

Facultad de Ciencias Agrarias

Universidad Nacional de Cuyo



Ingeniería en Recursos Naturales Renovables

Tesis de grado

Energía Geotérmica de Baja Entalpía: Comprobación de presencia y análisis conceptual de aprovechamiento.

Alumno: Santilli, Fabrizio Antonio

Director: Nacif, Daniel Héctor

Co-director: Rojas, Daniel

Contenido

1) Resumen	5
1.1) Palabras clave	5
2) Summary	5
2.1) Key words.....	6
3) Lista de gráficos.....	6
4) Lista de tablas	7
5) Lista de siglas y acrónimos.....	7
6) Anexos	8
7) Introducción.....	8
8) Objetivos.....	10
8.1) Objetivo general	10
8.2) Objetivos específicos.....	10
9) Justificación.....	10
10) Marco teórico o antecedentes	13
10.1) Geotermia.....	13
10.2) Clasificación de la energía geotérmica	14
10.1.1) Alta entalpía	15
Energía Geotérmica de alta entalpía en la Argentina	18
10.1.2) Muy baja entalpía.....	18
Captación de la energía geotérmica de baja entalpía.....	22

Captación vertical	23
Captación horizontal	23
Pozos canadienses o provenzales.....	23
La bomba de calor geotérmica.....	24
10.1.3) Termodinámica geotérmica.....	25
10.1.4) Aprovechamiento	29
10.1.5) Ecuación diferencial.....	30
11) Materiales y metodología	32
11.1) Objetivo: Análisis exploratorio de la manifestación de energía geotérmica de baja entalpia, en el perfil de suelo hasta 3 metros de profundidad.	34
11.2) Objetivo: Descripción de dispositivos de aprovechamiento de la energía geotérmica de baja entalpia. Resultados de mediciones, realizadas en los diferentes métodos, y conclusiones.	37
11.1.1) Discusión y propuestas para extraer y distribuir aire caliente del suelo hacia el cultivo	37
11.1.2) Determinar la pérdida de carga de una corriente de aire en un medio de gravas y el aporte energético del medio al fluido.	37
11.1.3) Realizar un túnel de tierra a 1,5 m de profundidad, hacer circular una corriente de aire a través de él y medir las temperaturas de entrada y salida del mismo.	40
11.1.4) Objetivo: Procesamiento de la información obtenida, extracción del modelo físico–matemático que describa el proceso geotérmico de baja entalpia que es aprovechado; diseño de nomogramas que registren los resultados obtenidos.	41
Primera aproximación	46
Segunda aproximación.....	46

Tercera aproximación.....	48
Cuarta aproximación	49
12) Análisis de resultados y discusiones	53
12.1) Objetivo: Análisis exploratorio de la manifestación de energía geotérmica de baja entalpía, en el perfil de suelo hasta 3 metros de profundidad.	53
12.2) Objetivo: Descripción de dispositivos de aprovechamiento de la energía geotérmica de baja entalpía. Resultados de mediciones, realizadas en los diferentes métodos, y conclusiones.	58
12.1.1) Discusión y propuestas para extraer energía del suelo	58
12.1.2) Determinar la pérdida de carga de una corriente de aire en un medio de gravas y el aporte energético del medio al fluido.	62
12.1.3) Realizar un túnel de tierra a 1,5 m de profundidad, hacer circular una corriente de aire a través de él y medir las temperaturas de entrada y salida del mismo.	62
12.1.4) Objetivo: Procesamiento de la información obtenida, extracción del modelo físico–matemático que describa el proceso geotérmico de baja entalpía que es aprovechado; diseño de nomogramas que registren los resultados obtenidos.	65
13) Conclusiones.....	68
14) Bibliografía.....	70

1) Resumen

El actual aumento de concentraciones de gases de efecto invernadero, el agotamiento y encarecimiento de combustibles fósiles, y el cuidado del ambiente, son los motivos principales por los cuales el uso de las energías a partir de fuentes renovables está incrementando.

La energía geotérmica es un tipo de energía potencialmente renovable. La misma presenta varias tipologías, siendo la de baja entalpía la que posee mayor disponibilidad en todo el mundo. Este tipo de energía se puede utilizar para climatizar ambientes, durante todo el año, debido a la estabilidad térmica que la misma brinda.

Se ha realizado un análisis del recurso presente en los primeros metros de profundidad de suelo, bajo determinadas condiciones externas y de extracción, y dentro de estas circunstancias se obtuvieron datos de temperatura de suelo, y de aire (tanto arriba como debajo de la tierra), los cuales, luego de ser estudiados, fueron comprobados matemáticamente y pudieron brindar un ábaco que sirve como herramienta para ser utilizado en distintos aprovechamientos utilizando el prototipo elaborado, pudiendo reflejar en la realidad práctica las investigaciones realizadas.

1.1) Palabras clave

Geotermia - Termodinámica - Temperatura – Suelo – Climatización

2) Summary

The actual increase of greenhouse gases concentrations, the decrease and price rising of fossil fuels, and the environment care, are the most relevant causes of the growing use of renewable energies.

Geothermal energy is a potentially renewable energy. This presents some variations, being the low enthalpy geothermal energy the most available in the world wide. This kind of energy can be used to acclimatize surroundings, through the year, thanks to its high thermic stability.

An analysis of the existent resource in the first meters of soil depth has been made, under certain external and extraction conditions, and into this circumstances there was obtain soil, and air (above and beneath the ground) temperature data, which, after being studied, was mathematically verified and it was able to bring an abacus that's useful as a tool to be used in different exploitations, reflecting the investigations performed in a practicing reality.

2.1) Key words

Geotherm - Thermodynamics – Temperature – Soil - Climatation

3) Lista de gráficos

[Gráfico nº 1: Cambios en la temperatura del suelo en función de la profundidad](#)

[Gráfico nº 2: Procedencias de la energía geotérmica de muy baja entalpía](#)

[Gráfico nº 3: A la izquierda, método de captación vertical, a la derecha, captación horizontal](#)

[Gráfico nº 4: Ubicación geográfica del sitio de experimentación](#)

[Gráfico nº 5: Finalización de construcción de pozo.](#)

[Gráfico nº 6: Termómetros de lectura directa: pantallas de lectura a la vista y bulbos de medición enterrados, previa construcción de casilla protectora de hormigón.](#)

[Gráfico nº 7: Relleno de peine de infiltración con piedra bola.](#)

[Gráfico nº 8: Prototipo en funcionamiento.](#)

[Gráfico nº 9: tubería unitaria en una envoltura de tierra.](#)

[Gráfico nº 10: Nomograma para la determinación de la relación de velocidades de aire \(K\).](#)

[Gráfico nº 11: Mediciones de temperatura a lo largo de toda la experimentación.](#)

[Gráfico nº 12: Curvas de temperaturas de suelo hasta 3 metros de profundidad.](#)

[Gráfico n° 13: Esquema de la idea inicial del intercambiador energético con medio de piedras bola.](#)

[Gráfico n° 14: Esquema del concepto de intercambio energético por termosifón.](#)

[Gráfico n° 15: Curvas de temperatura en la entrada y salida de túnel de tierra a 1,5 m de profundidad.](#)

4) Lista de tablas

[Tabla n° 1: Clasificación de la energía geotérmica según entalpía y tecnología empleada para su uso](#)

[Tabla n° 2: Conductividad térmica y capacidad térmica volumétrica para diferentes tipos de rocas y materiales](#)

[Tabla n° 3: Permeabilidad, conductividad y capacidad térmica para cada tipo de suelo](#)

[Tabla n° 4: Temperaturas de suelo hasta 3 metros de profundidad.](#)

[Tabla n° 5: Valores referenciales de temperatura hasta 3 metros de profundidad.](#)

[Tabla n° 6: Valores referenciales de temperatura en túnel de tierra a 1,5 m de profundidad.](#)

[Tabla n° 7: Valores para los datos de análisis](#)

[Tabla n° 8: Valores de parámetros notables del cálculo](#)

5) Lista de siglas y acrónimos

FCA: Facultad de Ciencias Agrarias

UNCuyo: Universidad Nacional de Cuyo

WEC: World Energy Council (Consejo Mundial de Energía)

EEUU: Estados Unidos

YPF: Yacimientos Petrolíferos Fiscales

GEI: Gases de Efecto Invernadero

RAE: Real Academia Española

EGEC: European Geothermal Energy Council

IGA: International Geothermal Association

\$: pesos argentinos (moneda oficial de la República Argentina)

US\$: dólares estadounidenses (moneda oficial de los Estados Unidos)

We: Watt eléctrico

Wt: Watt térmico

6) Anexos

Anexo 1: “Temperaturas suelo hasta 3 metros de profundidad”

Anexo 2: “Temperaturas del intercambiador subterráneo, a 0 m y a 1,5 m de altura”

Anexo 3: “Datos y planilla de cálculos”

Anexo 4: “Nomograma”

7) Introducción

La presente tesis, forma parte de un macro-proyecto de investigación de índole particular, titulado: “Defensa activa contra heladas. Utilización de energía geotérmica de baja temperatura”, llevado a cabo en la Facultad de Ciencias Agrarias (FCA), desde el mes de Abril del año 2012, hasta el mismo mes del año 2014, por parte de un equipo de trabajo liderado por el Ingeniero Agrónomo Daniel Rojas, y conformado por los estudiantes de Ingeniería en Recursos Naturales Renovables, Herrera Maximiliano, Ojeda Nuria Magdalena, Santilli Fabrizio Antonio y Tobar Federico Alan, y los profesores de la cátedra de física de la FCA, Nacif Daniel Héctor y Remugnán Daniel.

Dicho macro-proyecto busca utilizar la energía calórica del suelo a distintas profundidades para modificar la temperatura de un fluido caloportador, el cual, distribuido convenientemente en cultivos de vid, evite los daños provocados por la ocurrencia de heladas agroclimáticas.

Sin embargo, la presente tesis de grado, no ahondará en el tema de las heladas agroclimáticas, y se dedicará íntegramente a sentar las bases, principalmente físicas, de la energía geotérmica de muy baja entalpía, aportando información útil para luego poder realizar variadas aplicaciones a partir de la información que la misma brinde, por ejemplo para la climatización de ambientes residenciales, comerciales, gubernamentales, académicos y/o industriales.

Las investigaciones mediante las que se obtuvo toda la información para desarrollar la presente tesis de grado, se realizaron en la Facultad de Ciencias Agrarias (FCA), ubicada en la calle Almirante Brown con numeración 500, en la localidad de Chacras de Coria, cuyo código postal es 5505, y forma parte del departamento de Lujan de Cuyo, provincia de Mendoza, Argentina. Dicha casa de estudios pertenece a la Universidad Nacional de Cuyo (UNCuyo).

La financiación disponible para realizar las investigaciones provino de un particular, precisamente del líder del equipo de investigación, el Ingeniero Agrónomo Daniel Rojas, ex profesor y jefe de la cátedra de Mecánica Agrícola de la FCA.

8) Objetivos

8.1) Objetivo general

Revisión de las bases físicas de la energía geotérmica de muy baja entalpía, y análisis conceptual de aprovechamiento.

8.2) Objetivos específicos

- Análisis exploratorio de la manifestación de energía geotérmica de muy baja entalpía, en el perfil de suelo hasta 3 metros de profundidad.
- Descripción de dispositivos de aprovechamiento de la energía geotérmica de muy baja entalpía. Resultados de mediciones, realizadas en los diferentes métodos, y conclusiones.
- Procesamiento de la información obtenida, extracción del modelo físico–matemático que describa el proceso geotérmico de baja entalpía que es aprovechado; diseño de nomogramas que registren los resultados obtenidos.

9) Justificación

El hombre, en la Argentina y el mundo en general, presenta una dependencia creciente de la energía, en todas sus formas, pero principalmente eléctrica. Esta dependencia es impulsada por el crecimiento demográfico y socioeconómico, es decir, aumenta el número de consumidores, y la cantidad de energía eléctrica consumida por cada uno de ellos. Esto trae como consecuencia una situación de incremento (actual y pronóstico) en el consumo energético, a un ritmo aproximado del 1,8% a nivel mundial, entre los años 2000 a 2030 (Comisión Europea, 2003).

La mayoría de los gases de efecto invernadero (CO_2 , CH_4 , NO_x , SO_x) emitidos antrópicamente, provienen de la quema de combustibles fósiles en procesos de obtención de energía mecánica o eléctrica (Fundación Bariloche, 2010).

A los niveles de consumo actuales, las reservas mundiales de petróleo, correspondientes a 223.000 millones de toneladas, podrían acabarse dentro de medio siglo y las de gas (209 billones de metros cúbicos) dentro de 100 años. Otro recurso, el carbón, cuyas reservas mundiales se estiman en 891.000 millones de toneladas, podrá satisfacer las necesidades de la población del planeta durante los próximos 100 años. Según el WEC, el carbón sigue siendo la principal fuente de producción de electricidad en el mundo. Por ejemplo, en China, el 79% de electricidad se produce por la quema de carbón, mientras que en EE.UU. este índice alcanza el 40%, a pesar de que esta es una de las fuentes de energía más sucia. Sin embargo, aun conociendo la escasez del recurso y su impacto ambiental, según los pronósticos, la demanda de carbón en el mundo se incrementará en un 25% hasta el año 2020. Debido a esto se estima que las energías renovables tendrán un papel clave en el desarrollo del sector energético mundial (WEC, 2013).

Desde Septiembre del 2013 al mismo mes del año 2014, las naftas aumentaron un 60% a nivel nacional. En la Ciudad de Buenos Aires, en el mes de septiembre del 2014, el litro de nafta súper en las estaciones de servicio de YPF (Yacimientos Petrolíferos Fiscales) ya se situaba en \$11,91; la Premium en \$13,41; el gasoil en \$10,82, y su versión más sofisticada, el euro diésel, en \$12,40. Pese a eso, sus precios siguen entre los más bajos del mercado (Pablo Fernández Blanco, 2014).

Desde el año 2003 se presenta en el país un creciente déficit energético, ocasionado por falta de inversión, falta de exploración de nuevas fuentes, caída de reservas de hidrocarburos, ineficientes subsidios energéticos, aumento de consumo de energía eléctrica, ausencia de reales incentivos a las energías de fuentes renovables, entre otros., (Gonzalez, 2013; Guadagni, 2014). Durante el año 2011, el gobierno nacional invirtió 9.000 millones de dólares estadounidenses (US\$) en importación de combustibles (Diario MDZ, 08/2015) y luego en el siguiente año se invirtieron más de 11.000 millones de US\$ (De Santis, 12/2012).

Dicho lo anterior, podemos deducir que en la actualidad, se torna cada vez más importante el uso de energías de fuentes renovables debido al aumento en la concentración de gases de efecto invernadero

(GEI), cuya propuesta de disminución fue acordada por múltiples países en los últimos tratados internacionales, como el protocolo de Kyoto, también debido a la necesaria protección de la atmósfera y del ambiente en general, la disminución de reservas de hidrocarburos y por ende el aumento constante del precio del barril de petróleo, el aumento en el consumo energético, y a nivel nacional, el déficit energético.

Las energías renovables como la energía geotérmica, solar térmica, solar fotovoltaica, de la biomasa, eólica, etc., permiten obtener energía en muchas de sus formas de expresión, como son energía química, calórica, mecánica y/o eléctrica, y además, algunas de estas energías renovables, como es el caso particular de la energía geotérmica de baja entalpía, permiten disminuir el consumo de otros tipos de energía, es decir, que eficientizan el consumo de energía eléctrica.

El aumento de la utilización de las energías renovables dentro del panorama energético internacional va de la mano de un incremento considerable de la actividad empresarial en este sector y por tanto un aumento significativo de puestos de trabajo y desarrollo de tecnologías industriales, algo sumamente importante en nuestro país.

La creciente demanda de una estrategia para enfrentar el reto de los problemas energético-ambientales a nivel mundial lleva a la necesidad de investigar y desarrollar conocimientos sobre el uso de los recursos naturales renovables como potencial fuente energética, formando para ello, profesionales a la altura de la situación, y que estén capacitados para estudiar la viabilidad técnica y económica de los distintos proyectos de energías renovables y su impacto ambiental.

10) Marco teórico o antecedentes

10.1) Geotermia

Esta es una palabra de origen griego, derivada de "geos" que quiere decir tierra, y de "thermos" que significa calor: el calor de la tierra (Llopis Trillo, 2008).

El calor es una forma de energía, y la energía geotérmica es, literalmente, el calor contenido en el interior de la tierra, la cual genera un fenómeno geológico a escala planetaria (Dickson, 2004).

