



Especialización en Management Tecnológico

**Generación de energía a través del aprovechamiento del
gradiente geotérmico de la corteza terrestre.
Posibilidades de la Geotermia de bajas temperaturas.**

Ing. Gabriel Luciano Zanellato

Trabajo Final Integrador

Tutor: Esp. Ing. Gabriel Pagnossin

Co Tutora: Dra. María Angélica Diez

Abril 2021

ARTICULANDO CONOCIMIENTO Y PRODUCCIÓN



Ministerio de
Ciencia, Tecnología
e Innovación Productiva
Presidencia de la Nación



Contenido

1	Resumen.....	4
2	Introducción.....	6
1.1	La Geotermia	6
3	Aspectos Metodológicos	13
4	Definición del problema.....	15
5	Generación de Energía a través de dos fuentes a diferente temperatura	20
5.1	Máquina Térmica	20
5.1.1	Ciclo Rankine con recalentamiento	26
5.2	Tecnologías existentes	27
5.2.1	Energía Geotérmica.....	28
5.2.2	Energía Termo-oceánica	36
5.3	Gradiente geotérmico y agua de formación.....	40
5.3.1	Gradiente térmico en la cuenca neuquina	42
5.3.2	Agua de formación para el funcionamiento de la caldera.....	44
6	Innovación.....	49
6.1	Análisis termodinámico	52
6.1.1	Análisis en la turbina.....	52
6.1.2	Análisis en el condensador	53
6.1.3	Análisis en la bomba.....	54
6.1.4	Análisis en el pre-calentador y evaporador	55
6.1.5	Análisis de eficiencia	59
6.2	Aplicación de un cálculo tentativo.....	59
7	Estrategias institucionales.....	63
7.1	Estudio de puntos pendientes.....	63
7.1.1	Caudal de agua de formación.....	63
7.2	Evaluación económica inicial	64
7.3	Etapas de diseño de la máquina	65
7.3.1	Intercambiadores de calor	65
7.3.2	Turbina y generador	68
7.4	Etapas de diseño del pozo	69

7.4.1	Perforación de un pozo de 60 pulgadas a 1000 metros de profundidad.....	69
7.5	Evaluación económica final	71
7.6	Etapa de fabricación de componentes.....	72
7.7	Etapa de construcción de pozo y montaje	73
7.8	Etapa de puesta en marcha y pruebas	74
7.9	Etapa de puesta en producción y masificación.....	75
7.10	Institución encargada del proyecto	75
7.11	Instrumentos de financiamiento	76
8	Escenarios alternativos	78
9	Conclusiones.....	80
10	Bibliografía.....	82

1 Resumen

El uso de la energía para las sociedades actuales requiere pensar nuevas maneras de acceder a ella, con métodos cada vez menos agresivos para el medio ambiente. Profundizar en las estrategias de obtención de recursos energéticos implica considerar nuevos usos e investigaciones que mejoren la accesibilidad y calidad de los mismos.

Existen fuentes que poseen una cantidad inmensa de energía, pero por lo general su aprovechamiento es limitado. Ejemplos de ello son la gran cantidad de energía térmica almacenada en los océanos y aquella que emana desde el interior del planeta. Frente a estas restricciones, fuentes de energía más tradicionales ganaron su lugar debido a su mayor rendimiento térmico y su consecuente ventaja económica. Sin embargo, estas máquinas, entre ellas aquellas que queman combustibles fósiles, están produciendo graves inconvenientes ambientales, por ejemplo, el calentamiento global. Las energías renovables están incrementando su participación en el mercado energético internacional, pero algunas de ellas tienen limitaciones para generar energía de forma continua, debido a condiciones climáticas, como en el caso de la energía eólica, o por la dependencia a condiciones horarias, en el caso de la energía solar. La energía geotérmica está limitada a zonas volcánicas donde se puede acceder con relativa facilidad a fluidos de alta temperatura. Acceder a energías menos agresivas para el planeta, con la capacidad de operar en forma continua y con una mejor distribución geográfica, requerirá de mayor inversión económica, pero tal vez, de menores costos de operación. Poder aprovecharlas por sobre sus limitaciones de rendimiento demanda ideas innovadoras, con estudios que implican abordar muchas articulaciones y vínculos institucionales y empresariales.

El presente trabajo pretende abordar este tema desde una idea innovadora sabiendo de antemano que encontraremos limitaciones, siendo la principal de ellas, el bajo salto térmico presente en una zona de gradiente térmico normal y la dificultad consiguiente de considerar grandes intercambiadores de calor que solventen este problema. Sin embargo, la gran cantidad de energía emitida desde el interior de nuestro planeta nos invita a considerar un estudio mínimo de factibilidad de esta idea. Investigaciones posteriores podrían ayudarnos a tomar provecho de una fuente de energía hasta hoy desperdiciada.

En el desarrollo del trabajo se hará un estudio introductorio de las máquinas térmicas y las tecnologías existentes, haciendo hincapié en la energía geotérmica y la termo-océánica. Se plantea un esquema de máquina térmica, que utiliza para su funcionamiento el salto térmico

existente entre la temperatura de fondo de un pozo y la temperatura de superficie. Se llevan adelante cálculos termodinámicos que nos permiten convalidar la orientación del análisis propuesto. Se discuten las estrategias institucionales que un proyecto de esta envergadura requiere, se puntualizan temas que quedan pendientes de estudio y se plantea un esquema alternativo a la innovación que solventa algunos de los problemas que se encuentran en el desarrollo. Finalmente, se presentan las conclusiones de este trabajo y se plantean posibles escenarios futuros.

2 Introducción

El enunciado de Carnot del Segundo Principio de la Termodinámica expresa: “(...) Toda máquina térmica requiere para su funcionamiento de al menos dos fuentes de calor a diferentes temperaturas. La máquina funcionará tomando calor de la fuente a mayor temperatura, que denominaremos fuente caliente, producirá trabajo y entregará calor a la fuente a menor temperatura, que llamaremos fuente fría” (García, 1996). Se define Máquina Térmica a todo equipo que transforma calor en trabajo mecánico operando cíclicamente. Esto es, una máquina constituida por mecanismos y un fluido que evoluciona en ellos, de manera que al describir dicho fluido un ciclo termodinámico se produce la conversión de una cierta cantidad de calor en trabajo mecánico. Cuanto mayor es la diferencia de temperaturas entre ambas fuentes, mayor es el rendimiento termodinámico de la máquina, o sea, mayor será la cantidad de trabajo obtenido a partir de una cierta cantidad de calor aportado.

Conocemos dos tipos de tecnologías que utilizan fuentes a diferentes temperaturas presentes en la naturaleza: La energía geotérmica y la energía termo-oceánica. La primera utiliza saltos térmicos importantes a partir de la diferencia de temperatura entre un fluido geotérmico, típicamente mayor a 150°C, y el ambiente, por ejemplo 20°C. Esto solo es posible en zonas volcánicas donde pueden hallarse los fluidos geotérmicos a las temperaturas requeridas, a profundidades relativamente bajas. La segunda utiliza saltos térmicos bajos, del orden de 25°C, y los obtiene de la diferencia de temperatura entre el agua de mar superficial y el agua a mayor profundidad. De nuevo, esto solo es posible en algunos lugares, particularmente mares tropicales.

Surge la inquietud de si es posible extender el límite inferior de temperaturas que permiten el uso de plantas geotérmicas, creando una máquina que funcione con valores bajos de salto térmico, considerando que la energía termo-oceánica funciona con saltos cercanos a los 25 °C.

1.1 La Geotermia

La Tierra está dividida en tres partes: el núcleo (interno y externo), el manto y la corteza.

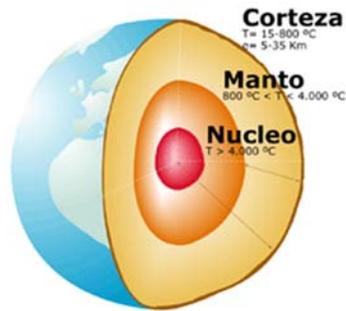


Figura N° 1. Estructura interna de la Tierra ¹

El manto tiene aproximadamente 2900 kilómetros de espesor, es viscoso y está compuesto de magma y roca. La corteza es la parte exterior de la Tierra, es sólida y está dividida en numerosas partes llamadas placas. Dichas placas, también conocidas como tectónicas, se mueven como un bloque relativamente rígido sobre el manto superior. Es en los bordes de las placas donde se concentra la actividad sísmica, volcánica y tectónica.

El gradiente geotérmico es el aumento de la temperatura con la profundidad de la corteza terrestre. Tiene valores típicos de 25-30 °C/Km. Un pozo de 1 Km de profundidad en formaciones de roca seca tendrá una temperatura de fondo cercana a los 40 °C en muchas partes del mundo suponiendo una temperatura media anual del aire de 15 °C (Fridleifsson et al., 2008).

La mayor fuente del calor interno de la tierra está dada por el decaimiento de los elementos radiactivos en la corteza y el manto superior. La corteza de la tierra está compuesta de varios tipos de roca las cuales contienen algunos isótopos radiactivos, en particular, uranio (U-235, U-238), torio (Th-232) y potasio (K-40). Se piensa que el calor liberado por estas reacciones nucleares es el responsable del calor natural que alcanza la superficie de la tierra (Di Pippo, 2012).

¹ <http://www.igme.es/Geotermia/La%20energ%EDa%20geot%E9rmica.htm>, visitado el 27/3/2021

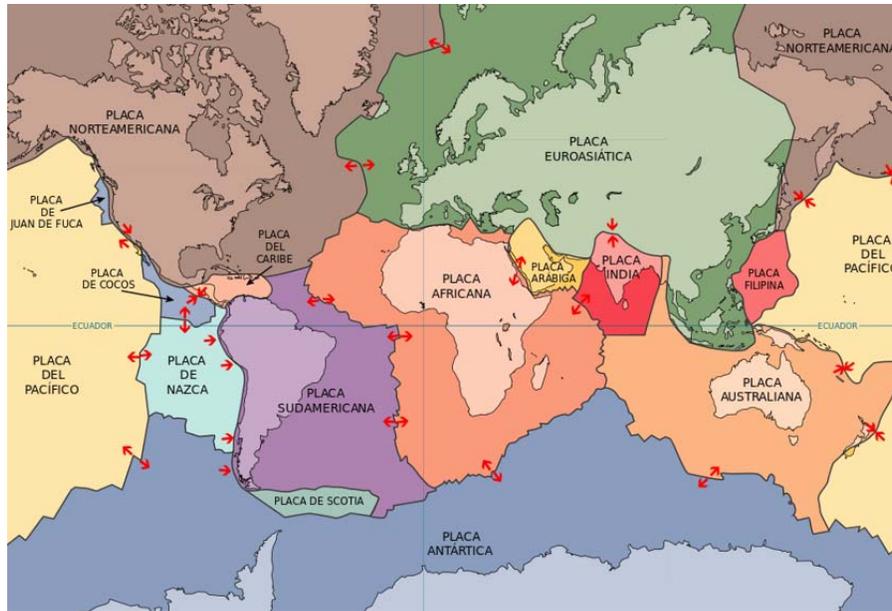


Figura N° 2. Placas tectónicas ²

Matemáticamente el gradiente geotérmico está representado por la ecuación (Sigismondi y Ramos, 2008):

$$\nabla T = \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) = (T_2 - T_1) / \Delta z$$

En la ecuación, T1 y T2 son dos puntos de lectura de temperatura que están separados por la distancia Δz .

El aumento de temperatura con la profundidad provoca entonces que las rocas se transformen en magma. Es en los bordes de las placas donde el magma encuentra su camino hacia la superficie, y es por eso que los volcanes prevalecen en estas áreas. El movimiento tectónico de placas causa el movimiento ascendente del magma desde los bordes, atrapando y formando reservorios de vapor y agua caliente (Rinkesh, 2013). Podemos alcanzar un reservorio de vapor y agua caliente mediante la perforación de un pozo, de forma de llevar los fluidos a

² <https://pubs.usgs.gov/gip/dynamic/slabs.html>, visitado el 28/3/21

superficie para ser utilizados como fuente caliente en una máquina térmica. Esta ha sido la técnica utilizada en la industria hasta el momento para construir plantas de energía geotérmica.

Las plantas geotérmicas de potencia se clasifican en tres tipos (Conserve Energy Future, 2018): (1) de vapor seco (2) flash (3) binarias, en orden descendente de temperatura del fluido geotérmico.

Las plantas de vapor seco generan potencia directamente desde el vapor extraído del pozo, el que mueve una turbina conectada a un generador eléctrico. Este tipo de planta presenta un gran desarrollo como puede verse en la Tabla N° 1, a pesar de que los depósitos hidrotermales naturales de vapor seco son muy raros. Típicamente, utiliza vapor a temperaturas mayores a 200°C.

