implementación, son necesarios grandes flujos de capital (más de 150 millones de dólares), lo que los hace proyectos difíciles de financiar y apalancar. Por esta razón se planteó un escenario en donde la filosofía sea generar electricidad con la menor inversión inicial posible, pero que sea atractivo financieramente. De esta manera se escogió un proyecto en donde solo se va a instalar una planta cabeza de pozo Binaria de Alta Entalpía, siendo esta la tecnología que puede producir más electricidad a partir de uno de los pozos del campo hipotético. En la Figura 8, se presentan las principales características del escenario con una sola planta cabeza de pozo Binaria de Alta Entalpía.



Figura 8: Principales características del escenario con una sola planta Binaria de Alta Entalpía.

A partir de los valores de la Figura 8, fue realizada una proyección financiera para analizar la viabilidad del proyecto dependiendo de la variación del tiempo de construcción, pero esta vez se crearon diferentes curvas representando distintos valores de venta de electricidad. Por lo tanto, en la Figura 9, se presenta la variación de la Tasa Interna de Retorno (TIR) dependiendo del tiempo de construcción de la planta, para diferentes valores de venta de electricidad.

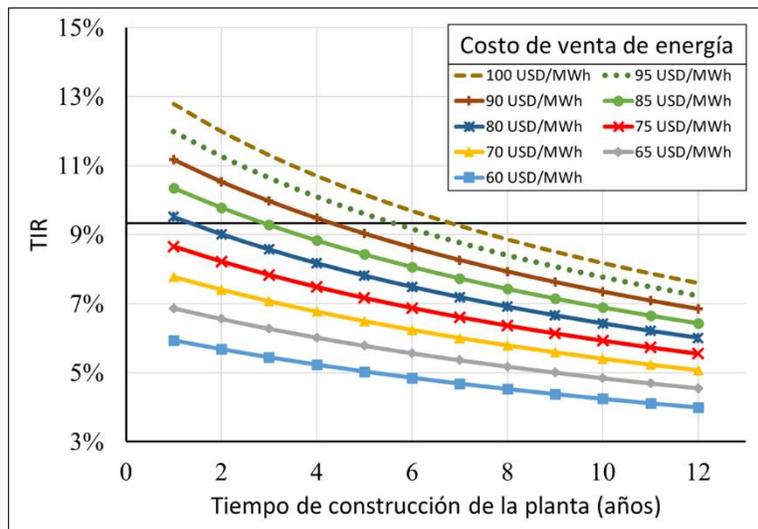


Figura 9: Proyección de la TIR dependiendo del tiempo de construcción, para la planta Binaria de Alta Entalpía..

Para analizar los datos de la Figura 9, debemos tener en cuenta que la CHEC solicita que los proyectos de inversión tengan una TIR superior a 9.33%. En este contexto, por ejemplo, si se tiene un tiempo de construcción del proyecto de 3 años, para que el escenario sea viable, es necesario firmar un contrato de venta de energía con un valor superior a 80 dólares por MWh. Cabe resaltar que, con el aumento en el tiempo de construcción, se tiene que garantizar un precio de venta mayor, para que el proyecto sea viable según el criterio de  $TIR > 9.33\%$ .

Para conocer más detalles acerca de estos escenarios de generación de electricidad, se pueden consultar los documentos:

- Características adecuadas para la planta de producción de electricidad.
- Diferentes escenarios de generación de electricidad en el proyecto geotérmico.
- Wellhead power plants, an option to enhance the “Macizo Volcánico del Ruiz” Geothermal Project.
- Flexibilidad en la generación de electricidad de los sistemas con plantas geotérmicas cabeza de pozo.
- Desarrollo del proyecto geotérmico con una sola planta cabeza de pozo.

### **Usos directos de la energía geotérmica con potencial para el proyecto geotérmico en el Macizo Volcánico del Ruiz**

Durante el desarrollo del proyecto, se realizó un reconocimiento del área de influencia directa en el Macizo Volcánico del Ruiz, para identificar las actividades productivas de la población. De esta manera se identificaron tres áreas productivas en el sector: agricultura en pequeña y mediana escala, producción de leche y turismo ecológico. Además de esto, como la agricultura y la producción de leche que se tienen en el sector, se limitan en su mayoría a la producción de materias primas, presentan grandes problemas en su comercialización por el mal estado de las vías de acceso y negociación con intermediarios.

Por lo tanto, analizando el panorama económico del área de influencia del proyecto y los usos directos de la energía geotérmica en el mundo, fueron seleccionados los siguientes usos del calor, como aquellos que tienen más potencial para mejorar las actividades productivas de la comunidad, residente en la zona donde van a ser desarrolladas las perforaciones de pozos geotérmicos.

Cabe resaltar que, para todos los diseños de sistemas de uso directo de la energía geotérmica, se tuvieron en cuenta los efectos corrosivos que puede tener el fluido geotérmico. Por esta razón, las configuraciones están basadas en que el menor número de equipos entre en contacto directo con el fluido, enfocando la posible corrosión en un intercambiador de calor principal, siendo el único que trabaja con fluido hidrotermal.

Para más detalles sobre esta información se pueden consultar los documentos:

- Actividades productivas del área de influencia del proyecto geotérmico.
- Actividades productivas con las condiciones adecuadas para el uso directo de la energía geotérmica.

### ***Deshidratador de alimentos***

Con este panorama, se seleccionó para el estudio un deshidratador de alimentos geotérmico que puede procesar parte de la producción agrícola que existe en el área y así darle un valor agregado.

Para el análisis del deshidratador de alimentos con las propiedades estimadas en el proyecto geotérmico en el Macizo Volcánico del Ruiz, se tomó el sistema de deshidratación desarrollado en el grupo de investigación de Desalación y Energías Alternas IIDEA, del instituto de ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México UNAM [13].

Con este sistema se puede deshidratar cualquier alimento o producto (frutas, vegetales, camarones, peces, carnes...), solo cambia el tiempo de secado y las temperaturas de exposición. Por ejemplo, para frutas regularmente se requieren temperaturas en la cámara de secado entre 40-60 °C y para carnes se requieren temperaturas entre 100-120 °C. Por lo tanto, para cada alimento se necesita obtener la curva de secado, para determinar el tiempo y la temperatura adecuada en la cámara. La temperatura del fluido geotérmico debe estar aproximadamente entre 20-30 °C arriba, de la temperatura cámara de secado. La energía térmica que se requiere para frutas, por ejemplo, es de un fluido geotérmico a 80 °C con un flujo másico de 0.4 ton/hora (0.12 kg/s), por cada kilogramo a deshidratar [14].

Para explicar mejor el sistema de deshidratación de alimentos, en la Figura 10 se muestra un diagrama simplificado del proceso.

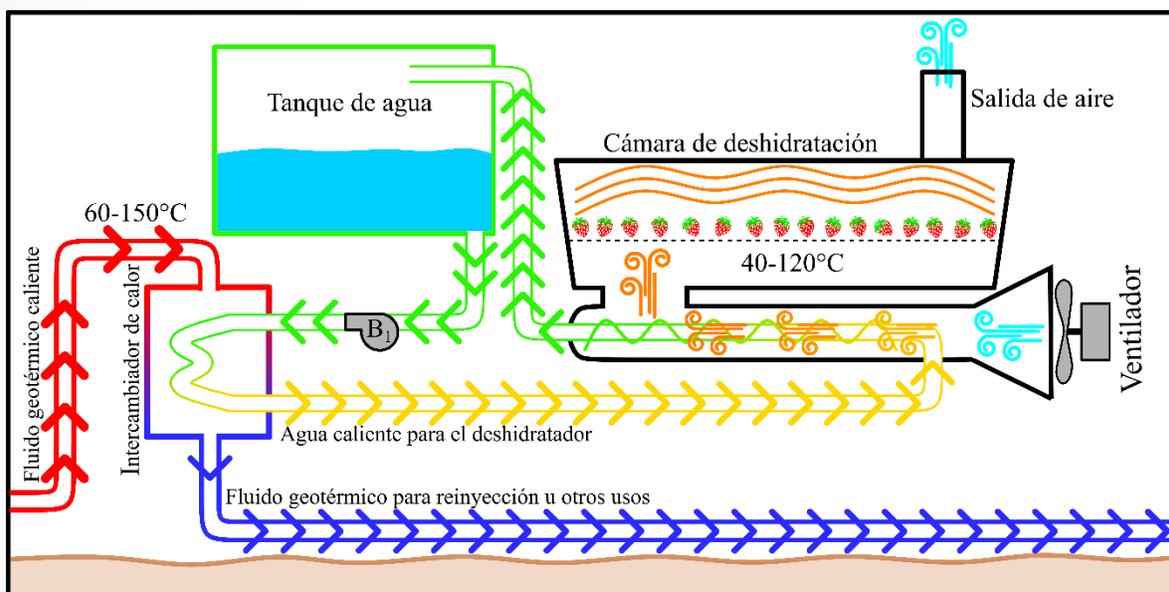


Figura 10: Sistema de deshidratación de alimentos con energía geotérmica (adaptado de [15])

Como se muestra en la Figura 10, el fluido geotérmico entra en el intercambiador de calor, en donde aumenta la temperatura del agua filtrada proveniente del tanque, que es usada como fluido de trabajo, después de esto el fluido geotérmico sale del intercambiador y va para otros procesos o para reinyección. Por su lado, después de ganar temperatura, el agua filtrada entra un intercambiador de calor que está en la cámara de deshidratación, donde por medio de un ventilador se calienta el aire que entra a la cámara, para deshidratar los alimentos que hay dentro en una rejilla. Finalmente, el agua filtrada sale de la cámara de deshidratación y entra en el tanque para cerrar el ciclo y volver entrar en el intercambiador de calor.