La valoración de recursos geotérmicos puede definirse como la estimación de recursos de energía geotérmica que pueden llegar a estar disponibles para ser utilizados, dadas determinadas suposiciones razonables sobre tecnología, economía, política, y contrastes ambientales. Esta valoración implica no únicamente determinar cómo está distribuida, sino también cuanta de esta energía puede ser extraída para ser utilizada por el hombre. El recurso propiamente dicho, es la energía térmica ubicada a profundidades que sean lo suficientemente someras como para poder acceder a ellas mediante perforaciones de manera tecnológica, legal y económicamente viables.

Debido a que la preocupación sobre el impacto que tienen las actividades humanas sobre el ambiente ha crecido, es que hay un aumento en el foco que se hace en el papel que juegan las energías de fuentes renovables para proveer energía limpia. La energía geotérmica es una de las mejores alternativas a las energías de fuentes tradicionales, debido a que es renovable, una fuente energética casi infinita y es independiente de las fluctuaciones estacionales o las condiciones climáticas (Bonté, 2012).

10.2) Clasificación de la energía geotérmica

Por su temperatura o entalpía la energía geotérmica se puede clasificar de la siguiente manera:

Tabla n° 1: Clasificación de la energía geotérmica según entalpía y tecnología empleada para su uso (Elaboración propia a partir de Vercelli, 2012).

Tipo de Yacimiento	Rango de temperatura (°C)	Uso principal	Tecnología
Muy baja entalpía	5 a 25	Climatización	Bomba de calor
Baja entalpía	25 a 100	Balnearios, climatización	Bomba de calor, uso directo
Media entalpía	100 a 150	Electricidad	Ciclo binario
Alta entalpía	mayor a 150	Electricidad	Ciclo binario, uso directo

La entalpía, la cual puede ser considerada más o menos proporcional a la temperatura, es utilizada para expresar el calor (energía térmica) contenido en los fluidos, y da una idea aproximada de su valor (Dickson, 2004). Según la Real Academia Española, la entalpía es una magnitud termodinámica de un cuerpo, igual a la suma de su energía interna más el producto de su volumen por la presión exterior (RAE, 2014). Además se la puede expresar como la cantidad de energía térmica que un fluido, o un objeto, puede intercambiar con su entorno. Se expresa en kJ/kg o en kcal/kg (Llopis Trillo, 2008).

Debido a que no existen aparatos que determinen directamente la entalpía de un fluido en el subsuelo, pero si existen sondas térmicas que miden la temperatura, y como la entalpía y la temperatura pueden considerarse, más o menos, proporcionales, la práctica habitual ha generalizado el empleo de las temperaturas de los fluidos geotermales en lugar de su contenido calorífico, pues, al fin y al cabo, son las temperaturas las que determinan su futura aplicación industrial (Llopis Trillo, 2008).

El uso directo del calor, es una de las más viejas, versátiles y comunes formas de uso de la energía geotérmica. Hay varios usos, actuales y futuros, para esta energía alrededor del mundo, algunos de

ellos son el calentamiento de ambientes y comunas enteras, aplicaciones en agricultura, acuicultura y usos industriales (Dickson, 2004).

Muchos de los conceptos relacionados con la energía geotérmica, corresponden a la energía geotérmica de alta entalpía, debido a que esta es la más conocida, y por ende aprovechada, a nivel mundial. A continuación se describe la misma a fines de terminar de comprender el concepto de energía geotérmica y poder discriminar entre las dos grandes clasificaciones (y usos): alta y baja entalpía, y finalmente dedicarnos íntegramente a las investigaciones realizadas, las cuales corresponden a la rama de la geotermia de muy baja entalpía.

10.1.1) Alta entalpía

En algunas zonas del planeta podemos encontrar (con relativa facilidad y dependiendo de la topografía) que esta energía calórica afecta a grandes volúmenes de suelo o napas de agua. En algunos casos el agua entra en ebullición y encuentra escape a la superficie como grandes chorros de vapor. En otros casos el calor está almacenado en la tierra y las piedras, y para extraerlo se inyectan toneladas de agua que se evaporan y vuelven a la superficie con un gran nivel energético (Vercelli, 2012).

La zona geotérmica es una definición geográfica, que usualmente indica un área con actividad geotermal en la superficie terrestre. En casos sin actividad superficial, este término se puede utilizar para indicar el área de la superficie que corresponde al reservorio geotermal que se encuentra debajo (Dickson, 2004).

La presencia de volcanes, aguas termales, y otros fenómenos térmicos deben haberle dado la pauta a nuestros ancestros que ciertas zonas del interior de la tierra eran calientes. Sin embargo, no fue hasta un período entre los siglos XVI y XVII, cuando las primeras minas fueron excavadas a unos pocos cientos de metros debajo del nivel del suelo, que el hombre dedujo, por una simple sensación física, que la temperatura de la tierra incrementaba con la profundidad. Las primeras medidas con termómetro fueron realizadas en el año 1740, pero recién en el siglo XX, con la comprensión del papel que juega

el calor radiológico, se pudo entender completamente el fenómeno del balance de calor y la historia térmica de la tierra (Dickson, 2004).

Continuamente se genera calor por el decaimiento de los longevos isotopos radioactivos de Uranio (U238, U235), Torio (Th232) y Potasio (K40), presentes en la tierra. Además del calor radiológico, en proporciones inciertas, se encuentran otras fuentes potenciales de calor, como es la energía primordial existente desde la formación del planeta tierra. En la década de 1980 se demostró que no hay un equilibrio entre el calor radiológico generado en el interior de la tierra y el calor disipado al espacio desde la tierra, y que nuestro planeta se está enfriando muy lentamente (350 °C en tres billones de años, permaneciendo en 4000 °C) (Dickson, 2004).

Teniendo en cuenta un promedio de temperatura asumida para la superficie, de 15 °C, la tierra posee una cantidad de energía correspondiente a los $12,6 \times 10^{24}$ MJ, de los cuales hay $5,4 \times 10^{21}$ MJ en la corteza. Dicho esto, la energía térmica de la tierra es inmensa, pero solo una porción puede ser utilizada por el hombre, al menos hoy en día. Hasta ahora el uso que le damos a esta energía ha sido limitado a áreas donde las condiciones geológicas permiten el uso de un portador (agua en fase líquida o vapor) para transferir el calor desde las zonas profundas y calientes hasta la superficie o cerca de ella, permitiendo de esta manera que la energía geotérmica sea un recurso (Dickson, 2004).

El recurso geotérmico de alta entalpía se puede aprovechar por utilización directa del calor para calefaccionar, o por medio de la generación de electricidad a partir del uso del vapor en turbinas. En el caso de la generación de energía eléctrica, las instalaciones son similares a las de las centrales térmicas, la diferencia es que el vapor no se genera quemando derivados del carbón, petróleo o gas sino que se obtiene directamente de la energía geotérmica (Farré, 2006).

Para poder considerar al recurso geotérmico como una fuente de característica renovable la extracción nunca debe superar el valor de la recarga natural de agua que alimenta el acuífero (Farré, 2006).

Un uso sustentable requiere un manejo eficiente con el fin de evitar una sobreexplotación, la cual suele suceder cuando hay falta de conocimientos y un bajo nivel de comprensión, así como en situaciones cuando hay varios usuarios utilizando el mismo recurso, sin un manejo en común. Realizar un uso eficiente de la energía disponible, así como un cuidadoso monitoreo y modelización, son ingredientes esenciales en un manejo sustentable. La reinyección del agua extraída como vapor, es algo esencial para un aprovechamiento sustentable de los sistemas geotérmicos, los cuales son virtualmente cerrados y con una recarga limitada, y la misma permite mantener el agua y por ende la presión del reservorio en niveles adecuados (Axelsson, 2004).

Existe en la actualidad un creciente interés en la exploración y el desarrollo de nuevas plantas de generación de electricidad basadas en este tipo de energía. Las principales ventajas de la explotación de este tipo de energía son (Vercelli, 2012):

- Ahorro en el uso de combustibles fósiles
- Produce 1/6 de emanaciones de CO₂/kWh en relación a una central térmica a gas natural (Farré, 2006).
- Es una fuente inagotable de energía (en la escala temporal de la humanidad)
- No provoca contaminación ambiental
- Produce mínimo impacto visual y auditivo
- Se traduce en enormes cantidades de energía eléctrica
- La inversión necesaria es relativamente baja
- No tiene ciclos de actividad y reposo, como ocurre con la energía eólica o solar

Hoy en día, las plantas de energía geotérmica para producción de energía eléctrica, existen en todos los continentes, en todos los lugares donde se puedan encontrar reservorios de vapor o agua caliente. La capacidad instalada en Europa se encuentra aproximadamente en 1,6 GWe (Giga Watts eléctricos), de los cuales, 0,9 GWe corresponden a países de la unión europea. Los recursos principales se encuentran lejos de estar completamente explotados, inclusive en Europa. La tierra se encuentra

repleta de energía. Virtualmente cualquier nivel de temperatura subterránea puede ser utilizado directamente, por ejemplo, con perforaciones profundas. A través de perforaciones profundas hay casi 4,5 GWt (Giga Watts térmicos) que se podrían aprovechar en Europa, ayudando a tener un ambiente limpio por remplazo de hidrocarburos, sin embargo solo es utilizada una pequeña fracción del recurso (EGEC).

Energía Geotérmica de alta entalpía en la Argentina

Los yacimientos de calidad en la Argentina se encuentran en la zona cordillerana. Allí las condiciones naturales: los volcanes y las montañas, nos suministran los elementos geotérmicos básicos: rocas subterráneas calientes y caudalosos acuíferos subterráneos formados por las aguas del deshielo y de las lluvias. Existen actualmente 6 grandes zonas, actualmente bajo estudio de factibilidad por la Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación, y estos son: Copahue-Caviahue (Neuquén), Domuyo (Neuquén), Tuzgle (Jujuy y Salta), Río Valdez (Tierra del Fuego), Bahía Blanca (Buenos Aires), y Caimancito – La Quinta – El Palmar (Jujuy) (Farré, 2006).

10.1.2) Muy baja entalpía

En esta categoría se encuentra el foco de la presente tesis de grado, de ahora en adelante al hablar de energía geotérmica se estará refiriendo a energía geotérmica de muy baja entalpía.

La temperatura dentro de los primeros metros debajo de la superficie del suelo, suele estar alrededor de los 15°C, y en promedio corresponde a la temperatura media ambiental (Dickson, 2004).

Esta energía térmica, ubicada a pocos metros debajo de la superficie del suelo, tiene el potencial de ser utilizada como energía geotérmica, inclusive si esta se encuentra solo aproximadamente entre 3 a 15 °C. Este sistema está basado en la estabilidad térmica del suelo a pequeñas profundidades (el límite suele estar a los 400 metros de profundidad). En la mayoría de los casos se requiere una bomba de calor, la cual ayuda a aumentar o disminuir la temperatura según lo requiera el sistema, y se puede tanto proveer calor como refrigeración (EGEC, 2013).

Prácticamente la totalidad de la corteza terrestre del planeta constituye un extenso yacimiento de recursos geotérmicos de muy baja temperatura o entalpía, que se ve interrumpido por la presencia de masas de agua continentales o marinas. Debido a que el terreno sirve, por así decirlo, de acumulador de energía solar, la energía geotérmica propiamente dicha no reviste más que un papel secundario (Llopis Trillo, 2008). Otro término que se puede encontrar en la literatura y en páginas web relacionadas es el de geotermia solar. Este término se usa para definir la geotermia de baja entalpía debido a que es el sol el que calienta la capa terrestre (Girodgeotermia, 2008).

En Argentina aproximadamente el 30% de la energía que se consume se utiliza en viviendas y edificios. Cerca de la mitad de esta energía se utiliza en acondicionamiento térmico de ambientes (Iannelli, 2012).

Debido a su alta capacidad calorífica y baja conductividad térmica, la tierra se comporta como un gran colector y acumulador de energía. Su baja conductividad térmica hace que la penetración del calor en el suelo sea muy lenta, al igual que su enfriamiento. De hecho, el terreno actúa como un gran termostato. Las propiedades térmicas del suelo hacen que las variaciones diurnas de la temperatura no penetren más allá de 0.5 m, pero las variaciones anuales de temperatura llegan hasta una profundidad de unos 2 m aproximadamente. Más allá de estas profundidades, la temperatura de la tierra se mantiene constante todo el año, y la misma es muy cercana a la temperatura de confort (Iannelli, 2012).

El confort térmico se define según la norma ISO británica 7730 como: “esa condición de la mente que expresa la satisfacción con el ambiente termal”. Tanto el rendimiento físico como intelectual del ser humano, decae al ser sometido a temperaturas ambientales extremas. Aproximadamente a los 20 °C, el rendimiento del ser humano es máximo (Meneses Pérez, 2007).

La aplicación más común que se le da a la energía geotérmica en la agricultura, es para el calentamiento de invernaderos. El cultivo de vegetales y flores fuera de estación, o en un clima que no es similar a su clima natural, ahora puede realizarse gracias a una amplia y experimentada tecnología.

La utilización de la energía calórica geotérmica en el calentamiento de invernaderos, obteniendo la temperatura óptima de crecimiento, puede reducir considerablemente los costos de operación, los cuales en algunos casos corresponden al 35% del costo del producto (vegetales, flores, plantas domésticas y plántulas de árboles) (Dickson, 2004). Sin embargo, la competencia en el sector energético puede ser considerada bastante injusta con los combustibles fósiles aun recibiendo subsidios, y es requerido apoyo financiero en este mercado emergente (EGEC, 2013). Además de climatizar hogares, invernaderos, edificios residenciales, industriales y comerciales, esta energía se puede aprovechar para acuicultura, crianza de animales, secado de alimentos y maderas, descongelar caminos, entre otros (Llopis Trillo, 2008).

Con sistemas muy simples y de una estructura adecuada, es posible aprovechar el potencial de este reservorio térmico para construir un acondicionador de aire natural, haciendo circular aire a través de tubos enterrados, antes de llegar al interior del ambiente a climatizar, reduciendo de esta manera el uso de energía convencional y las emisiones de gases de efecto de invernadero, generando ambientes confortables térmicamente tanto en invierno (calefacción) como en verano (enfriamiento) (Iannelli, 2012).

Además de las ventajas ambientales, su utilización puede ser un aporte interesante para disminuir nuestras importaciones de energía y preservar nuestros recursos naturales. La implementación de medidas de eficiencia energética podría reducir y hasta eliminar la necesidad de importar gas, generando un importante desarrollo industrial en el país, con la generación de empleos (Iannelli, 2012).

Si hacemos un estudio de la temperatura que tiene el subsuelo a medida que profundizamos en diferentes épocas del año, obtendremos un gráfico como el de la figura n° 2. En él observamos cuatro curvas (Girodgeotermia, 2008):

- Azul: En invierno, a medida que profundizamos, la temperatura va aumentando hasta alcanzar un valor fijo de 10 °C.

- Roja: En verano ocurre lo contrario; a medida que profundizamos la temperatura desciende hasta los 10 °C.
- Verde y amarilla: En primavera y otoño las variaciones son menores, llegándose a alcanzar, en profundidad, el mismo valor de 10 °C.

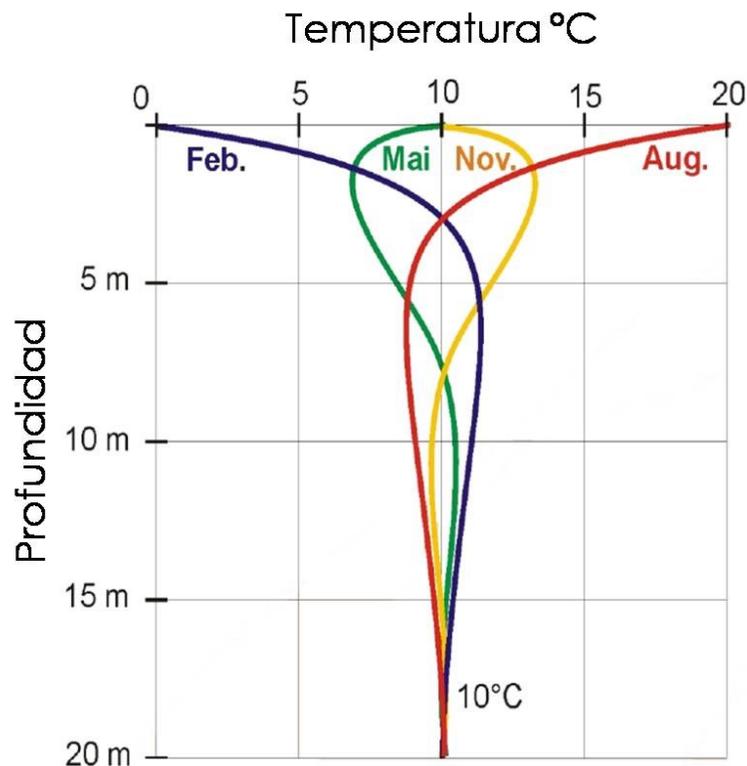


Gráfico n° 1: Temperatura del suelo en función de la profundidad en el hemisferio Norte
(Girodgetermia, 2008).