Country	Dry steam	1-Flash	2-Flash	3-Flash	Binary	Flash-binary	Hybrid	Total
United States	1477	49	707.3	49	466.13	20	6	2774.43
Philippines	0	1648	50.9	0	0	142	0	1840.9
Indonesia	445	689	0	0	0	0	0	1134
Mexico	0	540	440	0	3.3	0	0	983.3
Italy	862.5	20	0	0	0	0	0	882.5
New Zealand	55	5	326.8	176.8	84.2	135.5	0	783.3
Iceland	30	614.7	60	0	10.7	0	0	715.4
Japan	23.5	351.75	160	0	2.49	0	0	537.74
Costa Rica	0	144	0	0	61	0	0	205
El Salvador	0	160	35	0	9.3	0	0	204.3
Kenya	0	116.4	0	0	1.8	48	0	166.2
Turkey	0	20.4	47.4	0	27.18	0	0	94.98
Nicaragua	0	80	0	0	7.5	0	0	87.5
Russia	0	79	0	0	0	0	0	79
Papua-New Guinea	0	56	0	0	0	0	0	56
Guatemala	0	0	0	0	0	44.6	0	44.6
Portugal – San Miguel	0	0	0	0	26	0	0	26
China	0	0	24	0	0	0	0	24
France – Guadeloupe	0	10	4.7	0	0	0	0	14.7
Ethiopia	0	0	0	0	0	8.5	0	8.5
Germany	0	0	0	0	6.75	0	0	6.75
Austria	0	0	0	0	1.45	0	0	1.45
Thailand	0	0	0	0	0.3	0	0	0.3
Australia	0	0	0	0	0.15	0	0	0.15
Totals	2893	4581.26	1856.1	225.8	707.76	398.6	6	10668.52
Percent of total	27.12	42.94	17.40	2.12	6.63	3.74	0.06	100

Tabla N° 1. Plantas Geotérmicas de Potencia: MW instalados por tipo de planta hasta el año 2011 (Di Pippo, 2012)

Las plantas tipo flash utilizan agua caliente a temperaturas superiores a 180 °C. El proceso consiste en hacer pasar el agua extraída del pozo por un tanque de evaporación. Mediante una caída de presión se separa el fluido en líquido y vapor. Este último se deriva a una turbina para generar potencia. Existen plantas más complejas con dos e incluso tres procesos de flash.

Las plantas de tipo binario utilizan temperaturas más bajas, pudiendo llegar a unos 80°C. Es decir, un salto térmico cercano a los 60°C si consideramos una temperatura ambiente de 20°C. Este tipo de planta usa el agua a alta temperatura para calentar otro fluido que tiene un punto de ebullición más bajo que el agua. El fluido se vaporiza, impulsa la turbina y luego se condensa en líquido para comenzar nuevamente el ciclo. La eficiencia de una planta binaria es comparativamente baja y su economía cuestionable a bajas temperaturas. Esta es la razón del por qué las plantas binarias se construyen frecuentemente en conjunto con sistemas de calefacción en plantas de cogeneración.

Algunos recursos geotérmicos demandan sistemas de conversión de energía más sofisticados que los detallados arriba, y así han evolucionado para ajustarse a las necesidades específicas de los campos en desarrollo, integrando diferentes tipos de plantas de potencia. Por ejemplo, plantas híbridas que combinan sistemas flash y binarios (Di Pippo, 2012).

La Tabla N°2 indica las cantidades de plantas instaladas por tipo y por país. La información corresponde hasta el año 2011.

Country	Dry steam	1-Flash	2-Flash	3-Flash	Binary	Flash-binary	Hybrid	Total
United States	26	3	28	1	184	10	1	253
Philippines	0	42	1	0	0	5	0	48
New Zealand	1	1	10	5	10	16	0	43
Mexico	0	32	4	0	3	0	0	39
Italy	34	1	0	0	0	0	0	35
Iceland	1	20	2	0	8	0	0	31
Indonesia	8	15	0	0	0	0	0	23
Japan	1	16	3	0	1	0	0	21
Kenya	0	6	0	0	1	6	0	13
Russia	0	12	0	0	0	0	0	12
Guatemala	0	0	0	0	0	9	0	9
China	0	0	8	0	0	0	0	8
Costa Rica	0	4	0	0	4	0	0	8
Turkey	0	1	1	0	6	0	0	8
El Salvador	0	5	1	0	1	0	0	7
Papua-New Guinea	0	6	0	0	0	0	0	6
Portugal – San Miguel	0	0	0	0	6	0	0	6
Nicaragua	0	4	0	0	1	0	0	5
Germany	0	0	0	0	4	0	0	4
Austria	0	0	0	0	3	0	0	3
France – Guadeloupe	0	1	1	0	0	0	0	2
Australia	0	0	0	0	1	0	0	1
Ethiopia	0	0	0	0	0	1	0	1
Thailand	0	0	0	0	1	0	0	1
Totals	71	169	59	6	234	47	1	587
Percent of total	12.10	28.79	10.05	1.02	39.86	8.01	0.17	100

Tabla N° 2. Plantas Geotérmicas de Potencia: Número de unidades por tipo de planta hasta el año 2011 (Di Pippo, 2012)

Una gran parte de los recursos geotérmicos más aptos para generación de potencia, aquellos de temperaturas superiores a 150°C, se encuentran a grandes profundidades más allá del alcance de la tecnología actual. La perforación de un pozo geotérmico en zonas volcánicas es generalmente complicada, por tratarse de rocas de gran dureza y la presencia de alta temperatura. Recursos de menor temperatura, los cuales son mucho más comunes, son generalmente utilizados para calefacción, pero podrían ser una nueva fuente de potencia si los investigadores fueran capaces de encontrar una forma económica de convertir estos en electricidad. Algunos prototipos que usan temperaturas tan bajas como 74°C han sido desarrollados y testeados, utilizando el concepto de un sistema de refrigeración operando en forma inversa para generar electricidad (Patel, 2006).

Si perforamos un pozo de 1000 metros de profundidad en una zona de gradiente térmico estándar, obtenemos una diferencia de temperatura cercana a los 30 °C entre la superficie y el fondo. Si fuese posible aprovechar este salto térmico, se haría en una zona inherentemente no volcánica, por lo que se extendería el uso de la geotermia. Se puede pensar en la construcción de un pozo en una cuenca sedimentaria, donde se perforarían formaciones de baja dureza con relativa facilidad, y se tendría agua de formación disponible para el funcionamiento de los intercambiadores de calor. El desafío es encontrar la tecnología necesaria que pueda aprovechar un salto térmico tan bajo, buscando el equilibrio técnico-económico entre profundidad de pozo y salto térmico. A mayor profundidad, mayor salto térmico y mayor rendimiento de la máquina, pero mayor costo de la instalación.

3 Aspectos Metodológicos

El presente trabajo propone: en primer lugar indagar sobre las características de dos formas de energía renovable conocidas como energía geotérmica y energía termo-oceánica, a partir de analizar material teórico y literatura; en segundo lugar se plantea una innovación que pretende hacer uso de la energía geotérmica, extendida a una zona donde actualmente se considera no factible desarrollarla, tratando de trasladar conceptos de la energía termo-oceánica; por último se desarrolla un planeamiento de las estrategias político-institucionales que se requieren para investigar la temática y hacer posible nuestra propuesta.

Las preguntas surgen en tres ejes:

- ¿Qué avances actualizados hay acerca de los conocimientos referidos a la energía geotérmica y la termo-oceánica? ¿Qué potencial tiene cada una según el contexto y las demandas actuales?
- ¿Qué condiciones técnico-económicas deben darse para poder desarrollar la energía geotérmica y la termo-oceánica? ¿Cuál es el impacto ambiental de cada una?
- ¿Cuáles son las ventajas y desventajas de cada una considerando los avances tecnológicos? ¿Qué estructuras institucionales deben abordar los distintos procesos?

El objetivo general es comprender la factibilidad de ampliación del campo de aplicación de la energía geotérmica, desde zonas volcánicas a zonas no volcánicas. Los objetivos específicos son analizar la teoría acerca de la geotermia, la energía termo-oceánica y sus usos; evaluar las posibilidades para la construcción de una máquina térmica que pueda aprovechar el salto térmico disponible en un eventual pozo en tierra; y finalmente desarrollar el plan investigativo-institucional que requiere llevar adelante.

Se evalúan las posibilidades de funcionamiento de una planta de generación geotérmica de tipo binario, que utiliza un salto térmico más bajo que el planteado como posible por Lindal (1973). Se efectúa este planteo por la certeza que ofrece el funcionamiento de máquinas termo-oceánicas, que utilizan saltos térmicos en torno a 20°C. En esta instancia se recurre a un tratamiento cuantitativo del problema, incluyendo cálculos termodinámicos básicos a fin de conocer: la potencia y los rendimientos térmicos esperables, los tipos de ciclos termodinámicos y las características y dimensiones de los intercambiadores de calor necesarios. Finalmente, en

un momento de síntesis, se confrontan e integran los resultados descriptivos bibliográficos con el proceso analítico cualitativo y cuantitativo, para responder a los objetivos de construcción de nuevos conocimientos que fueron planteados.

4 Definición del problema

La energía representa un recurso estratégico para las economías de los pueblos. La sobreexplotación de recursos naturales, la consecuente contaminación del medio ambiente y la desigualdad económica, han llevado en los últimos tiempos al planteo de predicciones apocalípticas sobre el futuro de nuestra civilización. Hay un grupo de energías que parecen paliar los problemas mencionados, las energías renovables. Son por definición, tecnologías que obtienen energía de fuentes naturales virtualmente inagotables. Esta última cualidad se entiende porque las fuentes almacenan una gigantesca cantidad de energía o bien porque son capaces de regenerarse por medios naturales. Dentro del grupo de energías renovables utilizadas para generar electricidad, tenemos:

- la eólica, aprovecha la fuerza del viento
- la hidroeléctrica, utiliza la energía potencial acumulada en embalses de ríos
- la mareomotriz, o energía de las mareas
- la undimotriz, o energía de las olas
- la solar, aprovechamiento de la radiación solar mediante el uso de paneles fotovoltaicos
- los biocarburantes, mezcla de sustancias orgánicas derivadas de la biomasa y utilizada como combustible en motores de combustión interna
- la biomasa, energía química almacenada en las plantas en forma de materia orgánica que puede quemarse en forma directa o puede transformarse en combustible
- la geotérmica, es la parte del calor contenido en la tierra que puede ser recuperado y explotado por el hombre. Dickson y Fanelli (2004) nos dicen que, "(...) hasta ahora la utilización que hemos dado a esta energía ha estado limitada a áreas en las cuales condiciones geológicas permiten un portador (agua en la fase líquida o vapor) para transferir el calor desde zonas calientes profundas a la superficie o su cercanía, dando origen así a los recursos geotérmicos. Técnicas innovadoras en el futuro cercano, sin embargo, pueden ofrecer nuevas perspectivas en este sector".
- la termo-oceánica, "esta tecnología está basada en el principio de que la energía puede ser extraída de dos fuentes, si ellas están a diferentes temperaturas. Una

diferencia de temperatura de alrededor de 20°C puede ser explotada efectivamente para producir energía utilizable. Diferencias de temperatura de esta magnitud existen en aguas oceánicas entre la superficie y 1000 metros de profundidad en muchas partes del planeta, en latitudes tropicales” (Bharathan et al., 1990:1).

El mayor detalle que hemos dado a la energía geotérmica y a la termo-oceánica no es casual, ya que son los dos tipos de tecnologías sobre los que basamos el presente trabajo. Es interesante mencionar que la energía geotérmica aprovecha en realidad la energía térmica proveniente del decaimiento lento de isótopos radiactivos en la corteza terrestre, es decir, es energía nuclear per se. Además, la energía termo-oceánica, aprovecha la energía solar almacenada en los océanos luego de recibirla en forma de radiación. Es entonces una variante de la energía solar.

Hoy, la tendencia para la ciencia y la investigación aplicada, es profundizar el uso de energías renovables. Según Randall (2015) “El auge de las energías renovables está aquí. Trillones de dólares se invertirán en los próximos 25 años, conduciendo algunos de los cambios más profundos en cómo los seres humanos obtienen su electricidad (...)”. El autor se basa en el trabajo de Henbest y Giannakopoulou (2015), quienes nos ofrecen un pronóstico de la evolución de la capacidad eléctrica de acuerdo a su fuente de origen. Allí se señala a la energía solar como la de mayor crecimiento comparativo respecto a los otros tipos, según podemos ver en la Figura N° 3.

Tanto la geotermia como la energía termo-oceánica hacen uso de un salto térmico presente en la naturaleza para su funcionamiento. La Energía termo-oceánica aprovecha la diferencia de temperatura entre el agua de mar superficial y el agua a mayor profundidad más fría; y, la Energía geotérmica, aprovecha la diferencia de temperatura entre los fluidos termales y el medio ambiente.

Una instalación geotérmica no puede ser emplazada en cualquier lugar, sino en zonas volcánicas donde se encuentran yacimientos de aguas y vapores termales, con una temperatura suficiente para hacer funcionar la misma a un rendimiento aceptable. Las turbinas convencionales requieren fluidos a temperaturas mayores a 150°C. Sin embargo, instalaciones modernas de tipo binario pueden funcionar con agua a temperatura mayor a 85°C (Lindal, 1973).

