



Aplicación del enfoque de desarrollo en cascada en el proyecto geotérmico del Macizo Volcánico del Ruiz

Application of the cascade development approach in the “Macizo Volcánico del Ruiz” geothermal project

Julián Andrés Ortiz-González ¹

¹ Universidad Autónoma de Manizales, Colombia. Orcid: [0000-0002-3403-0668](https://orcid.org/0000-0002-3403-0668). Correo electrónico: julian.ortizg@autonoma.edu.co

Recibido: 10 octubre, 2022. Aceptado: 7 marzo, 2023. Versión final: 1 junio, 2023.

Resumen

Desde 1968, en el Macizo Volcánico del Ruiz se han realizado estudios que comprueban el gran potencial que existe en la región, para la generación de electricidad a partir de la energía geotérmica, sin embargo, este desarrollo no se ha materializado hasta la fecha. Por esta razón y con el ánimo de aportar en el desarrollo de la geotermia en Colombia, se analizaron las barreras que han venido surgiendo en la implementación del proyecto y para intentar superar algunas de estas se implementó una metodología de desarrollo en cascada a partir de un solo pozo productor. Los resultados mostraron que, con este nuevo enfoque, el aprovechamiento del campo se podría realizar en un menor tiempo, con una eficiencia energética mayor, adaptándose a las necesidades de las comunidades aledañas.

Palabras clave: energía geotérmica; proyecto geotérmico del Macizo Volcánico del Ruiz; desarrollo en cascada; generación de electricidad; usos directos del calor.

Abstract

Since 1968, studies have been conducted in the “Macizo Volcánico del Ruiz” that prove the great potential that exists in the region for the generation of electricity from geothermal energy. However, this development has not materialized yet. For this reason and with the aim of contributing to the development of geothermal energy in Colombia, the barriers that have been emerging in the implementation of the project were analyzed and to try to overcome some of these, a cascade development methodology was implemented based on a single producing well. The results showed that, with this new approach, the development of the field could be done in less time, with greater energy efficiency, adapting to the needs of the surrounding communities.

Keywords: geothermal energy; the “Macizo Volcánico del Ruiz” geothermal project; cascade development methodology; electricity generation; direct uses of heat.

1. Introducción

En un esfuerzo mundial por la implementación de Fuentes no Convencionales de Energía Renovable (FNCER), que garanticen su acceso asequible, seguro, sostenible y moderno, la energía geotérmica se viene mostrando como una alternativa atractiva, resaltando ante las otras FNCERs por la capacidad que tiene de producir energía 24 horas al día y 7 días a la semana [1]. Este recurso se genera y se almacena en la Tierra, proviniendo en un 20% de la formación original del planeta y en un 80% de la desintegración radiactiva de algunos minerales en su interior [2].

En 2020 se reportó que, del total de la electricidad generada a nivel mundial, el 3.2% provenía de la energía geotérmica [3]. Este valor en un ámbito global es pequeño, pero en algunos países la geotermia tiene un rol preponderante en la matriz energética local, por ejemplo, en 2019 más del 57% de la electricidad en Kenia fue generada a partir de recursos geotérmicos [3]. En la **Figura 1** se presentan los 10 países con mayor capacidad instalada para generación de electricidad con energía geotérmica [4].

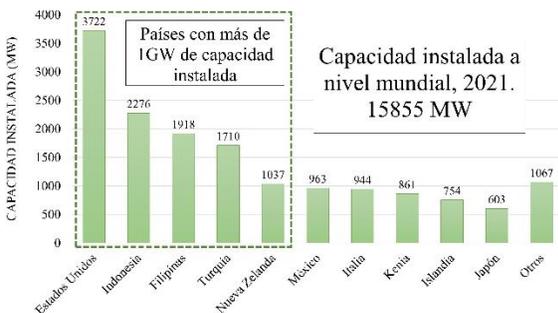


Figura 1. Países con mayor capacidad instalada para generación de electricidad con energía geotérmica a nivel mundial, datos del año 2021. Fuente: adaptado de [4].

En este contexto existen muchas formas de aprovechar el calor de la Tierra, pero la gran mayoría de la generación de electricidad con energía geotérmica se obtiene a través del aprovechamiento de sistemas hidrotermales [1], [2], [3], [4], [5]. A pesar de ser diferentes entre sí, se pueden establecer unas características básicas que estos sistemas hidrotermales tienen y que son cruciales para su uso en aplicaciones de generación de electricidad. En la **Figura 2** se presenta la estructura simplificada de un sistema hidrotermal.

De esta manera, un recurso hidrotermal geotérmico requiere de un reservorio subterráneo de agua con recarga natural, por la filtración de fluido a través de fracturas y

zonas permeables. También se requiere una fuente de calor cercana al reservorio, que aumenta la temperatura del fluido dentro del mismo. A su vez también debe existir una capa sello que impide que el fluido se escape fácilmente a la superficie por el aumento en la presión del reservorio, esto se logra porque la capa sello cuenta con una baja permeabilidad.

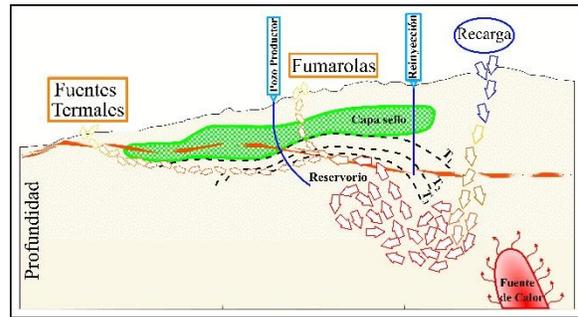


Figura 2. Características básicas de una formación hidrotermal geotérmica. Fuente: elaboración propia.

Entonces, en un proyecto geotérmico clásico, se tiene como objetivo principal encontrar un sistema hidrotermal (o reservorio hidrotermal = yacimiento hidrotermal) que cumpla con tener: 1º) Una fuente de calor que generalmente es una cámara magmática; 2º) Una roca almacén o reservorio; 3º) Una roca sello impermeable; y 4º) una recarga de fluido que mine el calor de la cámara magmática. Todo lo anterior, con condiciones económicamente explotables con la tecnología actual. Esto se comprueba mediante una metodología de trabajo que va desde la fase de exploración regional, a la prefactibilidad y factibilidad donde se identifican los blancos de perforación que permitan acceder directamente a los fluidos calientes dentro del reservorio, para su posterior uso en ciclos de generación de electricidad [1], [2], [3], [4], [5].

Bajo este marco, entidades que impulsan el desarrollo de estos proyectos han creado cartillas guía para su implementación. En la **Figura 3** se presentan las etapas de un proyecto geotérmico según el “Energy Sector Management Assistance Program” (ESMAP) [6].

Como se muestra en la **Figura 3**, los proyectos geotérmicos a gran escala tienen altos niveles de riesgo, principalmente antes de realizar la etapa de perforación exploratoria profunda. Esto se debe a que no se puede garantizar la existencia del recurso hidrotermal hasta que: no se perfore el reservorio, luego se obtenga fluido caliente y finalmente se hagan pruebas para determinar la viabilidad de su uso para generación de electricidad.

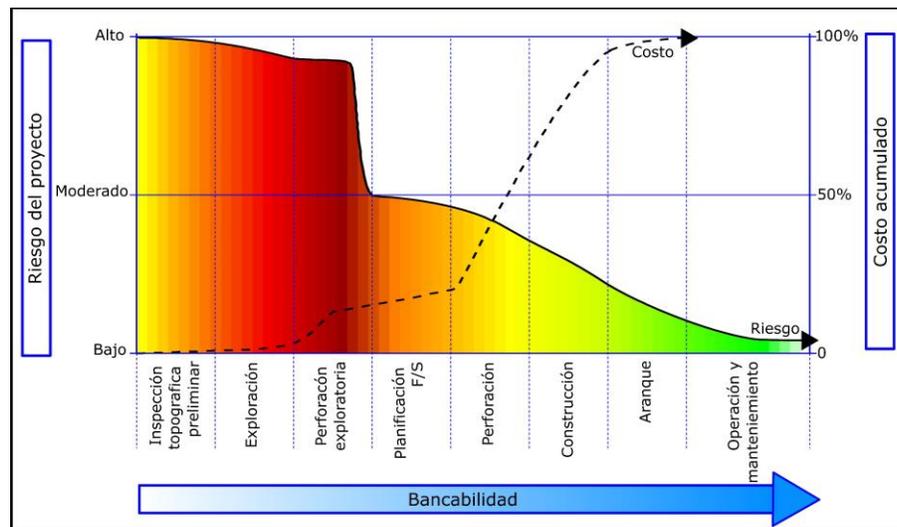


Figura 3. Riesgo y costo de las fases de un proyecto geotérmico para producción de electricidad a gran escala con planta central (>10MW), según el “Energy Sector Management Assistance Program” (ESMAP). Fuente: adaptado de [6].

Otro aspecto importante en este enfoque es que no se comienza a generar electricidad hasta que se perforen todos los pozos, se instale la red de vapor ductos y se termine la construcción de la planta.