A partir de este sistema y las propiedades estimadas del recurso en el Macizo Volcánico del Ruiz se realizó un análisis técnico y económico de este uso directo. De esta manera se determinó la viabilidad técnica del sistema bajo diferentes escenarios y también la viabilidad financiera a través de la venta de fresas deshidratadas. Por lo tanto, una vez evaluado el modelo financiero se encontró que el proyecto genera una TIR (Tasa Interna de Retorno) del 27.92%, superior al 9.99% de costo de capital y la inversión se recuperaría en 3 años y 2 meses. Para más información, se pueden consultar los documentos:

- Propuesta de deshidratación de alimentos en el proyecto geotérmico Macizo Volcánico del Ruiz, Valle de Nereidas.
- Estudio de aprovechamiento del calor geotérmico residual para la deshidratación de alimentos dentro del proyecto Macizo Volcánico Nevado del Ruiz CHEC-grupo EPM.
- Estudio para el aprovechamiento en cascada de la energía geotérmica en el Macizo Volcánico del Ruiz.

### ***Pasteurización de lácteos***

Fue seleccionada la pasteurización de lácteos con energía geotérmica porque, por ejemplo, las dos haciendas que comprenden las zonas con potencial para ser perforadas, se dedican a la ganadería extensiva netamente lechera. Sin embargo, no realizan ningún proceso con la leche y simplemente la venden como materia prima. Por esta razón, una planta pasteurizadora le daría un valor agregado a la leche, se le podría vender directamente a los consumidores, se disminuirían costos de transporte y se eliminan intermediarios en el proceso.

De esta manera, se analizó la posibilidad que existe para que con energía geotérmica se alimenten procesos de pasteurización y de ultra pasteurización, en el proyecto del Macizo Volcánico del Ruiz. En el proceso de pasteurización se toma la leche que se encuentra a aproximadamente 4°C y se lleva a una temperatura en torno de los 74°C, manteniéndola en esta temperatura durante un intervalo que va de 10 a 20 segundos. Después de este tiempo la leche se enfría a 3°C para proceder a su embalaje. Esta leche dentro del empaque puede tener una vida entorno de los 10 días, pero debe mantenerse refrigerada todo el tiempo [16].

Para el proceso de ultra pasteurización se toma la leche que se encuentra a aproximadamente 4°C y se lleva a una temperatura en torno de los 138°C, manteniéndola en esta temperatura por un tiempo que ronda los 3 segundos. Después de este tiempo la leche se enfría a 4°C para proceder a su embalaje. Esta leche ultra pasteurizada puede tener una vida entorno de los 90 días, a temperatura ambiente y en el envase sin abrir [16]. En la Figura 11 se presentan las temperaturas del proceso de pasteurización y de ultra pasteurización.

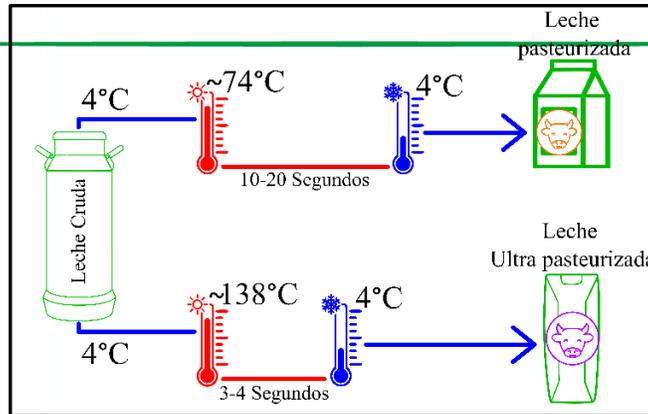


Figura 11: Procesos de calentamiento para la pasteurización y la ultra pasteurización (elaborado a partir de los datos de [16]).

Continuando con esta idea, en la industria ya han sido implementados sistemas de pasteurización geotérmica, como el que presenta Lund en su artículo de 1997 [17]. En la Figura 12 se presenta una adaptación con el diagrama de este sistema.

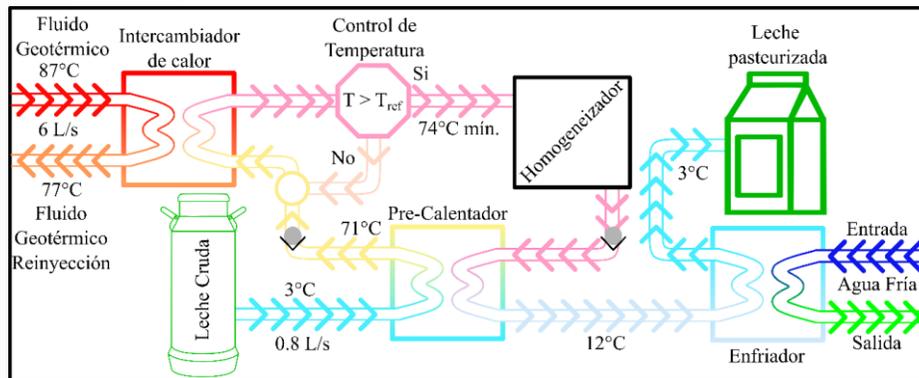


Figura 12: Sistema simplificado de pasteurización con energía geotérmica (adaptado de [17]).

Como muestra la Figura 12, el fluido geotérmico alimenta el intercambiador de calor principal, en donde se finaliza el calentamiento de la leche a la temperatura requerida para pasteurización. A continuación, el fluido geotérmico se envía a reinyección o a otros aprovechamientos. A su vez, para garantizar que la leche que sale del intercambiador de calor principal llegue a la temperatura necesaria para pasteurización, se usa un sistema de control en donde, si la leche no está a la temperatura deseada, esta se hace pasar de nuevo por el circuito del intercambiador de calor principal. En el momento que la leche llega a la temperatura deseada, se envía a un tanque de homogeneización, en donde la temperatura de la leche se estabiliza.

Después de esto, la leche sale del homogeneizador y pasa por un pre-calentador en donde transfiere calor con la leche cruda que apenas está entrando al circuito de pasteurización. De esta manera el pre-calentador tiene dos funciones; comenzar el calentamiento de la leche cruda, recuperando un poco de energía, e iniciar el enfriamiento de la leche que ya fue llevada a la temperatura máxima de pasteurización.

Después de que la leche pasa por la primera etapa de enfriamiento en el pre-calentador, entra al enfriador que usa un recurso de agua secundario, para llevarla a la temperatura mínima deseada. Finalmente, la leche es embazada y enviada para consumo final. Cabe resaltar que la leche cruda que entra al circuito por primera vez y pasa por el pre-calentador, entra en el intercambiador de calor principal y hace el ciclo antes descrito [17].

Durante la investigación, tanto el proceso de pasteurización como el de ultra pasteurización fueron analizados y se determinó su viabilidad técnica bajo diferentes escenarios, dependiendo del sistema de generación de electricidad que se utilice, ya que este condiciona la cantidad de energía térmica disponible.

Para mayor información sobre este análisis se puede consultar el documento:

- Estudio para el aprovechamiento en cascada de la energía geotérmica en el Macizo Volcánico del Ruiz

### ***Sistema de calefacción geotérmico***

En el área existe una iniciativa turística llamada la Ruta del Cóndor, que tiene como objetivo incentivar el turismo ecológico y la integración de la población en estos procesos. Esto hace que la región tenga un alto flujo de turistas que usan servicios de hospedaje en el sector. Por esta razón, estos hoteles pueden hacer uso de servicios alimentados con energía geotérmica como: calefacción de espacios, agua caliente sanitaria, lavado de ropa, balneología, entre otros. De esta manera, se estudió un sistema de calefacción con energía geotérmica, para ser usado en un Eco-hotel y también en una casa familiar. En la Figura 13 se muestra un diagrama simplificado de cómo funciona un sistema de calefacción geotérmico.