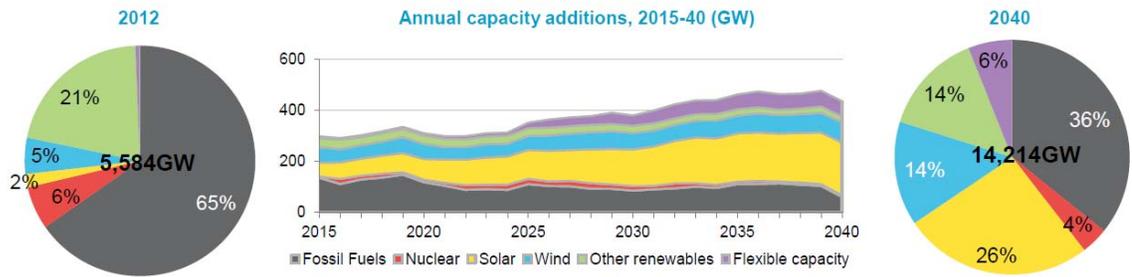


Figura N° 3. Adiciones de capacidad de electricidad, en gigavatios ³

La figura siguiente nos muestra aquellas zonas del planeta que cuentan con potencial geotérmico en las condiciones actuales:

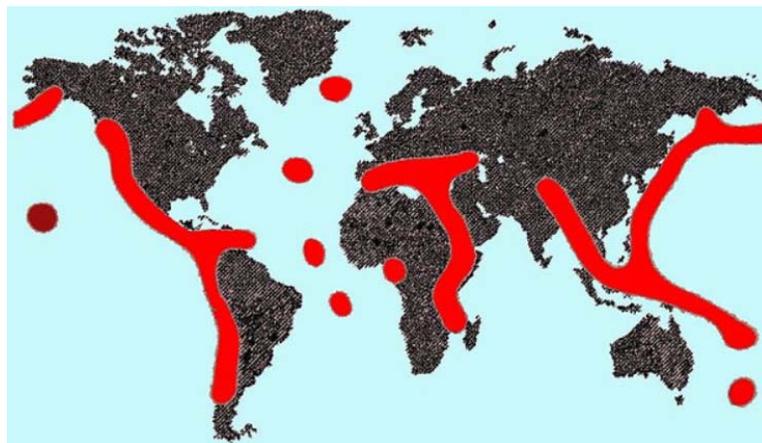


Figura N° 4. Zonas de potencial Geotérmico ⁴

Los 20°C a 25°C necesarios para la operación de las plantas termo-oceánicas, sólo se pueden obtener en algunos mares tropicales, como puede apreciarse en la Figura 4.

³ <http://www.bloomberg.com/company/new-energy-outlook/>, visitado el 12/10/19

⁴ <http://www.centralenergia.cl/2010/10/06/potencial-geotermico-de-chile/>, visitado el 28/3/21

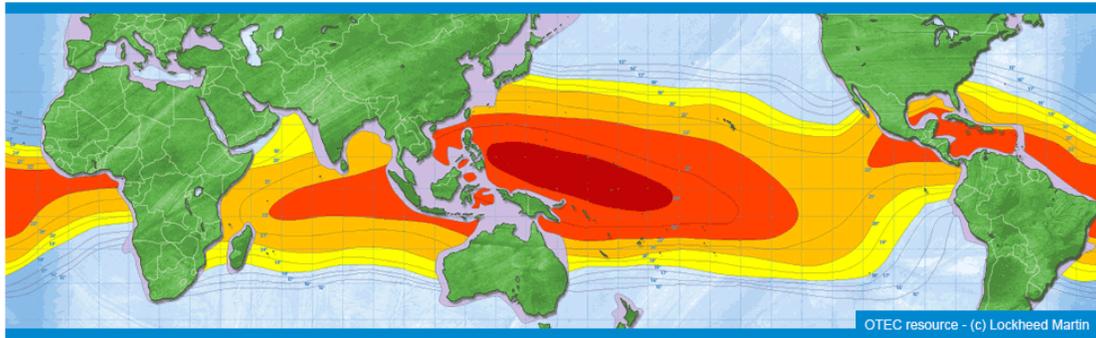


Figura N° 5. Diferencia de temperatura entre la superficie y 1000 metros de profundidad ⁵

Dickson y Fanelli (2004), en su trabajo sobre la energía geotérmica, ofrecen algunos datos de costos de generación de energía eléctrica en comparación con otras energías renovables. Si se confronta a la geotermia con la energía eólica, más cercana en costos, los valores para el año 2001 eran de 2 – 10 US\$/KWh versus 5 – 13 US\$/KWh, respectivamente. Comparaciones sobre los costos de inversión “llave en mano” también para el año 2001, mostraban para la energía geotérmica valores de 800 - 3000 US\$/KW, mientras que para la biomasa los valores eran de 900 – 3000 US\$/KW y para la energía eólica de 1100 – 1700 US\$/KW. La energía termo-oceánica requiere costos de inversión importantes, valores de 4000 a 11000 US\$/KW instalado. Por su parte, Masutani y Takahashi (2001) nos dan un poco más de detalle para las plantas termo-oceánicas, separándolas en dos tamaños: (1) Plantas en el rango de 1-10 MW basadas en tierra o en plataformas cercanas a la costa, requerirían una inversión de 10000 a 20000 US\$/KW instalado; (2) Plantas flotantes de ciclo cerrado, en el rango de 50-100 MW, tendrían un costo de 5000 US\$/KW instalado. Los mismos autores, nos presentan un costo comparativo de instalación de 1000 – 2000 US\$/KW para plantas que utilizan combustible fósil.

A partir de lo antes mencionado, surge la pregunta central del problema que aquí planteamos y que guiará la investigación que se propone realizar: ¿es posible pensar en una instalación

⁵ <http://www.otecnews.org/>, visitado el 16/10/19

geotérmica que opere con valores de salto térmico similares a los utilizados por la energía termo-oceánica? ¿Se puede pensar en ampliar el campo de aplicación de la energía geotérmica desde zonas volcánicas a zonas no volcánicas? Se debe considerar la dificultad en la perforación del pozo y la disponibilidad de agua de formación en grandes cantidades, para operar los intercambiadores de calor, lo que también limita de alguna manera la ubicación geográfica de esta tecnología.

5 Generación de Energía a través de dos fuentes a diferente temperatura

5.1 Máquina Térmica

La energía tiene calidad, así como cantidad (Wark, Richards, 2001). El trabajo puede transformarse en un 100% en calor, pero la situación inversa no es posible. El trabajo es una forma de transferencia de energía más valiosa que el calor. Cuanto mayor sea la temperatura a la que tiene lugar la transferencia de calor, mayor es la cantidad de calor transferido que puede convertirse en trabajo útil. Entonces, la energía disponible a altas temperaturas es más útil que la que se dispone a menor temperatura. Ejemplo de esto es la inmensa cantidad de energía almacenada en los océanos, pero su capacidad de aprovechamiento es muy pequeña, razón por la cual no han proliferado aún las máquinas termo-oceánicas.

Cada vez que la energía se transforma o se transfiere se conserva, pero también se degrada, es decir, pierde capacidad de aprovechamiento. Esto último es sobre todo cierto cuando la transferencia es en forma de calor. La Primera Ley de la Termodinámica se relaciona con la conservación de la energía, mientras que la Segunda Ley de la Termodinámica nos permite medir la degradación de la energía, así como su calidad (Wark et al., 2001).

No pretendemos dar una explicación termodinámica completa de las leyes, pero al menos las enunciaremos. La Figura N°6 considera un volumen de control (VC), donde \dot{Q}_{vc} es el flujo de calor que atraviesa la superficie de control, \dot{W}_{vc} es el trabajo transferido a través de la misma superficie, \dot{m}_e y \dot{m}_s son los caudales másicos de entrada y salida al sistema respectivamente, e_e y e_s representan la energía de entrada y salida.

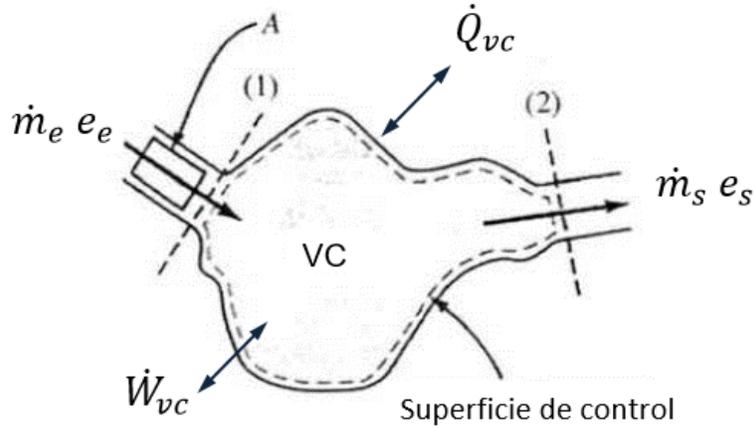


Figura N° 6. Volumen de control en un sistema abierto (Adaptado de Wark et al., 2001)

La Primera Ley de la Termodinámica nos dice que:

$$\begin{aligned}
 & \left(\begin{array}{c} \text{Variación de energía respecto} \\ \text{al tiempo dentro del volumen} \\ \text{de control} \end{array} \right) \\
 &= \left(\begin{array}{c} \text{flujos de energía} \\ \text{que atraviesan la frontera} \\ \text{como calor y trabajo} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{flujos de energía} \\ \text{total que entra con la masa} \\ \text{en el VC} \end{array} \right) \\
 &- \left(\begin{array}{c} \text{flujos de energía} \\ \text{total que sale con la masa} \\ \text{del VC} \end{array} \right)
 \end{aligned}$$

Matemáticamente:

$$\frac{dE_{vc}}{dt} = \dot{Q}_{vc} + \dot{W}_{vc} + \dot{m}_e e_e - \dot{m}_s e_s$$

Una Máquina Térmica es un dispositivo cíclico que produce trabajo intercambiando calor con dos o más fuentes a diferentes temperaturas. El fluido que describe el ciclo dentro de la

Máquina Térmica se denomina fluido de trabajo. La fuente de temperatura más alta entrega calor a la Máquina Térmica, solo una parte del calor recibido es transformado en trabajo, el resto se entrega a la fuente de menor temperatura.

Un proceso reversible es una idealización mediante la cual sistema y medio con el que interactúa pueden ser devueltos a sus estados iniciales sin dejar alteraciones en el universo. Esto sólo es posible si el calor neto y el trabajo neto intercambiados entre sistema y medio son cero al final del proceso completo (original e inverso). Los procesos reversibles son procesos idealizados que permiten determinar los límites teóricos de los procesos reales. Todos los procesos reales son irreversibles.

Sadi Carnot (1824) postuló una Máquina Térmica ideal, interna y externamente reversible. La máquina describe un ciclo reversible sin gradientes ni efectos de disipación, y los intercambios de calor se deben a diferencias infinitesimales de temperatura.

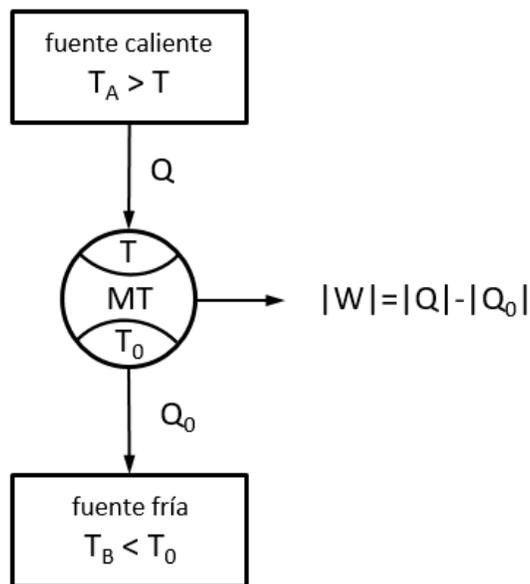


Figura N° 7. Representación de una Máquina Térmica que funciona entre dos fuentes de Temperaturas T_A y T_B .

El ciclo de Carnot, que representa los parámetros termodinámicos del fluido dentro de la máquina, está compuesto por los siguientes procesos reversibles: compresión isoentrópica 1-2, expansión isotérmica 2-3, expansión isoentrópica 3-4 y compresión isotérmica 4-1.

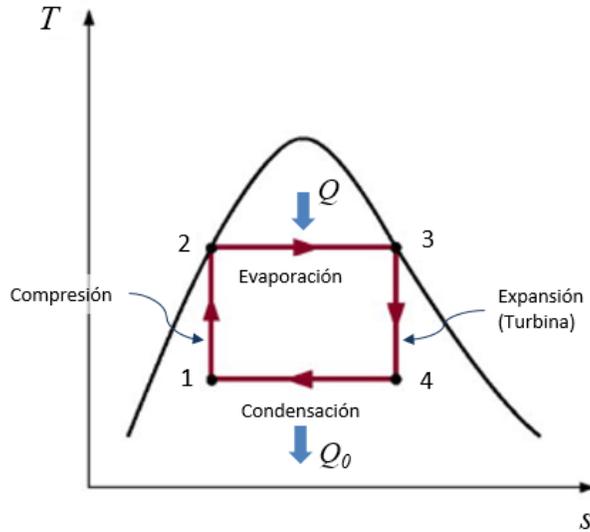


Figura N° 8. Ciclo de Carnot.