Este hecho es sumamente importante porque quiere decir que a partir de una determinada profundidad, la temperatura del subsuelo es constante, e independiente de la estación anual en la que nos encontremos y por supuesto, independiente de la hora del día o de la noche. Disponemos por ello, a unos pocos metros de nosotros, de una fuente de energía constante a lo largo de todo el año y accesible en todos los lugares (Girodgetermia, 2008).

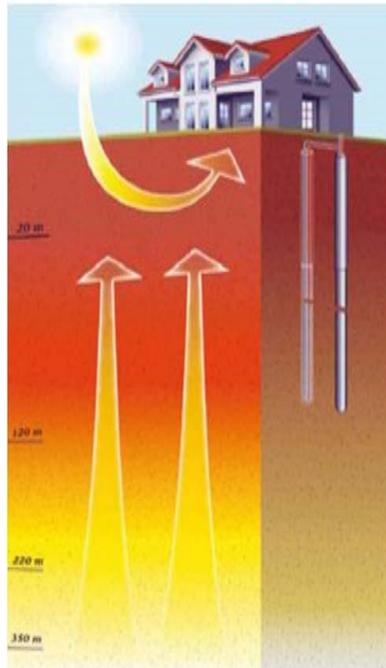


Gráfico nº 2: Procedencias de la energía geotérmica de muy baja entalpía (Girodgeotermia, 2008).

Tal como se observa en la imagen anterior, existen dos grandes fuentes de energía calórica que mantienen dicha temperatura constante, una de ellas es la energía procedente del sol, la cual aporta $1,74 \times 10^{17} \text{ J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, y la otra es la energía terrestre (desintegración isotópica, calor inicial de la formación del planeta tierra, movimientos diferenciales) que aportan $4,2 \times 10^{12} \text{ J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$. A medida que se profundice, mayor importancia adquiere la energía procedente del interior de la tierra. Además, la humedad aportada al terreno aumentará su capacidad de conducción térmica, favoreciendo el intercambio entre captadores y terreno (Girodgeotermia, 2008).

Captación de la energía geotérmica de baja entalpía

Al momento ya sabemos que disponemos de una fuente de energía renovable, al alcance de todos y durante todo el año. Una de las formas de aprovecharla es gracias a la colocación en el terreno de unos captadores de energía por los cuales circulará un fluido (líquido o gaseoso), normalmente agua con anticongelante, que al ponerse en contacto con el subsuelo, captarán o cederán energía como consecuencia de una diferencia de temperatura entre el fluido y el terreno (Girodgeotermia, 2008).

Algunos de los sistemas empleados en la captación de la energía geotérmica son los siguientes:

Captación vertical

Consiste en la ejecución de una o varias perforaciones en las cuales se introducirán los captadores de energía. Su longitud varía entre los 50 m aproximadamente hasta los 200 m. Tienen la ventaja de que ocupan poco espacio y proporcionan una gran estabilidad de las temperaturas. Por el contrario, su ejecución es más cara que otros sistemas de captación (Girodgeotermia, 2008).

Captación horizontal

La captación horizontal consiste en la ejecución de una serie de zanjas en las cuales se colocan los colectores de energía. Su profundidad está comprendida entre los 0,6 m a 1,5 m aproximadamente. Se trata de un sistema más económico que las perforaciones que sin embargo presenta el inconveniente de requerir bastante superficie de terreno, sobre el cual no se podrán plantar árboles de profundas raíces que puedan romper en un futuro los captadores energéticos ni construir plataformas o soleras (Girodgeotermia, 2008).



Gráfico n° 3: A la izquierda, método de captación vertical, a la derecha, captación horizontal

(Girodgeotermia, 2008).

Pozos canadienses o provenzales

A diferencia de los 2 métodos previamente detallados (sistemas cerrados), este método utiliza como fluido de intercambio energético al aire atmosférico (sistema abierto), en lugar de utilizar un fluido líquido.

Este sistema se puede definir como un intercambiador energético aire-tierra. El mismo consta básicamente de un tubo que tiene una salida al interior del ambiente a climatizar y otra al exterior. Este tubo se encuentra enterrado, en contacto con la tierra, con lo cual se extrae aire desde el exterior mediante un ventilador, haciéndolo pasar por el largo del tubo, calentando o enfriándolo dependiendo del período, por ende de la diferencia de temperatura, para luego inyectarlo en el ambiente objetivo (Meneses Pérez, 2007).

En Provenza, Francia, se utilizaba este método para refrigerar las casas, al ingresar, de manera forzada, el aire exterior dentro de túneles, los cuales se encontraban a una temperatura inferior y luego ingresar en el ambiente a climatizar. El mismo método se utilizaba en Canadá pero con el fin inverso, es decir, calefaccionar el ambiente, cuando el aire exterior se encontraba a una temperatura inferior a la de las tuberías o túneles construidos bajo la superficie del suelo; y de allí proviene su denominación (Llopis Trillo, 2008).

Dicho lo anterior, este sistema se puede utilizar también durante todo el año, para calefaccionar en invierno y para refrigerar en verano, siempre y cuando haya un diferencial de temperatura entre el ambiente externo y el sistema subterráneo de intercambio energético.

La temperatura de la energía geotérmica somera (alrededor de los 15 °C), no es exactamente la temperatura de confort térmico humano, es decir, que no se consigue la temperatura adecuada de refrigeración o calefacción con este sistema, sin embargo, este siempre mejorará el rendimiento al partir de una temperatura más próxima a la de demanda (Llopis Trillo, 2008).

La bomba de calor geotérmica

Una bomba de calor es una máquina que mueve el calor, utilizando algún fluido líquido, en sentido opuesto al que tendería a ir naturalmente, por ejemplo, de un espacio o cuerpo frío hacia uno caliente. Esta no es más que una unidad de refrigeración. Todos los dispositivos de refrigeración (aire acondicionado, heladera, freezer, etc.) mueven el calor desde un espacio, para mantenerlo frío, y lo

descargan en otro a una temperatura mayor. La única diferencia entre una bomba de calor y un dispositivo de refrigeración es el efecto deseado, el cual es enfriar para el refrigerador y calentar para la bomba de calor. Una segunda distinción en muchas bombas de calor es que estas son reversibles y pueden tanto calentar como enfriar ambientes. Estas necesitan energía eléctrica para operar, pero en condiciones climáticas adecuadas y con un buen diseño, el balance energético es positivo. Dichas bombas se utilizan en sistemas de climatización, utilizando el suelo como referencia térmica, ubicados a temperaturas que van de los 5 a los 30 °C (Dickson, 2004).

En invierno, el terreno transfiere el calor, el cual es almacenado por el agua con anticongelante, que se utiliza para calefacción, ya que la bomba geotérmica eleva aún más su temperatura. En verano, el agua en circuito cerrado transfiere al terreno el exceso de calor del edificio, de forma que se obtiene refrigeración (Llopis Trillo, 2008).

Todo esto ocurre con un consumo energético muy bajo, es decir, menores emisiones de gases de efecto invernadero, y económicamente viable, lo que se traduce en importantes ahorros económicos. Este proceso permite que se obtenga energía limpia y renovable en una proporción de hasta 1:5, es decir, que por cada kWh que la bomba necesita para operar obtiene 4 kWh de energía “gratuita” de la tierra. En otras palabras, si una casa necesita 32.000 kWh para calentar la casa y el agua sanitaria al año, (equivalente a unos 3 m³ de Gasoil), con la geotermia ahorra 25.600 kWh en costos e impacto ambiental (Girodgeotermia, 2008).

10.1.3) Termodinámica geotérmica

La conductividad térmica es una propiedad característica de cada material que indica su capacidad para conducir el calor. Se expresa en W/(m*°C) (Llopis Trillo, 2008).

El gradiente geotérmico es la variación de temperatura en función de la profundidad, expresado en °C/km. Tiene un valor medio para todo el planeta, de 33 °C/km. Este tiene incidencia desde el núcleo terrestre hasta los 20 metros de profundidad aproximadamente, y desde allí hasta la superficie del suelo, la mayor influencia de energía calórica proviene de la radiación solar (Llopis Trillo, 2008).

El producto de la conductividad térmica y el gradiente geotérmico proporciona el flujo de energía en forma de calor, por unidad de superficie y por unidad de tiempo. Se expresa en W/m^2 . El flujo de calor terrestre es del orden de los $60 mW/m^2$ (Llopis Trillo, 2008).

Los mecanismos por los que se propaga el calor en cualquier medio son (Llopis Trillo, 2008):

- **Conducción:** es la transferencia de calor a través de un medio por interacción entre partículas adyacentes. Puede tener lugar en sólidos, líquidos y gases, aunque suele ser característica de los sólidos, puesto que en gases y líquidos siempre se producirá convección simultáneamente.
- **Convección:** es el modo por el que se transfiere la energía térmica entre una superficie sólida y un fluido adyacente (líquido o gas). Comprende los efectos combinados de la conducción y el movimiento del fluido provocado por las diferencias de densidad del mismo. Las partículas más calientes del fluido y, por tanto, menos densas, ascienden, desplazando a las más frías, que se hunden por gravedad, dado que son más densas, y éstas, posteriormente, al calentarse, son empujadas otra vez hacia arriba. Cuanto más rápido es el movimiento del fluido, mayor es la transferencia de calor por convección.
- **Radiación:** es la emisión de energía en forma de ondas electromagnéticas, como resultado de cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas. Radiación térmica es la radiación emitida por los cuerpos debido a su temperatura. Todos los materiales a temperatura superior al cero absoluto emiten radiación térmica. Los más calientes radian más que los más fríos. Cuando radiación electromagnética choca con un material, sus moléculas se mueven más deprisa, calentando el material. La transferencia de calor por radiación es la más rápida, se hace a la velocidad de la luz, y no sufre atenuación en el vacío.

Para dimensionar un sistema de intercambio de energía geotérmica es importante tener en cuenta la conductividad térmica del terreno, ya que la potencia de extracción debe ser proporcional a la misma, a la humedad del suelo, ya que mejora la conductividad térmica, y a la presencia o ausencia de aguas subterráneas (Llopis Trillo, 2008).

En el suelo, materiales de revestimiento y relleno, y tubos, el calor se transmite por conducción. En el seno del fluido que se utiliza en el sistema de intercambio energético, el calor se propaga por convección, la cual puede ser natural y/o forzada (Llopis Trillo, 2008).

Para la transferencia de calor por conducción, las propiedades físicas más importantes del suelo, rocas y materiales del sistema geotérmico utilizado son la conductividad térmica y la capacidad térmica volumétrica (o calor específico), la cual es la cantidad de calor necesario para elevar la temperatura de 1 m³ de terreno en 1 °C, y se expresa en J/(m³*°C) (Llopis Trillo, 2008).

Para la transferencia de calor por convección, un parámetro importante es la permeabilidad del terreno, la cual es la capacidad de un suelo o roca para ser atravesado por agua, se expresa en m/s (Llopis Trillo, 2008).

A continuación se ilustra una imagen con algunos valores de conductividad térmica y capacidad térmica volumétrica para diferentes tipos de rocas y materiales.

Tabla n° 2: Conductividad térmica y capacidad térmica volumétrica para diferentes tipos de rocas y materiales (Llopis Trillo, 2008).

TIPO DE ROCA	Conductividad térmica (W/mK)			Capacidad térmica volumétrica
	min.	valor típico	max.	(MJ/m³K)
Rocas magmáticas				
Basalto	1,3	1,7	2,3	2,3 - 2,6
Diorita	2,0	2,6	2,9	2,9
Gabro	1,7	1,9	2,5	2,6
Granito	2,1	3,4	4,1	2,1 - 3,0
Peridotita	3,8	4,0	5,3	2,7
Riolita	3,1	3,3	3,4	2,1
Rocas metamórficas				
Gneis	1,9	2,9	4,0	1,8 - 2,4
Mármol	1,3	2,1	3,1	2,0
Metacuarcita		aprox. 5,8		2,1
Micasquistos	1,5	2,0	3,1	2,2
Esquistos arcillosos	1,5	2,1	2,1	2,2 - 2,5
Rocas sedimentarias				
Caliza	2,5	2,8	4,0	2,1 - 2,4
Marga	1,5	2,1	3,5	2,2 - 2,3
Cuarcita	3,6	6,0	6,6	2,1 - 2,2
Sal	5,3	5,4	6,4	1,2
Arenisca	1,3	2,3	5,1	1,6 - 2,8
Rocas arcillosas, limosas	1,1	2,2	3,5	2,1 - 2,4
Rocas no consolidadas				
Grava, seca	0,4	0,4	0,5	1,4 - 1,6
Grava, saturada de agua		aprox. 1,8		aprox. 2,4
Morrena	1,0	2,0	2,5	1,5 - 2,5
Arena, seca	0,3	0,4	0,8	1,3 - 1,6
Arena, saturada de agua	1,7	2,4	5,0	2,2 - 2,9
Arcilla / limo, seco	0,4	0,5	1,0	1,5 - 1,6
Arcilla / limo, saturado de agua	0,9	1,7	2,3	1,6 - 3,4
Turba	0,2	0,4	0,7	0,5 - 3,8
Otros materiales				
Bentonita	0,5	0,6	0,8	aprox. 3,9
Hormigón	0,9	1,6	2,0	aprox. 1,8
Hielo (-10 °C)		2,32		1,87
Plástico (PE)		0,39		-
Aire (0 - 20 °C, seco)		0,02		0,0012
Acero		60,0		3,12
Agua (+10 °C)		0,58		4,19

En la siguiente imagen podemos visualizar los campos de variación de las 3 características previamente mencionadas para los grandes grupos de suelos que se pueden presentar en una zona donde se quiera aprovechar el recurso geotérmico.

Tabla n° 3: Permeabilidad, conductividad y capacidad térmica para cada tipo de suelo (Llopis Trillo, 2008).

Tipo de suelo	Permeabilidad	Conductividad térmica		Capacidad térmica volumétrica	
		(W/mK)		(MJ/m³K)	
	(m/s)	seco	saturado	seco	saturado
Arcilla	10 ⁻⁸ - 10 ⁻¹⁰	0,2 - 0,3	1,1 - 1,6	0,3 - 0,6	2,1 - 3,2
Limo	10 ⁻⁵ - 10 ⁻⁶	0,2 - 0,3	1,2 - 2,5	0,6 - 1,0	2,1 - 2,4
Arena	10 ⁻³ - 10 ⁻⁴	0,3 - 0,4	1,7 - 3,2	1,0 - 1,3	2,2 - 2,4
Grava	10 ⁻¹ - 10 ⁻³	0,3 - 0,4	1,8 - 3,3	1,2 - 1,6	2,2 - 2,4

10.1.4) Aprovechamiento

Pese a la globalidad que se ha enunciado para la disponibilidad de esta energía, su rendimiento puede ser muy diverso, según la temperatura de la que se disponga. Así, si se considera la temperatura del subsuelo según una función F, tal que:

$$T_{sp} = F(T_{ss}, X, K, C_e, t) \text{ (Llopis Trillo, 2008)}$$

Donde:

T_{sp}=temperatura del suelo a una determinada profundidad

T_{ss}=temperatura del suelo en superficie

X=profundidad bajo la superficie

K=conductividad térmica del terreno

C_e=calor específico del terreno

t=tiempo de intercambio de calor

Es evidente que el comportamiento de los terrenos en cuanto a la transmisión del calor a través de ellos y a su capacidad de almacenarlo, condicionarán en gran medida el rendimiento de los aprovechamientos de este tipo de energía (Llopis Trillo, 2008).

Hay dos variables que influirán fuertemente en la optimización del funcionamiento de los intercambiadores por los que circula el fluido caloportador. Una es el material de fabricación de los mismos, los metales son buenos conductores del calor pero estos se corroen y no son flexibles, por lo que se suele optar por el PVC en el caso de usar cañerías. La segunda variable, o mejor dicho, conjunto de variables, es el tiempo de contacto del intercambiador con el terreno y la superficie de contacto con el mismo; para una determinada cantidad de calor a intercambiar, a mayor tiempo de intercambio, menor superficie será necesaria y viceversa (Llopis Trillo, 2008).