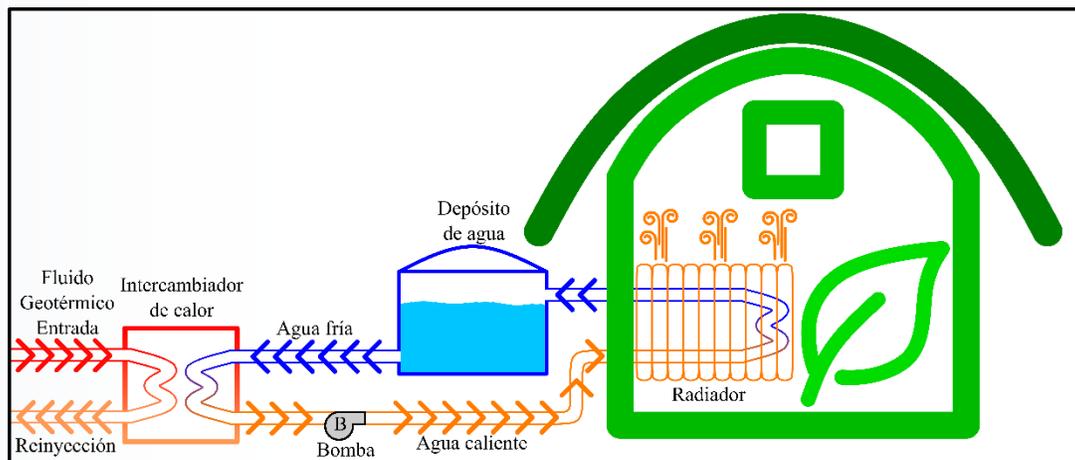


Figura 13: Sistema de calefacción geotérmico simplificado.

Como se presenta en la Figura 13, en el sistema de calefacción que se estudió para el proyecto en el Macizo Volcánico de Ruiz, se extrae la energía del fluido geotérmico por medio de un intercambiador de calor, para calentar un líquido de trabajo que en este caso es agua filtrada.

Este líquido de trabajo sale de un tanque, pasa por el intercambiador donde aumenta su temperatura, luego una bomba lo lleva al radiador dentro del recinto, para calentar el ambiente y luego vuelve al tanque, cerrando el ciclo. De esta manera, se realizaron los cálculos termodinámicos para dimensionar un sistema de este tipo, en un Eco-Hotel y en una vivienda familiar que estarían ubicados en la zona de influencia del proyecto. A partir de un estudio socioeconómico en el área, se proyectó un Eco-Hotel con 22 habitaciones, lavandería, spa y restaurante. Con las dimensiones de la estructura y teniendo en cuenta que la temperatura en el área de influencia está entre 3.1 y 12.4°C, fueron realizados los cálculos termodinámicos para dimensionar los radiadores necesarios para la calefacción dentro del Eco-Hotel. En la Tabla 4 se muestran los radiadores que fueron escogidos para cada espacio, su capacidad y cantidad de unidades. Cabe resaltar que las potencias de los radiadores son de unidades comerciales y están por encima de la potencia requerida que se obtuvo en los cálculos.

Tabla 4: Radiadores que fueron seleccionados para la calefacción del Eco-Hotel.

Tipo de espacio	Unidades por tipo de espacio	Potencia del radiador (W)				Total de radiadores por tipo de espacio
		1139	1483	1929	2752	
14 habitaciones Sencillas y dobles	1		X			14
8 habitaciones Familiares	1				X	8
Lavandería	2			X	X	2
Spa	2				X	2
Recepción	2		X		X	2
Restaurante	2			X	X	2

Además de esto, teniendo en cuenta las pérdidas en tuberías y demás accesorios, se determinó que es necesario un intercambiador de calor de 99.8 kW y una bomba de circulación centrífuga de 0.75 MW. Por otro lado, también se calcularon los requerimientos de equipos para la calefacción geotérmica de una casa con 3 habitaciones, sala-comedor, cocina y 2 baños. En la Tabla 5 se muestran los radiadores que fueron escogidos para cada espacio, su capacidad y cantidad de unidades.

Tabla 5: Sistema de radiadores seleccionados para la calefacción de la casa familiar.

Tipo de espacio	Unidades por tipo de espacio	Potencia del radiador (W)				Total de radiadores por área
		1139	1483	1929	2752	
Habitación principal	1				X	1
Habitación 1	1		X			1
Sala comedor	1				X	1
Habitación 2	1		X			1
2 Baños	2	X				4
Cocina	1				X	1
Patio de ropa	2		X	X		2

Junto con esto, teniendo en cuenta las pérdidas en tuberías y demás accesorios, se determinó que es necesario un intercambiador de calor de 22.2 kW y una bomba de circulación centrífuga de 0.55 MW.

Estos sistemas fueron evaluados desde el punto de vista técnico, teniendo en cuenta diferentes escenarios de recurso geotérmico disponible, variando temperatura y caudal, y en todos ellos la instalación del sistema es viable. Por ejemplo, se tiene un rango de temperaturas en todos los escenarios que va de 80 a 158°C, lo cual supliría los requerimientos del sistema sin problemas, considerando también que el caudal requerido sumado para los dos sistemas es de más o menos 0.5 Kg/s y se tiene un caudal disponible muy por encima de eso, superior a 40Kg/s en todos los escenarios

A partir de estos escenarios de calefacción, se realizó una proyección financiera para determinar en cuanto tiempo se pagaría el costo total del proyecto, teniendo en cuenta el ahorro en costo de energía, comparando la energía geotérmica con electricidad y gas domiciliario. Por un lado, se estima que se podría entregar fluido geotérmico con un costo de 200 COP por KW/h, teniendo en cuenta la manutención de los ductos. Por otro lado, en la región la electricidad tiene un costo de 600 COP por KW/h y el gas domiciliario de 294 COP por Kw/h.

Este análisis mostró como solo con el ahorro que se obtiene al usar energía geotérmica por encima de la electricidad y el gas, el sistema se pagaría después de un tiempo, a tal punto de tener un excedente de dinero ahorrado. De esta manera para el caso del Eco-Hotel, en todos los escenarios se recuperaría la inversión realizada en menos de 2 años. Para el caso de la vivienda familiar, también en la mayoría de escenarios se recuperaría la inversión en menos de 2 años, solo en un escenario de uso moderado de la calefacción geotérmica en la casa, comparado con el uso de gas, se tendría un tiempo de recuperación de la inversión mayor a 2 años (demoraría 5 años).

De esta manera, los sistemas de calefacción geotérmicos se presentan como una alternativa viable técnica y económicamente para ser aplicada en el sector de influencia directa del proyecto.

Para mayor información, por favor consultar los siguientes documentos:

- Análisis técnico de sistemas de calefacción geotérmica.
- Análisis financiero de sistemas de calefacción geotérmica.
- Estudio para el aprovechamiento en cascada de la energía geotérmica en el Macizo Volcánico del Ruiz.

### ***Sistema acuapónico con calefacción geotérmica***

En la acuaponía se realiza una sinergia entre las técnicas piscícolas (cultivo de peces) y las técnicas de hidroponía (cultivos sin suelo), buscando el aprovechamiento integral de los recursos. En este sentido, el control de las temperaturas en el cultivo de especies acuáticas es de mayor importancia, respecto de las especies terrestres.

Manteniendo artificialmente una temperatura óptima es posible cultivar más especies exóticas, mejorar la producción e incluso, en algunos casos, duplicar el ciclo reproductivo. Con esto en mente y teniendo en cuenta que en el área de influencia directa del proyecto se cultivan peces como la tilapia, se estudió un sistema geotérmico de calefacción para un estanque de acuicultura semi-intensivo, dentro de un sistema acuapónico.

Con esto y las condiciones climáticas de la zona de influencia directa se puede dimensionar el sistema de calefacción geotérmico para el estanque de peces. En la Figura 14 se presenta un diagrama del proceso acuapónico, teniendo en cuenta el filtro, la bomba, el intercambiador de calor, el cultivo hidropónico y demás elementos necesarios para el cultivo de peces.