A partir del trabajo de Carnot se desprenden los siguientes principios:

Postulado A: el rendimiento térmico de una Máquina Térmica *Reversible* es función exclusiva de las temperaturas de las fuentes sin importar el diseño del dispositivo ni el fluido utilizado para su funcionamiento:

$$\eta_c = 1 - \frac{T_0}{T} = f(T_0, T) \quad \text{Rendimiento de Carnot}$$

Postulado B: el rendimiento térmico de una Máquina Térmica *Real* siempre es menor o a lo sumo igual al de una Máquina Térmica *Reversible* que funcione entre las mismas fuentes:

$$\eta_t = \frac{|W_{NETO}|}{|Q|} \leq \eta_c$$

A partir de los estudios de Carnot, Rudolf Clausius (1850) encontró que para la Máquina Térmica Reversible:

$$\frac{|Q|}{T} = \frac{|Q_0|}{T_0}$$

La cantidad Q_i/T_i se denomina *Entropía* y se representa con la letra S . Se comporta como una función de estado o propiedad del sistema. En la Máquina Térmica de Carnot, la entropía que entra es igual a la entropía que sale. Es decir, en una Máquina Térmica ideal o reversible no solo se conserva la energía sino también la entropía.

Sin embargo, en una Máquina Térmica Real que funciona entre las mismas fuentes de temperatura, se produce menos trabajo y esa diferencia se desprende como más calor a la fuente fría. Por lo tanto, la entropía de salida es mayor que la de entrada. Se ha generado entropía.

Representamos lo anterior con la desigualdad de Clausius, válida para ciclos reversibles ($=0$) e irreversibles (<0):

$$\sum_i \frac{Q_i}{T_i} \leq 0$$

Podemos enunciar el Segundo Principio de la Termodinámica de la siguiente manera: *En sistemas aislados la energía total permanece constante y la entropía siempre aumenta encontrando un máximo cuando alcanza el equilibrio.*

Tal como hicimos con la energía, podemos plantear un balance de entropía. La Figura N°9 representa un sistema abierto, donde $\dot{\sigma}$ es la entropía generada, que es siempre mayor o igual a cero, correspondiendo la igualdad a procesos reversibles. \dot{Q}_i es el calor intercambiado en el punto i de la superficie, que está a la temperatura T_i . s_e y s_s son la entropía de entrada y salida respectivamente.

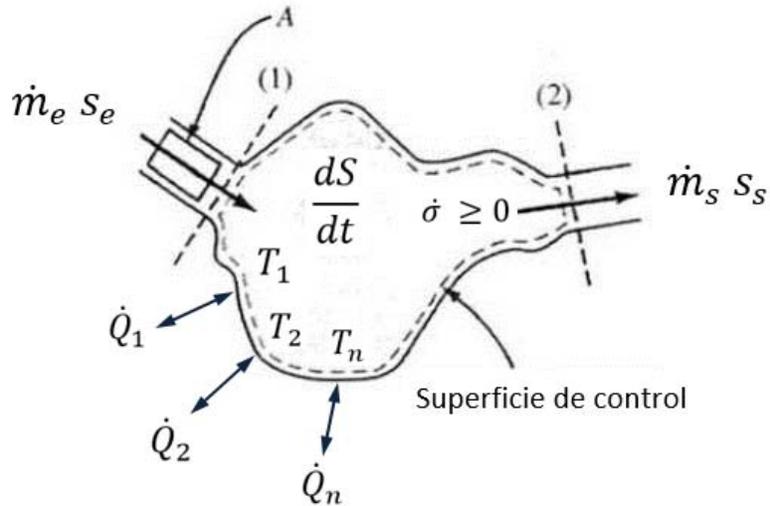


Figura N° 9. Volumen de control en un sistema abierto (Adaptado de Wark et al., 2001)

$$\begin{aligned}
 & \left(\begin{array}{c} \text{Variación de entropía respecto} \\ \text{al tiempo dentro del volumen} \\ \text{de control} \end{array} \right) \\
 = & \left(\begin{array}{c} \text{Flujo neto de entropía} \\ \text{debido al flujo de} \\ \text{calor} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{Flujo neto de entropía} \\ \text{debido al flujo de} \\ \text{masa} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{Producción de entropía} \\ \text{por unidad de tiempo} \\ \text{debida a} \\ \text{irreversibilidades} \end{array} \right)
 \end{aligned}$$

Matemáticamente:

$$\frac{dS}{dt} = \sum_i \frac{\dot{Q}_i}{T_i} + \dot{m}_e s_e - \dot{m}_s s_s + \dot{\sigma}$$

Describiremos ahora el ciclo *Rankine* de potencia de vapor, ya que es de gran utilización en la industria, incluso en las plantas geotérmicas y termo-oceánicas descritas en el presente trabajo.

5.1.1 Ciclo Rankine con recalentamiento

Para describir este ciclo analizamos primero el ciclo de Carnot. El mismo es inviable técnicamente ya que dos de sus procesos son de muy difícil realización: (1) la compresión isoentrópica 1-2 de un fluido bifásico para terminar en líquido saturado en el estado 2 es prácticamente imposible; requeriría además el control de la condensación 4-1 para terminar en el estado 1 con la calidad de vapor deseada, (2) La expansión isoentrópica 3-4 entrega un vapor húmedo con un muy alto contenido de humedad, lo que provocaría que las gotas de agua erosionasen los álabes de la turbina (Wark et al., 2001).

Para sortear estos problemas técnicos se realizan un par de modificaciones al ciclo de Carnot, que permiten llevar adelante un ciclo termodinámico de trabajo realizable: (1) la compresión isotérmica 4-1 se lleva a cabo de manera tal que el vapor húmedo que sale de la turbina se condensa por completo hasta el estado de líquido saturado 1, a la presión de salida de la turbina. Esto permite que el proceso 1-2 se realice ahora mediante una bomba de líquido, elevando isoentrópicamente la presión del líquido que sale del condensador hasta la presión de la caldera o de evaporación. (2) Ahora el proceso 2-3 finaliza en un estado sobrecalentado del fluido, a la temperatura T_3 , de manera tal que la expansión isoentrópica 3-4 finaliza en un estado donde el vapor posee un contenido muy bajo de líquido, evitando los problemas antes mencionados en la turbina.

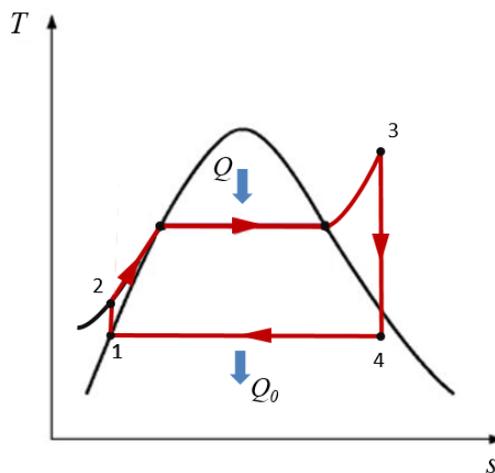


Figura N° 10. Diagrama T-s del ciclo de trabajo Rankine con recalentamiento.

La Figura N°10 muestra el diagrama Temperatura – Entropía del ciclo Rankine con recalentamiento, mientras que la Figura N°11 es un esquema de la instalación mecánica necesaria para poder ejecutar dicho ciclo.

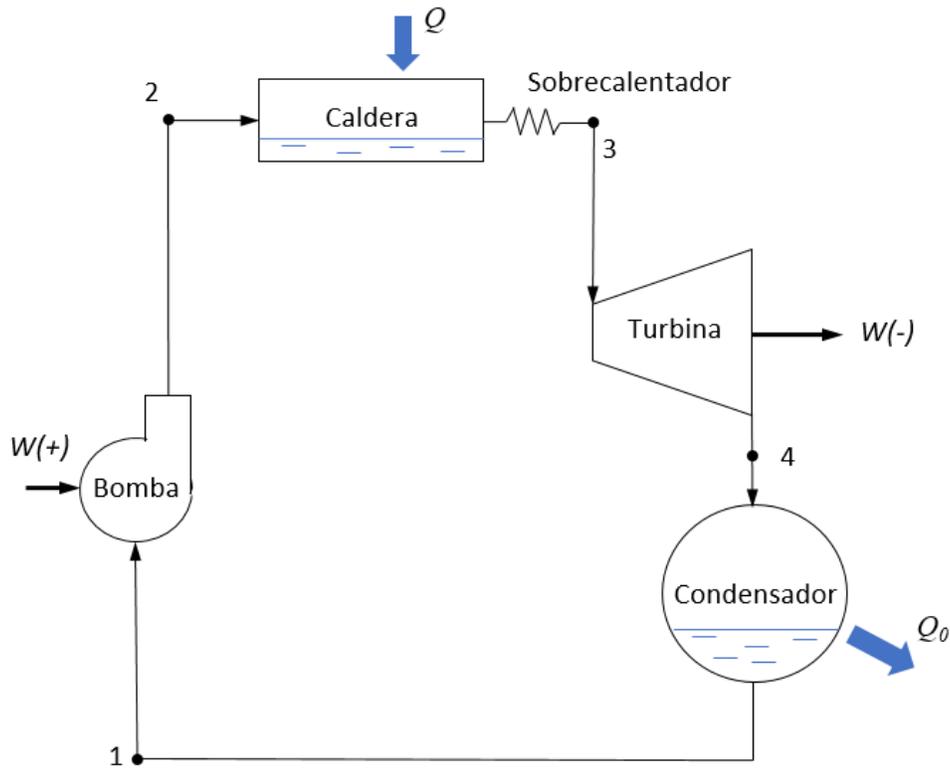


Figura N° 11. Instalación para realizar el ciclo Rankine con recalentamiento

5.2 Tecnologías existentes

Analicemos ahora con un poco más de detalle las tecnologías existentes, para tener una base más sólida sobre la cual plantear nuestra máquina.

5.2.1 Energía Geotérmica

Los cambios climáticos que actualmente acontecen obligan al mundo a moverse rápidamente hacia fuentes de energía primaria más sustentables. El potencial de la energía geotérmica es enorme. Se estima que, en el curso de un año, el equivalente a más de 100 millones de GWh de energía calórica es conducida desde el interior de la Tierra hacia su superficie (Di Pippo, 2012). Pero la energía geotérmica tiende a ser relativamente difusa y difícil de aprovechar; solo una fracción de su inmensa capacidad puede ser utilizada por el hombre.

La capacidad eléctrica geotérmica instalada en todo el mundo en 1995 era de 6833 MWe y en el año 2000, 7974 MWe (Dickson et al., 2004). Por su parte Di Pippo (2012) nos muestra que para el año 2011 la cifra llegaba a 10669 MWe, como habíamos visto en la Tabla N° 1.

Un sistema geotérmico se describe esquemáticamente como “convección de agua en la corteza superior de la Tierra, que, en un espacio confinado, transfiere el calor desde una fuente a un disipador de calor, generalmente la superficie libre” (Dickson et al., 2004). El sistema geotérmico tiene tres componentes: una fuente de calor, un reservorio y un fluido. La fuente de calor puede ser una intrusión magmática que ha alcanzado profundidades relativamente bajas, de 5 a 10 km por ejemplo, y puede tener temperaturas mayores a los 600°C. El reservorio es un volumen de roca caliente permeable que contiene al fluido. Generalmente está cubierto por una capa de roca impermeable y conectado a un espacio de recarga superficial a través del cual las aguas meteóricas pueden reemplazar o reemplazar parcialmente los fluidos que escapan del reservorio por medios naturales (a través de manantiales, por ejemplo) o son extraídos por perforaciones. El fluido geotérmico es agua, en la mayoría de los casos agua meteórica, en fase líquida o vapor, dependiendo de su temperatura y presión.

El mecanismo subyacente a los sistemas geotérmicos está, en general, gobernado por la convección de fluidos. La convección se produce por el calentamiento y consecuente expansión térmica de los fluidos en un campo de gravedad. El fluido calentado de menor densidad tiende a subir y ser reemplazado por un fluido más frío de alta densidad, proveniente de los márgenes del sistema. Todo esto se representa en la Figura N°12.