Las dos formas más comunes de definir la superficie de contacto, es con el diámetro y la longitud del intercambiador. Esta longitud será una función del calor capaz de ser absorbido o cedido por el terreno, de las temperaturas del suelo y del fluido intercambiador, de la resistencia térmica del terreno y de las características conductivas del material del que está compuesto el tubo captador. Puede formularse una función F, tal que:

$$L_{cap} = F(Q, T_s, T_f, Cap, R_s) \text{ (Llopis Trillo, 2008)}$$

Donde:

L_{cap} =Longitud del captador de calor (superficie/tiempo de contacto)

Q=calor a disipar o captar por el terreno

T_s =temperatura del suelo

T_f =temperatura del fluido de intercambio, generalmente agua glicolada

Cap=morfología y tipo del material captador

R_s =resistencia térmica del terreno (inversa de la conductividad térmica).

10.1.5) Ecuación diferencial

Para el análisis matemático del suelo, se simplifica su geometría al de un sólido semi-infinito y se procede a analizar la propagación de la energía térmica en una recta infinita, lo que nos permite determinar la transferencia de calor transitoria cerca de la superficie de la tierra, para lo cual se utiliza la siguiente ecuación diferencial:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\partial T}{\partial t}$$

La ecuación anterior implica que la transferencia de calor en función de la distancia, depende de la temperatura del terreno y del aire, del tiempo de transferencia y de la difusividad térmica. Dicha ecuación diferencial de derivadas parciales se puede separar y acomodar adecuadamente en expresiones matemáticas para su análisis, separando sus variables, las cuales son independientes entre sí.

Las variables se separan buscando un producto de funciones dependientes, en la que cada una utiliza una sola de las variables. Debido a que las funciones deben respetar la igualdad en la ecuación, para cualquier valor de las variables que las conforman, cada una de estas debe ser igual a una constante.

En dinámica de fluidos, para el campo de flujo, se puede utilizar la especificación lagrangiana, la cual observa el movimiento del fluido desde el fluido mismo, en movimiento (observación dinámica), o la especificación euleriana, la cual lo observa desde un punto fijo, centrándose en lugares específicos del espacio por el cual fluye a medida que pasa el tiempo (observación estática).

La advección es la variación de un escalar (magnitud que carece de dirección) en un punto dado por efecto de un campo vectorial. El operador advección se expresa como el producto escalar del vector velocidad, por el gradiente de la propiedad.

11) Materiales y metodología

Las investigaciones pertinentes se realizaron desde el mes de abril del año 2012, hasta el mes de marzo del año 2014, sin embargo fueron seleccionadas solo algunas actividades, con su respectiva información obtenida, con el fin de dejar el resto de los objetivos y datos disponibles para que el resto de los integrantes del equipo de investigación los utilice en el futuro para realizar sus tesis de grado.

En primer lugar se procedió a hacer un profundo análisis bibliográfico de la energía geotérmica de baja entalpía, todos sus posibles usos y las experiencias a nivel nacional e internacional. Dicha información fue obtenida a partir de fuentes primarias y secundarias, que van desde libros, tesis y publicaciones en diarios, hasta una entrevista personal con ejecutivos de una empresa española dedicada a instalaciones domiciliarias, comerciales e industriales, de equipos de climatización de ambientes a partir del aprovechamiento de la energía geotérmica de muy baja entalpía.

Se midió la temperatura del suelo a distintas profundidades, llegando hasta los 3 metros bajo la superficie de la tierra. Para realizar esto se utilizaron termómetros de lectura directa.

Luego se procedió a diseñar distintos prototipos de aprovechamiento y a seleccionar los que reunieran la mayor cantidad de aptitudes acordes a los objetivos planteados. Una vez seleccionados, se fueron construyendo los distintos modelos y fueron probados realizando las mediciones a campo pertinentes, con el fin de hacer la extracción de la energía geotérmica y medir su potencial.

Los prototipos de aprovechamiento consisten básicamente en distintos túneles subterráneos, los cuales fueron construidos haciendo uso de mano de obra y maquinaria, y por los mismos se hizo circular una corriente de aire impulsada por un ventilador. Se probaron ventiladores de tipo axial y centrífugo.

En los túneles, se midió el intercambio energético, mediante el uso de termómetros provistos de una memoria de almacenamiento de datos (datalogers) dispuestos estratégicamente en diferentes lugares de cada túnel.

La mayoría de las experiencias del proyecto de investigación, y todas las expuestas en esta tesis de grado, se realizaron en la parcela de viñedos pertenecientes a la finca de la Facultad de Ciencias Agrarias, ubicada en la calle Almirante Brown con numeración 500, en Chacras de Coria, del Departamento de Lujan de Cuyo, Mendoza, precisamente en las coordenadas: 33° 0'32.52" S; 68°52'32.99" O.

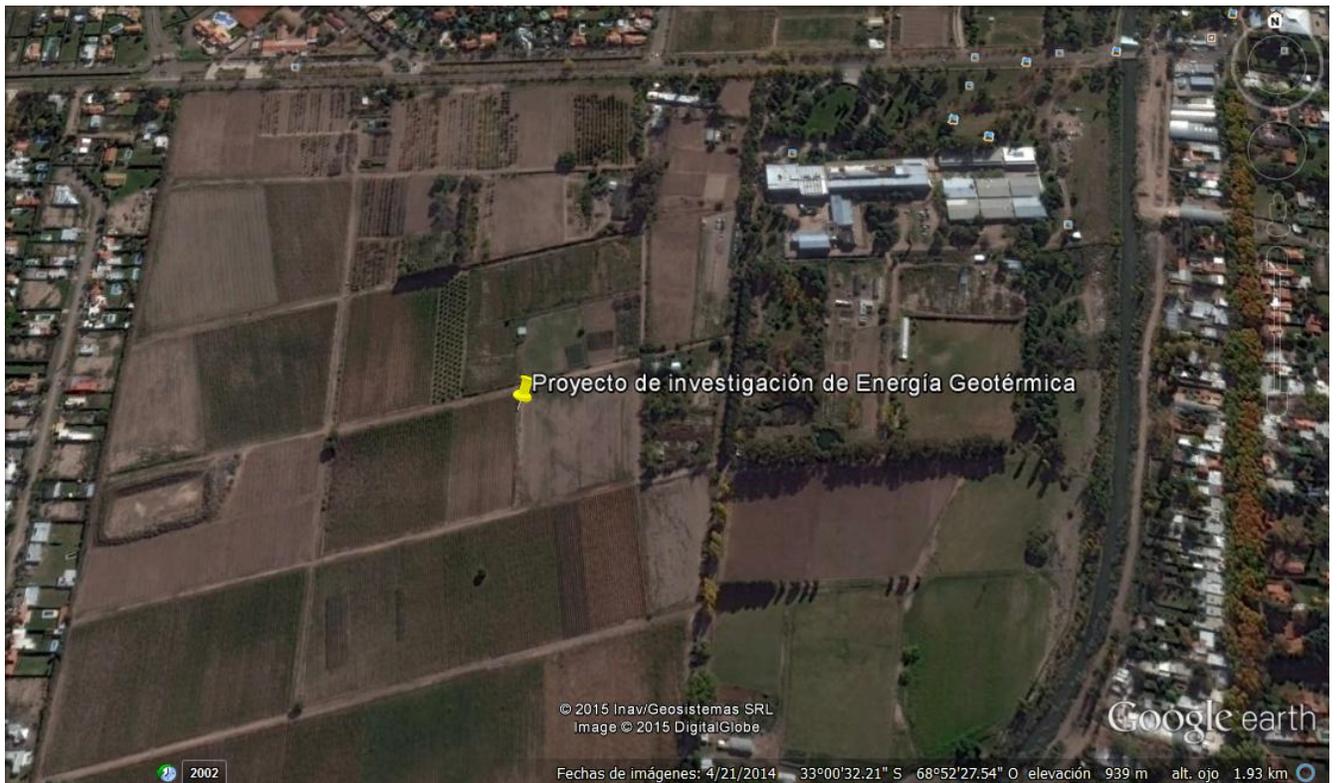


Gráfico n° 4: Ubicación geográfica del sitio de experimentación.

Desde el mes de Abril del año 2014, en adelante, se procede con la recopilación de toda la información obtenida durante los dos años de investigación, su análisis y obtención de conclusiones que permitan cumplir con los objetivos propuestos.

11.1) Objetivo: Análisis exploratorio de la manifestación de energía geotérmica de baja entalpia, en el perfil de suelo hasta 3 metros de profundidad.

En las experimentaciones llevadas a cabo para alcanzar dicho objetivo, las cuales comenzaron en el mes de Junio del año 2012, se buscaba precisamente determinar la temperatura a distintas profundidades del suelo, durante un ciclo invierno-verano.

El método que se utilizó fue el de realizar un pozo de 3 metros de profundidad y colocar cuatro termómetros de lectura directa a distintas profundidades. En primer lugar se procedió a excavar de forma manual, con pico y pala, realizando la excavación con una sección rectangular ligeramente redondeada y con un área de sección lo suficientemente grande de modo que pudiera ingresar una persona agachada cómodamente dentro de ella y se pueda movilizar con facilidad para llevar a cabo la perforación, y a su vez no tan grande para disminuir los riesgos de derrumbe.



Gráfico n° 5: Finalización de construcción de pozo.

El perfil de suelo en el lugar presenta un desarrollo leve, el cual llegaba hasta 1,7 metros de profundidad y a partir de allí comienza un manto gravoso característico de la zona del piedemonte.

Una vez finalizado el proceso de perforación, al llegar a los 3 metros de profundidad, se procedió a ingresar a la excavación los bulbos de medición de los termómetros previamente mencionados. Estos bulbos están unidos, mediante un cable de comunicaciones de 3 metros de longitud, a la pantalla de lectura directa. El primer bulbo se ubicó a una profundidad de 3 metros, es decir, en el fondo de la excavación, para luego comenzar el relleno de esta, con los mismos materiales que en ella se encontraban, tierra y piedras, hasta llegar nuevamente a 2,2 metros de profundidad, donde se ubicó el segundo bulbo de medición de temperatura, y así sucesivamente, a los 1,4 metros y 0,5 metros de profundidad se fueron ubicando el resto de los bulbos de medición. Las pantallas de lectura se colocaron al nivel del suelo, protegidas en una casilla de hormigón contra las condiciones climáticas, paso de vehículos y posibles vandalismos.



Gráfico n° 6: Termómetros de lectura directa: pantallas de lectura a la vista y bulbos de medición enterrados, previa construcción de casilla protectora de hormigón.

Los termómetros utilizados poseen un rango de temperatura de -50°C a $+70^{\circ}\text{C}$, con una exactitud de $\pm 1^{\circ}\text{C}$ y una resolución de $0,1^{\circ}\text{C}$. Los mismos son alimentados por una batería LR44 de $1,5\text{ V}$ de tensión de corriente. El sensor externo o bulbo de medición es a prueba de líquidos, por lo que es apto para las experimentaciones que se llevaron a cabo.

Se realizaron las lecturas de las pantallas con una frecuencia adecuada de modo de poder graficar las variaciones de temperatura durante los meses del año en estudio. Cada lectura se anotó en lápiz y papel, respetando el orden, es decir, la profundidad, de cada termómetro, luego los datos se digitalizaron en planilla Excel para poder hacer un análisis acorde de los mismos.

11.2) Objetivo: Descripción de dispositivos de aprovechamiento de la energía geotérmica de muy baja entalpía. Resultados de mediciones, realizadas en los diferentes métodos, y conclusiones.

A fines de poder realizar el objetivo planteado, durante las experimentaciones se llevaron a cabo varios sub-objetivos.

11.1.1) Discusión y propuestas para extraer y distribuir aire caliente del suelo hacia el cultivo

El mes de Mayo del año 2012 se comenzó a analizar toda la bibliografía disponible sobre energía geotérmica de muy baja entalpía, distintos aprovechamientos de la misma y sobre termodinámica.

Una vez analizado el marco teórico, se comenzaron a discutir los mecanismos preliminares con los que se podría extraer la energía calórica del suelo. Se procedió a diseñar varios prototipos y luego a descartar los que en primera instancia, por motivos técnico-económicos parecían inviables. Se seleccionaron los modelos posibles de ser ejecutados a modo experimental y posteriormente industrial y se propuso una logística para los ensayos pertinentes.

11.1.2) Determinar la pérdida de carga de una corriente de aire en un medio de gravas y el aporte energético del medio al fluido.

El primer prototipo que se eligió para analizar la energía del suelo, consistió en un túnel, relleno con gravas, por el cual circulara una corriente de aire que pudiera extraer dicha energía.

Este modelo se probó casi inmediatamente después de analizar la teoría disponible, en el mes de Junio del año 2012.

La idea para realizar el sistema, consistía en realizar una perforación, a 1,5 metros de profundidad, con un ancho aproximado de 60 centímetros, y un largo de 6 metros. Esta perforación se iba a rellenar con piedra bola hasta una altura de 60 centímetros, quedando una sección de $0,6 \times 0,6 = 0,36$ m², y luego rellenar con el suelo que se encontraba previamente en el lugar de excavación.

En ese momento no se contaba con las herramientas necesarias para realizar dicha obra, por lo que se decidió por montar un prototipo que simulara al anterior, construyendo de esta manera una caja, con las mismas dimensiones planteadas pero a nivel superficial, con paredes de madera y hermeticidad mediante polietileno plástico de 200 micrómetros. Dicha caja/túnel se relleno con piedra bola con un diámetro de 4" a 10".



Gráfico n° 7: Relleno de peine de infiltración con piedra bola.

Mediante un ventilador axial de 1 HP, con conexión trifásica, prestado por la cátedra de física de la FCA, se impulsó aire a presión desde un extremo, midiendo la pérdida de carga en tres puntos equidistantes del túnel, es decir, en la entrada, en la parte central y previo a la salida del mismo.



Gráfico n° 8: Prototipo en funcionamiento.

La pérdida de carga se midió mediante diferencia de nivel de agua en tubo comunicante, colocando una entrada del tubo en el interior del túnel, doblándolo en forma de S, colocando agua dentro del mismo y la otra entrada dejándola en el exterior, es decir, a presión atmosférica. Este método permite medir las diferencias de presión dentro de un ambiente, tomando como referencia la presión atmosférica.

Además se colocaron termómetros con registro de temperatura en memoria de datos programable. Los mismos están equipados con un sensor interno de temperatura, que le otorga un tiempo de reacción rápido a los cambios de temperatura y un indicador lumínico que proporciona advertencia si la temperatura censada se ha salido de los límites establecidos. Posee amplias opciones que permiten la personalización de los valores de alerta para adaptarse a una aplicación en particular. Su rango de temperatura es -40 a 85 °C y su memoria permite almacenar 8000 mediciones, con un intervalo de

medición ajustable. Su carcasa protectora es IP65, lo que permite exponerlo a diversas condiciones climáticas mientras se está utilizando.

Se colocaron 7 termómetros en total, a lo largo de toda la caja, desde la entrada hasta la salida, a 1 metro de distancia uno del otro. Estos se protegieron con espuma de polietileno con el fin de que las piedras del interior de la caja no los afectaran negativamente.

11.1.3) Realizar un túnel de tierra a 1,5 m de profundidad, hacer circular una corriente de aire a través de él y medir las temperaturas de entrada y salida del mismo.

Haciendo uso de una máquina retroexcavadora, en el mes de Agosto del año 2012, se realizó una zanja de 1,5 metros de profundidad, 0,6 metros de ancho y 70 metros de largo.

En un tramo de 15 metros de la misma, el día 16/08/2012, se colocó en el fondo, una manga de polietileno, de sección circular de 10" de diámetro, la cual se selló en un extremo utilizando un alambre y una banda de butilo (pedazo de cámara de moto), se rellenó con agua y se procedió a sellar el otro extremo con los mismos materiales. La manga se rellenó a su máxima capacidad, de modo de mantener la mayor presión interna posible. El fin de colocar la manga plástica y rellenarla, es para utilizarla como soporte interno de la geometría del túnel.

Luego se comenzó a tapar la zanja por capas, con la manga plástica en su interior, utilizando la tierra previamente extraída y humedeciendo la misma para lograr un nivel de compactación similar al natural durante un período prolongado de tiempo, a fines de imitar las condiciones estructurales del suelo en condiciones naturales y además de no romper la manga plástica llena de agua.

Una vez que el suelo situado en la parte superior de la manga plástica se encontró adecuadamente seco y asentado, se procedió a retirar el agua contenida en el interior de la manga, y luego la manga misma, quedando de esta manera un túnel de tierra, sin revestimiento, con dirección Norte-Sur, de 15 metros de largo, 10 pulgadas de diámetro, y a 1,5 metros de profundidad en su punto inferior.