De esta manera, al encarar un proyecto de este tipo, los inversionistas se enfrentan a altos niveles de riesgo, una gran inversión inicial y un periodo de espera de aproximadamente 5 años para la llegada de los primeros ingresos, siendo este un estimado optimista de tiempo de construcción total del sistema, que se encuentra en la literatura [6]. Adicional a estas barreras, se presentan otras dificultades para la implementación de proyectos geotérmicos en países con poca experiencia en el tema como Colombia [7], [8]:

- Las fases preliminares de exploración implican altos riesgos e inversiones.
- Las perforaciones profundas se enmarcan en factores de éxito que están entre el 60 y el 78%, lo que quiere decir que, de cada 10 pozos, entre 2 y 4 pueden no ser viables para producción de electricidad, por los métodos tradicionales [9].
- El limitado conocimiento técnico y científico de las autoridades retrasa el estudio y la autorización de permisos ambientales para el desarrollo de los proyectos.
- Limitaciones de infraestructura, equipo especializado y mano de obra para la exploración y desarrollo de proyectos geotérmicos.
- La ubicación de lugares con alto potencial geotérmico, en áreas volcánicas sin ninguna

infraestructura que pueda permitir el acceso y la conexión al sistema nacional de transmisión.

- Aún falta legislación adecuada que permita el desarrollo y la explotación de los recursos geotérmicos y su participación eficiente y efectiva en el mercado. Sin embargo, resaltan los últimos avances en esta materia, obtenidos con el Decreto 1318 y la Resolución 40302 de 2022, los cuales son la base legislativa para el aprovechamiento de la energía geotérmica en Colombia [10], [11].
- La falta de conocimiento por parte de la sociedad en general y los sectores políticos sobre los beneficios del desarrollo de la energía geotérmica.
- La alta oferta de recursos hidráulicos para producir electricidad a costos más bajos. Esto resulta relevante, porque en Colombia el 68.3% del total de la capacidad instalada para la generación eléctrica se alimenta de fuentes hidráulicas [12].

Actualmente en la industria se están implementando métodos para superar estas barreras, que dificultan la implementación de proyectos geotérmicos en países que están incursionando en la geotermia. Una de las medidas que mejores resultados a dado es la inclusión de plantas cabeza de pozo para generación de electricidad con el primer pozo productor viable, a continuación, se presentan las ventajas que estos dispositivos aportan a los proyectos [13], [14], [15], [16], [17], [18], [19], [20], [21], [22], [23], [24].

- Aceleran la entrega y el acceso a la electricidad, generando ingresos anticipados.

- Tardan de 6 a 12 meses en ser construidas (más rápido que una planta central convencional).
- Puede reducir los costos asociados del proyecto de perforación al desplazar el diésel.
- Son una plataforma para capacitar en aspectos de operación y mantenimiento.
- Son económicamente asequibles, fáciles de instalar y baratas de mantener y operar.
- Pueden ser portátiles, para facilitar su movilización a otras áreas geotérmicas.
- Permiten el aprovechamiento de pozos casi inmediatamente después de las pruebas.
- Vienen en un diseño y construcción estandarizados, lo que las hace más confiables.

Uno de los ejemplos más exitosos de implementación de plantas cabeza de pozo, se presentó en el campo geotérmico en Olkaria Kenia. Con pozos productores ya perforados y con el conocimiento de la viabilidad del yacimiento para la producción de electricidad, KenGen (“Kenya Electricity Generating Company”) duró más de ocho años intentando financiar sin éxito la central geotérmica a gran escala. Como no fue posible producir electricidad por este camino, KenGen decidió implementar el uso de una planta modular de 5MW en uno de sus pozos [13].

Esta planta de cabeza de pozo fue instalada en 2011 y produjo electricidad por 18 meses. En este punto KenGen le encargó a la GEG (Green Energy Group) la construcción de 14 plantas de este tipo, teniendo en cuenta el éxito que habían tenido con la primera. La

totalidad de las plantas entraron en operación en 2016 y las 15 plantas que suman una capacidad instalada de 85.6 MW, incluyendo la planta modular inicial, producen electricidad hasta el día de hoy. Esta solución fue tan exitosa, que el plan de cambiar las plantas modulares por una central a gran escala se ha pospuesto indefinidamente [13], [14]. Como este, existen diferentes casos exitosos y estudios que recomiendan como una buena práctica la inclusión de plantas cabeza de pozo en los proyectos geotérmicos [15], [16], [17], [18], [19], [20], [21], [22], [23], [24].

Otro método que está ganando bastante importancia para mejorar el panorama de inversión de los proyectos geotérmicos, es la filosofía del desarrollo en cascada [25], [26]. Para entender este concepto, debemos tener en cuenta los usos directos del calor geotérmico que se han implementado desde las primeras civilizaciones, con ejemplos como la balneología, hasta sistemas más complejos como deshidratación de alimentos [27]. De esta manera, en la Figura 4 se presentan los diferentes usos directos de la geotermia, dependiendo de la temperatura del recurso [28].

Como se muestra en la Figura 4, dependiendo de la temperatura del recurso, diferentes aprovechamientos de la energía geotérmica pueden ser aplicados, además de la generación de electricidad. En este sentido, se tienen usos directos que demandan altas temperaturas como lo es la producción de vapor limpio (170-300°C) y otros con una demanda energética baja como lo es la acuicultura (20-40°C).

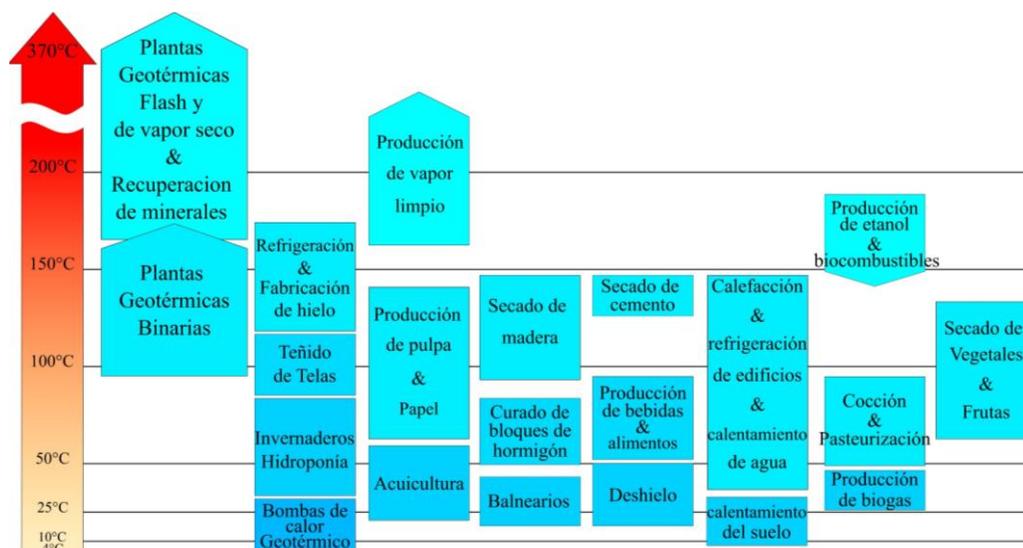


Figura 4. Usos directos de la energía geotérmica, dependiendo de la temperatura del recurso. Fuente: adaptado de [28].

Continuando con este análisis, en la **Tabla 1** se presentan los usos directos de la energía geotérmica con mayor capacidad instalada a nivel mundial, para el año 2020 [27]. Los resultados de la **Tabla 1** muestran como los usos directos de la energía geotérmica han aumentado en capacidad instalada a lo largo de los años, siendo esta una evidencia de su importancia en la industria.

Tabla 1. Ponderado de capacidad instalada de diferentes usos directos de la energía geotérmica a nivel mundial 2005-2020

Tipo de uso	Capacidad instalada GWt			
	2020	2015	2010	2005
Bombas de calor	77.6	50.3	33.1	15.4
Calefacción	12.8	7.6	5.4	4.4
Invernaderos	2.5	1.97	1.5	1.4
Acuicultura	0.95	0.7	0.65	0.61
Secado de alimentos	0.26	0.16	0.12	0.16
Usos industriales	852	614	533	484
Balneología	12.3	9.1	6.7	5.4
Derretimiento nieve	0.44	0.36	0.37	0.37
Otros	0.11	0.07	0.04	0.08
Total	107.7	70.9	48.5	28.3

Fuente: adaptado de [27].

En este punto se debe resaltar que las bombas de calor se diferencian de los otros usos por su principio de funcionamiento, ya que en estas se aprovecha la temperatura casi constante del subsuelo a lo largo del año, para extraer calor en el invierno (calefacción) e inyectar calor en el verano (refrigeración) [29]. Por el contrario, la mayoría de los otros usos directos que se presentan en la **Tabla 1**, hacen uso de fluido hidrotermal para el aprovechamiento del calor [27].

Entonces, teniendo en cuenta que la geotermia puede suplir diferentes niveles de demanda de energía (**Figura 4**), se han venido aplicando en la industria los esquemas de desarrollo en cascada, en donde a través de una red de vapor ductos se alimentan los diferentes usos de la energía geotérmica. Un ejemplo de esto se presenta en la **Figura 5**, donde está la distribución de los aprovechamientos geotérmicos en el campo de la ciudad de Húsavík, Islandia [30]. El complejo geotérmico en el campo de Húsavík tiene diferentes niveles de suministro de fluido caliente; las más altas temperaturas se entregan para generación de electricidad y para usos industriales. A la salida de la planta de generación eléctrica se alimentan sistemas de balneología y de piscicultura.