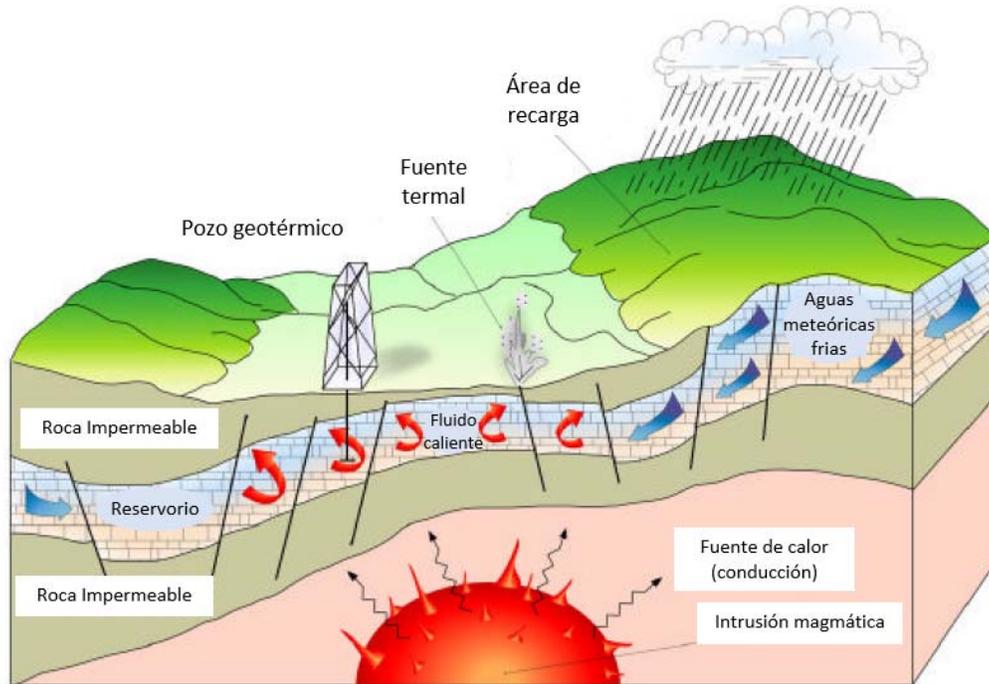


Figura N°12. Representación esquemática de un sistema geotérmico ideal (Dickson et al., 2004)

Existen diversas formas de clasificar a los recursos geotérmicos. El criterio más común se basa en la Entalpía del fluido geotérmico. Dicha propiedad termodinámica es proporcional a la temperatura y se usa para expresar la energía térmica contenida en el fluido. Los recursos se dividen en *baja, media y alta entalpía*. Sin embargo, los criterios pueden ser diferentes dependiendo del autor, como puede observarse en la siguiente tabla:

	Muffler y Cataldi (1978)	Hochstein (1990)	Benderitter y Cormy (1990)	Nicholson (1993)
Recursos de baja entalpía	<90	<125	<100	=150
Recursos de entalpía intermedia	90-150	125-225	100-200	
Recursos de alta entalpía	>150	>225	>200	>150

Tabla N° 3. Clasificación de recursos geotérmicos (°C) (Adaptado de Dickson et al., 2004)

En el caso de Nicholson, se hace una separación entre recursos aptos para generar electricidad ($>150^{\circ}\text{C}$, alta entalpía) y recursos aptos para uso directo como calefacción (baja entalpía).

Otra distinción separa los recursos en *sistemas dominados por agua*, donde el agua líquida es la fase fluida continua que controla la presión y el vapor solo puede estar presente como burbujas, y en *sistemas dominados por vapor*, donde el agua y el vapor coexisten en el reservorio, con el vapor como la fase continua que controla la presión. Ejemplos de este último caso, son los campos Lardarello en Italia y The Geysers en Estados Unidos. Ellos producen vapor seco a sobrecalentado.

Una última categorización de los recursos es aquella basada en el estado de equilibrio del reservorio. Esta considera la circulación del fluido del reservorio y el mecanismo de transferencia de calor. En un *sistema dinámico* el reservorio es continuamente recargado por agua que es calentada y posteriormente descargada a la superficie o bien a formaciones permeables subterráneas. El mecanismo de transferencia de calor es convección del fluido. En un *sistema estático* o estancado no hay recarga de agua o bien es mínima y el calor se transfiere por conducción.

La energía geotérmica se clasifica usualmente como renovable y sustentable. El primer término describe una propiedad de la fuente de energía mientras el segundo describe cómo el recurso es utilizado. Sin embargo, un recurso geotérmico será renovable mientras la tasa de producción sea menor a la de recarga. En caso contrario debería considerarse como un recurso finito. El término desarrollo sustentable es usado por la Comisión Mundial sobre Medio Ambiente y Desarrollo para significar un desarrollo que "...satisface las necesidades de la generación actual sin comprometer las necesidades de las generaciones futuras". Deberíamos dirigir nuestros estudios de sustentabilidad geotérmica de manera de alcanzar y luego mantener un cierto nivel general de producción geotérmica a nivel nacional o regional, durante un período determinado, por ejemplo 300 años, trayendo nuevos sistemas geotérmicos al tiempo que los otros se agotan (Dickson et al., 2004).

Dependiendo del recurso geotérmico y la temperatura de los fluidos que podamos hallar, será el tipo de instalación que pueda aprovechar dicho recurso: (1) planta de vapor seco (2) planta tipo flash (3) planta tipo binaria, en orden descendente de temperatura.

5.2.1.1 Plantas Geotérmicas de vapor seco

Fue el primer tipo de planta geotérmica que logró estatus de comercialización. En general es más simple y económica que los otros tipos de planta. Hay en el mundo solo dos campos principales de vapor seco, Lardarello y The Geysers antes mencionados. Sin embargo, hay 71 plantas operativas alrededor del mundo, aportando el 27% de toda la energía geotérmica generada (Di Pippo, 2012). El esquema de este tipo de plantas es sencillo y puede observarse en la Figura N°13. La Figura N°14 muestra el ciclo termodinámico.

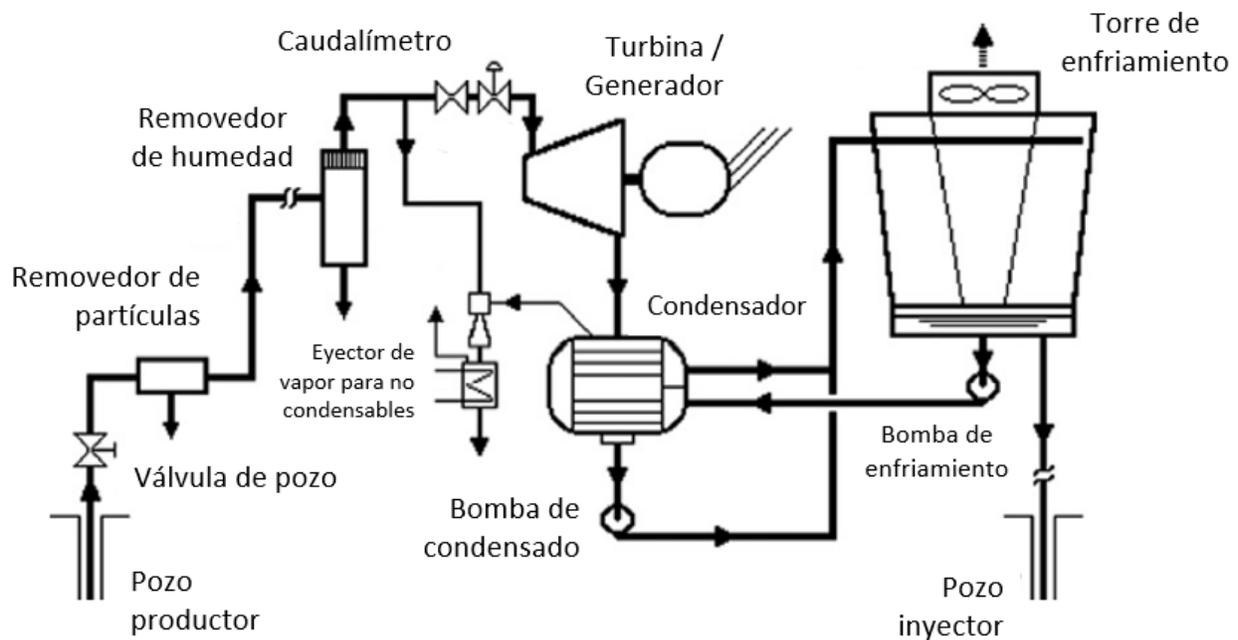


Figura N° 13. Esquema de una instalación de vapor seco (Di Pippo, 2012)

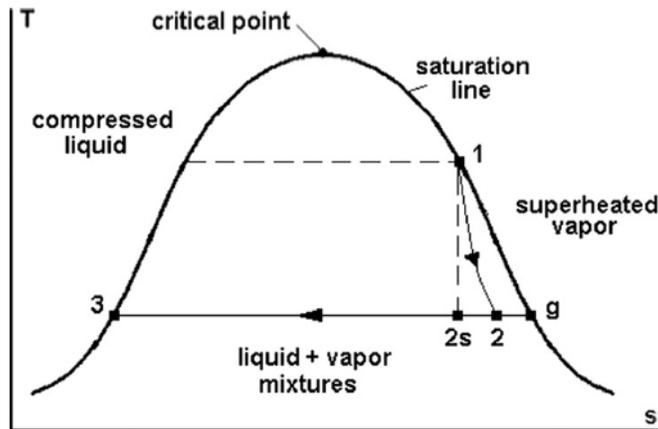


Figura N° 14. Diagrama T-s de un ciclo de vapor seco (Di Pippo, 2012)

5.2.1.2 Plantas Geotérmicas tipo Flash

Existen plantas de flash simple y doble. Las de tipo flash simple son el pilar de la industria geotérmica, ya que frecuentemente es el primer tipo de planta de potencia que se instala en un nuevo campo geotérmico con un sistema dominado por agua, que es mucho más común que los campos de vapor seco. En 2011 había 169 plantas de tipo flash simple, representando el 43% del total de la capacidad geotérmica instalada para generación eléctrica. Además, para la misma fecha había 59 unidades de tipo flash doble, aportando en ese caso el 17% de la capacidad geotérmica eléctrica mundial.

Utiliza típicamente fluidos con temperaturas por encima de 180°C. El término flash refiere al proceso de pasar un líquido presurizado a una mezcla de líquido y vapor, como resultado de bajar la presión del fluido por debajo de su presión de saturación, correspondiente a la temperatura del fluido. Cuando el yacimiento geotérmico aporta un fluido que es una mezcla de líquido y vapor, estas plantas son una manera sencilla de convertir energía geotérmica en electricidad. El proceso de flash puede darse en varios lugares: (1) en el reservorio a medida que el fluido fluye a través de la formación permeable y va perdiendo presión, (2) en el pozo de producción como resultado de la pérdida de presión por fricción o la pérdida de presión hidrostática a medida que sube el fluido, (3) en la entrada del separador ciclónico en un proceso de estrangulamiento inducido por una placa orificio o válvula de control. La mezcla se separa en las dos fases con una mínima pérdida de presión, a través de un recipiente cilíndrico ciclónico de

presión, orientado generalmente de manera vertical, aprovechando la diferente densidad de ambas fases. Por lo demás la instalación es muy similar a las de vapor seco, Figura N°15.

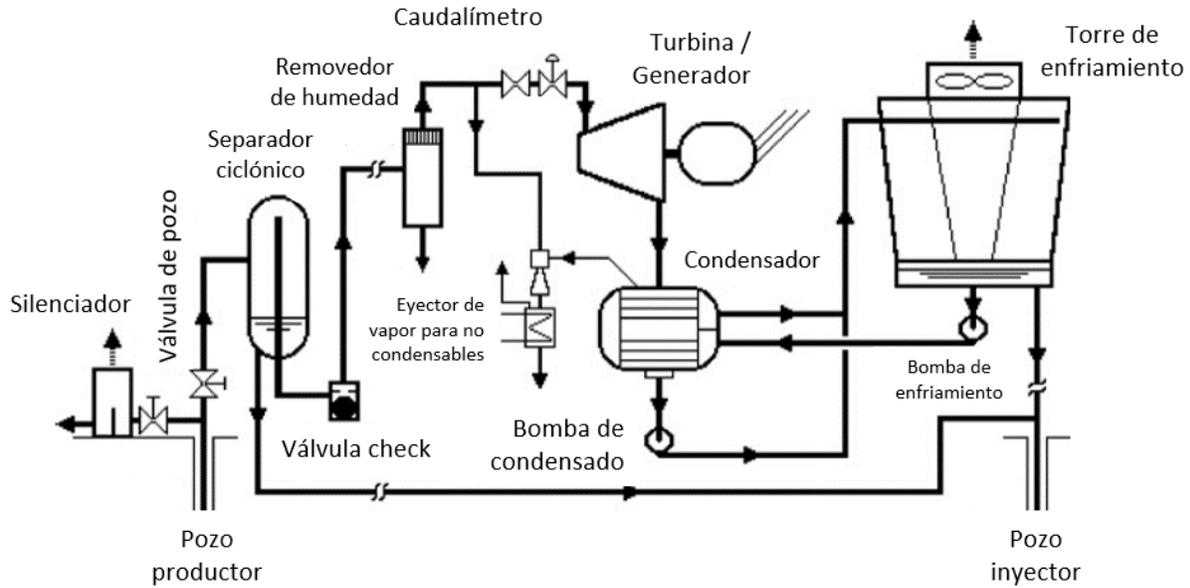


Figura N° 15. Esquema de una instalación tipo flash simple (Di Pippo, 2012)

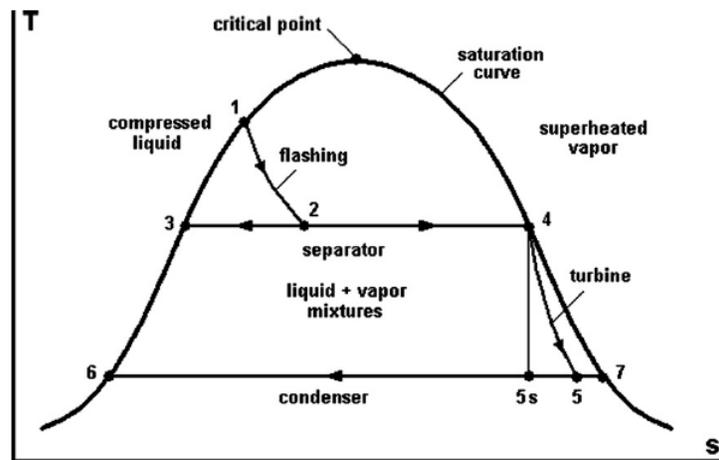


Figura N° 16. Diagrama T-s de un ciclo flash simple (Di Pippo, 2012)

5.2.1.3 Plantas Geotérmicas Binarias

En este tipo de plantas el fluido de trabajo, que es un fluido secundario, describe un ciclo termodinámico cerrado. El fluido de trabajo recibe calor desde el fluido primario proveniente del reservorio, se evapora, se expande en una turbina produciendo trabajo, se condensa y vuelve al evaporador por medio de una bomba de líquido. Hoy es el tipo de planta más desarrollado en el mundo con 235 unidades operativas hasta el año 2011, constituyendo el 40% del total de plantas en el mundo. Los 708 MW generados aportan sin embargo solo el 6.6% del total de la energía geotérmica en el mundo para el mismo año.