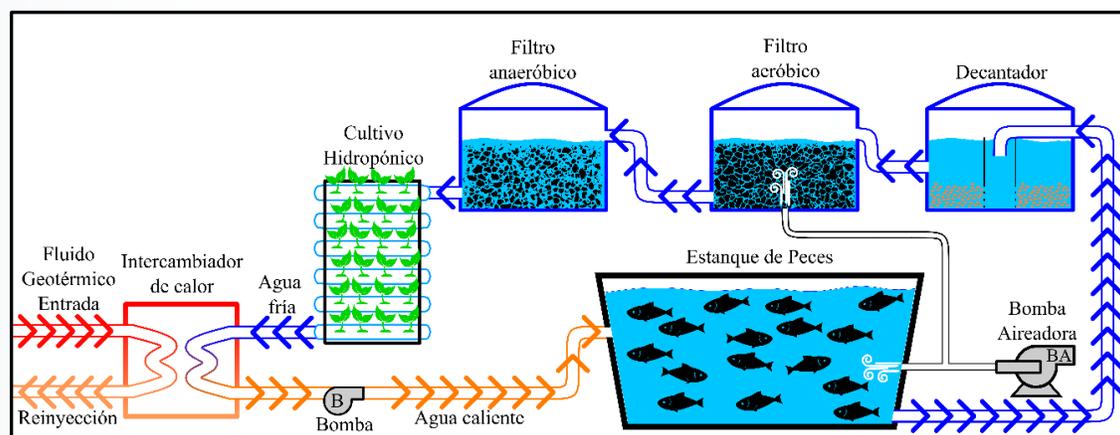


Figura 14: Sistema acuícola semi-intensivo con calefacción geotérmica y cultivo hidropónico (Sistema acuapónico).

Como se muestra en la Figura 11, el fluido geotérmico alimenta un intercambiador de calor que se usa para aumentar la temperatura del agua que entra al estanque de los peces. Después de salir del intercambiador de calor, el fluido geotérmico se envía para reinyección. Por otro lado, del estanque de peces sale el agua para pasar por un proceso de filtrado, compuesto por tres etapas; decantador para eliminar el material articulado, filtro aeróbico y filtro anaeróbico. Continuando con el proceso, el agua filtrada pasa por un cultivo hidropónico en donde las plantas aprovechan los altos niveles de nitritos del agua, generando otro producto para aportar ingresos económicos al sistema. Finalmente, el agua que sale del cultivo hidropónico entra al intercambiador de calor cerrando el ciclo.

De esta manera fue proyectado un sistema de producción de tilapias y hortalizas con calefacción geotérmica dentro del proyecto del Macizo Volcánico del Ruiz. El centro del sistema es un estanque de peces de 32 m<sup>3</sup>, que según las proyecciones y teniendo en cuenta tasas de mortalidad, va a tener una cosecha de aproximadamente 1103 peces cada 6 meses, con un peso sumado de todos los peses de alrededor de 640 Kg.

Ahora para mantener una temperatura del agua del estanque en torno de los 27 °C y teniendo en cuenta las condiciones del área de influencia directa del proyecto, es necesario el uso de un intercambiador de calor de 43kW de potencia, para calentar un flujo de masa constante de agua de 4.6x10<sup>-4</sup>m<sup>3</sup>/s. Además de esto, con esta biomasa de peces, se estima que se pueden producir cerca de 534 hortalizas cada 6 meses, teniendo en cuenta que la producción de

plantas aumenta, conforme los peces van creciendo, obteniendo cosechas de hortalizas cada 45 días. De la misma manera fueron seleccionados los demás elementos que conforman el sistema; tuberías, accesorios, filtros, bomba, estructura de cultivo de hortalizas, cubierta del sistema...

Con el diseño finalizado, se buscaron diferentes proveedores para estimar el costo total de la inversión necesaria para la construcción del sistema. Además de esto, se realizó una proyección financiera teniendo en cuenta la venta de peces y de hortalizas.

Por lo tanto, estableciendo los costos de construcción y funcionamiento del sistema, se realizó una proyección financiera a 6 años con dos escenarios; uno que incluye solo la venta de peces y otro que incluye la venta de peces y hortalizas, junto con el costo de la estructura para cultivo hidropónico, respectivamente. En la Tabla 6 se presentan los costos de la inversión y los resultados de la proyección financiera.

Tabla 6: Proyección financiera del sistema de producción de peces y hortalizas (elaborado por el practicante Ricardo José Hernández Rolón).

Producción de Peces		Producción de peces y hortalizas		
Periodo Años	6	Producto	Tilapia	Lechuga
Tasa de oportunidad	14%	Periodos (Años)	6	
Costo de inversión	\$ 16.611.227	Tasa de oportunidad	14%	
Costo de producción	\$ 13.371	Costo de inversión	\$ 16.611.227	\$ 2.360.873
Costo de venta	\$ 16.046	Costo de producción	\$ 13.371	\$ 89,30
Margen de utilidad	20%	Costo de venta	\$ 16.046	\$ 2.890
Ingresos anuales	\$ 5.899.482	Margen de utilidad	20%	3137%
		Ingresos Anual	\$ 5.899.482	\$ 2.674.495
VPN	\$ 3.642.171	VPN	\$ 14.369.248	
TIR	23%	TIR	39%	
Recuperación PB (Años)	2,8	Recuperación PB (Años)	2,2	
Recuperación DPB (Años)	3,8	Recuperación DPB (Años)	2,8	

Como se muestra en la Tabla 6 los dos escenarios son viables, si se establece como Tasa de Oportunidad 14% y teniendo en cuenta que la TIR con solo peces es 23% y con peces y lechugas es 39%. Un aspecto interesante del sistema de producción de peces es que la demanda de energía es baja, con una temperatura requerida en el estanque de 27°C. De esta manera, este sistema puede ser alimentado al final de la cadena de suministro, ya que se requieren temperaturas de fluido geotérmico que estén por encima de los 50°C, por lo que en todos los escenarios que fueron estudiados se encontró que el sistema es técnicamente viable.

Para mayor información sobre estos resultados, se pueden consultar los documentos:

- Análisis técnico del sistema acuapónico con calefacción geotérmica.
- Análisis financiero del sistema acuapónico con calefacción geotérmica.
- Estudio para el aprovechamiento en cascada de la energía geotérmica en el Macizo Volcánico del Ruiz.

## Análisis adicionales

Ya con todos estos escenarios de generación de electricidad y usos directos de la geotermia establecidos, se realizaron diferentes análisis sobre estudios comparativos de la energía geotérmica con otras fuentes, acerca de la flexibilidad de la generación modular, la configuración de los desarrollos en cascada y el panorama de financiación para el proyecto geotérmico.

### *Flexibilidad en la generación de electricidad de los sistemas con plantas geotérmicas cabeza de pozo*

Dentro de este estudio se plantearon varios escenarios de electrificación, entre ellos un escenario en el cual se tienen dos fuentes de generación para alimentar la red; geotermia con plantas cabeza de pozo Flash simple con turbina de condensación en el Macizo Volcánico del Ruiz (Tabla 2) y generación solar en EL Paso, Cesar [18, 19]. En este sentido la energía solar solo produce durante el día con un pico bastante pronunciado. Con el objetivo de entregar un suministro casi constante a la red, sin picos ni valles bruscos, se aprovecha la modularidad del sistema geotérmico, para suavizar las variaciones de la energía solar. Esto es posible porque la generación Geotérmica se realiza a partir de 12 plantas independientes cabeza de pozo, que se pueden apagar o prender sin afectarse entre ellas. En la Figura 15 se muestran las curvas de generación solar y geotérmica con 12 plantas Flash simple con turbina de condensación. Este sistema geotérmico tiene una capacidad instalada de 71 MW y una capacidad de generación de 435-621 GWh/año.

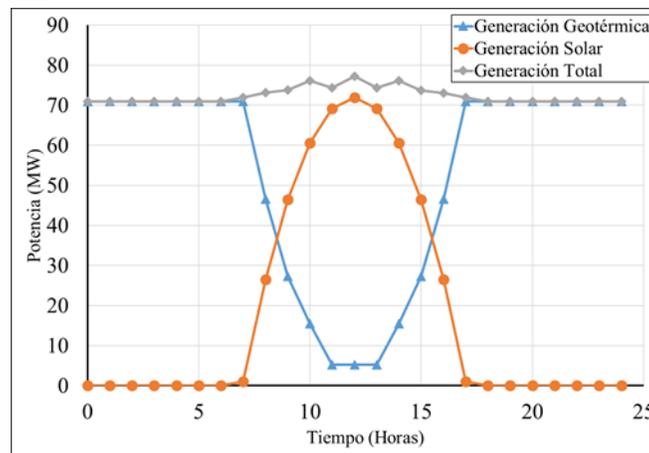


Figura 15: Generación solar sumada con generación geotérmica, para suavizar la curva total.

Como se muestra en la Figura 15, el sistema de generación geotérmica con 12 plantas FSTC se mantiene en funcionamiento total desde las 0:00h hasta las 7:00h, donde se comienzan a apagar algunas de las plantas cabeza de pozo, para mantener una generación total casi constante, lo inverso se hace al final de la tarde. En este escenario se tendrían al final del día; 483MWh/día de generación solar, 1259MWh/día de generación geotérmica y 1742MWh/día de generación total.