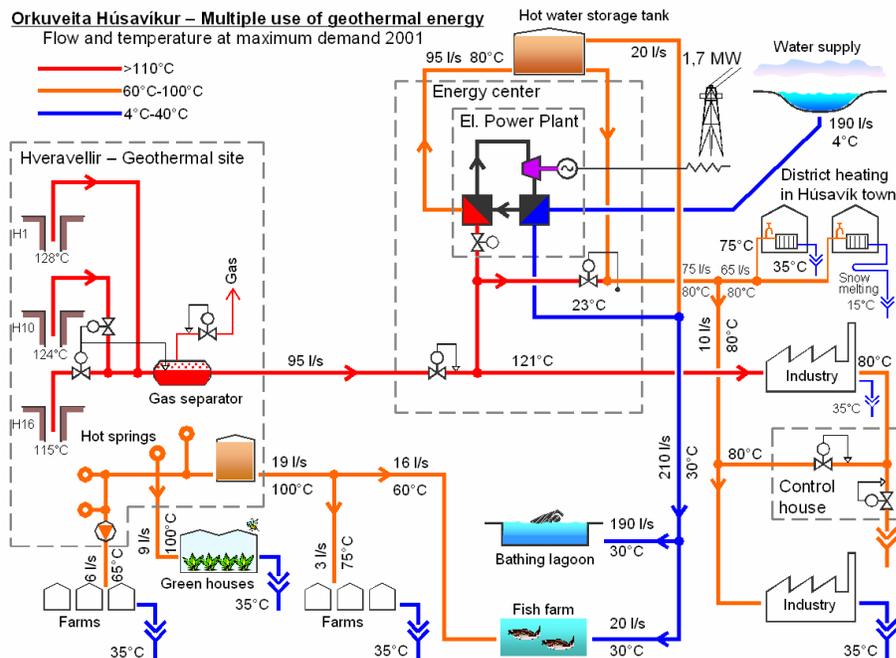


Figura 5. Diagrama del complejo geotérmico en Húsavík, Islandia. Fuente: [30].

Por otro lado, en la línea de alta temperatura se tiene una derivación para distritos de calefacción domiciliaria. De manera similar, la red de usos industriales tiene diferentes niveles de suministro de energía dependiendo de la demanda específica.

Finalmente, se observa cómo se alimentan algunos de los usos a partir de fuentes termales naturales, complementando los fluidos que se obtienen a través de los pozos productores [30].

De esta manera, al observar los proyectos geotérmicos desde el punto de vista del desarrollo en cascada, los riesgos y costos que se presentan en la Figura 3 cambian, ya que se pueden realizar aplicaciones de uso directo a partir del aprovechamiento del primer pozo productor, que traerían beneficios económicos al proyecto, en algunos casos, desde la etapa de perforación exploratoria profunda. Además de esto, como se comentó anteriormente, la perforación de pozos está atada a una tasa de éxito de entre el 60 y 78% [9], esto teniendo en cuenta condiciones de caudal y temperatura para generación de electricidad, sin embargo, pozos por debajo de estos estándares podrían ser usados para alimentar otras aplicaciones con una demanda energética menor.

Por lo tanto, con una tasa de éxito de perforación más alta y con un uso de la energía más eficiente, los proyectos geotérmicos bajo la filosofía del desarrollo en cascada tienen un panorama financiero más favorable, que aquellos que se planean solo para generación de electricidad con una planta central.

Tomando lo anterior en cuenta, en este marco de desarrollo en cascada y plantas cabeza de pozo, fue estudiado el proyecto geotérmico en el Macizo Volcánico del Ruiz, con el fin de brindar una mejor perspectiva de inversión, que aquella que se ha venido planteando en donde el desarrollo del campo se da a partir de una planta central.

2. Principales características del proyecto geotérmico en el Macizo Volcánico del Ruiz

Los estudios geológicos para determinar el potencial geotérmico en el Macizo Volcánico del Ruiz comenzaron en 1968 y se han continuado hasta la fecha [31], [32], [33], [34]. Uno de los mayores hitos de este proyecto fue la perforación del pozo exploratorio Nereidas 1 en 1997. Este pozo tiene una profundidad vertical de 1363 metros y una temperatura en fondo de 197 °C aproximadamente. Sin embargo, con este pozo no se llegó al reservorio geotérmico, por lo que se encuentra seco y despresurizado [35].

Esta situación obligó a que los estudios fueran revisados para determinar nuevos blancos de perforación.

Los estudios más recientes acerca del potencial geotérmico de la zona fueron realizados en 2016. Los resultados que se destacan de este trabajo son: 5 nuevos blancos para perforación exploratoria profunda, una temperatura estimada de reservorio que oscila entre 240 y 260 °C y un 90% de probabilidad de que el yacimiento pueda alimentar una planta de 65 MW eléctricos, esto a partir de la aplicación del modelo volumétrico islandés [36], [37].

Con estos datos se modeló un campo geotérmico hipotético con 12 pozos productores. Entonces, se tiene una curva de producción y una temperatura de fondo estimadas para cada pozo. En conjunto, los 12 pozos productores pueden alimentar una planta de generación de electricidad Flash Simple de 65 MW, manteniendo la coherencia con las estimaciones de los estudios más recientes.

Este campo geotérmico hipotético ha sido usado para simular diferentes escenarios de generación de electricidad en trabajos anteriores [38]. Para los análisis mostrados en este estudio, se usaron sólo los datos del que sería el primer pozo productor del campo geotérmico en el Macizo Volcánico del Ruiz. En la Figura 6 se presenta la curva de producción estimada de este pozo.

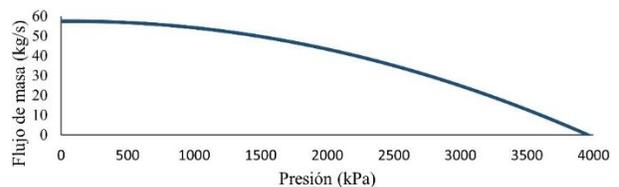


Figura 6. Curva de producción estimada para el primer pozo dentro del campo geotérmico hipotético. Fuente: adaptado de [38].

3. Ciclos de generación de electricidad

Con base en las características estimadas del recurso en la zona del Macizo Volcánico del Ruiz, se seleccionaron los ciclos termodinámicos que se consideraron como los más adecuados, siguiendo las recomendaciones de la literatura y considerando los nuevos avances que se están presentando en la industria [5], [6], [39].

El primer ciclo que fue usado en los cálculos es el Flash Simple con turbina de condensación. Este sistema se usa cuando se puede extraer vapor del fluido del pozo a través de un separador, conservando una alta temperatura que permita una expansión considerable en la turbina. En la

Figura 7 se presenta un diagrama simplificado del proceso de generación dentro de una planta Flash simple con turbina de condensación.

Como se muestra en la figura, se extrae el fluido del pozo y se pasa por un separador, en donde la fase vapor se envía a la turbina y la fase líquida se va para reinyección u otros usos. Continuando con el proceso, después de que el vapor se expande dentro de la turbina para generar electricidad, el fluido pasa por un proceso de condensación para luego ser reinyectado o aprovechado en procesos secundarios.

Realizando los cálculos con los datos de la Sección 2, se obtuvo que con este ciclo se podrían generar aproximadamente 5 MW de electricidad netos. Esto con una presión de 590 kPa en el separador y una de 8.5 kPa en el condensador. De esta manera se tendrían disponibles a la salida del separador aproximadamente

45 kg/s de recurso líquido saturado a una temperatura de 158°C aproximadamente.

El otro ciclo que se seleccionó fue el Binario de alta entalpía. Este ciclo está ganando terreno en la industria siendo relativamente nuevo. Empresas como Turboden y Ormat lo han venido implementando con éxito, sustituyendo en algunos casos el uso de sistemas Flash Simple, siendo este último el tipo de planta con mayor capacidad instalada a nivel mundial [39], [40].

En la Figura 8 se presenta un diagrama simplificado del ciclo de generación de electricidad Binario de Alta Entalpía. En este tipo de sistemas se extrae el fluido del pozo y se hace pasar por un separador, en donde la parte vapor va para un evaporador y la parte líquida va para un precalentador. Al pasar por esos dos dispositivos el fluido geotérmico se envía para reinyección o para alimentar otros usos.

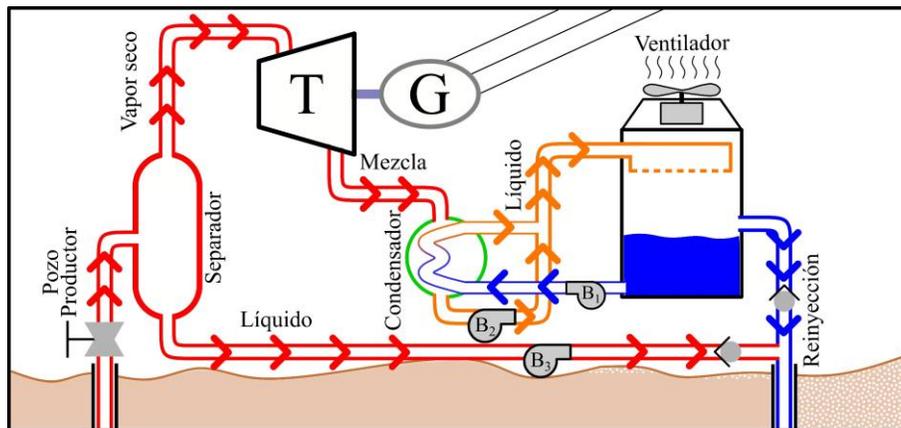


Figura 7. Diagrama simplificado del ciclo de generación de electricidad Flash simple con turbina de condensación. (T= Turbina, G= Generador). Fuente: elaboración propia.