A temperaturas por debajo de 150°C es difícil llevar adelante un proceso tipo flash que pueda aprovechar el fluido de manera económica y eficiente. Allí es donde aparecen entonces las plantas binarias, que siguen el esquema de la Figura N°17. Los pozos de producción están equipados con bombas que se colocan por debajo de la profundidad de flash, determinada por las propiedades del yacimiento y el caudal deseado. El proceso de calentamiento del fluido de trabajo consta de dos pasos: (1) el primero se realiza en el pre-calentador donde el fluido de trabajo se lleva a su punto de ebullición, (2) el segundo paso se da en el evaporador o caldera, del cual emerge como vapor saturado. El fluido primario proveniente del reservorio, se mantiene en todo momento y lugar a una presión por encima de su punto de flash a la temperatura del fluido, para evitar la separación de vapor y gases no condensables que podrían provocar la formación de incrustaciones de calcita en la tubería. Además, no se permite que la temperatura del fluido caiga a un punto donde la incrustación de sílice podría convertirse en un problema en el pre-calentador, en las tuberías y los pozos de inyección aguas abajo.

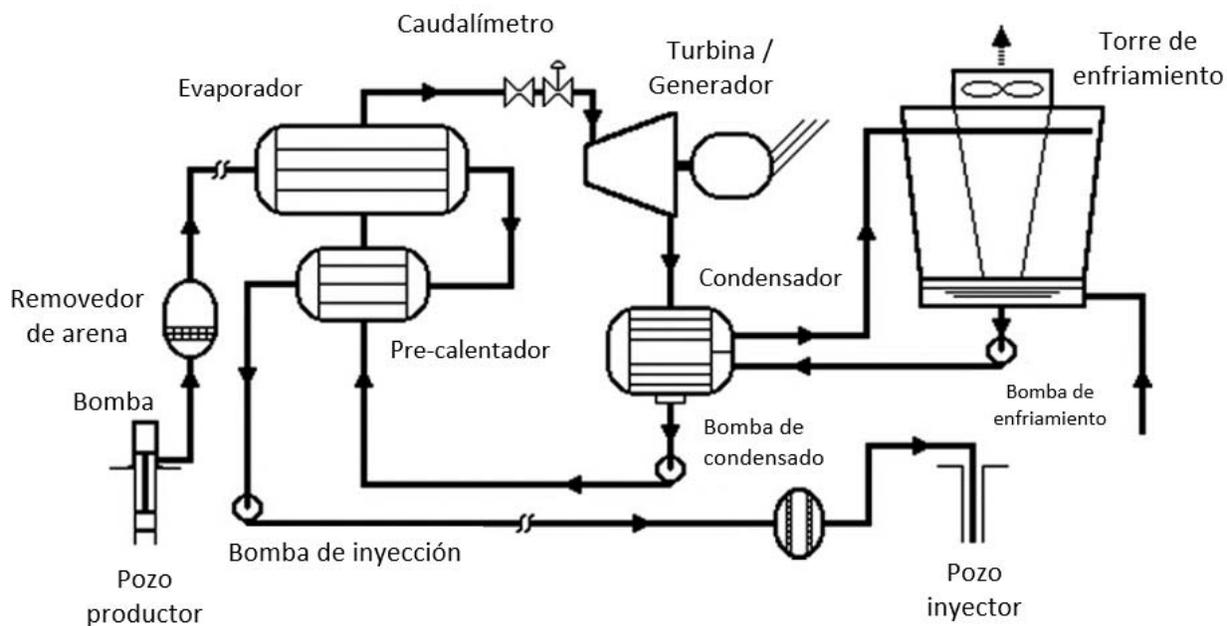


Figura N° 17. Esquema de una instalación tipo binaria (Di Pippo, 2012)

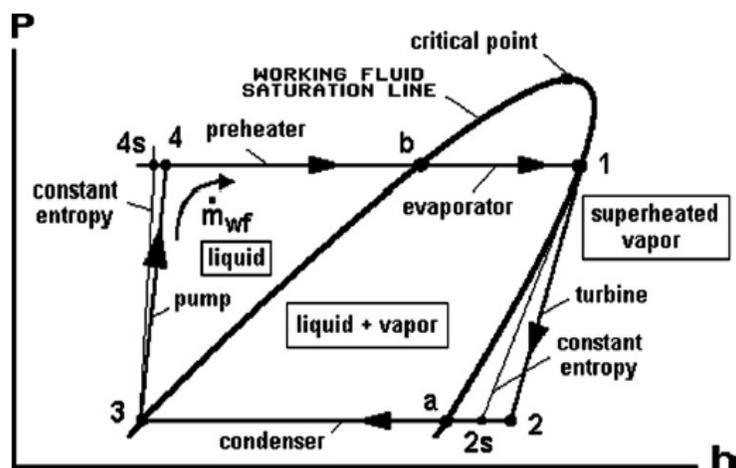


Figura N° 18. Diagrama Presión - Entalpía de un ciclo binario (Di Pippo, 2012)

5.2.2 Energía Termo-oceánica

Un sistema de potencia Termo-oceánico, OTEC (*Ocean-Thermal Energy Conversion*), opera como una máquina térmica cíclica. Recibe energía térmica a través de la transferencia de calor desde el agua superficial de mar calentada por el sol, y transforma parte de esa energía en electricidad. Una fracción significativa de la radiación solar incidente en el océano es retenida por el agua de mar en las regiones tropicales, lo que resulta en temperaturas superficiales promedio durante todo el año de aproximadamente 28°C. Mientras tanto, el agua profunda y fría se forma en latitudes más altas y desciende al fondo marino hacia el ecuador por diferencia de densidad en un movimiento de convección. La capa superficial cálida, que se extiende a profundidades de aproximadamente 100-200 m, se separa del agua fría profunda mediante una termoclina.

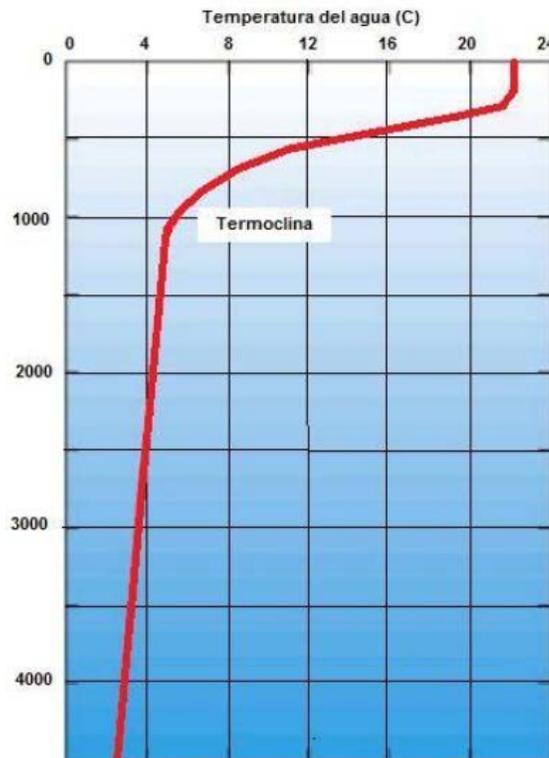


Figura N° 19. Termoclina ⁶

⁶ https://meteoglosario.aemet.es/es/termino/699_termoclina, visitado el 29/3/21

Se define como termoclina a una capa de agua donde la temperatura cambia rápidamente con la profundidad. El agua no es perfectamente transparente, por lo que la mayoría de la luz solar se absorbe en la superficie, lo que produce su calentamiento. El movimiento del agua hace que la capa superficial sea relativamente uniforme. Por debajo de esta capa la temperatura cae rápidamente, por ejemplo 20 °C en los siguientes 150 metros. A esta zona se la denomina termoclina. Luego, a mayor profundidad la temperatura sigue descendiendo, pero de forma mucho más gradual, pudiendo alcanzar valores de 0 °C a 4 °C. La diferencia de temperatura entre la superficie y 1000 metros de profundidad, varía entre 10 °C y 20°C aproximadamente, dependiendo de la latitud, ocurriendo la mayor diferencia en mares ecuatoriales y tropicales.

La Primera Ley de la Termodinámica nos dice que la cantidad de trabajo (electricidad en nuestro caso) producido por la máquina, es igual a la diferencia entre las tasas de transferencia de calor desde la fuente caliente hacia la máquina y aquella desde la máquina hacia la fuente fría. La Segunda Ley de la Termodinámica limita la conversión completa de energía térmica en trabajo, ya que una parte del calor extraído del agua caliente de mar debe ser enviada a un sumidero más frío. El sumidero empleado por las plantas OTEC es agua de mar fría bombeada desde grandes profundidades.

La baja diferencia de temperatura entre la fuente caliente y la fuente fría empleada por plantas OTEC, hace necesaria la utilización de grandes intercambiadores de calor y de elevados caudales de agua de mar para su funcionamiento, para producir cantidades relativamente bajas de electricidad. Esto produce una desventaja que ha limitado la proliferación de este tipo de plantas: los grandes intercambiadores de calor y tuberías extensas y de gran diámetro hacen que se necesite un costo de capital y de inversión inicial muy elevado. Como contrapartida, la ventaja de los sistemas OTEC es que utilizan energía solar renovable por lo que los costos recurrentes son mínimos. También se mencionan beneficios ambientales tangibles como la reducción de las emisiones de CO₂ y de gases de efecto invernadero.

El ciclo utilizado es del tipo *Rankine*. La potencia neta generada surge de la diferencia entre la potencia producida en la turbina y la potencia consumida en las bombas. En una máquina térmica convencional esta diferencia es muy importante y, además, generalmente es despreciable la potencia necesaria para mover el agua de refrigeración del condensador. Sin embargo, en los sistemas OTEC, se requiere bombear volúmenes grandes de agua de mar a través de los intercambiadores de calor, lo que consume una fracción muy importante de la potencia de la turbina, dejando una potencia neta generada marginal. Dada su baja eficiencia, la

implementación exitosa de la tecnología OTEC exige una ingeniería cuidadosa para minimizar las irreversibilidades.

Los sistemas OTEC se clasifican en dos tipos, cerrados y abiertos.

5.2.2.1 Sistemas OTEC cerrados

Los sistemas OTEC de tipo cerrado utilizan un fluido de trabajo en un circuito cerrado que describe un ciclo termodinámico: el fluido se evapora mediante un intercambiador de calor a la temperatura del agua de mar superficial, se expande en la turbina para producir trabajo, se condensa en otro intercambiador de calor a la temperatura del agua de mar de mayor profundidad, para ser bombeado nuevamente al evaporador y completar el ciclo.