Este análisis mostró como el sistema geotérmico con 12 plantas Flash simple con turbina de condensación logra suavizar satisfactoriamente el pico de generación solar, solucionando el problema que se genera en la red con el aumento en la generación a partir de esta fuente, siendo esta una situación que está pasando actualmente en Colombia [18-19].

Se realizó un ejercicio similar a partir de la generación hidráulica de electricidad que actualmente tiene la empresa CHEC. En total el sistema de generación CHEC tiene una capacidad instalada de 256.1MW, con una generación que oscila entre 58-61 GWh/mes. Con el objetivo de entregar un suministro casi constante a la red, sin picos ni valles bruscos, se aprovecha la modularidad del sistema geotérmico, para suavizar las variaciones de la generación hidráulica de la empresa CHEC. Esto es posible porque la generación Geotérmica se realiza a partir de 12 plantas independientes cabeza de pozo, que se pueden apagar o prender sin afectarse entre ellas. Primero en la Figura 7 se muestran las curvas de generación hidráulica CHEC y geotérmica con 12 plantas Flash simple con turbina de condensación, para el promedio de junio y noviembre respectivamente. Este sistema geotérmico tiene una capacidad instalada de 71 MW y una capacidad de generación de 435-621 GWh/año.

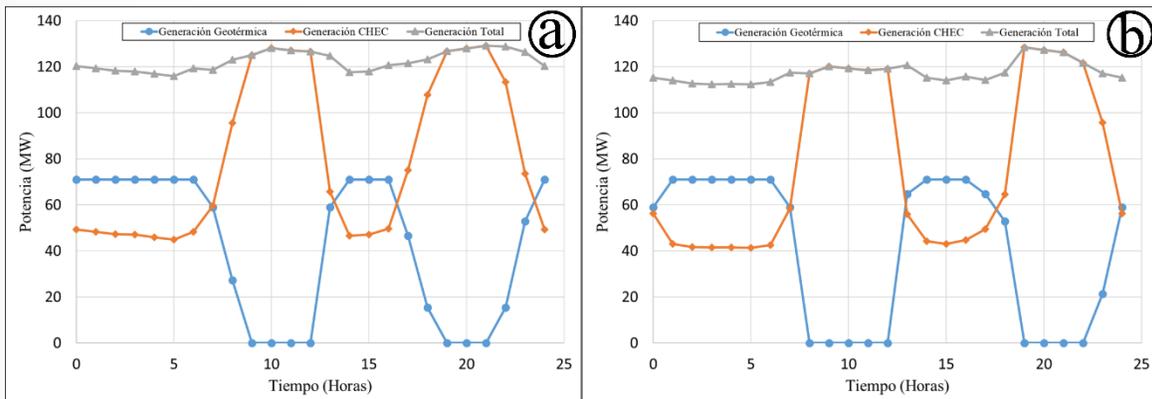


Figura 16: Generación CHEC promedio (a) junio y (b) noviembre, sumada con generación geotérmica, para suavizar la curva total, usando el sistema de plantas cabeza de pozo Flash simple.

Los datos de la Figura 16 muestran como el sistema de generación geotérmica con 12 plantas Flash simple con turbina de condensación, logra estabilizar el total de generación hidráulica CHEC, en los meses de junio y noviembre, entregando a la red un total casi constante de 120MWh. Totalizando los valores para junio tenemos (Figura 16a): Generación CHEC hidráulica promedio 1956 MWh/día, generación geotérmica 985 MWh/día, generación total 2941 MWh/día. Para noviembre se tienen unos totales de (Figura 16b): Generación CHEC hidráulica promedio 1862 MWh/día, generación geotérmica 960 MWh/día, generación total 2822 MWh/día.

Este estudio mostró como la generación geotérmica es una herramienta que le brinda robustez al sistema interconectado corrigiendo picos y valles en la generación a partir de otras fuentes. Además de estos escenarios, fueron estudiados otros y se pueden consultar en el documento: “Flexibilidad en la generación de electricidad de los sistemas con plantas geotérmicas cabeza de pozo”.

### Desarrollo del proyecto geotérmico con una sola planta cabeza de pozo

Hasta ahora se han analizado escenarios de generación de electricidad, a partir de energía geotérmica en el Macizo Volcánico del Ruiz, en los que se busca aprovechar la mayor cantidad de energía disponible en el yacimiento hidrotermal. De esta manera, se han estudiado plantas con capacidad instalada por encima de los 25MW [7]. Estos escenarios a pesar de ser financieramente viables, requieren de una inversión de capital inicial que iguale o excede los activos de la empresa CHEC, por lo que dificultan la financiación del proyecto. Por esta razón, se planteó un escenario de desarrollo geotérmico, en el cual se reduzca el capital inicial necesario para su desarrollo, por medio de la instalación de una planta cabeza de pozo que aproveche la energía de un solo pozo. De esta manera se escogió un proyecto en donde solo se va a instalar una planta cabeza de pozo Binaria de Alta Entalpía, siendo esta la tecnología que puede producir más electricidad a partir de uno de los pozos del campo hipotético. Para contextualizar lo que significa el desarrollo de este proyecto, se realizó una comparación con un proyecto solar fotovoltaico en Colombia.

En 2019 en El Paso Cesar, fue inaugurado un parque solar fotovoltaico con una capacidad instalada de 86.2 MW. Según los datos entregados por Enel Green Power la empresa dueña del parque solar, este sistema puede llegar a producir 176 GWh/año, bajo condiciones ideales y tiene un compromiso de energía firme de 87.6 GWh/año [18, 19]. Con esto en mente, la Figura 17 muestra una comparación entre el Parque Solar y la planta Binaria de Alta Entalpía de 7MW en términos de costo y energía generada.

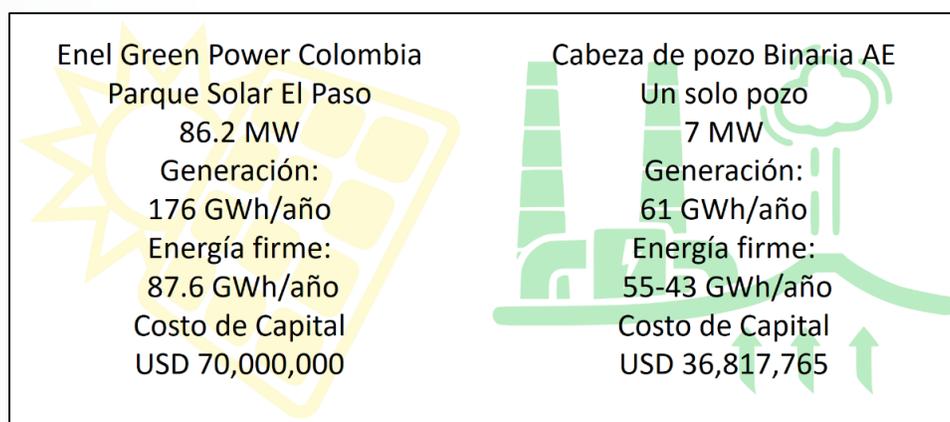


Figura 17: Comparación Solar vs. Geotermia: Parque solar de El Paso, Cesar [18, 19]. Proyecto geotérmico en el Macizo Volcánico del Ruiz, planta Binaria de Alta Entalpía de 7MW.

Realizando esta comparación varios valores que se presentan en la Figura 17 se muestran relevantes. Primero, los factores de capacidad de cada energía, dejan ver como con 7MW instalados de energía geotérmica se puede llegar a producir 55 GWh/año de energía firme, más de la mitad de la energía firme producida por los 86.5 MW instalados de paneles solares en El Paso Cesar. De esta manera en una comparación simple también se puede decir que, con un poco más de la mitad de la inversión que se hizo en el parque solar, se produce más de la mitad de la energía firme que este tiene, todo esto a partir de la geotermia, sin olvidar que la producción de electricidad a partir de energía geotérmica es casi constante, 24 horas al día 7 días a la semana.

Las comparaciones y el análisis realizados en este estudio, muestran como este escenario con una sola planta cabeza de pozo Binaria de alta entalpía es viable técnica y económicamente, siempre y cuando se garantice un valor de venta de la energía favorable, en relación al tiempo de construcción de la planta, como se mostró en la Figura 9. Para conocer más detalles de este estudio, se puede consultar el documento: “Desarrollo del proyecto geotérmico con una sola planta cabeza de pozo”.

### ***Beneficios tributarios y sistemas financieros de apoyo para el proyecto geotérmico***

Analizando el panorama del proyecto geotérmico en el Macizo Volcánico del Ruiz, se realizó un estudio explorando diferentes herramientas financieras y de beneficios tributarios para potenciar el desarrollo de esta iniciativa.