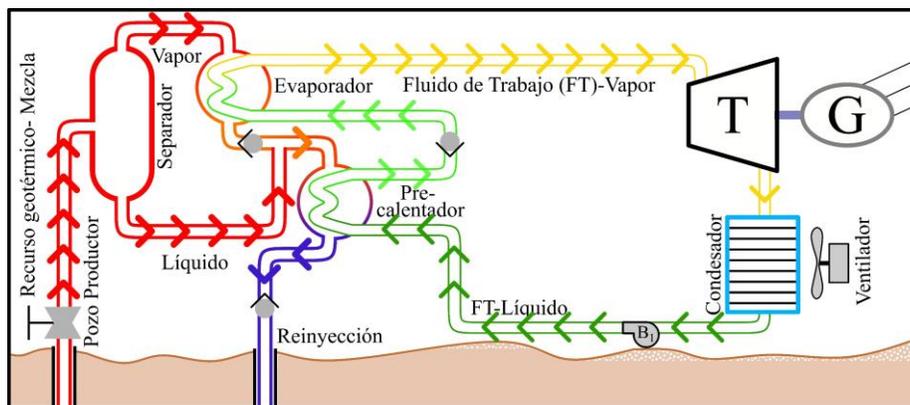


Figura 8. Diagrama simplificado del ciclo de generación de electricidad Binario de Alta Entalpía. (T= Turbina, G= Generador). Fuente: elaboración del autor.

Tanto el evaporador, como el precalentador, son intercambiadores de calor en los cuales se extrae energía del fluido geotérmico, para evaporar un segundo fluido de trabajo que es el que se expande en la turbina y luego se condensa, todo esto en un ciclo cerrado; precalentador – evaporador – turbina – condensador.

Al aplicar los cálculos para este ciclo con las características esperadas que fueron descritas en la sección anterior, se estima que se podrían generar 7MW netos de electricidad aproximadamente.

Esto con una presión de 870 kPa en la cabeza del pozo, un flujo de líquido a la salida del precalentador de 55 kg/s y una temperatura de reinyección de 88°C. Adicional a esto, el fluido de trabajo que se usó fue isopentano. Este entra a la turbina a una presión de 2500 kPa como vapor saturado y sale a una presión de 100 kPa para entrar al condensador. Cabe resaltar que se tuvo especial cuidado con la selección del fluido de trabajo, ya que este afecta directamente la eficiencia del ciclo. Para elegir la mejor opción, se deben tener en cuenta principalmente las condiciones de caudal y temperatura del fluido geotérmico y el tipo de ciclo binario que se quiere aplicar. Otros parámetros que entran en juego son: restricciones operativas o de diseño impuestas en la planta, inflamabilidad del fluido, toxicidad, agresividad química, los peligros potenciales para el medio ambiente y el costo [5].

Para obtener los resultados presentados en esta sección se usaron los procesos de cálculo que existen en la literatura [1], [5], [23], [39].

4. Usos directos del calor

Para seleccionar las aplicaciones que se le podría dar al fluido geotérmico dentro del proyecto en el Macizo Volcánico del Ruiz, se analizaron las actividades socioeconómicas que existen en la actualidad en la zona de influencia. Entonces, juntando el conocimiento adquirido a través de visitas de campo y la información contenida en el estudio de impacto ambiental realizado por la empresa Ingeniería Strycon se destacan las siguientes actividades productivas [41]:

- En las zonas más cercanas al proyecto, la actividad que predomina es la ganadería extensiva principalmente lechera. Por ejemplo, la mayoría de los trabajos dentro del proyecto se realizarán en la vereda el Páramo, que cuenta con un aproximado de 1800 cabezas de ganado. Actualmente la leche de la región se vende cruda a empresas donde se procesa para ser vendida al consumidor final.
- En las zonas aledañas a la vereda el Páramo existe una producción agrícola muy variada; fresa, gulupa,

aguacate, mora, lulo, cebolla... En su mayoría, estos productos se venden al por mayor sin realizarles ningún proceso adicional. Sin embargo, se ha venido incentivando la transformación de estas materias primas para su comercialización directa al consumidor, de esta manera ya se encuentran productos como: mermeladas, dulces, conservas...

- 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; hotel Termes la Quinta, albergue ecológico el Nido del Cóndor, Hostal la Laguna...
- En la vereda Laguna Alta, al lado de la vereda el Páramo, se encontraron cultivos de peces, principalmente trucha y tilapia. Estos pescados se venden al por mayor a intermediarios que los comercializan con el consumidor final.

Con esta información se seleccionaron los siguientes usos directos para ser estudiados dentro del proyecto geotérmico del Macizo Volcánico del Ruiz. Cabe resaltar que cada uso directo fue analizado en detalle, por un grupo interdisciplinar dentro del proyecto, generando un documento específico para cada uno, de tal manera que, por razones prácticas, en esta sección solo se da una visión general de cada sistema, mencionando el documento donde se consignó el estudio respectivo.

4.1. Deshidratador de alimentos

Se seleccionó este proceso porque en la región existe una producción agrícola muy variada y el deshidratador de alimentos tiene la capacidad de procesar diferentes productos, alterando simplemente la temperatura de la cámara de secado y el tiempo de exposición del alimento. Además de esto, el proceso de deshidratación entrega un producto terminado listo para el consumo, reduciendo drásticamente su peso (más del 80% en algunos casos), por lo que es más fácil de transportar y se le entrega directamente al consumidor [42]. Cabe resaltar que el proceso de deshidratación aumenta la vida útil de los alimentos. Para el análisis del deshidratador de alimentos con las propiedades estimadas en el proyecto geotérmico en el Macizo Volcánico del Ruiz, se tomó como referencia 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 [43].

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 [44].

Por lo tanto, para cada alimento se debe obtener la curva de secado, estableciendo el tiempo y la temperatura adecuada en la cámara. Se recomienda que la temperatura del fluido geotérmico esté entre 20 y 30 °C por encima de la temperatura en la cámara de secado [43].

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 [44]. Teniendo en cuenta que, por ejemplo, a la salida del separador de la planta Flash Simple, alimentada por un solo pozo, se estima que se puede tener un fluido geotérmico con una temperatura de 158 °C, en forma de líquido saturado, con un flujo de masa de más de 45 Kg/s, la instalación del deshidratador de alimentos se puede considerar como viable técnicamente.

Para explicar mejor el sistema de deshidratación de alimentos, en la **Figura 9** se muestra un diagrama simplificado del proceso.

Como se muestra en la **Figura 9**, 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 en 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 a entrar en el intercambiador de calor [42].

Paralelo a este análisis, Giraldo et al. realizaron una proyección financiera de este sistema, teniendo como producto agrícola a deshidratar la fresa [45]. Este análisis mostró que este sistema por sí solo sería viable económicamente, con una Tasa Interna de Retorno de 27.92%, y una recuperación de la inversión en 3 años y 2 meses [45].

4.2. Pasteurización de lácteos

Fue seleccionado este uso porque, por ejemplo, dos de las 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 podría vender directamente a los consumidores, se disminuirían costos de transporte y se eliminan intermediarios en el proceso. Las experiencias en el mundo muestran grandes ventajas en la pasteurización y producción de leche en polvo con energía geotérmica [46], [47].

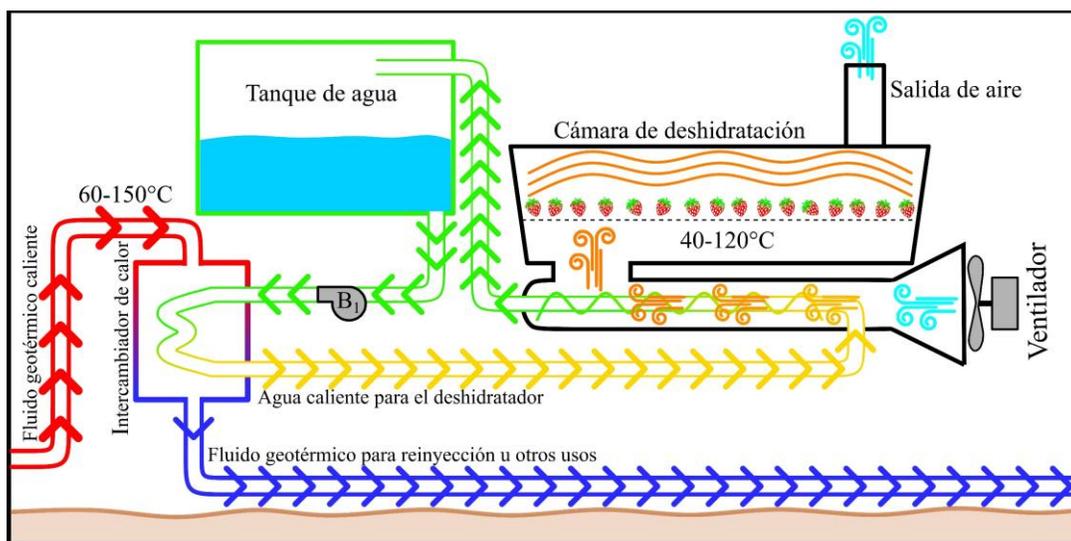


Figura 9. Sistema de deshidratación de alimentos con energía geotérmica. Fuente adaptado de [42].