En el extremo Sur del túnel, se colocó un ventilador radial de 1 HP de potencia y conexión trifásica, la cual no estaba disponible en el lugar de emplazamiento por lo que se tuvieron que crear las conexiones pertinentes desde el tendido trifásico instalado en los callejones de la finca de la FCA. Dicho ventilador se utilizó para hacer circular aire a temperatura ambiente durante un lapso prolongado de tiempo y poder medir el intercambio calórico que ocurría entre el túnel y el aire o fluido caloportador.

Mediante los termómetros de registro programable detallados anteriormente, se midió la temperatura del aire en la entrada y salida del túnel y los valores se almacenaron en formato digital con el fin de analizarlos posteriormente.

Las mediciones comenzaron el día 26 de octubre del 2012 a las 7:21 a.m., con una medición por minuto, se detuvieron las mediciones el día 29/10/2012 a las 1:26 p.m. para extraer los datos almacenados y limpiar la memoria con el fin de poder seguir midiendo sin saturar la misma, este proceso duró 10 minutos aproximadamente, y a las 1:36 p.m. se comenzó a medir la temperatura nuevamente, terminando con las mediciones el día 02 de Noviembre del año 2012 a las 12:13 a.m.

11.1.4)Objetivo: Procesamiento de la información obtenida, extracción del modelo físico–matemático que describa el proceso geotérmico de baja entalpía que es aprovechado; diseño de nomogramas que registren los resultados obtenidos.

Nomenclatura a utilizar:

T = Temperatura del suelo [°C]

t = Tiempo [s]

α = Difusividad térmica [m²/s]; $\alpha = \frac{k_s}{\rho_s \cdot c_s}$ es la relación entre la conductividad térmica del suelo

respecto a la capacidad calórica volumétrica de la tierra.

$\rho_s \cdot c_s$ = Capacidad calórica volumétrica de la tierra [J/(m³K)]

ρ_s = Densidad de la tierra [kg/m^3]

c_s = Calor específico de la tierra [$\text{J}/(\text{kg K})$]

Q_w = Corriente de calor del aire [W] (energía suministrada por unidad de tiempo).

\dot{Q} = Corriente de calor de la tierra [W] (energía suministrada por unidad de tiempo).

Δz = Largo del segmento [m]

h_i = Coeficiente de transferencia de calor en la superficie interna del tubo [$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$]

k_a = Conductividad térmica del aire en el tubo [$\text{W}/(\text{m}\text{K})$]

Nu = Número de Nusselt del aire en el tubo

Re = Número de Reynolds del aire en el tubo

Pr = Número de Prandtl del aire (típicamente: $Pr = 0,72$)

ν = Viscosidad cinemática del fluido [m^2/s]

V = Volumen de la tubería [m^3]

B = Razón o relación de transferencia de calor, desde la superficie de la tierra al tubo y desde el flujo de aire, a la pared del tubo.

k_s = Conductividad térmica del suelo [$\text{W}/(\text{m}\text{K})$]

U_L = Coeficiente de transferencia de calor por largo de pared del tubo, entre el aire y la pared del tubo [$\text{W}/(\text{m}\text{K})$]

S_0 = Profundidad de instalación del tubo [m]

R_0 = Radio del tubo en [m]

$T_{E,W}$ = Temperatura de la tierra en la pared del tubo [$^{\circ}\text{C}$]

$T_{A,P}$ = Temperatura del aire en el tubo [°C]

$T_{E,0}$ = Temperatura de la tierra en la pared del tubo, no influenciada por él [°C]

ξ = Parámetro adimensional utilizado para calcular la “profundidad térmica” del tubo, la que depende de la profundidad real en la cual se sitúa el intercambiador junto con las características térmicas de la tierra sobre él. Esta es la profundidad teórica en la que se encontraría la temperatura media ambiental anual, en el terreno.

$$\xi = S_0 \sqrt{\frac{\pi \rho c}{t_0 k_s}}$$

t_0 = Duración de un año [s] (1 año = $31,5 \times 10^6$ [s])

t/t_0 = Fracción de año (con t/t_0 igual a cero para la máxima temperatura ambiental)

$T_{A,0}$ = temperatura ambiental en °C en el tiempo t en s

$T(x, t)$ = Temperatura de la tierra en función de la profundidad y del tiempo [°C]

Q_a = Caudal [m^3/s]

K = Parámetro adimensional que establece la relación entre la velocidad inicial y la velocidad final (V_i/V_f).

T_c = Temperatura crítica (°C)

T_{ob} = Temperatura objetivo (°C)

m = Flujo másico del aire [kg/s]

c_p = Calor específico del aire [kJ/(kg °C)]

δ_a = Densidad del aire

ΔP = Diferencia de presión entre la entrada y la salida del intercambiador energético [Pa]

Con la ayuda de Daniel Nacif, Ingeniero en Electrónica y Electricidad y profesor de la Cátedra de Física de la Facultad de Ciencias Agrarias, basándose en los principios de las leyes de la termodinámica,

extraídos de la bibliografía de apoyo, y tomando como constantes algunas variables, se buscó obtener un modelo matemático simplificado del comportamiento energético del suelo a profundidades someras.

Con todos los datos obtenidos, se procedió a ajustar las constantes, variables y parámetros del modelo matemático con el fin de hacer más simple su uso y aplicación.

En primer lugar se procedió a validar las ecuaciones teóricas presentes en la bibliografía, comparando mediante el uso del método científico, los valores teóricos que estas arrojan, con los valores reales que se obtienen, utilizando los datos resultantes de las experimentaciones.

Cabe mencionar, que como parte del macro-proyecto de investigación del cual forma parte esta tesis de grado, el cual consistió en analizar la posible defensa activa frente a una helada agroclimática utilizando energía geotérmica, se realizaron mediciones de temperatura atmosférica, colocando termómetros con memoria de datos, sin abrigo, desde los 0 metros, hasta los 4 metros de altura. En este objetivo se utilizaron los datos obtenidos desde el día 26/10/2012 a las 8 a.m. hasta el día 02/11/2012 a las 11 a.m., por los termómetros ubicados a 0 metros, y a 1,5 metros de altura, debido a que esta última, es la altura, por convención, en la que se mide la temperatura atmosférica en estaciones meteorológicas.

A fines de analizar los modelos matemáticos teóricos existentes, y corroborar si los datos obtenidos en las experimentaciones se ajustan a los mismos, se procedió a utilizar los datos de temperatura obtenidos en la entrada y la salida del intercambiador geotérmico descrito previamente en el objetivo anterior.

A los efectos de concretar un modelo matemático que nos permita implementar los fenómenos que hemos relatado anteriormente, se tomará una tubería como la ilustrada en la figura a continuación, y un entorno a esa tubería, el cual es el terrón de tierra señalado. En cada plano se puede observar una curva en color rosado, la cual indica el perfil de absorción del calor, el cual no es uniforme. En base a

este esquema, se procederá a argumentar los modelos realizando una serie de aproximaciones. Como primer paso, destacaremos las fuentes de errores.

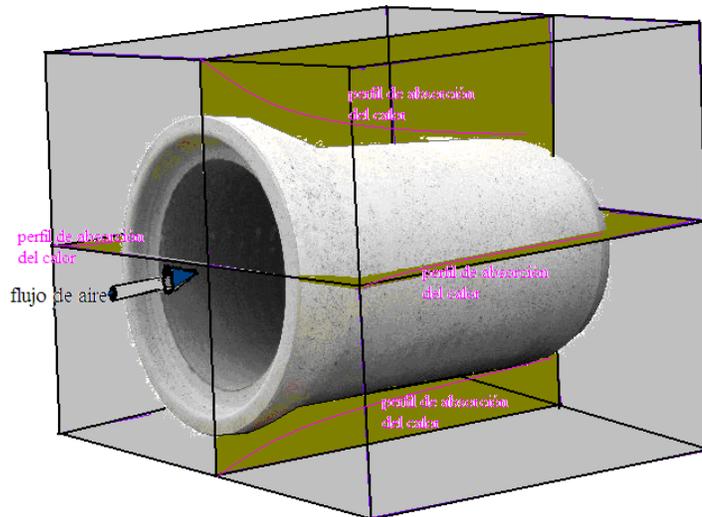


Gráfico n° 9: tubería unitaria en una envoltura de tierra.

Fuente de errores:

1. El calor no ingresa de manera uniforme. La contribución energética posee la forma de un decaimiento exponencial.
2. La forma del túnel no es regular y la turbulencia aumenta con la velocidad del fluido.
3. En la entrada de la tubería hay un espacio muerto, sin transferencia de calor, este es un transitorio violento en un pequeño tramo, por lo que la longitud efectiva de intercambio es menor que la longitud del intercambiador o túnel. Todo esto varía con el diámetro de la tubería y la profundidad en la que esta se ubica.
4. La tubería se desgrana al ser de tierra.
5. El aire y la tierra no siempre poseen las mismas condiciones, se ha presupuesto un valor estimado de humedad para el aire y la tierra, y la textura de esta última.
6. No se han considerado condiciones eventuales, por ejemplo, viento zonda, viento blanco, etc.

Primera aproximación

Se tendrá en cuenta la conductividad térmica del suelo y el calor específico del mismo, como indicadores importantes de nuestra actividad, por lo que el modelo a utilizar es la ecuación de Fourier para tuberías cilíndricas, estimando como el radio menor el del túnel subterráneo, y el radio mayor la profundidad del mismo desde su punto medio. Se considera a la tubería como el terrón de tierra que circunda el intercambiador energético.

En primer lugar se obtiene el promedio de temperaturas a 0 m de altura a partir de los datos obtenidos durante los días en que se realizaron las mediciones de temperatura en el túnel, luego se calcula el promedio de temperaturas en la entrada y salida del túnel durante los 6 días en que se realizaron mediciones. Otro valor que es necesario y se debe calcular es el de la conductividad térmica del suelo, para el cual se considera limo húmedo, y este valor es obtenido de un promedio geométrico entre los valores correspondientes al limo seco y al limo saturado extraídos de tablas estandarizadas ubicadas en la bibliografía (Coronel Toro, 2005).

Los datos previamente mencionados han sido extraídos con el fin de obtener el valor promedio real de la corriente de calor de la tierra.

$$H = 2\pi\kappa_s \frac{(T_a - T_b)}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)} * L$$

Siendo, "a" el radio menor y "b" el radio mayor (Tijonov, 1984).

$H = \dot{Q}$, siendo esta la corriente de calor, o energía suministrada por unidad de tiempo (kWh/h=kW=kJ/s). $H = m * cp * (Tob - Tc)$ (kJ/s)

Se supone un régimen permanente y una transferencia energética unidireccional en dirección radial.

Segunda aproximación

Para la transferencia de calor en el intercambiador de calor aire-tierra, se considera que, tanto la tierra como el aire, son secos.

Para realizar el cálculo, se divide el intercambiador en segmentos iguales (Δz), a los que les daremos el valor de 1 metro. Utilizaremos el coeficiente de traspaso térmico (U_L) por la longitud de la pared del tubo, el cual es equivalente a una conductividad térmica. Este es la corriente de calor por unidad de longitud y por unidad de temperatura (Tijonov, 1984).

Uno de los datos necesarios en la aproximación al modelo, es la temperatura de la tierra en la profundidad del túnel. Debido a que se habían realizado mediciones a 1,4 m de profundidad, y durante los 6 días en que se utilizó la turbina para medir las temperaturas del intercambiador, se efectuaron 4 de estas mediciones, se utilizan estos datos para obtener un promedio que sea de utilidad.

Se utiliza la fórmula a continuación para obtener el valor real, es decir, el valor a partir de datos resultantes de las experimentaciones a campo, del coeficiente U_L . Para esto también es necesario el valor de la corriente de calor de la tierra, previamente obtenido, y las temperatura promedio de la tierra en la profundidad del túnel y del aire.

$$U_L = \frac{\dot{Q}_W}{\Delta z \cdot (T_{E,W} - T_{A,P})}$$

Este indica la cantidad de energía que debe suministrar el suelo para elevar la temperatura del fluido en una unidad, mientras este circula a lo largo del intercambiador energético. Este depende del coeficiente de transferencia de calor en la superficie interna del tubo (h_i), el cual a su vez depende de las características del flujo, de las dimensiones del tubo y de las propiedades del aire en el tubo. Este coeficiente está definido por el número de Nusselt (Nu) del aire en el tubo, el número de Reynolds (Re) y por ende del caudal (Tijonov, 1984).

El número de Nusselt es un gradiente adimensional de temperatura en la superficie. Además éste es un número adimensional que mide el aumento de transmisión del calor desde una superficie por la que el fluido discurre (convección) comparada con la transferencia de calor si esta ocurriera solamente por conducción.

Luego, se procede a obtener el valor teórico del coeficiente de traspaso térmico, para lo cual primero debemos calcular otros parámetros.

A partir de tablas estandarizadas (Coronel Toro, 2005), obtenemos el valor de la viscosidad cinemática, tanto para 15 como para 20 °C, y calculamos el promedio geométrico entre ambos. Con este valor, el diámetro del túnel y las velocidades del aire en la entrada y la salida, medidas en las experimentaciones, conseguimos el número de Reynolds para ambas posiciones.

$$Re = \frac{v_s D}{\nu}$$

Luego, con este valor, y el número de Prandtl, obtenido a partir de la misma tabla (Coronel Toro, 2005), logramos el número de Nusselt, para la entrada y la salida del túnel, y obtenemos un promedio aritmético entre ambos. Además, de la misma tabla mencionada, adquirimos el promedio geométrico de la conductividad térmica del aire, entre 15 y 20 °C.

$$Nu = 0,0214 \cdot (Re^{0,8} - 100) \cdot Pr^{0,4}$$

Finalmente, con el número de Nusselt promedio y la conductividad térmica del aire, calculamos el coeficiente de traspaso térmico teórico.

$$U_L = \pi \cdot k_A \cdot Nu \quad (\text{Tijonov, 1984}).$$

Tercera aproximación

Se define el parámetro “B”, el cual es la razón de transferencia de calor desde la superficie de la tierra

al tubo y desde el flujo de aire a la pared del tubo. $B = \frac{\dot{Q}}{Q_w}$

Fórmula de la cual se deduce: $B = 2\pi \left[\frac{\kappa_s}{U_L} \right] \cdot \frac{1}{\ln \left(\frac{S_0}{R_0} + \sqrt{\left(\frac{S_0}{R_0} \right)^2 - 1} \right)}$

A partir de los valores teóricos y reales del coeficiente de traspaso térmico previamente obtenido, se calculan en este caso los valores teóricos y reales del parámetro adimensional “B”, respectivamente.

El valor B representa el nuevo coeficiente de corrección de conductividad térmica equivalente para el sistema, y es simplemente una razón de transferencia de calor obtenida con las temperaturas involucradas (temperatura de la tierra a la profundidad de instalación $T_{E,0}$, temperatura de la tierra en la pared del tubo $T_{E,W}$ y temperatura del aire en el interior del tubo $T_{A,P}$).

Para averiguar “B”, es utilizada la ley de Fourier, y la ley de enfriamiento/calentamiento de Newton, equivalente a la corriente de calor por unidad de longitud, expresada a través de la siguiente ecuación diferencial:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = ka.(T - T_m) \Rightarrow T(t) = (T_0 - T_m) \cdot e^{-ka \cdot t} + T_m \quad T(0) = T_0 \quad (\text{Tijonov, 1984}).$$

Utilizando el valor del parámetro B y la corriente de calor de la tierra, obtenemos el valor de la corriente de calor del aire (Q_w).

Cuarta aproximación

$$T(x, t) - T_m = (T_{\max} - T_m) e^{-\xi} \cos\left(2\pi \frac{t}{t_0} - \xi\right) \quad (\text{Tijonov, 1984}).$$

De la fórmula anterior despejamos “xi”, un parámetro adimensional que nos permite calcular la profundidad térmica, la cual es la profundidad teórica en la que se encontraría la temperatura media ambiental anual, en el terreno.

A partir del despeje de “xi”, obtenemos el factor “A” el cual es:
$$A = \left(\frac{T(x, t) - T_m}{T_{\max} - T_m} \right)$$
 Para obtener este valor debemos encontrar previamente el valor máximo de temperatura registrada a la salida del túnel durante las experimentaciones.

$$\xi = -\ln \left(\frac{A}{\cos \left(2\pi \frac{t}{t_0} - \xi \right)} \right)$$

De esta manera despejamos el valor teórico de “xi”: el cual es comparado

con el valor real de este: $\xi = -\ln \left(\frac{T(x,t) - T_m}{T_{A,O}(t) - T_m} \right)$ (Tijonov, 1984).

A fines de obtener el valor real de xi, debemos calcular el promedio de temperaturas medidas a 1,5 m de altura durante los días en que se realizaron las experimentaciones en el intercambiador.