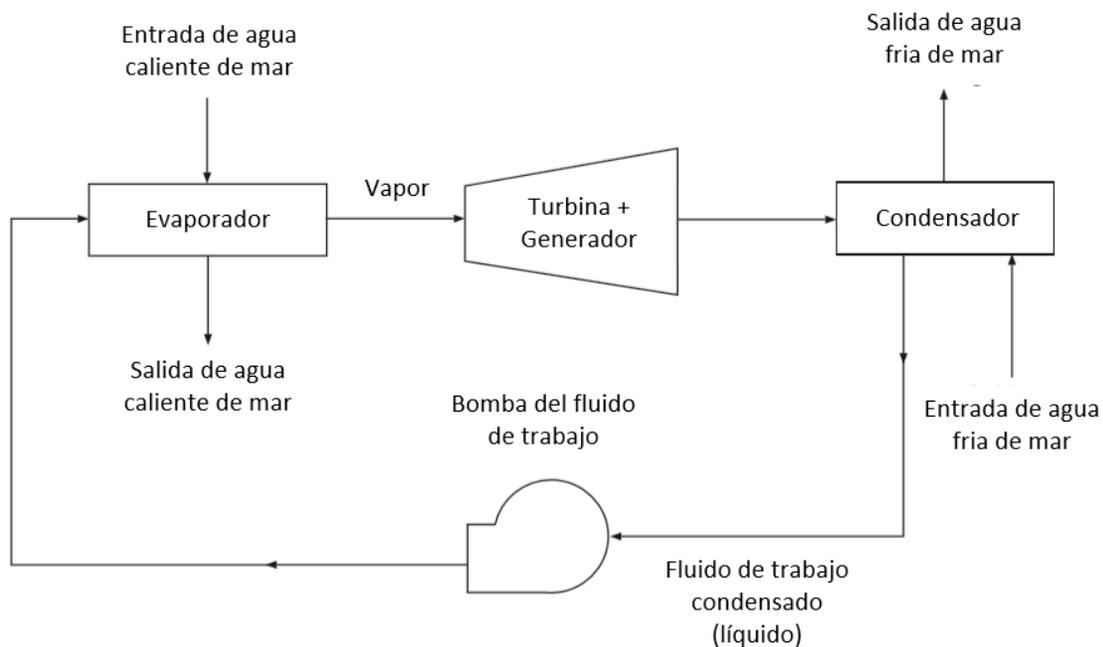


Figura N° 20. Diagrama esquemático de un sistema OTEC de ciclo cerrado (Masutani et al., 2001)

El sistema de alimentación de agua de mar para el funcionamiento de los intercambiadores de calor, evaporador y condensador, representa la mayor parte del consumo de energía parásita y una fracción significativa del costo de capital.

5.2.2.2 Sistemas OTEC abiertos

Para evitar el uso de los costosos intercambiadores de calor y además eliminar la potencial generación de incrustaciones en los mismos, se propuso el sistema OTEC abierto, donde se usa el agua superficial de mar directamente como fluido de trabajo para generar vapor. Entonces, se bombea agua de mar superficial a través de una cámara de vacío, se separa el fluido de trabajo en líquido y vapor, este último se expande en una turbina que conectada a un eje mueve un generador eléctrico, el vapor se condensa luego por contacto directo con agua fría de mar, para finalmente descargar el condensado de agua y gases residuales no condensables. Se elimina entonces la necesidad de uso de los intercambiadores de calor superficiales.

El fluido de trabajo (vapor) se descarga luego de una pasada simple, y los estados termodinámicos inicial y final son diferentes, de allí su nombre de ciclo abierto.

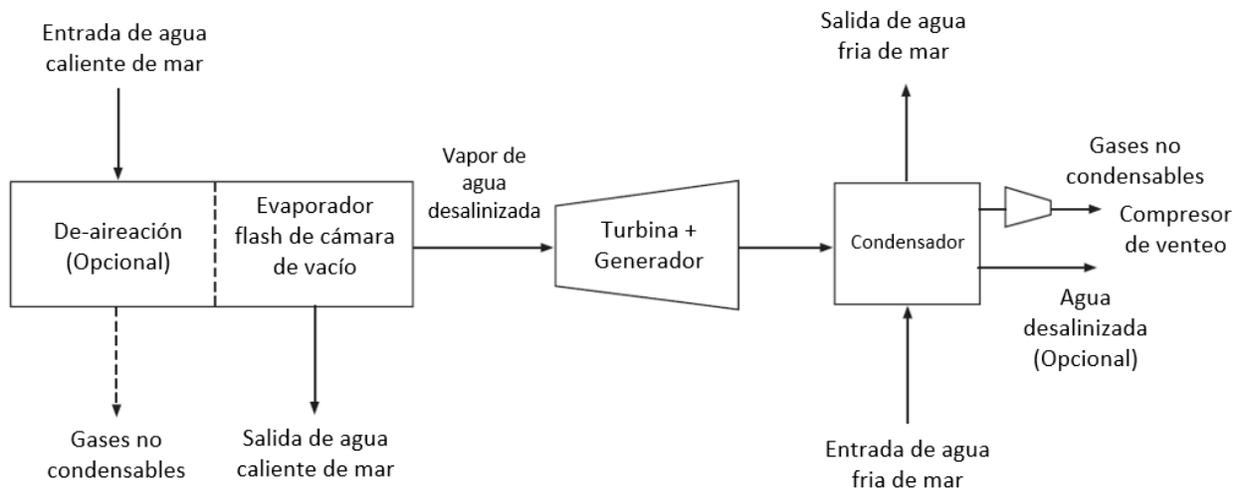


Figura N° 21. Diagrama esquemático de un sistema OTEC de ciclo abierto (Masutani et al., 2001)

El sistema ubicado entre evaporador y condensador trabaja a una presión de 1-3% de la presión atmosférica. Esta caída de presión es provocada por un compresor de vacío que además remueve los gases no condensables. Dicho compresor más las bombas que mueven el agua de mar y realizan las descargas, representan la mayor parte del consumo de energía parásita del ciclo abierto OTEC. Menos del 0.5% de la masa de agua caliente de mar que entra al evaporador se convierte en vapor para mover la turbina. La máxima caída de presión en la turbina es de alrededor de 3000 Pa. El condensador del vapor que sale de la turbina puede ser de dos tipos: (1) condensador de contacto directo, en el que un spray de agua fría de mar se rocía sobre el vapor, (2) condensador convencional de superficie que mantiene separados los flujos de condensado y refrigerante. Las ventajas de uno y otro son el bajo costo del primero, y la producción de agua dulce del segundo.

Una desventaja destacable de las plantas OTEC de ciclo abierto, es que, debido a la baja presión de trabajo, se necesitan grandes componentes para acomodar los altos caudales volumétricos de vapor. Además, el sistema es propenso a las fugas de aire hacia el interior con los consecuentes problemas de necesidad de eliminación de gases no condensables (Masutani et al., 2001).

5.3 Gradiente geotérmico y agua de formación

Hemos indagado cómo una máquina termo-oceánica utiliza para su funcionamiento un salto térmico tan bajo como 25°C. Ahora, queremos entender si es posible proyectar una máquina geotérmica que funcione con un salto térmico similar al de una máquina termo-oceánica. Nos permitiría pensar en una instalación geotérmica que funcione en una zona no volcánica, resolviendo el suministro de energía en lugares de difícil acceso a la misma. En la Figura N°22 se observan los campos geotérmicos que producen electricidad, la gran mayoría de ellos están ubicados sobre los límites de las placas tectónicas.

Según Lindal (1973), la temperatura mínima requerida para hacer funcionar una planta binaria de generación geotérmica es 85°C, Figura N°23. Sin embargo, Patel (2006), reporta el funcionamiento de un prototipo de 200 KW que utiliza una temperatura de 74°C. La idea del

desarrollo era aprovechar el agua caliente generada en grandes cantidades en pozos de petróleo y gas, y el uso invertido de un sistema de refrigeración como unidad de generación, de forma de aprovechar los menores costos de producción de estos equipos.

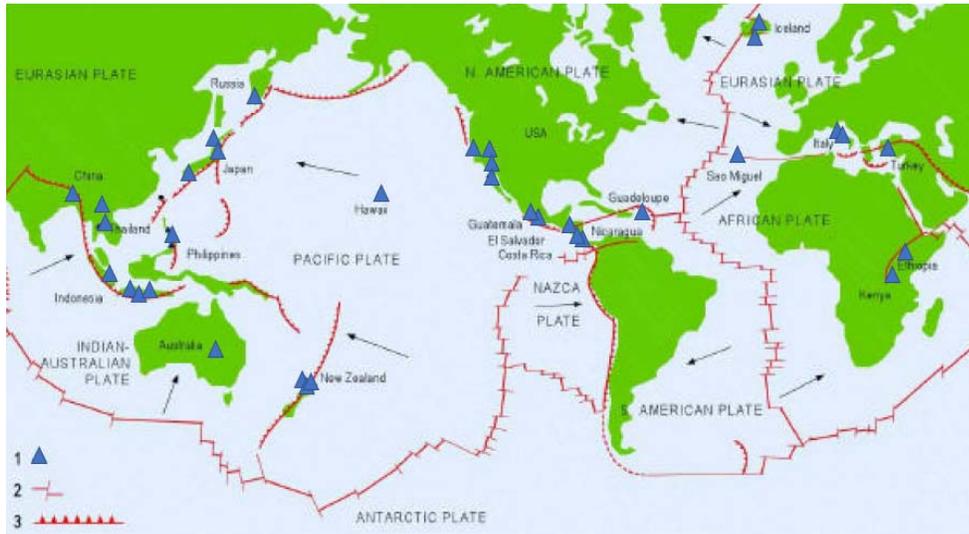


Figura N° 22. Campos geotérmicos que producen electricidad (Dickson et al., 2004)

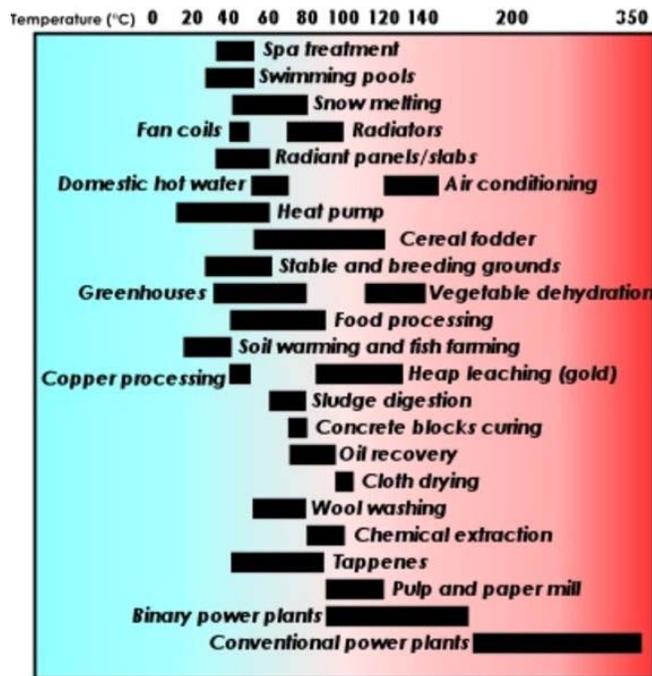


Figura N° 23. Utilización de Fluidos Geotérmicos (Lindal, 1973).

Una cuenca sedimentaria es una zona deprimida de la corteza terrestre de origen tectónico, donde se acumulan sedimentos. Las rocas ígneas y metamórficas que yacen debajo de las rocas sedimentarias se denominan basamento, y son difíciles de perforar. En algunas áreas del planeta el basamento está en la superficie o muy cerca de esta. Estas áreas son llamadas escudos y se muestran en la Figura N°24:



Figura N° 24. Localización de los escudos, en negro (Hyne, 2012).

Un dato fundamental a tener en cuenta en la máquina propuesta, es la profundidad del pozo a perforar, la cual dependerá del gradiente térmico local. Dickson (2004) informa un gradiente térmico promedio de 2.5-3 °C/100 m. Hay casos donde el basamento ha sufrido un hundimiento y la cuenca ha sido rellenada con sedimentos geológicamente “muy jóvenes”, allí el gradiente geotérmico puede ser inferior a 1°C/100 m. Es necesario considerar otros tres aspectos fundamentales, facilidad de perforación de un pozo de gran diámetro, disponibilidad de agua de formación en grandes volúmenes y permeabilidad de la roca reservorio para el funcionamiento de los intercambiadores de calor.

5.3.1 Gradiente térmico en la cuenca neuquina

Sigismondi (2008) muestra en su trabajo que el gradiente geotérmico en la cuenca neuquina es superior al normal. Como puede verse en la Tabla N°4, a 1000 metros de profundidad

es posible encontrar una temperatura de 54 °C en promedio, lo que resulta en un salto térmico aproximado de 24 - 54 °C, dependiendo de la temperatura de la superficie.