Una de las herramientas más importantes es una subvención para transferencia de los riesgos de perforación, que ofrece el Banco Interamericano de Desarrollo (BID). En este sentido, se debe tener en cuenta que las perforaciones profundas se enmarcan dentro de factores de éxito que están entre el 60 y el 78%, lo que quiere decir por ejemplo que, de cada 10 pozos, entre 2 y 4 pueden no ser viables para producción de electricidad, por los métodos tradicionales [19].

Por esta razón, el BID junto con el Banco de Desarrollo Empresarial de Colombia (Bancoldex) y a partir de recursos del Clean Technology Fund, crearon un programa de subvención para transferencia del riesgo en las labores de perforación exploratoria profunda, de un proyecto geotérmico [20, 21].

Con un monto de 9,3 millones de dólares, la subvención funciona más o menos de la siguiente manera: el desarrollador presenta ante Bancoldex el plan de perforación exploratoria profunda, el cual se estudia para determinar si es apto para recibir la subvención. Ya con la subvención otorgada, el desarrollador puede perforar los pozos, que serán probados para determinar si son exitosos. En este punto si el diagnóstico muestra que no están dentro de los parámetros de viabilidad determinados por el BID, Bancoldex cubrirá los costos de los pozos fallidos entregando estos recursos al desarrollador, teniendo como límite 9,3 millones de dólares.

Actualmente se está estudiando una modificación a este sistema, en donde, un Banco que puede ser Bancoldex, presta el dinero para la perforación de los pozos geotérmicos y si alguno de los primeros pozos de diámetro comercial falla y no llega al reservatorio geotérmico, la subvención pagará la deuda adquirida, hasta agotar el monto total del programa (9.3 MUSD) [20]. De esta manera, si uno de los pozos falla los costos de este serán pagados por la subvención, sin afectar las finanzas del proyecto (ver Figura 18).

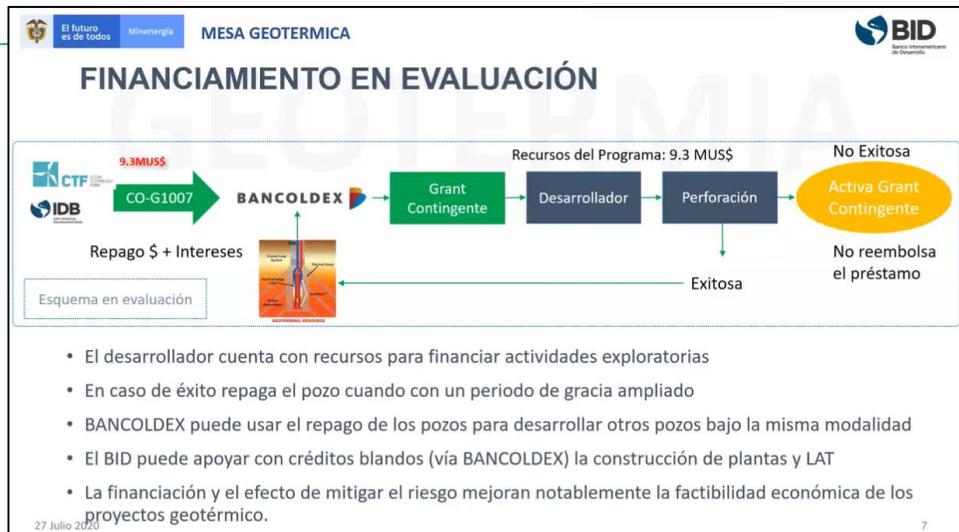


Figura 18: Funcionamiento del programa CO-G1007, presentación realizada por el funcionario del BID Gaston Siroit: Recomendaciones para la Mesa Geotérmica, apoyo del BID y esquemas de financiamiento con Bancoldex (Fuente [20]).

Este es solo uno de los caminos para potenciar el desarrollo del proyecto geotérmico, para conocer un poco más sobre este tema se puede consultar el documento: “Beneficios tributarios y sistemas financieros de apoyo para el proyecto geotérmico”.

### ***Estudio para el aprovechamiento en cascada de la energía geotérmica en el Macizo Volcánico del Ruiz***

Con el enfoque de desarrollo en cascada, dependiendo de la cantidad energía que no es aprovechada para generación de electricidad, se determina la capacidad de los usos directos que componen la cadena. En este sentido, los ciclos termodinámicos que dejan una mayor cantidad de energía libre son: Flash simple con turbina de contra presión y Flash simple con turbina de condensación (Figura 5 y Tabla 2). Esto pasa porque solo la fracción del fluido geotérmico en fase vapor es aprovechada para generación de electricidad. De esta manera toda la porción del fluido que está en fase líquida a la salida del separador puede ser aprovechada en los usos directos. Entonces, a partir de las propiedades estimadas en el Macizo Volcánico del Ruiz, se cree que a la salida del separador en las plantas Flash simple se tendría un fluido geotérmico en fase líquida, con una temperatura aproximada de 158 °C y un flujo de masa en torno de los 46 Kg/s.

Con esto en mente, al analizar el sistema de deshidratación de alimentos, que fue explicado anteriormente, junto con estos valores de temperatura y caudal, se puede asegurar que el deshidratador tendría la capacidad de procesar desde frutas y verduras, hasta productos cárnicos, siendo estos últimos los que requieren la temperatura de fluido geotérmico más alta (de 120 a 150°C).

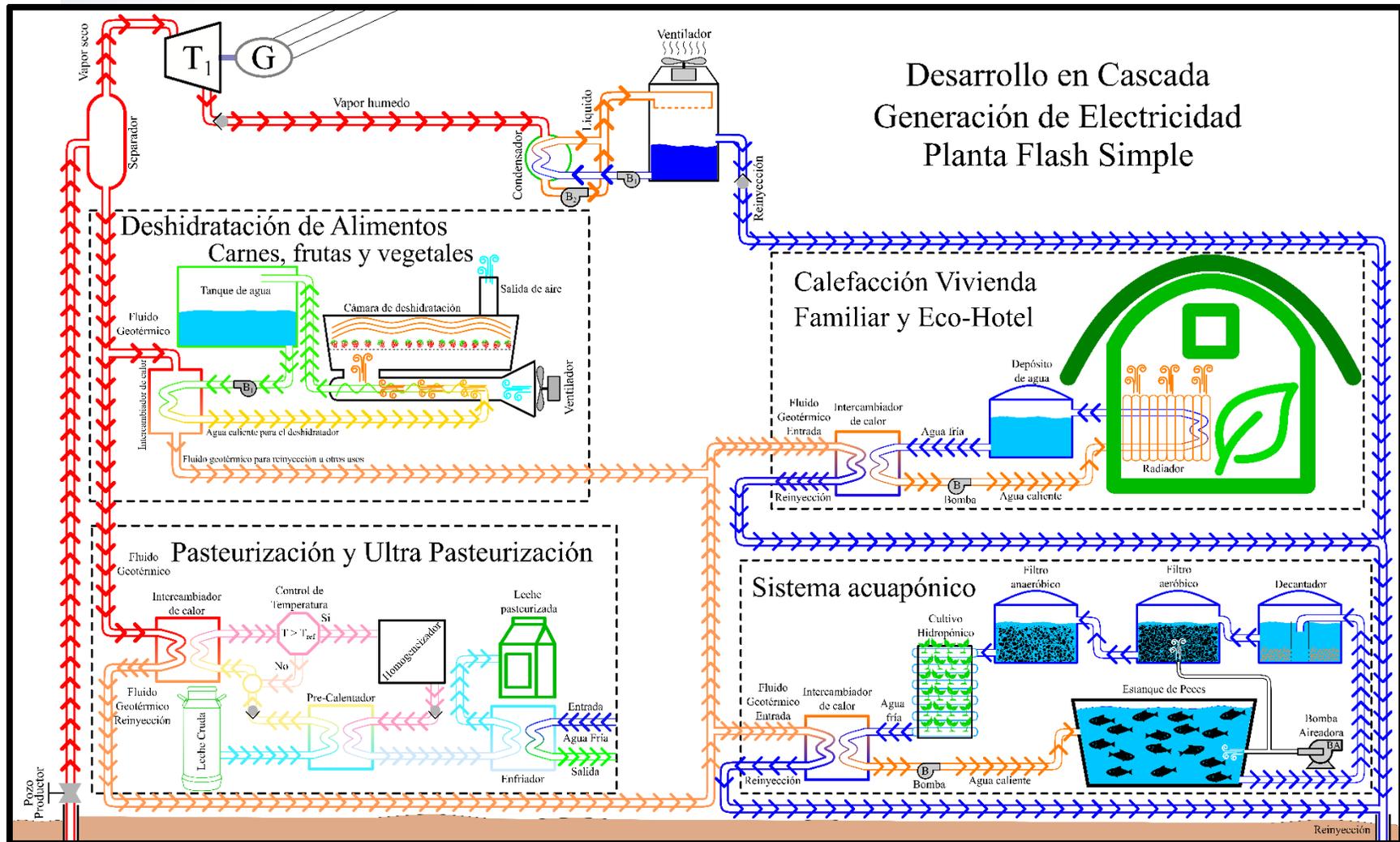


Figura 19: Desarrollo en cascada propuesto para el proyecto geotérmico en el Macizo Volcánico del Ruiz a partir de una planta Flash simple con turbina de condensación.