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 un proceso de pasteurización simple se toma la leche que se encuentra aproximadamente a 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 4°C para proceder a su embalaje. Esta leche dentro del empaque puede tener una vida media de 10 días, pero debe mantenerse refrigerada todo el tiempo [48].

Para el proceso de ultra pasteurización se toma la leche que se encuentra aproximadamente a 4°C y se lleva a una temperatura promedio de 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 promedio de 90 días, a temperatura ambiente y en el envase sin abrir [48]. En la Figura 10 se presentan las temperaturas del proceso de pasteurización y de ultra pasteurización.

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 [47]. En la Figura 11 se muestra una adaptación con el diagrama de este sistema.

Como se muestra en la figura, 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 precalentador en donde transfiere calor con la leche cruda que apenas está entrando al circuito de pasteurización. De esta manera el precalentador 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 precalentador, 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 precalentador, entra en el intercambiador de calor principal y hace el ciclo antes descrito [47].

De la misma manera, en la Figura 11 se muestran los requerimientos mínimos de fluido geotérmico, para el uso del sistema de pasteurización presentado en el trabajo de Lund [47]. Por lo tanto, como se requiere una temperatura de 87°C y un caudal de 6 L/s (flujo de masa $\approx 6 \text{ Kg/s}$), las características estimadas del fluido geotérmico a la salida del separador de la planta Flash Simple alimentada con un solo pozo ($T = 158^{\circ}\text{C}$, $m \geq 45 \text{ Kg/s}$), son suficientes para alimentar este ciclo.

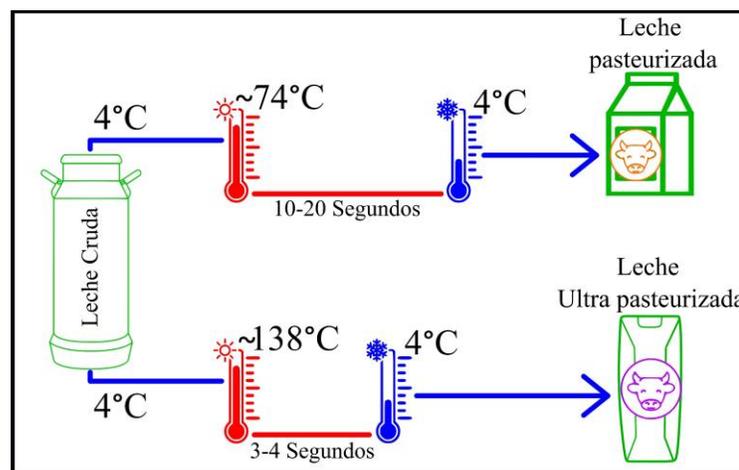


Figura 10. Descripción de las temperaturas en el proceso de pasteurización y de ultra pasteurización. Fuente: adaptado de [48].

Analizando con mayor detalle este sistema, E. F. M. Ramírez realizó su proyecto de grado sobre este tema. Los resultados de este trabajo mostraron que, al remplazar el uso de gas en el proceso de pasteurización por energía geotérmica, el panorama financiero mejora, pasando de un Valor Presente Neto de 710,220,182 a uno de 781,484,556 pesos colombianos [49].

4.3. Sistema de calefacción geotérmico

En el área del proyecto existe una iniciativa 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 viajeros que usan servicios de hospedaje en el sector y una industria turística creciente. En este sentido, los hoteles podrían hacer uso de servicios alimentados con energía geotérmica como: calefacción de espacios, agua caliente sanitaria, lavado de ropa, balneología, entre otros. De esta manera la geotermia puede brindar estos

servicios con un costo de energía reducido, comparando con el costo que tendría su implementación a partir de otras fuentes energéticas. En principio se plantea un sistema de calefacción para un hotel, pero podría ser implementado también en hogares del sector, creando distritos de calefacción [25], [30]. En la Figura 12 se muestra un diagrama simplificado de cómo funcionaría el sistema de calefacción geotérmico.

Como se presenta en la Figura 12, en el sistema de calefacción que se estudió para el proyecto en el Macizo Volcánico del 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 retorna al tanque cerrando el ciclo.

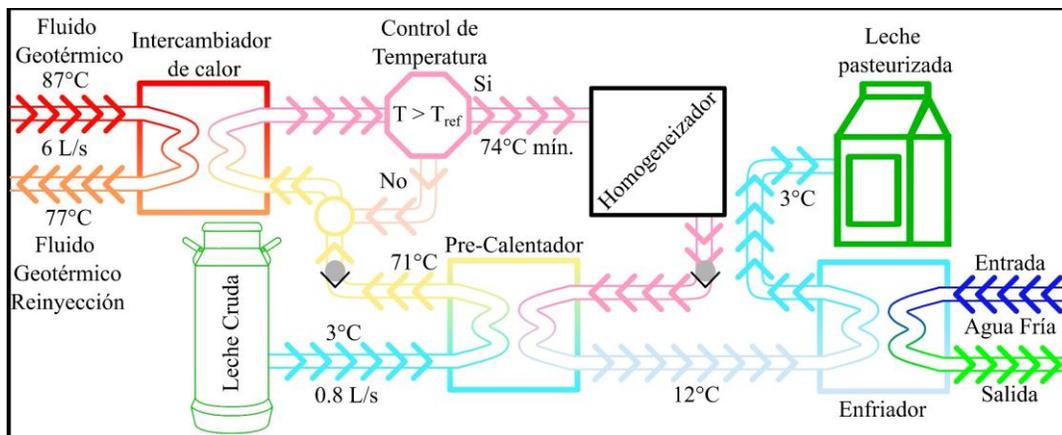


Figura 11. Sistema simplificado de pasteurización con energía geotérmica. Fuente: adaptado de [47].

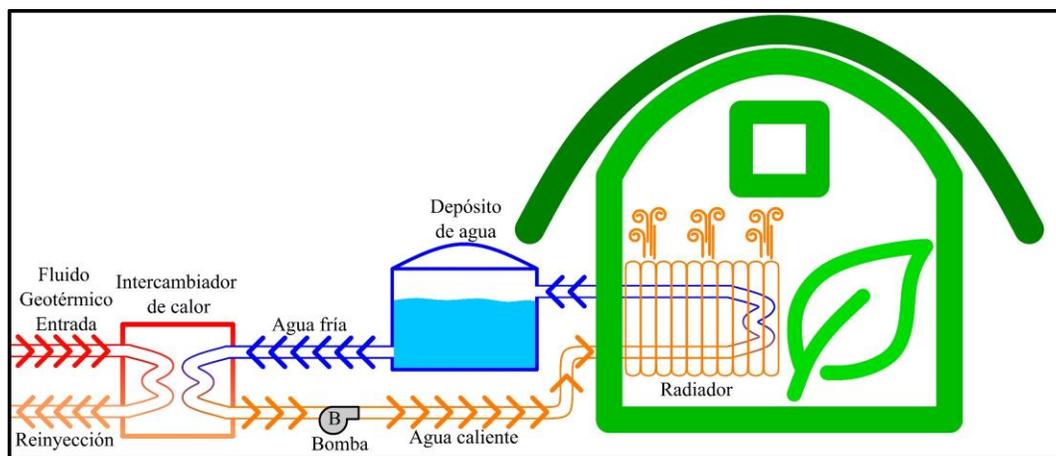


Figura 12. Sistema de calefacción geotérmico simplificado. Fuente: elaboración propia.

Con este potencial en mente, se dimensionó un sistema de calefacción geotérmico para un hotel de la zona, con 22 habitaciones, lavandería, spa y restaurante. De esta manera determinaron que, para suplir esta demanda, se necesitaría un intercambiador central de 90.7 kW y una bomba de circulación centrífuga de 0.75 MW, además de radiadores de tamaños diferentes, dependiendo del volumen del recinto a calentar [50].

Con el diseño técnico establecido, estimaron los costos de instalación del sistema y cuantificaron el ahorro que se tendría en el funcionamiento al compararlo con un sistema alimentado con gas o con electricidad. Fruto de este análisis, se estableció que en los diferentes escenarios de consumo la inversión total de la instalación se recuperaría en menos de 1.6 años. Mayores detalles de estos resultados se encuentran en los trabajos de González y Rolón [50], [51].

4.4. 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. Esta actividad actualmente está adquiriendo importancia a nivel mundial, debido al aumento de la demanda de alimentos. Además de esto, manteniendo artificialmente una temperatura óptima de los estanques, es posible cultivar más especies acuáticas 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.

Como se escogió la tilapia para el análisis de este sistema (partiendo de un producto que ya se cultiva en el área), es necesario conocer el efecto de la temperatura en el crecimiento de este pez. En la Figura 13 se muestra la variación en el crecimiento de la tilapia a lo largo del tiempo, dependiendo de la temperatura del estanque [52].

Como se muestra en la Figura 13, con una temperatura en el estanque entre 27 y 28 °C se mejora el crecimiento de las tilapias, aumentando en casi tres veces el peso del pez, cuando se compara con una temperatura del agua entre 23 y 24°C, esto en el mismo intervalo de tiempo [52]. 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 [53].