Como podemos observar en la ecuación utilizada para obtener el valor teórico de “xi”, en la misma están involucradas una curva de base “e” con exponente negativo, y una curva secante, por lo que podemos encontrar a través de un método gráfico, el valor aproximado en el cual confluyen estas dos curvas. Dicho valor, bautizado como “X”, nos indica el valor del denominador de la ecuación mencionada.

$X = \cos \left(2\pi \frac{t}{t_0} - \xi \right)$ Entonces: $\xi = -\ln \left(\frac{A}{X} \right)$

Finalmente, haciendo uso de los datos obtenidos, se confecciona un ábaco exclusivo del dispositivo piloto utilizado. Este ábaco ha sido realizado en base a la teoría presente en el artículo “Introducción a la Nomografía. Instrumentos Matemáticos. Expresión Gráfica del Cálculo. El Arte de Calcular”, elaborado por Daniel Nacif en el año 2014.

Las variables auxiliares que se utilizaron son: U=Corriente de calor/unidad de caudal, y mide la cantidad de energía por unidad de volumen, expresado en kiloJoules/m³; el otro parámetro es W, el cual mide la variación de presión cinética dentro de la tubería, expresado en Pascales; y el coeficiente K, el cual representa la relación entre la velocidad de aire en la salida de la turbina, es decir, en la entrada de la tubería, con respecto a la velocidad de salida de la tubería.

El ábaco representa el volcado en forma gráfica de los datos obtenidos del dispositivo piloto con el cual se trabajó, previa comprobación matemática.

El mismo, se confeccionó colocando, en el eje vertical izquierdo, un parámetro que indica el ritmo con el cual se entrega la energía por unidad de volumen, lo que corresponde a la corriente de calor por unidad de caudal; en el eje vertical ubicado a la derecha del gráfico, el cual puede leerse como: (K^2-1) es igual a la variación o cambio de energía cinética por unidad de energía cinética entregada en la salida; el eje curvo K^3 , ubicado dentro de la gráfica, mide la relación de energías cinéticas entre la entrada y la salida del túnel (K^2), multiplicada por el factor de relación de velocidades (K). Finalmente en el eje horizontal, ubicado en el extremo superior del gráfico, se afora el factor K mencionado.

Dicho ábaco o nomograma, es la memoria gráfica que representa el aprovechamiento del dispositivo que se desarrolló durante las experimentaciones a campo y responde a la siguiente fórmula:

$$Vf * K^3 * (K^2 - 1) = 2 * \frac{\Delta P}{\delta a}$$

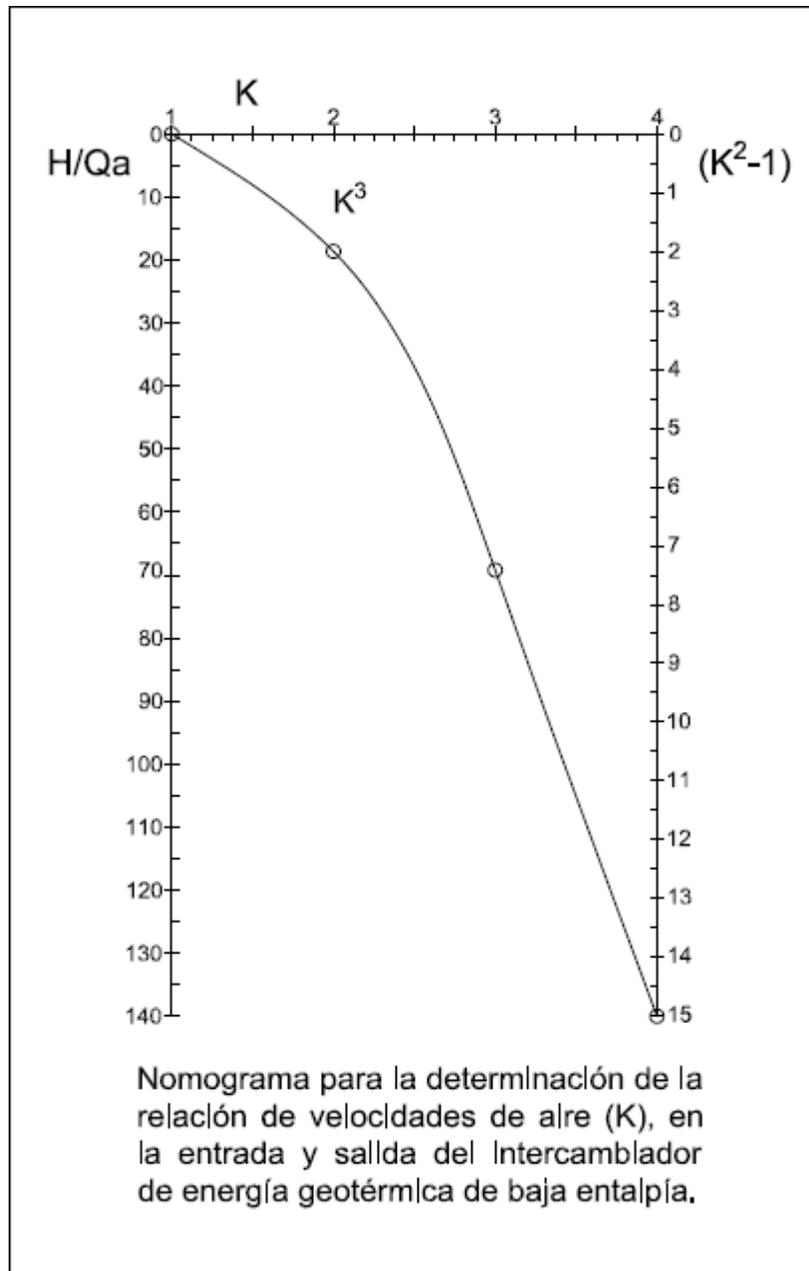


Gráfico n° 10: Nomograma para la determinación de la relación de velocidades de aire (K).

Por ejemplo, para climatizar a 14° C (Tob) un invernadero de 15 m de largo, por 10 de ancho y 2,5 de alto, es decir, de un volumen de 375 m³, en un tiempo de 4 horas, es decir, 14.400 s, y cuyo cultivo posee una temperatura crítica (Tc) de 2 °C, primero debo calcular el caudal de aire (Qa) que debe ingresar al invernadero, es decir, que debe circular por la salida del túnel.

$$Qa = V/t = 375/14400 = 0,026 \text{ m}^3/\text{s}$$

Con el dato del caudal de aire a ingresar en el invernadero, y la sección del túnel a utilizar, el cual será de las características del túnel utilizado en las experimentaciones descritas, se calcula la velocidad de aire en la salida del túnel (V_{sal}).

$$V_{sal} = Q_a / A = 0,8276 \text{ m/s}$$

Nuevamente, con el valor del caudal, y la densidad del aire obtenida por tabla (Coronel Toro, 2005) ($1,2 \text{ kg/m}^3$), obtenemos el flujo másico del aire, el cual corresponde a $0,0312 \text{ kg/s}$.

Luego, calculamos la corriente de calor, utilizando el poder calórico del aire a presión constante, obtenido por tabla (Coronel Toro, 2005), correspondiente a $1 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$, el flujo másico de aire y la diferencia entre la temperatura objetivo y la crítica.

$$H = m \cdot c_p \cdot (T_{ob} - T_c) = 0,0312 \cdot 1 \cdot (14 - 2) = 0,3744 \text{ kJ/s}$$

Utilizando los valores previamente obtenidos, calculamos H/Q_a , el cual arroja un valor de $14,4 \text{ kJ/m}^3$, y con este dato ingresamos en el ábaco confeccionado, marcando un valor aproximado de $K=1,79$.

Finalmente, obtenemos el valor de la velocidad de aire que debe haber en la entrada del túnel (V_{ent}), es decir, la que debe arrojar la turbina utilizada.

$$V_{ent} = K \cdot V_{sal} = 1,79 \cdot 0,8276 = 1,48 \text{ m/s.}$$

12) Análisis de resultados y discusiones

12.1) **Objetivo: Análisis exploratorio de la manifestación de energía geotérmica de baja entalpia, en el perfil de suelo hasta 3 metros de profundidad.**

A continuación se muestra la tabla de resultados obtenidos a partir de las mediciones de temperatura realizadas hasta 3 metros de profundidad:

Tabla n° 4: Temperaturas de suelo hasta 3 metros de profundidad.

Temperaturas suelo (°C)					
Fecha	Hora	Profundidad			
		3,0 m	2.2 m	1.4 m	0.5 m
22/06/2012	17:50	14	13,4	11,9	11,2
25/06/2012	16:37	16,2	14,6	12,5	10,8
27/06/2012	12:25	16,3	14,8	12,7	10,5
27/06/2012	17:40	16,3	14,8	12,8	10,4
28/06/2012	14:55	16,3	14,9	12,9	10,3
29/06/2012	16:05	16,4	15,1	13,0	10,5
01/07/2012	12:44	16,5	15,2	13,2	11,1
02/07/2012	12:00	16,5	15,2	13,3	11,2
03/07/2012	12:58	16,5	15,3	13,3	11,2
05/07/2012	16:17	16,6	15,3	13,5	10,3
06/07/2012	16:00	16,6	15,3	13,5	10,1
10/07/2012	11:22	16,6	15,4	13,5	9,5
11/07/2012	16:13	16,5	15,4	13,3	9,5
13/07/2012	15:20	16,5	15,3	13,3	9,4
16/07/2012	17:00	16,5	15,2	13,2	9,2
21/07/2012	11:00	16,3	15,1	13,2	10,3
23/07/2012	12:35	16,3	15,1	13,2	10,8
24/07/2012	12:35	16,2	15,1	13,2	10,9
26/07/2012	11:20	16,2	15,0	13,3	10,8
31/07/2012	18:17	16,1	14,9	13,2	10,2
01/08/2012	12:00	16,0	14,9	13,2	10,0
03/08/2012	16:00	16,0	14,9	13,2	10,1
07/08/2012	11:37	15,9	14,8	13,1	10,7
09/08/2012	13:19	15,9	14,7	13,1	11,0
16/08/2012	15:14	15,1	14,1	13,0	11,3
22/08/2012	13:00	13,8	12,6	12,1	11,4
24/08/2012	14:06	13,8	12,6	12,1	11,8
27/08/2012	15:30	13,8	12,1	12,7	13,8
28/08/2012	11:16	13,8	12,8	12,1	11,1
19/09/2012	13:00	15,0	14,3	14,0	13,8
28/09/2012	13:00	14,7	14,1	14,5	14,9
26/10/2012	15:30	18,1	16,5	15,4	15,5
31/10/2012	13:00	19,5	17,0	15,7	15,8
01/11/2012	08:30	19,7	17,1	15,8	15,8
01/11/2012	14:30	19,8	17,1	15,9	15,8
02/11/2012	10:50	19,9	17,2	15,8	15,9
11/11/2012	18:00	24,3	21,1	18,8	18,3
19/11/2012	18:00	22,1	19,5	17,6	17,0
21/11/2012	12:00	22,5	19,6	17,8	17,1
22/11/2012	13:00	22,9	19,5	17,8	17,2
11/12/2012	18:00	24,3	21,1	18,8	18,3
27/12/2012	12:30	24,4	21,8	20,1	18,6
09/01/2013	11:00	23,8	21,8	21,3	23,2

31/01/2013	14:30	22,0	22,2	22,9	24,1
08/02/2013	12:00	20,8	21,2	22,6	24,4
25/02/2013	17:30	21,3	21,9	23,2	24,8
07/03/2013	17:55	21,3	22,2	22,7	23,5
15/03/2013	14:00	21,2	21,3	22,3	22,4
16/03/2013	12:00	21,2	21,4	22,2	21,8
21/03/2013	17:00	21,1	21,2	21,5	20,5
30/03/2013	14:30	21,0	21,0	21,3	21,5
01/04/2013	12:00	21,0	21,0	21,3	21,3
10/04/2013	13:00	20,8	20,5	20,4	18,8
11/04/2013	11:55	20,8	20,5	20,3	18,9
12/04/2013	13:45	20,7	20,4	20,2	18,8
16/04/2013	15:00	20,5	20,2	19,9	17,9
19/04/2013	14:00	20,4	20,1	19,6	18,5
24/04/2013	14:00	20,2	19,8	19,6	19,1
26/04/2013	12:00	20,2	19,8	19,6	19,3
27/04/2013	12:00	20,2	19,8	19,6	19,5
29/04/2013	17:30	20,1	19,7	19,7	18,8
14/05/2013	14:00	19,6	19,0	18,3	16,4
16/05/2013	14:00	19,5	18,9	18,1	16,0
24/05/2013	15:00	19,1	18,3	17,1	14,3
29/05/2013	15:00	18,9	17,9	16,7	14,1
17/06/2013	12:00	17,8	16,8	15,4	13,0
24/06/2013	12:00	17,5	16,1	14,6	11,1
26/07/2013	12:00	16,0	14,5	12,5	9,0
09/08/2013	12:00	15,2	14,0	12,6	10,9
11/08/2013	15:00	15,2	14,0	12,6	10,8
12/08/2013	17:20	15,2	14,0	12,6	10,7
14/08/2013	17:50	15,1	13,9	12,6	10,5
15/08/2013	10:40	15,1	13,9	12,5	10,4
20/08/2013	12:00	15,0	13,8	12,4	10,5
26/08/2013	16:00	14,9	13,8	12,5	10,8
28/08/2013	15:00	14,9	13,8	12,6	10,7
06/09/2013	17:00	14,9	13,9	13,2	13,0
17/09/2013	18:36	15,1	14,3	14,4	13,9

Como podemos observar las mediciones comenzaron el día 22 de Junio del año 2012 y finalizaron el día 17 de Septiembre del año 2013, anotando un total de 78 datos durante 453 días, es decir, que se registraron las temperaturas, cada un intervalo promedio de 5,8 días, durante 1 año y casi 3 meses. En el siguiente gráfico se muestra la distribución de las mediciones a lo largo del tiempo, pudiendo observar que esta es bastante uniforme sin grandes saltos, es decir, que no transcurrieron grandes períodos de tiempo entre mediciones.

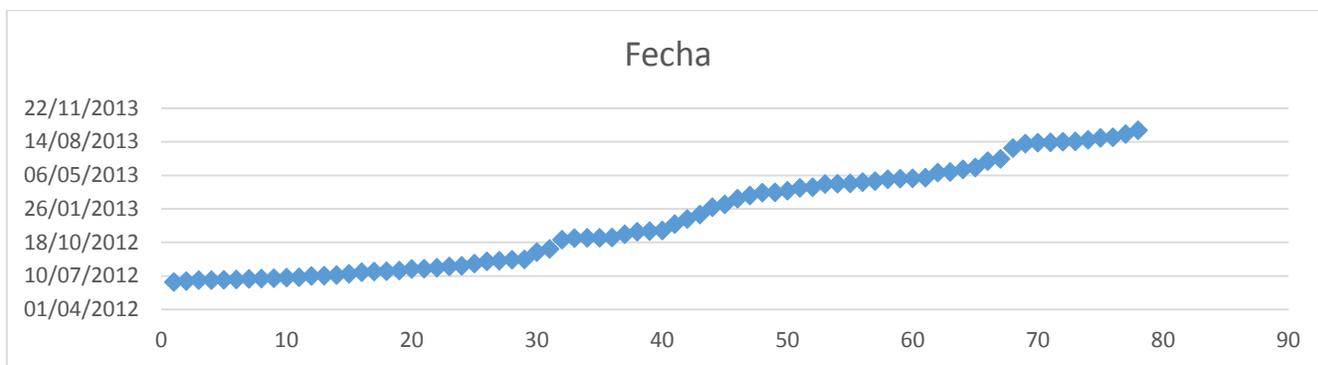


Gráfico n° 11: Mediciones de temperatura a lo largo de toda la experimentación.

Transcurrieron 2 inviernos durante el período de mediciones, sin embargo solo transcurrió un verano, hecho que se ve reflejado en los resultados promedio.

Algunos valores de referencia que podemos extraer a partir de los datos obtenidos son los expuestos en la tabla n° 6.

Tabla n° 5: Valores referenciales de temperatura hasta 3 metros de profundidad.

Temperaturas suelo (°C)				
Variable	Profundidad			
	3,0 m	2.2 m	1.4 m	0.5 m
Máximo	24,4	22,2	23,2	24,8
Mínimo	13,8	12,1	11,9	9,0
Rango	10,6	10,1	11,3	15,8
Promedio	18,0	16,9	15,8	14,4

Como se observa en la tabla anterior, dentro de las distintas profundidades de medición, el mayor valor registrado fue a 0,5 metros de profundidad y corresponde a 24,8 °C, como así también el menor valor registrado fue a la misma profundidad y corresponde a 9 °C, lo que determina que el mayor rango de temperaturas, es decir, donde fluctúa más la temperatura, es a 0,5 metros de profundidad, siendo esta la medición más somera.