De igual manera al analizar el sistema de pasteurización, con estas propiedades de fluido geotérmico (158 °C) se podrían implementar procesos de pasteurización y ultra pasteurización, ya que, si se tiene en cuenta que este último presenta la mayor demanda energética, siendo necesario llevar la leche a 138°C, se tendría una diferencia de temperatura entre el fluido geotérmico y la leche de aproximadamente 20°C. De esta manera al realizar el estudio termodinámico se descubrió que la eficiencia del intercambiador de calor permite que el fluido geotérmico a 158 °C caliente la leche hasta llegar a los 138°C.

Continuando con los sistemas, en un nivel más abajo estaría el sistema de calefacción domiciliar que, con estas características de fluido geotérmico, sería fácilmente satisfecho, ya que, según los cálculos termodinámicos, puede llegar a trabajar con una temperatura mínima de fluido geotérmico cercana a los 90°C. Al final del sistema en cascada está el proceso de acuaponía, que tiene la menor demanda de energía, ya que la temperatura requerida en el estanque sería solo de alrededor de 27°C.

Finalmente, teniendo en cuenta que se estima un flujo de masa geotérmico de aproximadamente 46 Kg/s, todos los usos directos podrían llegar a ser alimentados en paralelo a partir del mismo ducto, ya que los flujos de masa requeridos en paralelo por uso directo son: deshidratador de alimentos 20 Kg/s, sistema de pasteurización 6 Kg/s, sistemas de calefacción 0.5 kg/s y sistema acuapónico 0.1 Kg/s, dando un flujo de masa requerido de 27.5 Kg/s, menor que la estimación de recurso disponible. Además de esto, sería posible también conectar los sistemas en serie, con tres niveles de aprovechamiento y generación eléctrica Flash simple, como se muestra en la Figura 19, ordenando los sistemas de mayor demanda energética hacia abajo.

Como este fueron analizados diferentes escenarios de desarrollo en cascada, que se pueden consultar en el documento: “Estudio para el aprovechamiento en cascada de la energía geotérmica en el Macizo Volcánico del Ruiz”

### ***Objetivos de desarrollo sostenible ODS***

El 25 de septiembre de 2015, los líderes mundiales adoptaron un conjunto de objetivos globales para erradicar la pobreza, proteger el planeta y asegurar la prosperidad para todos, como parte de una nueva agenda de desarrollo sostenible, durante una cumbre de las Naciones Unidas [22]. De esta manera, los resultados de esta investigación están enmarcados en algunos de estos Objetivos de desarrollo sostenible (ODS).

Principalmente, este proyecto busca asegurar el suministro de energía en el país con la apropiación de procesos y tecnologías de bajo impacto ambiental, a través de la geotermia, apuntando al Objetivo 7 de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, el cual aspira a “garantizar el acceso a una energía asequible, fiable, sostenible y moderna para todos”. Adicionalmente apunta al Objetivo 13 de los objetivos de desarrollo sostenible, el cual aspira a "Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos" [22].

Teniendo en cuenta que, el proyecto plantea la posibilidad de alimentar posesos productivos de la comunidad, con la energía geotérmica proveniente de los pozos, también se realizará un aporte a objetivos de desarrollo sostenible como el ODS 8 “trabajo decente y crecimiento económico”, el ODS 9 “Industria innovación e infraestructura”, el ODS 11 Ciudades y comunidades sostenibles y el ODS 12 producción y consumo responsables. En la Figura 20 se muestran los logos de estos objetivos.



Figura 20: Objetivos de Desarrollo Sostenible ODS en los cuales están enmarcados los resultados de esta investigación (Fuente [22]).

Para dejar una mayor claridad, acerca de cómo los resultados de este proyecto aportan a estos objetivos (Figura 20), se listan uno por uno a continuación.

ODS 7 Energía asequible y no contaminante; siendo la energía geotérmica una FNCER, los resultados de este proyecto mostraron que el Macizo Volcánico del Ruiz tiene un gran potencial para alimentar con energía geotérmica, procesos de generación de electricidad y uso directo del calor, con la posibilidad de remplazar otros tipos de fuentes de energía que son más contaminantes. Sin olvidar que la energía geotérmica se destaca dentro de todas las FNCER, por ser no contaminante, por operar todo el año con interrupciones mínimas, por tener un bajo uso del suelo por MWh generado (solo comparable con energía nuclear), entre otras ventajas [8, 10].

ODS 8 trabajo decente y crecimiento económico; El proyecto se encuentra ubicado en la zona rural del municipio de Villamaría Caldas. La economía en este lugar se basa en la producción de materias primas, principalmente leche y productos agrícolas. Los resultados de este proyecto mostraron como la energía geotérmica de la zona, puede ser usada para la generación de electricidad o el uso directo del calor, esta energía de bajo costo podría alimentar procesos productivos que le den valor agregado a los productos de las comunidades del sector, generando crecimiento económico con trabajo decente para los residentes. Por ejemplo, los resultados muestran el gran potencial que tiene la instalación de un deshidratador de alimentos, sustentado con energía geotérmica.

ODS 9 Industria innovación e infraestructura; Este es un proyecto de innovación, ya que hasta el día de hoy no existe un aprovechamiento geotérmico a través de un yacimiento hidrotermal de este tipo en Colombia, por lo que los datos obtenidos aportan en el desarrollo de esta tecnología. Adicional a esto, como el proyecto se encuentra en una zona rural con vías sin pavimentar y un limitado acceso a servicios, para materializar el proyecto sería necesario mejorar la infraestructura del sector, lo que beneficiaría directamente a las comunidades.

ODS 11 Ciudades y comunidades sostenibles; La energía geotérmica tiene el potencial no solo de producir electricidad, sino también de alimentar procesos que necesiten una fuente de calor. Por esta razón, el desarrollo en cascada planteado en esta investigación, puede sustentar procesos de calefacción de hogares, agua sanitaria y demás servicios que desplacen el uso de otras energías no renovables como combustibles fósiles.

ODS 12 Producción y consumo responsables; al aprovechar la geotermia reemplazando otras fuentes de energía más contaminantes, se avanza en el uso moderado de los recursos, además de llevar la cadena de producción cerca de los productores de la zona de influencia del proyecto, para disminuir el desperdicio de materias primas, generado por procesos como largos trayectos de transporte.

ODS 13 Acción por el clima: Como la energía geotérmica tiene la capacidad de producir electricidad 24 horas al día, 7 días a la semana, durante todo el año sin importar las condiciones del clima, esta es una de las pocas FNCER que puede reemplazar una planta termoeléctrica (solo comparable con una planta nuclear), teniendo más confiabilidad que una hidroeléctrica, que produce menos durante las temporadas secas. De esta manera, si se reemplaza una termoeléctrica, por sistemas de producción de electricidad con energía geotérmica (cualquiera de los escenarios presentados en este proyecto), se estaría eliminando una fuente directa de gases de efecto invernadero, mitigando el cambio climático.

## **Conclusiones**

A través del estudio de los resultados del potencial geotérmico en el Macizo Volcánico del Ruiz, se creó un campo geotérmico hipotético, con el cual se simularon diferentes escenarios de aprovechamiento, los cuales son una evidencia clara del gran potencial que existe para la generación de electricidad y los usos directos del calor, en esta región de Colombia.

A partir de un análisis comparativo de diferentes tecnologías y enfoques de generación de electricidad, se evidenciaron las principales ventajas técnicas de los sistemas modulares de cabeza de pozo. Tal vez una de las más importantes es el aumento en la generación, a partir del mismo recurso geotérmico, por la optimización de la curva de producción de cada pozo.

Las proyecciones financieras mostraron como los sistemas modulares de cabeza de pozo son más estables a los retrasos en el tiempo de construcción, cuando se comparan con sistemas de plantas centrales. De esta manera una forma de proteger el proyecto a la incerteza que existe en los cronogramas de ejecución es un desarrollo con plantas cabeza de pozo.

La investigación mostró otra de las ventajas de los sistemas cabeza de pozo geotérmicos, ya que cuentan con la capacidad de corregir los picos y valles de la generación entregada al sistema interconectado, a través de un control inteligente de la generación de electricidad (Figura 16). Esto podría corregir la inestabilidad de la generación hidráulica de la CHEC.