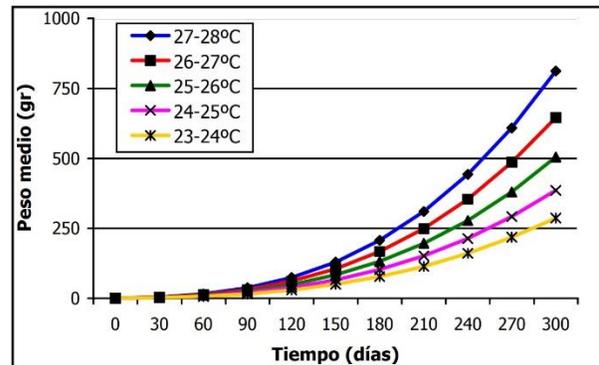


Figura 13. Curvas de crecimiento de la tilapia para varias temperaturas del agua. Fuente: [52].

Como se muestra en la Figura 14, 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 [53].

Para analizar la viabilidad de este sistema, Juan Sebastián Pulgarín González y Ricardo José Hernández Rolón proyectaron un estanque de peces de 32 m³, que permitiría una cosecha de aproximadamente 1103 peces cada 6 meses, con un peso sumado de todos los pesos de alrededor de 640 kg. Esto bajo condiciones de control de temperatura, en donde se debe mantener el agua del estanque a 27°C aproximadamente. Según los cálculos realizados por ellos, esto se logra con un intercambiador de 43kW de potencia, que calentaría con el recurso geotérmico, un flujo de agua constante de 4.6x10⁻⁴m³/s [53].

Adicional a esto, con esta biomasa de peces, estimaron 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 aproximadamente.

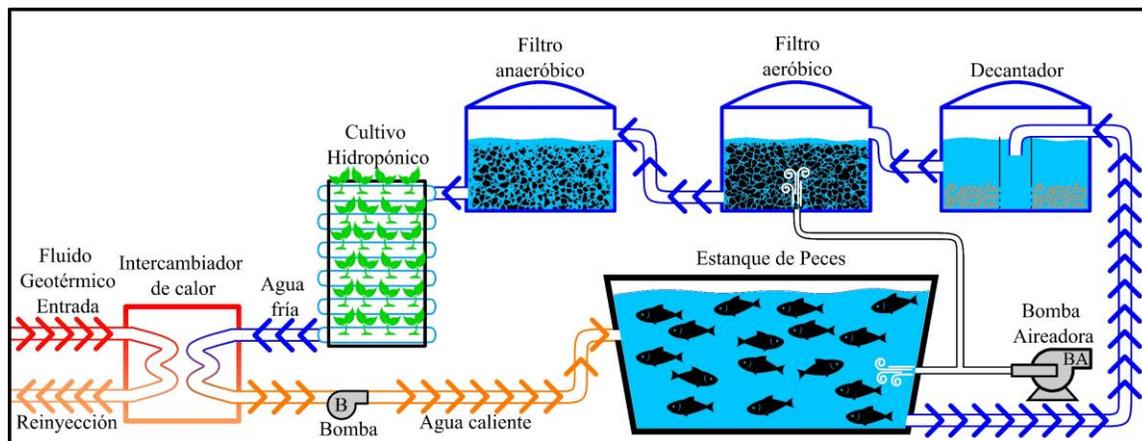


Figura 14. Sistema acuícola semi-intensivo con calefacción geotérmica y cultivo hidropónico (Sistema acuapónico). Fuente adaptado de [53].

Junto con esto, seleccionaron los demás elementos que conforman el sistema; tuberías, accesorios, filtros, bomba, estructura de cultivo de hortalizas y cubierta del sistema; con estos datos se estimaron los costos de instalación y operación, para realizar una proyección financiera a 6 años. De esta manera con una Tasa de Oportunidad de 14%, se obtuvo que el proyecto es viable en dos escenarios analizados; solo con la venta de peces (TIR = 23%) y con venta de peces y lechugas (TIR= 39%). Otro aspecto relevante es que agregando el sistema de hidroponía aumentan los costos de inversión, pero esto se justifica, ya que aumenta la viabilidad del proyecto, pasando de una Tasa Interna de Retorno de 23% a una de 39% [54].

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, teniendo en cuenta que, por ejemplo, a la salida de la planta Flash Simple se tendría un fluido geotérmico a más o menos 158°C. Los detalles sobre las características de estos sistemas están en los documentos elaborados por González y Rolón [53], [54].

5. Diseños en cascada para el proyecto geotérmico en el Macizo Volcánico del Ruiz

Ahora se debe analizar como los diferentes sistemas geotérmicos se integran entre sí, en un desarrollo en cascada. Cabe resaltar que, todos los usos directos fueron analizados a partir del aprovechamiento de la energía de un solo pozo, después de haber pasado por un sistema de generación de electricidad, y se puede aumentar su

capacidad conforme más pozos estén disponibles, siempre y cuando los cálculos técnicos y financieros sean favorables.

5.1. Uso en cascada con sistema de generación de electricidad Flash Simple

Con este enfoque, dependiendo de la cantidad de energía que no es aprovechada para generación de electricidad, se determina la capacidad de los usos directos que componen la cadena. En este sentido, el ciclo termodinámico que deja la mayor cantidad de energía libre es el Flash simple con turbina de condensación (Figura 7). 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 calculó que a la salida del separador en la planta 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 45 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).

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.

En un nivel más bajo 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 85°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 45 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 [42], [43], [44], [45], [47], [49], [50], [51], [53], [54]. 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 15**, ordenando los sistemas de mayor demanda energética hacia abajo.

5.2. Uso en cascada con sistema de generación de electricidad binario de alta entalpía

En el sistema de generación de electricidad Binario de Alta Entalpía, se extrae energía de la totalidad del fluido geotérmico que sale del pozo, tanto de la fase líquida como de la fase vapor (**Figura 8**). De esta manera se va a tener disponible para los usos directos la totalidad del fluido que va para reinyección.

En este sentido la temperatura del fluido de reinyección depende del diseño de la planta, ya que se determina a través de la optimización del proceso en los intercambiadores de calor.

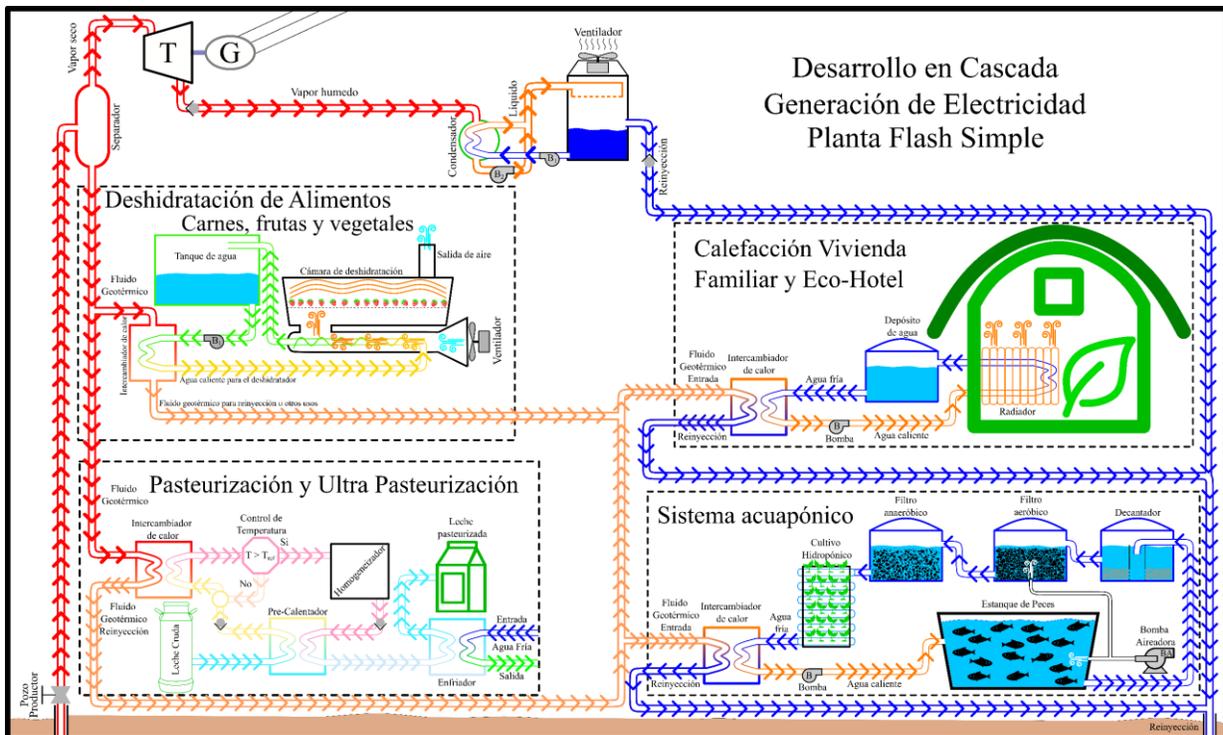


Figura 15. Desarrollo en cascada propuesto para el proyecto geotérmico en el Macizo Volcánico del Ruiz a partir de una planta Flash simple con turbina de condensación. Fuente: elaboración propia.

Por ejemplo, en el escenario que fue estudiado durante esta investigación, se diseñó una planta binaria de alta entalpía que aprovecha la energía de un solo pozo y tiene una capacidad instalada de 7MW netos. En este caso la temperatura del fluido de reinyección es de 88°C, con un flujo de masa de 55 kg/s aproximadamente (Sección 3).

En este escenario se ven afectadas las capacidades de los sistemas de deshidratación de alimentos y de pasteurización. Teniendo en cuenta que se estima una temperatura de fluido geotérmico de aproximadamente 88°C, el deshidratador solo podría procesar frutas y verduras, ya que estas demandan una temperatura de recurso entre 70 y 90°C. De la misma manera, con estas características de fluido geotérmico, solo se podría implementar un sistema de pasteurización clásico, en donde se puede trabajar con un fluido geotérmico con una temperatura mayor a 87°C, como se muestra en la **Figura 11**.