Algo a remarcar es que el menor rango de temperatura no es justamente el registrado a 3 metros de profundidad, es decir, en la medición a mayor profundidad, sino que este se registró en el termómetro ubicado a 2,2 metros de profundidad.

El promedio de temperaturas presenta un claro ascenso a medida que descendemos en profundidad, esto en parte es explicado por el hecho de que se tomaron mediciones durante dos estaciones de invierno, sin embargo, solo durante un verano.

En el siguiente gráfico se observan los datos de temperatura registrados durante las mediciones.

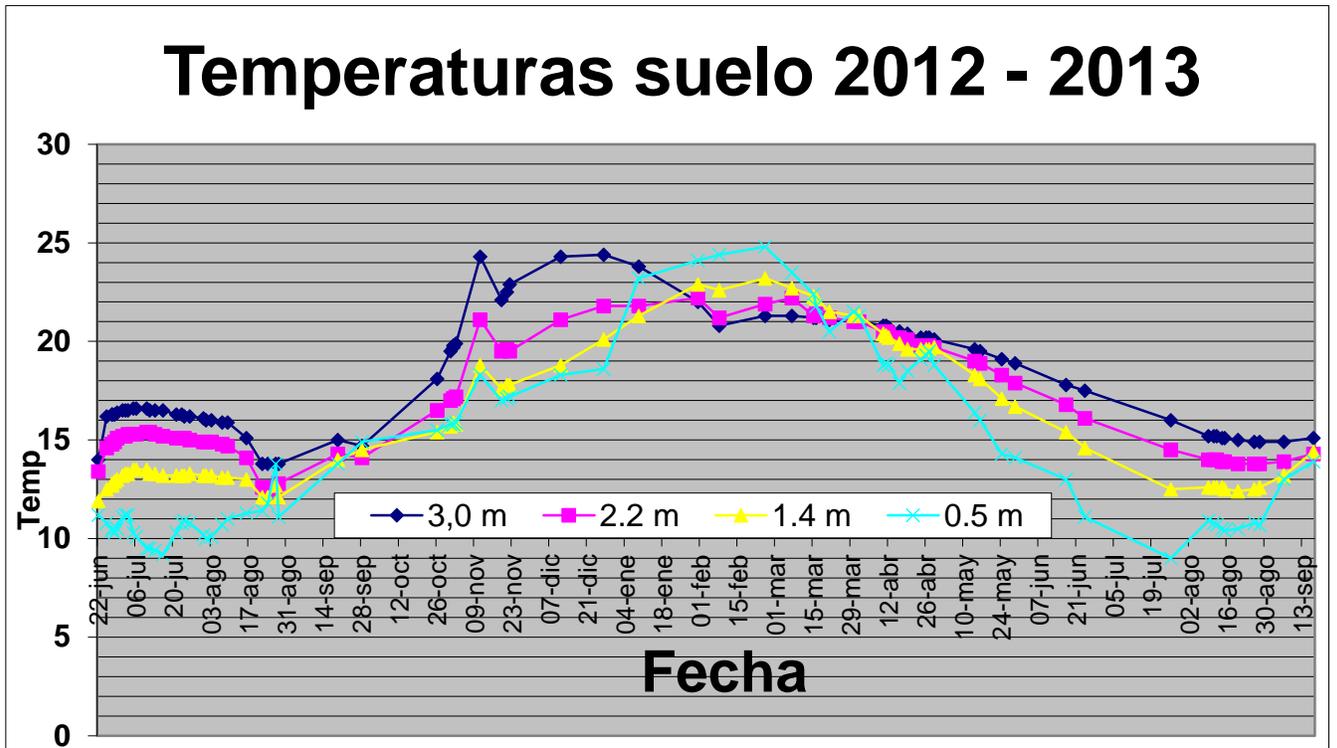


Gráfico n° 12: Curvas de temperaturas de suelo hasta 3 metros de profundidad.

En el gráfico anterior se puede observar como la curva de color celeste, es decir, la de menor profundidad, posee una marcada mayor fluctuación respecto a las otras 3 curvas. Todas las curvas presentan pequeñas variaciones a lo largo del tiempo, más visibles en la curva correspondiente a 0,5 metros de profundidad, sin embargo la variación más notoria es la que ocurre entre los ciclos invierno-verano y viceversa.

La conclusión que se extrae de la experimentación es que a medida que descendemos en el perfil del suelo, la temperatura, y por ende la energía calórica, es más estable, permitiendo darle varios usos a la misma.

12.2) Objetivo: Descripción de dispositivos de aprovechamiento de la energía geotérmica de muy baja entalpía. Resultados de mediciones, realizadas en los diferentes métodos, y conclusiones.

A fines de poder realizar el objetivo planteado, durante las experimentaciones se llevaron a cabo varios sub-objetivos.

12.1.1) Discusión y propuestas para extraer energía del suelo

Como resultado de la revisión bibliográfica, razonamientos y discusiones grupales, se propusieron las siguientes formas de extracción de la energía geotérmica:

- Intercambiador de energía con agregado de piedra bola: el mismo consiste en la realización de una zanja de 15 metros, a 3 metros de profundidad, y con un ancho de 1,2 metros. En la misma se colocarían piedras de sección aproximadamente circular (canto rodado o piedra bola), hasta una profundidad de 1,8 metros, y de allí hasta el nivel del suelo se llenaría con la misma tierra extraída durante la excavación.

Como producto se obtendría un túnel de 15 metros de largo, con una sección de 1,2 x 1,2 metros, es decir, 1,44 m², por el cual se hará circular aire de manera forzada, con el fin de que el suelo y las piedras intercambien su calor acumulado con el aire que circula a través de las piedras.

Debido a que había una gran incertidumbre sobre la pérdida de carga que podría presentarle el túnel de piedras al aire, se decidió como método de prueba de hipótesis modificar un poco el diseño por uno más simple, para que fuese más fácil de realizar, ahorrando tiempo, esfuerzo y dinero. En el caso de que la pérdida de carga no fuese considerable, se procedería a realizar el modelo más complejo.

El modelo simplificado consiste en un cajón lleno de piedras bola (canto rodado) con el fin de simular el peine de intercambio previamente detallado y medir la pérdida de carga del aire impulsado por un ventilador axial de 1 HP de potencia al pasar a través del mismo.

El cajón diseñado posee 6 metros de largo, 0,6 m de alto y 0,5 metros de ancho. El mismo está formado por una estructura madera, la cual será revestida por dentro con un nylon de 200 μm , con el fin de evitar que ocurra pérdida de carga por escape del aire a través de las uniones del dispositivo, y dejando libres los extremos, para poder ingresar el aire mediante la turbina y que el mismo pueda salir por el otro extremo.

En el interior del nylon se ubican las piedras bola hasta aproximadamente unos 5 cm antes del punto más alto de la estructura de madera, luego el nylon se cierra y por encima se coloca tierra y más piedras con el fin de que el mismo no se levante.

Se colocan termómetros digitales a lo largo del cajón a una distancia media desde la superficie del mismo para registrar el comportamiento de la temperatura del aire al atravesarlo. A través del uso de mangueras transparentes que contengan agua en su interior colocadas con sus bocas de forma paralela a la dirección del paso del aire, con el fin de registrar la presión hidrostática, se debe determinar de forma visual la pérdida de carga debida al rozamiento del aire con las piedras dentro del dispositivo.

A continuación podemos observar el modelo planteado inicialmente.

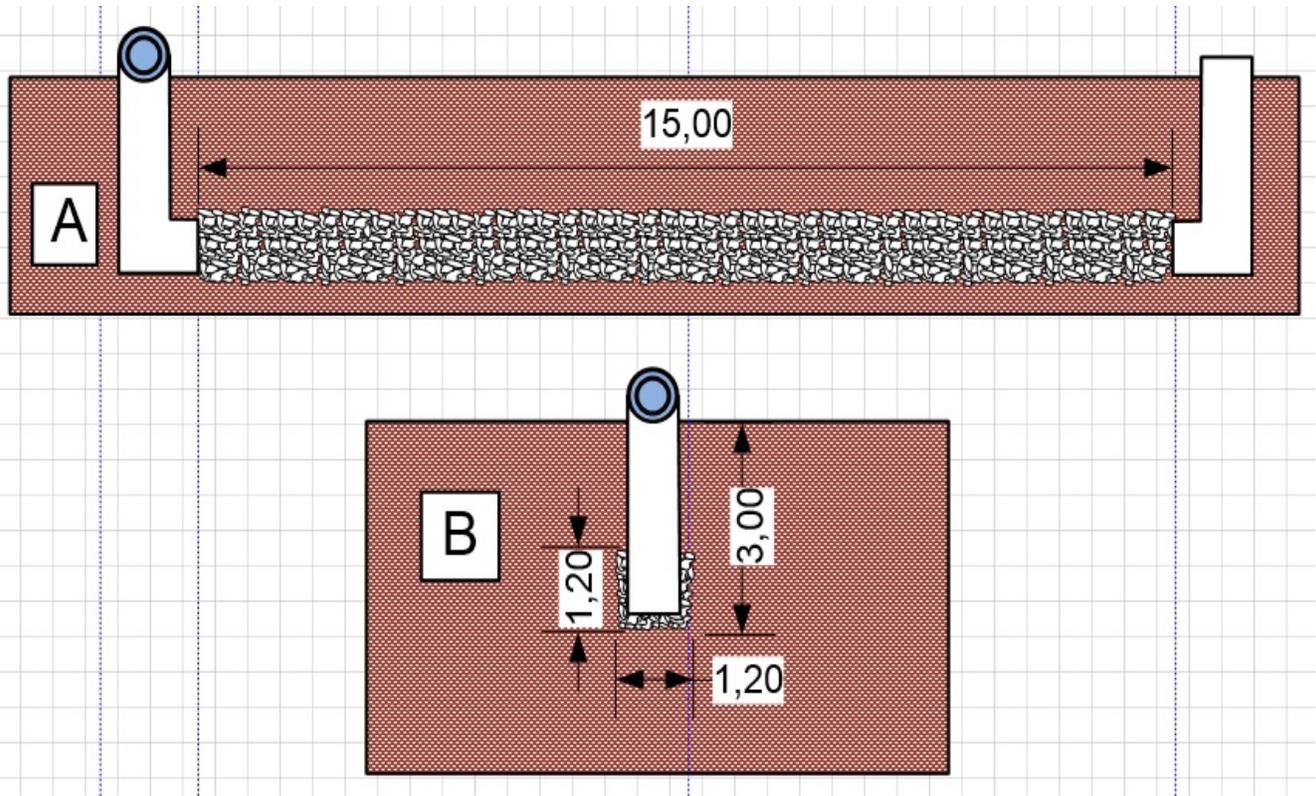


Gráfico n° 13: Esquema de la idea inicial del intercambiador energético con medio de piedras bola.

- **Termosifón:** Este modelo se puede utilizar solo para calefaccionar ambientes en momentos de una gran diferencia de temperatura entre la temperatura ambiente (la cual debe presentar la temperatura baja del diferencial) y el suelo (temperatura mayor).

Basándose en el fenómeno de convección natural que experimentan los fluidos debido a cambios en su temperatura, es que se diseñó este sistema que sirve tanto de intercambiador como de distribuidor de la energía obtenida del suelo. El mismo consiste en un túnel, de 15 metros de largo, que posee una gran boca en uno de sus extremos, y en donde el otro extremo es ciego, es decir sin comunicación con el exterior. A lo largo de dicho túnel y en forma perpendicular a este se construyen pequeñas perforaciones que lo comunican con la superficie.

La boca principal del intercambiador funciona como recolector del aire frío, que debido a su baja temperatura, y por lo tanto mayor densidad, debería encontrarse sobre la superficie del suelo (0,0 m),

entrando por su propio peso por dicha boca del túnel en donde, una vez adentro, comenzaría a elevar su temperatura.

Al mismo tiempo el aire contenido dentro del intercambiador, que se encuentra más caliente que el que está ingresando, y por lo tanto es más liviano (menor densidad) tiende a salir hacia la atmosfera, que se encuentra más fría, y debería ser empujado por el aire frío que ingresa al intercambiador. De éste modo se genera un flujo permanente y prácticamente constante de aire frío que entra por el extremo mayor del túnel y aire más caliente que sale por todas las pequeñas perforaciones que se comunican con el exterior.

Hay que tener en cuenta que la sumatoria de las áreas comprendidas por las perforaciones debería ser igual al área de la boca mayor de entrada para mantener el flujo constante de movimiento de aire, y que todas las bocas (tanto la mayor como las menores) deben constar de tapas que se abrirían cuando se determine que sea necesario.

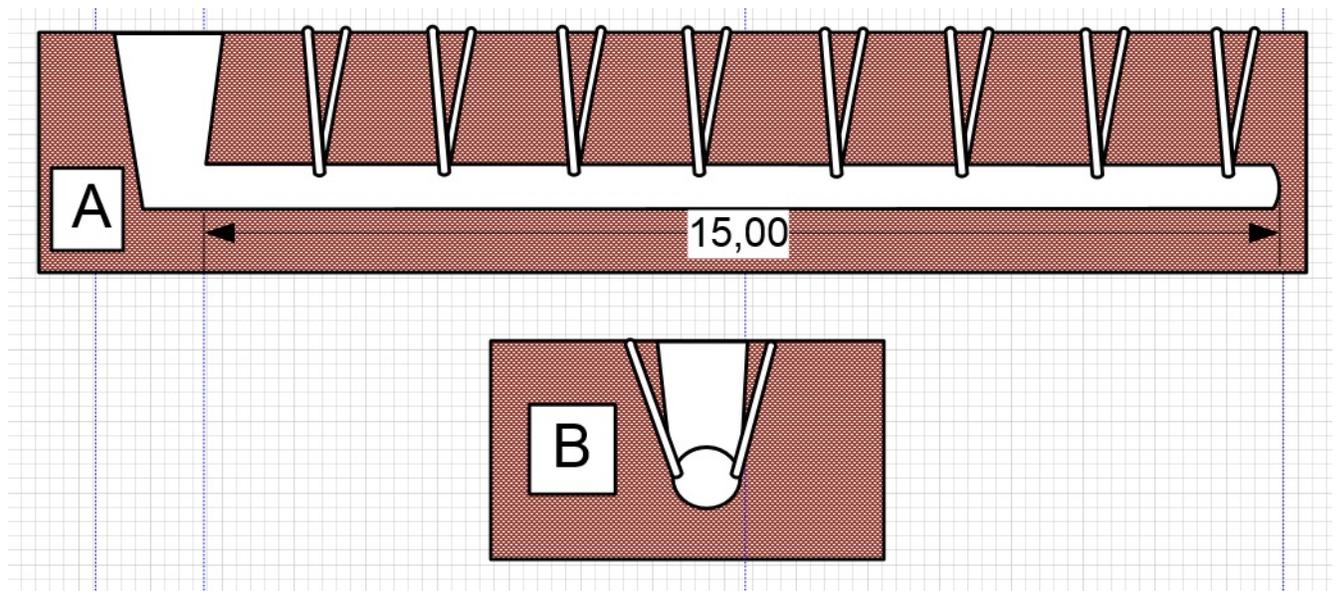


Gráfico n° 14: Esquema del concepto de intercambio energético por termosifón.

- Túnel de intercambio energético acoplado con turbina o ventilador impulsores de aire: el presente modelo consiste en un túnel de 15 metros de largo, con su margen inferior ubicado a 1,5 metros de profundidad, y de sección circular, la cual posee un diámetro de 10 pulgadas.

El mismo posee una entrada por la cual ingresa el aire de manera forzada mediante el uso de una turbina, y una salida por la cual egresa el aire, el cual, a su paso por el túnel, es sometido a un intercambio de energía calórica, aportada por el suelo mayormente por convección, pero también con una pequeña participación de la conducción y la radiación de la energía geotérmica.

12.1.2) Determinar la pérdida de carga de una corriente de aire en un medio de gravas y el aporte energético del medio al fluido.

Luego de la experiencia descrita se determinó una marcada disminución de la presión del aire al atravesar el peine, observando al primer metro de longitud una presión de 3 cm de columna de agua, al tercer metro de longitud una presión de 2 cm., y a los seis metros una presión de 1 cm de columna de agua.

Una vez obtenidos estos datos, considerando la gran pérdida de carga de aire que se producía a raíz del medio de gravas, se abandonó la medición de temperatura con los termómetros de registro y se decidió desechar este método de extracción de la energía geotérmica.

12.1.3) Realizar un túnel de tierra a 1,5 m de profundidad, hacer circular una corriente de aire a través de él y medir las temperaturas de entrada y salida del mismo.