Con el estudio de las actividades socioeconómicas del área de influencia directa del proyecto, se seleccionaron tres usos directos de la energía geotérmica con potencial para ser analizados; deshidratación de alimentos, pasteurización de lácteos, calefacción domiciliaria y acuaponía con calefacción geotérmica. De esta manera, los resultados mostraron que estos usos directos son viables técnica y económicamente para su implementación en el proyecto geotérmico en el Macizo Volcánico del Ruiz.

Implementando la filosofía de desarrollo en cascada se simularon diferentes escenarios de generación de electricidad y usos directos del calor a partir de un solo pozo. Esto dejó claro que, por ejemplo, los sistemas que permiten la implementación de la mayor cantidad de usos directos son las plantas tipo Flash Simple.

Además de todos los escenarios de desarrollo del potencial del campo con diferentes enfoques, se realizó una propuesta de inversión en la cual se proyecta la instalación de una sola planta Binaria de Alta Entalpía, en un solo pozo. Este escenario se mostró más asequible teniendo en cuenta la inversión inicial, y viable desde el punto de vista técnico y financiero, siempre y cuando se tengan en cuenta detalles como el tiempo de construcción y el precio de venta de la energía.

Al analizar todas las herramientas financieras y de beneficios tributarios disponibles para la realización del proyecto, quedó claro que una buena articulación de todos estos sistemas facilitaría las labores del desarrollo de esta iniciativa, amortizando el riesgo que existe en un emprendimiento geotérmico.

### **Trabajos Futuros**

Los resultados de esta investigación mostraron el gran potencial que tiene la energía geotérmica en la región y la viabilidad técnica y económica para su uso, por lo que se recomienda continuar analizando diferentes sistemas de generación de electricidad y usos directos del calor.

En los desarrollos geotérmicos frecuentemente se presenta la dificultad de apalancar las primeras etapas de desarrollo, por el elevado costo de la inversión inicial. Esto hace que sea necesario mantener una búsqueda constante de formas de financiamiento para el proyecto geotérmico, ya sea para actividades de investigación o actividades de desarrollo.

Uno de los momentos más importantes dentro del marco del proyecto geotérmico en el Macizo Volcánico del Ruiz, fue la perforación del pozo Nereidas 1 en 1997. El pozo alcanzó, hasta agotar presupuesto, una profundidad medida (MD) de 1469 metros, y aunque su blanco inicial fue de 2000 metros, se registraron temperaturas de casi 200 °C en reservorios secos despresurizados.

Como el objetivo principal del proyecto es encontrar un yacimiento hidrotermal para producción de electricidad, después de esto fue necesario realizar más estudios para determinar con mayor exactitud la ubicación del posible reservorio geotérmico. Actualmente el pozo Nereidas 1 está sellado y sin ningún tipo de función.

Ante este panorama, se propone realizar una investigación para estudiar los sistemas de extracción de calor de pozos profundos y analizar la viabilidad que existe para su implementación en el pozo Nereidas 1. Por este camino, se le presentaría a la empresa una nueva solución para el aprovechamiento de la energía geotérmica en el proyecto, que no dependa de extraer fluido del yacimiento hidrotermal, recuperando la inversión realizada en el pozo Nereidas 1. Si los resultados son satisfactorios, se podría llegar a la construcción de un prototipo de este sistema, que sería pionero en América Latina. En la Figura 21 se presenta un esquema de cómo funciona un sistema de este tipo.

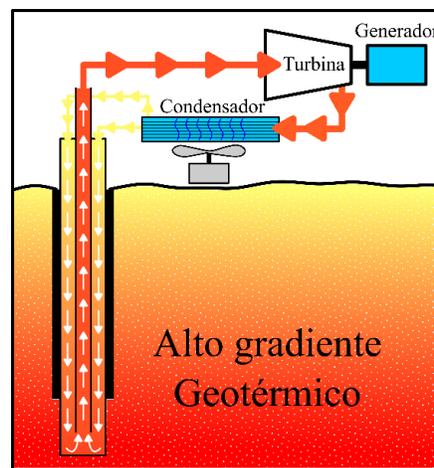


Figura 21: Esquema de un intercambiador de calor coaxial de fondo de pozo (Adaptado de [23]).

Para obtener una mayor claridad acerca de los trabajos futuros que se proponen, se puede consultar el documento: “Anteproyecto pozo Nereidas 1”.

### Agradecimientos

Esta investigación es el fruto de un trabajo conjunto entre empresa pública y entidades de educación superior, que a través de una convocatoria del Minciencias, crearon un equipo de trabajo multidisciplinar con el firme objetivo de aportar en el desarrollo de la geotermia en Colombia. Por esta razón nos gustaría agradecer a las siguientes entidades:



## Referencias

- [1] Bassam N. E., Maegaard P., Schlichting M. L. (2013). Chapter Twelve - Geothermal Energy. Distributed Renewable Energies for Off-Grid Communities. Elsevier. 185-192.
- [2] Government of Western Australia. (2004) Obtaining a geothermal title. [en línea] <http://www.dmp.wa.gov.au/Petroleum/Obtaining-a-Geothermal-title-4240.aspx>
- [3] Enel Green Power. (2021) All the advantages of geothermal energy. [en línea] <https://www.enelgreenpower.com/learning-hub/renewable-energies/geothermal-energy/advantages>.
- [4] Minciencias. (2019) Convocatoria Programa de Estancias Postdoctorales en entidades del SNCTeI 2019. <https://minciencias.gov.co/convocatorias/oportunidades-formacion/convocatoria-programa-estancias-postdoctorales-en-entidades>
- [5] LaGeo. Proyecto Geotérmico Valle de Nereidas, Colombia. Revisión e integración del modelo conceptual para determinar puntos de perforación. Presentado a EPM 2016.
- [6] International Finance Corporation. (2013) Success of Geothermal Wells: A global study. World Bank Group.
- [7] Dewhurst Group. (2016) Appendix 10 Economic Impact Assessment. Geothermal Resource Assessment. Presentado a Empresas Públicas de Medellín E.S.P.
- [8] DiPippo R. (2012). Geothermal Power Plants: Principles, Applications, Case Studies and Environmental Impact. EL SEVIER. 3°ed.
- [9] Geirdal C. A. C., Gudjonsdottir M. S., Jensson P. (2015) Economic comparison of a well-head geothermal power plant and a traditional one. Geothermics, v. 53, p. 1–13.
- [10] Jutglar L. y Pous J, (2014). Energía Geotérmica. Editorial CEAC, 1, 100-136.
- [11] Energy Sector Management Assistance Program (2012). Geothermal handbook: Planning and Financing Power Generation. The World Bank, 16-100.
- [12] Bonafin J., Felice F. and Duvia A. (2018) Binary power plants for the high enthalpy well-head generation. Proceedings, 7th African Rift Geothermal Conference.
- [13] Grupo de investigación de Desalación y Energías Alternas IIDEA, del instituto de ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México UNAM. (2021) Deshidratador Geotérmico de Alimentos <http://proyectos2.iingen.unam.mx/IIDEA/deshidratador.html>
- [14] Jiménez H. A. (2020) Uso integral de la energía geotérmica en México. Grupo de investigación de Desalación y Energías Alternas IIDEA, del instituto de ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México UNAM. Videoconferencia.
- [15] Jiménez H. M. A., Pérez P. S., Madrazo O. V., González E. P., Rivera A. J. Low-Enthalpy Geothermal Food Dehydrator. GRC Transactions, 2016, 40:163-168.
- [16] Ultra High Temperature (UHT) Pasteurisation. The UHT pasteurisation process. <https://uht-pasteurisation-foodtech9.weebly.com/uht-pasteurisation-process-q1.html>
- [17] Lund W. L. Milk pasteurization with geothermal energy. GHC bulletin, 1997.
- [18] Región Caribe. La planta Fotovoltaica más grande de Colombia. <https://regioncaribe.com.co/la-planta-fotovoltaica-mas-grande-de-colombia-fue-inaugurada-en-el-paso-cesar/>

- [19] Presidencia de la República de Colombia. La planta fotovoltaica más grande de Colombia fue inaugurada en el Paso-Cesar.  
[https://id.presidencia.gov.co/obras/MinEnergia\\_fotovoltaicaPaso.html](https://id.presidencia.gov.co/obras/MinEnergia_fotovoltaicaPaso.html)
- [20] Ministerio de Minas y Energía. (2020) Mesa consultiva derivada de la “Iniciativa para el desarrollo de la Geotermia en Colombia”. Conferencia Virtual.
- [21] Inter-American Development Bank. Investment Grant for The Financing and Risk Transfer Program for Geothermal Power, CO-G1007. Environmental and Social Management Report.
- [22] Naciones Unidas (ONU). (2021) Objetivos de Desarrollo Sostenible.  
<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- [23] Wang Z., McClure M. W., Horne R. N. (2009) A single-well EGS configuration using a thermosiphon. Proceedings, Thirty-Fourth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University.