Además de esto, los sistemas de calefacción y acuaponía pueden funcionar con la temperatura estimada de fluido geotérmico, y como en este escenario se tiene el mayor caudal disponible (55 Kg/s), los procesos pueden ser dispuestos en serie o en paralelo. En la **Figura 16** se presenta un diagrama con la disposición del sistema en

cascada con generación de electricidad Binaria de Alta Entalpía.

Estos escenarios muestran como dependiendo del sistema de generación de electricidad, se determina la capacidad de los usos directos de la geotermia que se pueden instalar y la forma en que estarían dispuestos en la cadena de suministro de calor. Por lo tanto, cuando se escoja exactamente qué sistema de generación de electricidad se va a usar en el Macizo Volcánico del Ruiz, se podrán determinar con seguridad los usos directos para la configuración en cascada, de la manera más eficiente.

6. Discusión y conclusiones

Cuando se desarrolla un proyecto de generación de electricidad con el modelo clásico de planta central, hay que realizar todas las perforaciones para poder construir y poner a funcionar la planta [5]. Sin embargo, con el modelo implementado en este trabajo, el desarrollo del campo se puede realizar pozo a pozo, consiguiendo una generación por pozo de entre 5 y 7 MW, dependiendo de la tecnología escogida y con las características estimadas en el Macizo Volcánico del Ruiz (Sección 3). De esta manera se aprovecha el campo en una etapa temprana, obteniendo ingresos económicos a partir del primer pozo

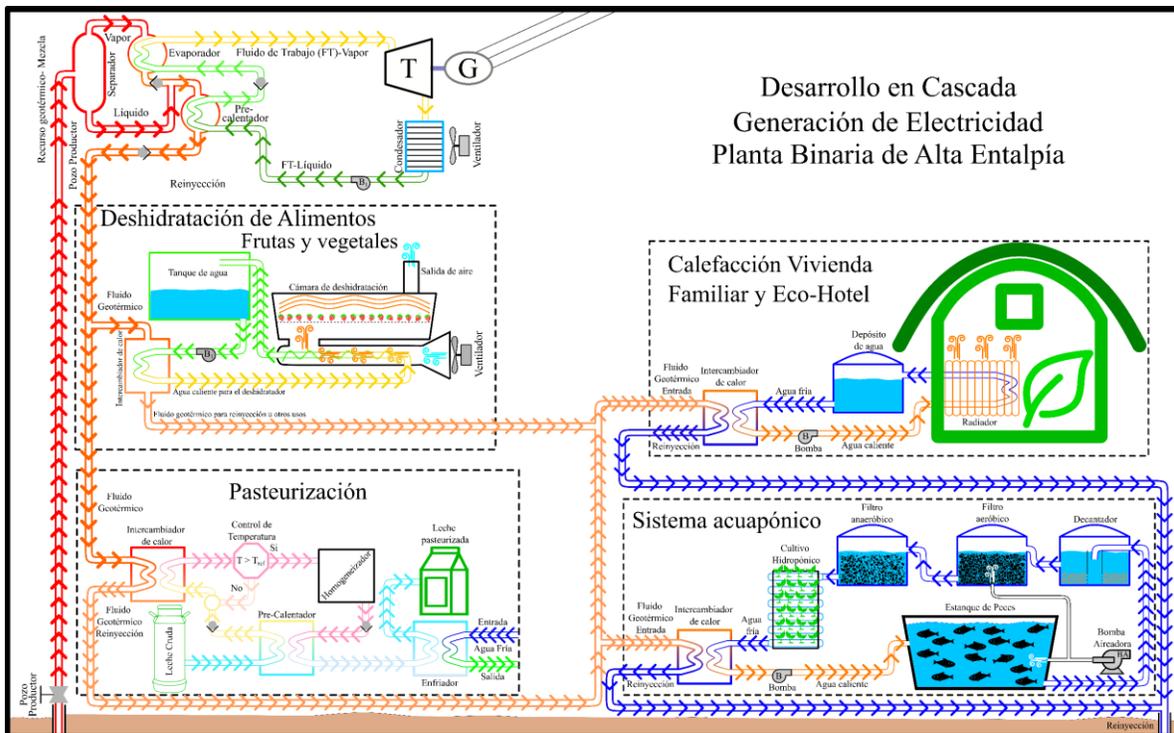


Figura 16. Desarrollo en cascada propuesto para el proyecto geotérmico en el Macizo Volcánico del Ruiz a partir de una planta Binaria de alta entalpía. Fuente: elaboración del autor.

productor y continuando con los trabajos de perforación y construcción paralelamente.

A través del estudio se determinaron diferentes niveles de demanda energética, dependiendo del uso geotérmico implementado. Esta visión es importante porque bajo la mirada clásica, un pozo solo es exitoso si con él se puede generar electricidad [9], pero en el desarrollo en cascada, un pozo “fallido” puede pasar a alimentar los usos con demandas energéticas menores y de esta manera entrar en la cadena productiva del proyecto. Esta situación muestra la relevancia de estudiar todas las alternativas de aprovechamiento en los proyectos geotérmicos.

Estos usos directos de la geotermia se escogieron a partir del análisis de las actividades socioeconómicas en el área de influencia del proyecto. Por esta razón, si se continúa con un diálogo permanente con estas comunidades, pueden surgir nuevas ideas para potenciar sus actividades con energía geotérmica, integrándolas al desarrollo en cascada.

Los resultados mostraron que la generación de electricidad y los usos directos son compatibles y no se excluyen entre sí, permitiendo que los diferentes procesos se puedan desarrollar en armonía, usando la energía de una manera más eficiente.

Agradecimientos

Fondo Nacional de Financiamiento para la Ciencia, la Tecnología y la Innovación Francisco José de Caldas, Minciencias, Colombia. Central Hidroeléctrica de Caldas SA ESP– CHEC grupo EPM. Grupo de investigación Archytas, Universidad Autónoma de Manizales UAM. Participantes del proyecto geotérmico Macizo Volcánico del Ruiz.

Financiación

Convocatoria 904-2021 de Minciencias, con lo cual se recibieron beneficios tributarios por inversión CTel.

Contribuciones de los autores

J. A. O. González: conceptualización, curación de datos, análisis formal, investigación, metodología, software, validación, visualización, redacción – borrador original, redacción – revisión y edición.

Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

Conflictos de interés

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Declaración de la Junta de Revisión Institucional

No aplica.

Declaración de consentimiento informado

No aplica.

Referencias

- [1] J. Pous, *Energía geotérmica*. Barcelona: Ceac, 2004.
- [2] N. E. Bassam, P. Maegaard y M. L. Schlichting, Chapter Twelve - Geothermal Energy. *Distributed Renewable Energies for Off-Grid Communities*. Elsevier, 2013, pp. 185-192, doi: <https://doi.org/10.1016/C2011-0-07940-1>
- [3] IRENA. *Statistics: Trends in Renewable Energy*. [En línea]. Disponible en: <http://www.irena.org/Statistics/View-DatabyTopic/Capacity-and-Generation/Statistics-Time-Series>
- [4] ThinkGeoEnergy. Top 10 Geothermal Countries 2021 – installed power generation capacity (MWe). [En línea]. Disponible en: <https://www.thinkgeoenergy.com/thinkgeoenergy/top-10-geothermal-countries-2021-installed-power-generation-capacity-mwe/>
- [5] R. DiPippo, *Geothermal Power Generation: Developments and Innovation*. EL SEVIER, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/C2014-0-03384-9>
- [6] M. Gehringer, V. Loksha, “Geothermal Handbook: Planning and Financing Power Generation A Pre-launch.” The World Bank Group, Washington, USA, pp. 16–100, 2012.
- [7] E. Mejía, L. Rayo, J. Mendez, J. Echeverri, “Geothermal Development in Colombia”, Short Course VI on Utilization of Low- and Medium-Enthalpy Geothermal Resources and Financial Aspects of Utilization. LaGeo, 2014. [Online]. Available: <http://collections.unu.edu/eserv/UNU:5544/ESSC2014.pdf>