Los datos obtenidos de las mediciones pertinentes se presentan en el anexo 1 “Temperaturas túnel realizado con manga plástica”, y se resumen en el cuadro y gráfico siguientes.

Tabla n° 6: Valores referenciales de temperatura en túnel de tierra a 1,5 m de profundidad.

Temperaturas túnel (°C)			
	Entrada	Salida	Delta T
Máximo	40,50	44,70	18,90
Mínimo	8,20	12,00	-8,00
Rango	32,30	32,70	26,90
Promedio	20,16	18,26	1,90

Los valores observados en la tabla n° 6, no poseen relación temporal entre sí, por ejemplo, el momento de mayor temperatura en la entrada del túnel, no es el mismo momento en el que se registró la mayor temperatura en la salida del mismo, ni el mismo en el que se registró el valor máximo de Delta T.

Como podemos observar en el gráfico anterior, la curva que expresa la temperatura a la entrada del túnel, posee una variación mucho mayor que la curva de temperatura de salida, esto nos indica que el suelo actúa como un amortiguador térmico, disminuyendo el rango de variación de temperatura, tal como lo menciona la teoría, otorgando una gran herramienta para climatizar ambientes.

El dato más sorprendente obtenido, es la mayor diferencia de temperatura observada entre la entrada y la salida del túnel, la cual corresponde a 18,9 °C, siendo que en ese momento, es decir, el día 28/10/2012 a las 4:43:58 p.m. (fila 3441 del anexo 1), en la entrada del túnel el aire poseía una temperatura de 40,2 °C, y en la salida 21,3 °C.

Se puede apreciar que el mayor diferencial de temperatura ocurre en el sentido de los ascensos de temperatura, es decir, que el suelo estaría absorbiendo energía, o dicho de otra manera, enfriando el aire que circula por el túnel. Hay que tener en cuenta que la experiencia se realizó a fines del mes de Octubre y principios de Noviembre, por lo que las temperaturas medias se situaban por encima de la temperatura del suelo, lo que determina que el suelo sirva para refrigerar. Una posible futura experiencia se podría realizar en época invernal, para analizar el potencial del suelo para ceder energía calórica, es decir, calentar el fluido de intercambio energético.

En el gráfico también se observan algunas anomalías, por ejemplo, en la primera, segunda, quinta y sexta cresta, enumeradas de izquierda a derecha, se pueden apreciar picos repentinos en la curva de temperatura a la salida del túnel, los cuales marcan ascensos muy rápidos de temperatura, sobrepasando la temperatura de entrada del túnel, siendo que la misma se encontraba en ascenso, dado por el momento del día. Este comportamiento es anómalo debido a que al estar ascendiendo la temperatura ambiente, ergo la de entrada del túnel, el suelo debería amortiguar este ascenso de temperatura, y en cambio lo aumenta, funcionando como un activador en lugar de un amortiguador térmico.

Cabe destacar que la temperatura de entrada al túnel se midió en la turbina misma, la cual se situó al aire libre, sin embargo a 1,5 metros de profundidad, introducida en la zanja que se construyó para luego fabricar el túnel en una fracción de la misma. Al estar el termómetro situado en profundidad, a pesar de no estar cubierto, recibe aislamiento energético, ya que la recepción de radiación solar directa es muy acotada, por la profundidad y por la dirección Norte-Sur del túnel, y además está influenciado por la energía calórica del suelo, no solo del plano inferior, sino también desde dos de sus costados (Este y Oeste), siendo que el suelo se encuentra a una temperatura media menor a la temperatura media ambiente. Dicho esto, se concluye que la temperatura de entrada del túnel, es menor que la temperatura ambiente, por lo que el amortiguamiento térmico que el mismo brinda es aún mayor al que expresan sus datos de temperatura obtenidos en la experiencia.

12.1.4)Objetivo: Procesamiento de la información obtenida, extracción del modelo físico–matemático que describa el proceso geotérmico de baja entalpía que es aprovechado; diseño de nomogramas que registren los resultados obtenidos.

Se procesó la información y se utilizaron las formulas mencionadas previamente. La planilla de cálculo se encuentra en el anexo correspondiente, y los resultados obtenidos se pueden observar a continuación:

Tabla n° 7: Valores para los datos de análisis

Datos	Unidades	Valor
$T(E,W)=T(x,t)$ =Temperatura promedio a 1,4 m de profundidad	°C	15,70
T_b =Temperatura promedio a 0 m de altura	°C	22,52
D =Diámetro del túnel	m	0,25
a =Radio a = Radio del túnel	m	0,125
b =Radio b = Profundidad punto medio túnel	m	1,375
$T(A,P)_{in}$ =Temperatura promedio de entrada en el túnel	°C	20,21

T(A,P)out=Temperatura promedio de salida en el túnel	°C	18,28
T(A,P) prom=Ta=Temperatura promedio en el túnel	°C	19,25
Δz =Segmentos del intercambiador	m	1,00
Ka=Conductividad térmica del aire (promedio geométrico entre 15 y 20°C)	W/(m*K)	0,02495
Ks=Conductividad térmica del limo húmedo (promedio geométrico entre seco y saturado)	W/(m*K)	0,65
L=Largo del túnel o intercambiador energético	m	15,00
V1=Velocidad de entrada	m/s	7,40
V2=Velocidad de salida	m/s	2,70
ν =Viscosidad cinemática (promedio geométrico entre 15 y 20°C)	m ² /s	0,000014933
Pr=Número de Prandtl (promedio geométrico entre 15 y 20°C)	-----	0,73
Tm=Temperatura ambiente promedio del año 2012	°C	16,80
Tmáx=Temperatura máxima de salida del túnel	°C	44,70
T(A,O)=Temperatura promedio a 1,5 m de altura	°C	20,09

Tabla n° 8: Valores de parámetros notables del cálculo

Cálculos	Unidades	Valor
H=Corriente de calor promedio en la tierra (real)	W	-83,67
Re=Número de reynolds en la entrada del túnel	-----	123.884,16
Re=Número de reynolds en la salida del túnel	-----	45.200,98
Nu=Número de Nusselt en la entrada del túnel	-----	222,26
Nu=Número de Nusselt en la salida del túnel	-----	98,17
Nu=Número de Nusselt promedio	-----	160,21
UL=Coeficiente de traspaso térmico teórico	W/(m*K)	12,56
UL=Coeficiente de traspaso térmico real	W/(m*K)	23,60

B=Parámetro B teórico	-----	0,11
B=Parámetro B real	-----	0,06
Qw=Corriente de calor promedio en el aire (real)	W	-1.493,60
A=Parámetro A	-----	-0,04
X=Parámetro X	-----	1,00
xi=xi teórico	-----	3,23
xi=xi real	-----	1,10

La corriente de calor promedio en la tierra, por conducción, es la que puede aportar la tierra hacia el flujo de aire que circula por el túnel.

La corriente de calor aportada desde el flujo de aire en el túnel, hacia el suelo, es marcadamente superior, por lo que, como hablamos de un sistema de baja entropía (poca energía relativa en el suelo), es fácil retribuir el calor a la tierra, pero no es tan fácil extraer el calor de la tierra; esto se traduce en tiempos (el tiempo de calentamiento del aire es más lento que el tiempo de calentamiento de la tierra).

El régimen es totalmente turbulento, por lo que se deben considerar ciertos fenómenos, como cambios de densidades por las distintas compresiones, cavitaciones en los cambios de sección, las cuales producen vibraciones mecánicas que disminuyen la vida útil del túnel, y la distribución de temperatura debido a estos hechos, no es fácil de describir, por lo que la descripción que se ha hecho es un modelo simplista.

El número de Nusselt, nos indica que al existir convección y conducción, el intercambio energético es 160,21 veces mayor que si solo existiera conducción. Esto se puede registrar a través de tablas estandarizadas.

La diferencia observada entre el valor del coeficiente de traspaso térmico teórico, y el valor real, se debe a que el rango de las variables utilizadas en el valor teórico es mucho más amplio que el rango tomado para adquirir el valor real, principalmente la variable tiempo.

Si bien hay una discrepancia interesante en los valores reales y teóricos de ξ , los cuales destacan la profundidad teórica, los valores obtenidos para el ξ teórico fueron de rangos de meses en el año, en cambio los utilizados en la práctica fueron de días en el año, de modo que los valores son adecuados o consistentes con esta información.

13) Conclusiones

Podemos establecer que el prototipo de extracción de la energía geotérmica haciendo circular de manera forzada, una corriente de aire, a través de un medio de gravas, no es útil, debido a la gran pérdida de carga que el mismo presenta.

El sistema de extracción consistente en un túnel horizontal sin revestimiento, es decir, de tierra, a 1,5 metros de profundidad, con un diámetro de 25 cm y un largo de 15 metros, presenta una alta utilidad para climatizar ambientes, por ejemplo, invernaderos. Sin embargo, hay que plantear ciertos aspectos a mejorar, ya que si bien su construcción no representa un alto costo financiero, su vida útil puede verse reducida al ser sus paredes de tierra, ya que estas pueden desgranarse con el tiempo, se pueden derrumbar si el túnel es inundado, entre otras situaciones que se pueden presentar a campo, como el hecho de que un tractor circule por encima del mismo y este se derrumbe al no poseer ningún soporte superior que le brinde mayor resistencia a presiones verticales.

A partir de los datos obtenidos y el análisis matemático de los mismos, se pudo confeccionar finalmente un nomograma. Si se posee la información del volumen (m^3) a climatizar, el tiempo (s) en el que requiere ser climatizado dicho volumen, la temperatura crítica (por ejemplo, temperatura en la que se hiela un cultivo) y la temperatura que se quiera obtener en el ambiente, podemos calcular la velocidad de salida de aire en el túnel, la corriente de calor necesaria (H) y el caudal (Q_a) que se debe aportar. Con este parámetro obtenido ($H/Q_a = kJ/m^3$), ingresamos en el ábaco trazando una línea horizontal, intersectando el eje K^3 , para desde allí trazar una línea vertical y así obtener el valor del parámetro adimensional K, el cual indica la relación entre la velocidad de aire en la entrada del intercambiador energético y la

salida del mismo. Debido a que con el diámetro del túnel y el caudal necesario, se puede obtener la velocidad de salida necesaria, utilizamos además el valor de K obtenido, y adquirimos el resultado final, correspondiente al de velocidad de aire en la entrada del túnel, con el cual es posible saber que turbina se debe utilizar para un aprovechamiento con determinadas características, utilizando un intercambiador energético como el que se elaboró en las experimentaciones mencionadas, y además, saber si es necesario un aporte extra de energía.

Dicho nomograma resume todo el trabajo realizado, brindando una herramienta útil y práctica que puede ser utilizada a campo para diseñar instalaciones de aprovechamiento de energía geotérmica de baja entalpía con fines de climatización.

14) Bibliografía

- Axelsson, G. y col – 2004 – Sustainable utilization of geothermal resources for 100-300 years – Twenty-ninth workshop on geothermal reservoir Engineering – Stanford University, Stanford, California, United States of America – SGP-TR-175 -
- Bonté, D. y col – 2012 - Subsurface temperature of the onshore Netherlands: new temperature dataset and modelling - Netherlands Journal of Geosciences - Geologie en Mijnbouw; 91–4; Págs. 491-515 - Utrecht University, Budapestlaan 4, 3584 CD Utrecht, the Netherlands -
- Comisión Europea – 07/05/2003 - [En Línea] - http://ec.europa.eu/research/energy/pdf/key_messages_es.pdf - [Consulta: 14/12/2014] –
- Coronel Toro, J. F. – 01/2005 – Colección de tablas, gráficas y ecuaciones de transmisión de calor. Versión 3,2 – Universidad de Sevilla, Departamento Ingeniería Energética y Mecánica de Fluidos, Grupo de Termotecnia – Sevilla, España – [Consulta: 18/06/2015] -
- De Santis, Juan Pablo – 11/12/2012 – Diario La Nación – [En línea] - <http://www.lanacion.com.ar/1535814-la-importacion-de-combustible-de-este-ano-equivale-a-5-represas-hidroelectricas> – [Consulta: 08/01/2015] -
- Diario MDZ online - 13/08/2012 – [En línea] - <http://www.mdzol.com/nota/409767-ypf-record-de-importacion-de-combustibles/> - [Consulta: 08/01/2015] -
- Dickson, M.H. y col – 2004 – What is Geothermal Energy? - Instituto de Geociencia y Recursos Geológicos, CNR, Pisa, Italia –
- EGEC, European Geothermal Energy Council - [En línea] - <http://egec.info/about/> - [Consulta: 31/01/2015] –
- EGEC, European Geothermal Energy Council – 2013 – Financing Geothermal Energy – EGEC Policy Paper - [Consulta: 31/01/2015] –

- Farré, M. T. – 2006 – Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación; Manual de Buenas Prácticas; Energía Geotérmica – [En línea] - <http://www.ambiente.gov.ar/?idarticulo=1278> – [Consulta: 28/01/2015] –
- Fundación Bariloche – 2010 - Inventario nacional de la republica argentina, de fuentes de emisiones y absorciones de gases de efecto invernadero, no controlados por el protocolo de Montreal - [En Línea] - http://www.ambiente.gov.ar/archivos/web/UCC/File/inventario_gases.pdf - [Consulta: 14/11/2014] –
- Girodgeotermia – 2008 – Qué es la energía geotérmica - [En línea] - http://www.girodgeotermia.com/index.php?option=com_content&view=article&id=209&Itemid=134 – [Consulta: 28/01/2015] –
- Gonzalez, J. M. – 05/2013 – En 10 años la importación de combustibles aumentó un 1.765% - [En línea] - <http://periodicotribuna.com.ar/14366-en-10-anos-la-importacion-de-combustibles-aumento-un-1765.html> - [Consulta: 13/01/2015] –
- Guadagni, A. A. – 04/2014 – Seminario de Energía, UNCuyo – El escenario global de la producción y el consumo de energía en la primera mitad del siglo XXI – Mendoza, Argentina – [Consulta: 13/01/2015] -
- Iannelli, L. y col – 2012 - Uso de energía geotérmica para el acondicionamiento de aire en viviendas – UNSAM-INTI-ENARGAS – [Consulta: 31/01/2015] -
- IGA, International Geothermal Association – 10/2014 – The institution - [En línea] - http://www.geothermal-energy.org/about_the_iga/mission.html - [Consulta: 28/01/2015] –
- Llopis Trillo, G. y col – 2008 – Guía de la Energía Geotérmica – Dirección General de Industria, Energía y Minas – Consejería de Economía y Consumo – Madrid, España -
- Meneses Pérez, O. A. – 2007 – Diseño de un intercambiador de calor aire-tierra para generar calefacción y climatización de edificios en Santiago – Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Mecánica – Santiago, Chile -

- Muffler, L. J. P. – 1978 - 1978 USGS Geothermal Resource Assessment - MS 18, U. S. Geological Survey Menlo Park CA 94025
- Nacif, D. H. – 2014 – Introducción a la Nomografía. Instrumentos Matemáticos. “Expresión Gráfica del Cálculo-El Arte de Calcular” – Profesorado de Matemáticas (asignatura electiva) – Instituto de Educación Superior (IES) – [Consulta: 01/07/2015] -
- Pablo Fernández Blanco, Diario Los Andes – 2014 – “Volvieron a aumentar las naftas: este año ya treparon hasta 44%” – [En Línea] - <http://www.lanacion.com.ar/1723679-volvieron-a-aumentar-las-naftas-este-ano-ya-treparon-hasta-44-info-96-x-90-mm> - Buenos Aires, Argentina – [Consulta: 15/12/2014] -
- Real Academia Española (RAE) – 2014 – [En línea] - <http://lema.rae.es/drae/?val=entalpía> – [Consulta: 26/02/2015] -
- Secretaría de Energía de la Nación – 2008 – Energía Geotérmica. Energías Renovables – Buenos Aires, Argentina –
- Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación – [En Línea] - <http://www.ambiente.gov.ar/?idarticulo=1278> – [Consulta: 14/11/2014] –
- Tijonov, A. N., Samarsky, A. A. – 1983 – Ecuaciones de la Física Matemática – Tercera Edición – Editorial MIR – Traducido del ruso por Juan José Tolosa – Moscú, Rusia – [Consulta: 15/11/2014] -
- Vercelli, A. – 2012 - ¿Qué es la energía geotérmica? – [En línea] - <http://www.energias.bienescomunes.org/2012/06/26/que-es-la-energia-geotermica/> - [Consulta: 28/01/2015] -
- World Energy Council (WEC) – 2013 – Recursos Energéticos Globales – Inglaterra y Gales - ISBN: 978 0 946121 29 8 -