- [8] D. A. M. Rendón, I. J. L. Sánchez, D. Blessent, “Geothermal energy in Colombia as of 2018”, *Ing. Univ.* vol. 24, no. 1, pp. 2–27, Feb. 2020, doi: <https://doi.org/10.11144/Javeriana.iyu24.geic>
- [9] International Finance Corporation, “Success of Geothermal Wells: A global study.” [En línea]. Disponible en: <https://www.ifc.org/wps/wcm/connect/22970ec7-d846-47c3-a9f5-e4a65873bd3b/ifc-drilling-success-report-final.pdf?MOD=AJPERES&CVID=jYlcyTW>
- [10] “Decreto 1073 de 2015: con el fin de reglamentar los artículos 21 y 21-1 de la Ley 1715 de 2014 en lo relacionado con el desarrollo de actividades orientadas a la generación de energía eléctrica a través de geotermia,” Ministerio de Minas y Energía, 2015.
- [11] Ministerio de Minas y Energía, “Resolución 40302 de 2022: Por la cual se establecen los requisitos técnicos que regirán el Registro Geotérmico,” Presidencia de la República de Colombia, 2022.
- [12] Acolgen, “Capacidad instalada en Colombia,” 2023. [En línea]. Disponible en: <https://acolgen.org.co/>
- [13] P. Chege, G. Bardarson, A. Richter, “KenGen’s successful implementation of a modular geothermal wellhead strategy,” *Trans. - Geotherm. Resour. Counc.*, vol. 41, pp. 2407–2421, 2017, [Online]. Available: <https://publications.mygeoenergynow.org/grc/1033878.pdf>
- [14] S. Kiptanui, E. Kipyego, “Viability of wellhead power plants in accelerating geothermal development in Kenya: case of Menengai,” *Proceedings, 6th African Rift Geothermal Conference*, 2016.
- [15] G. H. Bert, “Developments in geothermal energy in Mexico-part three: economics of wellhead versus central power plants,” *J. Heat Recovery Systems*, v. 6, no. 3, pp. 191-200, 1986, doi: [https://doi.org/10.1016/0198-7593\(86\)90002-0](https://doi.org/10.1016/0198-7593(86)90002-0)
- [16] K. Wallace, T. Saleen, W. Harvey, “Field Hopping: Modular Turbine Experience from Central America,” *GRC Trans.*, vol. 41, 2018, [Online]. Available: <https://publications.mygeoenergynow.org/grc/1033966.pdf>
- [17] J. Sutter, E. Kipyego, D. Mutai, “The use of portable geothermal wellhead generators as small power plants to accelerate geothermal development and power generation in Kenya,” *Proceedings, Thirty-Seventh Work. Geotherm. Reserv. Eng.*, pp. 27–33, 2012, [Online]. Available: <https://pangea.stanford.edu/ERE/pdf/IGAstandard/SGW/2012/Sutter.pdf>
- [18] J. W. Lund, T. Boyd, “Small geothermal power project examples,” *GHC Bulletin*, 2019.
- [19] M. Long, R. Raman, W. Harvey, “Staged Asset Deployment – Commercial and Technical Advantages of Using a Wellhead Generation Unit,” *Proceedings 4th African Rift Geothermal Conference*, 2012.
- [20] M. A. Dahlan, H. B. Pratama, N. M. Saptadji, “Pre-feasibility Study of Condensing Wellhead Generating Unit Utilization in Partially Vapor Dominated System,” *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 417, no. 1, p. 012021, 2020, doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/417/1/012021>
- [21] Y. Gudmundsson, E. Hallgrimsdottir, “Wellhead power plants,” *Proceedings, 6th African Rift Geothermal Conference*, 2016. [Online]. Available: https://theargeo.org/fullpapers/WELLHEAD_POWER_PLANTS.pdf
- [22] L. Elíasson, C. Smith, “When smaller is bettercost/size/risk analysis of geothermal projects,” in *Proceedings of Kenya Geothermal Conference*, 2011.
- [23] A. Córdova Geirdal, M. S. Gudjonsdottir, P. Jensson, “Economic comparison of a well-head geothermal power plant and a traditional one,” *Geothermics*, vol. 53, pp. 1–13, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2014.04.003>
- [24] J. A. Ortiz Gonzalez, J. L. Palacio, “Analysis of Different Electricity Generation Scenarios in the ‘Macizo Volcánico Del Ruiz’ Geothermal Project,” *SSRN Electron. J.*, 2022, doi: <https://doi.org/10.2139/ssrn.4191255>
- [25] C. Rubio-Maya, V. M. Ambríz Díaz, E. Pastor Martínez, J. M. Belman-Flores, “Cascade utilization of low and medium enthalpy geothermal resources – A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 52, pp. 689–716, Dec. 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.162>

- [26] H. Aviña Jiménez, M. Torreblanca, A. Garcia-Gutierrez, “Cascade uses of geothermal energy in Mexico,” *GRC Trans.*, vol. 40, p. 169.172, 2016.
- [27] J. W. Lund, A. N. Toth, “Direct Utilization of Geothermal Energy 2020 Worldwide Review,” *Proceedings World Geothermal Congress*, 2020.
- [28] M. Climo, S.D. Milicich, B. White, “A history of geothermal direct use development in the Taupo Volcanic Zone, New Zealand,” *Geothermics*, vol. 59, pp. 215–224, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2015.07.004>
- [29] Burlington Electric Department, Ground-source heat pump systems. [En línea]. Disponible en: <https://www.burlingtonelectric.com/gshp/>
- [30] H. Hreinn, M. Runólfur, J. Sigbór, “Húsavík Energy - Multiple use of geothermal energy Thermie project nr.,” *Int. Geotherm. Conf.*, 2003, [Online]. Available: https://rafhladan.is/bitstream/handle/10802/9409/S11Pa_per058.pdf?sequence=1
- [31] C. Alfaro, “Improvement of Perception of the Geothermal Energy as a Potential Source of Electrical Energy in Colombia, Country Update,” *Proceedings, World Geothermal Congress*, 2015.
- [32] J. A. Hernández, J. F. Cardona, E. J. Vega. “Colombian Geothermal Energy Development: Technical and Economic Factors Favoring Foreign Investment,” *GRC Transactions*, vol. 40, 2016.
- [33] “Notas para la investigación y desarrollo de proyectos geotérmicos en Colombia. Estudios de prefactibilidad para el campo geotérmico del Macizo Volcánico del Ruiz: Programa Estratégico de Investigación y Modelo del Sistema Hidrotermal Magmático”, *Convenio ISAGEN - BID/JC*, 2012.
- [34] N. C. Marzolf, “Emprendimiento de la Energía Geotérmica en Colombia,” *ISAGEN y BID*, 2014.
- [35] “Nevado del Ruiz Geothermal Prospect,” Nereidas Exploration Well N1. Drilling Report, 1997.
- [36] “Proyecto Geotérmico Valle de Nereidas, Colombia: Revisión e integración del modelo conceptual para determinar puntos de perforación,” Empresas Públicas de Medellín E.S.P., 2016.
- [37] Dewhurst Group, “Appendix 10 Economic Impact Assessment. Geothermal Resource Assessment,” Presentado a Empresas Públicas de Medellín E.S.P. 2016.
- [38] J. A. O. González, J. L. Palacio, “Wellhead power plants, an option to enhance the “Macizo Volcánico del Ruiz” Geothermal Project,” *Proceedings World Geothermal Congress*, 2021.
- [39] J. Bonafin, F. Felice, A. Duvia, “Binary power plants for the high enthalpy well-head generation,” *Proceedings, 7th African Rift Geothermal Conference*, 2018.
- [40] G. Cappetti, “Cerro Pabellón geothermal plant: a success story.,” *GEOLAC*, Santiago de Chile, 2019.
- [41] Ingeniería Strycon S.A.S., “Estudio de impacto ambiental: Proyecto Geotérmico Macizo Volcánico del Ruiz – Etapa exploratoria. Caracterización área influencia – medio socioeconómico,” Informe interno para CHEC grupo EPM, 2016.
- [42] H. M. A. Jiménez, P. S. Pérez, O. V. Madrazo, E. González, P. A. J. Rivera, “Low-Enthalpy Geothermal Food Dehydrator,” *GRC Transactions*, v. 40, pp. 163-168, 2016.
- [43] “Deshidratador Geotérmico de Alimentos”, Grupo de investigación de Desalación y Energías Alternas IIDEA, del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México UNAM, 2021. [En línea]. Disponible en: <http://proyectos2.iingen.unam.mx/IIDEA/deshidratador.html>
- [44] H. A. Jiménez, “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, 2020.
- [45] L. T. Giraldo, G. H. C. Marín, J. A. O. González, “Estudio de aprovechamiento del calor geotérmico residual para la deshidratación de alimentos dentro del proyecto Macizo Volcánico Nevado del Ruiz” CHEC-grupo EPM, 2022.
- [46] “British Columbia Utilities Commission – Indigenous Utilities Regulation Inquiry – Project No. 1598998 Final Report”, British Columbia Utilities Commission, 2020.

[47] W. L. Lund, Milk pasteurization with geothermal energy. GHC bulletin, 1997.

[48] Ultra-High Temperature (UHT) Pasteurisation, “The UHT pasteurisation process,” 2021. [En línea]. Disponible en: <https://uht-pasteurisation-foodtech9.weebly.com/uht-pasteurisation-process-q1.html>

[49] E. F. M. Ramírez, “Estudio de factibilidad para el aprovechamiento de calor residual en el proyecto planta geotérmica Valle de Nereidas, a construirse en el Macizo Volcánico del Ruiz,” Proyecto fin de master, Universidad Autónoma de Occidente, 2022.

[50] J. S. P. González, “Calefacción para un Eco-Hotel y una vivienda familiar, proyecto geotérmico Macizo Volcánico del Ruiz,” Informe interno CHEC grupo EPM, 2021.

[51] R. J. H. Rolón, “Análisis financiero de sistemas de calefacción geotérmica,” Informe interno CHEC grupo EPM, 2021.

[52] M. Jover, S. Martínez, A. Tomás, L. Pérez, “Propuesta metodológica para el diseño de instalaciones piscícolas,” Grupo de Investigación en Recursos Acuícolas, Departamento de Ciencia Animal, Universidad Politécnica de Valencia, 2003.

[53] J. S. P. González, “Análisis técnico del sistema acuapónico con calefacción geotérmica,” Informe interno CHEC grupo EPM, 2021.

[54] R. J. H. Rolón, “Análisis Financiero del sistema acuapónico con calefacción geotérmica,” Informe interno CHEC grupo EPM, 2021.