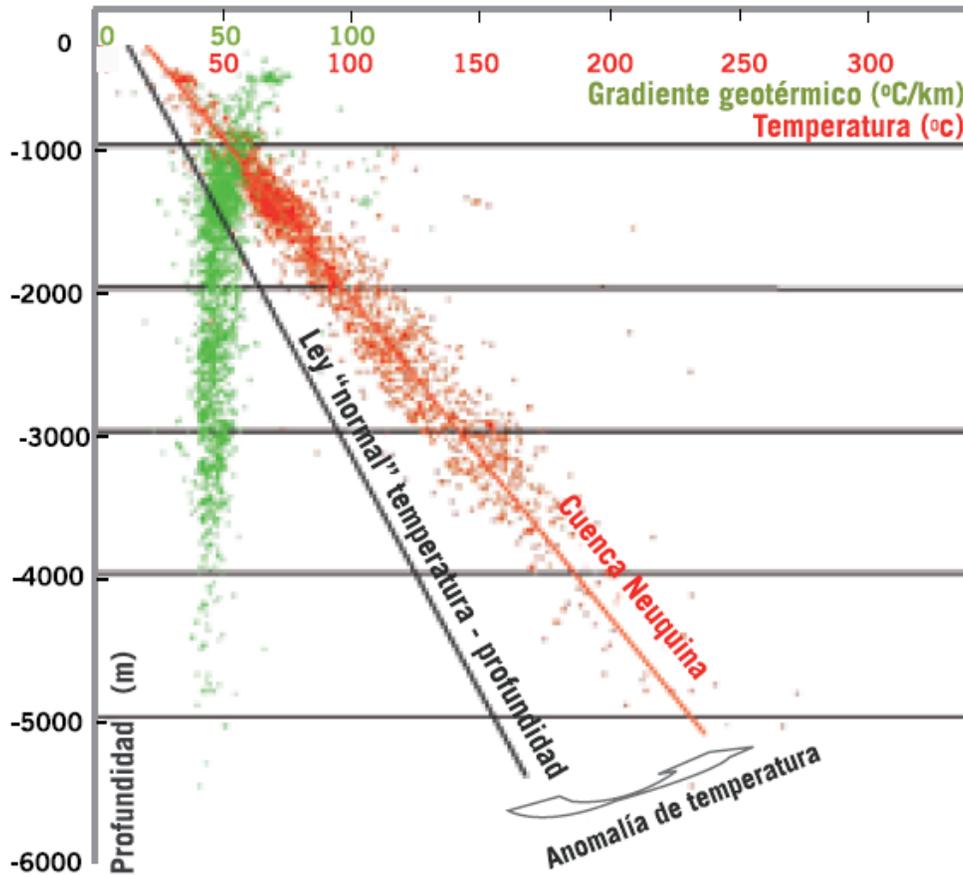


Figura N° 25. Correlación temperatura – profundidad (Sigismondi et al., 2008)

Para los cálculos iniciales de la máquina se considera una profundidad de 1000 metros y un salto térmico de 37 °C. De ser necesario, esta profundidad podrá ajustarse para optimizar el rendimiento de la máquina y su capacidad de producción neta de energía.

Cuenca Neuquina: Leyes de variación de la temperatura por región

Cuenca Neuquina	Faja plegada y corrida	Dorso de los Chihuidos	Plataforma nororiental	Engolfamiento	Dorsal de Huincul	Picún Leufú	Totales
	215	125	1688	471	421	21	2941
Profundidad (m)	0,0427z + 12,340	0,0522 z - 7,2733	0,0443 + 9,3205	0,0451 + 5,628	0,0438 + 13,295	0,0466 + 4,2425	0,0443 + 9,5967
0	12	-7	9	6	13	4	10
500	34	19	31	28	35	28	32
1000	55	45	54	51	57	51	54
1500	76	71	76	73	79	74	76
2000	98	97	98	96	101	97	98
2500	119	123	120	118	123	121	120
3000	140	149	142	141	145	144	142
3500	162	175	164	163	167	167	165
4000	183	202	187	186	188	191	187
4500	204	228	200	209	210	214	209
5000	226	254	231	231	132	237	231
5500	247	280	253	254	254	261	253
6000	269	306	275	276	276	284	275

Tabla N° 4. Variación de temperatura con la profundidad para cada región de la Cuenca Neuquina (Sigismondi et al., 2008)

5.3.2 Agua de formación para el funcionamiento de la caldera

Respecto a la necesidad de encontrar agua de formación se requiere una evaluación para ubicar zonas potenciales en profundidades cercanas a los 1000 metros. En la industria del petróleo y gas se produce con frecuencia agua de formación, la que posteriormente es tratada e inyectada en pozos de campos maduros, técnica denominada recuperación secundaria, con el objetivo de mejorar la producción de los mismos. Se plantea en nuestro caso la conveniencia de utilizar acuíferos no aptos para consumo humano, por ejemplo, por alta salinidad o contenido de minerales, a fin de evitar problemas por pasivos ambientales. Sin embargo, se tiene la ventaja de que no es necesario producir el agua a superficie, sino que la misma recircula en el fondo del pozo al intercambiar calor en la caldera o evaporador. En caso de pobre permeabilidad de la formación que contiene el agua, se podría mejorar la misma mediante la estimulación de un campo artificial de fracturas con la técnica de fracturamiento hidráulico.

Se plantea también la posibilidad de alimentar el reservorio de agua por medio de uno o varios pozos sumidero. Este tipo de pozo, también denominado de inyección profunda, es una instalación destinada a inyectar agua residual, en formaciones que poseen las condiciones de entrapamiento estructural y de roca sello, que garantizan la estanqueidad de fluidos, imposibilitando su vinculación con las aguas subterráneas dulces (IAPG, 2013). Esto nos abre un nuevo panorama, ya que estaríamos dando utilización a las aguas residuales de la industria del petróleo y gas que hoy se inyectan en este tipo de pozo. Aportaría un factor de peso importante a nuestra máquina, en caso que hallemos que la misma es viable técnicamente, pero resulta muy costoso fabricarla e instalarla. En la cuenca neuquina, a partir del desarrollo de los no convencionales, se generan grandes volúmenes de aguas residuales en el proceso de fracking. Una parte de este volumen se recupera, pero otra parte muy importante no lo hace por no lograr las condiciones técnicas para su reutilización.

Con respecto a los pozos sumidero, no encontramos información detallada disponible, solo algunos artículos en diarios locales, mencionando cantidades variables entre 50 y 85 pozos en la cuenca neuquina ^{7, 8}. Se informa una profundidad mínima para estos pozos de 1.200 metros. Por el momento continuaremos con nuestro planteo inicial de una profundidad de 1.000 metros y un salto térmico de 37°C para verificar la viabilidad de la máquina.

Se deberá poner atención en evitar la formación de incrustaciones para mantener la performance del intercambiador, lo que requerirá un trabajo especial por parte de especialistas.

Se toma en consideración la información de la producción de agua en pozos en los primeros meses de 2019 en Argentina (Capítulo IV, Secretaría de Energía), y se selecciona de acuerdo al siguiente criterio:

- Producción de agua por pozo > 10.000 m³/mes (esto es totalmente tentativo, no conocemos qué caudal de agua se podría recircular en el fondo del pozo)
- 900 m < profundidad < 1.200 m

⁷ https://www.rionegro.com.ar/petroleo-afuera-desechos-adentro-LCRN_7948526/, visitado el 29/3/21

⁸ <http://www.opsur.org.ar/blog/2017/05/23/basureros-petroleros-que-son-y-donde-se-encuentran/>, visitado el 29/3/21

Esto no asegura el correcto funcionamiento de los intercambiadores de calor, pero al menos da una estimación de áreas potenciales. Se obtienen los siguientes resultados por cuenca:

5.3.2.1 Cuenca Neuquina

Area	Provincia	Pozo	Prod. Agua m3/mes	Corte Agua (*)	Formación	Prof. (m)
Borde Colorado Este	Nqn	BCE-1033	11469	0.6%	Precuyo	960
Centro Este	RN	CE-26	10004	1.4%	Centenario	1025
Chihuido de la Sierra Negra	Nqn	3 pozos	10799 (prom.)	0.7% (prom.)	Agrio	1151 (prom)
Desfiladero Bayo	Mdza	NDB-146	10528	1.3%	Agrio	989
Lomita Sur	Nqn	LMS-96	14994	1.0%	Agrio	1197
Puesto Hernández	Nqn	25 pozos	13662 (prom.)	0.9% (prom.)	Rayoso/Agrio	1113 (prom)

(*) Producción de Petróleo / Producción de Agua

Tabla N° 5. Pozos de alta producción de agua en la cuenca neuquina (Capítulo IV, Secretaría de Energía)



Figura N° 26. Ubicación de pozos de alta producción de agua, con profundidades entre 900 y 1.200 metros, en la cuenca neuquina

Sería importante dar aprovechamiento a áreas con producción marginal de hidrocarburos. Como se observa en la Tabla N°5, el corte de agua en estos pozos es inferior al 1.4%.

5.3.2.2 *Cuenca Austral*

Solo se encontraron pozos con una producción acumulada de agua mayor a los 10.000 m³/mes en profundidades mayores a 1.550 metros, en las áreas Estancia La Maggie (formación Springhill) y Estancia Agua Fresca (formación Magallanes). Por lo que, al menos para la consideración inicial de una profundidad cercana a los 1.000 metros, descartamos en principio esta cuenca. Esto no quita que, en caso de hallar que la economía de la máquina sea favorable, o bien que se pueda recircular el agua de fondo a caudales suficientes para el funcionamiento de la caldera, podamos reconsiderar esto.

5.3.2.3 *Cuenca Cuyana*

Se encuentran pozos con caudales mayores a 10.000 m³/mes, solo a partir de los 1.840 metros en el área Vizcacheras (en las formaciones Papagayo, Barrancas y Río Blanco). También lo descartamos para nuestro análisis.

5.3.2.4 *Cuenca Golfo San Jorge*

En el pozo Ch.AE-1008, área KM20, la producción es de 10.873 m³/mes en promedio, pero a una profundidad de 750 metros. Se requiere un estudio más detallado del gradiente térmico en el área. Se descarta para el presente trabajo.

En el pozo SC.LP-1777, área Los Perales, con una producción promedio de 10.805 m³/mes, la profundidad es de 1.350 metros (formación Bajo Barreal). En el pozo Ch.CG-1188, área Cañadón Grande, la producción promedio de agua es de 10.095 m³/mes a la profundidad 1.388 metros (formación Comodoro Rivadavia). No son profundidades excesivas y podrían considerarse en un trabajo futuro.

5.3.2.5 *Cuenca del Noroeste*

Producciones de agua mayores a 10.000 m³/mes, solo se encuentran en pozos con profundidades mayores a 3.900 metros en el área Palmar Largo. Además, considerando la dureza de las formaciones a perforar y la complejidad de la perforación en la cuenca, se descarta esta área para un desarrollo de este tipo.

6 Innovación

Puesto que en la técnica usada hasta el momento para la explotación de la energía geotérmica se reportan temperaturas mínimas de fluido de 85°C (Lindal, 1973) y 74°C (Patel, 2006), se debe pensar en una alternativa innovadora que pudiera aprovechar los 54 °C que se podrían conseguir a 1.000 metros de profundidad en la cuenca neuquina. Como se dijo anteriormente, la técnica actual consiste en perforar un pozo para llevar el fluido geotérmico a superficie y allí utilizarlo para hacer funcionar la máquina. La innovación consiste en llevar la máquina al fondo del pozo, lo que trae consigo puntos a favor y en contra.

Ventajas:

- Mínimo impacto superficial, solo se necesita allí la torre de enfriamiento
- Mínima pérdida de carga y temperatura en el conducto de agua del evaporador, no se requiere ir a superficie
- Al recircular el agua del evaporador en el fondo del pozo, podemos usar agua salobre de formación o bien inyectar agua residual, tomando los recaudos necesarios para evitar problemas en el evaporador
- Se puede diseñar, dentro de los límites económicos, un evaporador de gran longitud para una transferencia de calor más eficiente
- Ensamblado modular de la máquina

Desventajas:

- Altas pérdidas de carga en el conducto de agua del condensador, se requiere ir a superficie
- Se necesita cableado eléctrico en el fondo del pozo para la bomba de agua de formación y el generador
- Elevado costo de la instalación por las grandes longitudes de las cañerías necesarias y la perforación de un pozo de gran diámetro
- La diferencia de presión entre el circuito de agua del evaporador y el del fluido de trabajo podría inducir la mezcla de ambos componentes ante una eventual fuga

- Elevado costo de mantenimiento en caso de falla de un componente o generación de incrustaciones en el evaporador y condensador

La Figura N°27 muestra el esquema de la máquina planteada. El circuito del fluido de trabajo se encuentra contenido totalmente en el pozo. Separamos el proceso de calentamiento en dos pasos: (1) Pre-calentador, donde el fluido de trabajo se lleva a su punto de ebullición, (2) Evaporador, de donde el fluido emerge como vapor saturado.

En el diagrama T-s del ciclo de la máquina, Figura N°28, se considera rendimiento isoentrópico tanto para la bomba como para la turbina, es decir se suponen componentes reales con irreversibilidades. Por ello, la entropía del punto 2 real es mayor a la del punto 2s (isoentrópico). Lo mismo ocurre entre el punto 4 real y 4s.

La máquina podría ensamblarse modularmente, de forma similar a como se reviste un típico pozo petrolero. Deberán preverse las soluciones tecnológicas necesarias para llevar las cañerías a superficie a medida que se baja la máquina. Esta es una forma de aprovechar personal, equipos y recursos ya disponibles en la industria de la perforación de pozos petroleros, y también será un factor a la hora de sopesar la innovación propuesta.

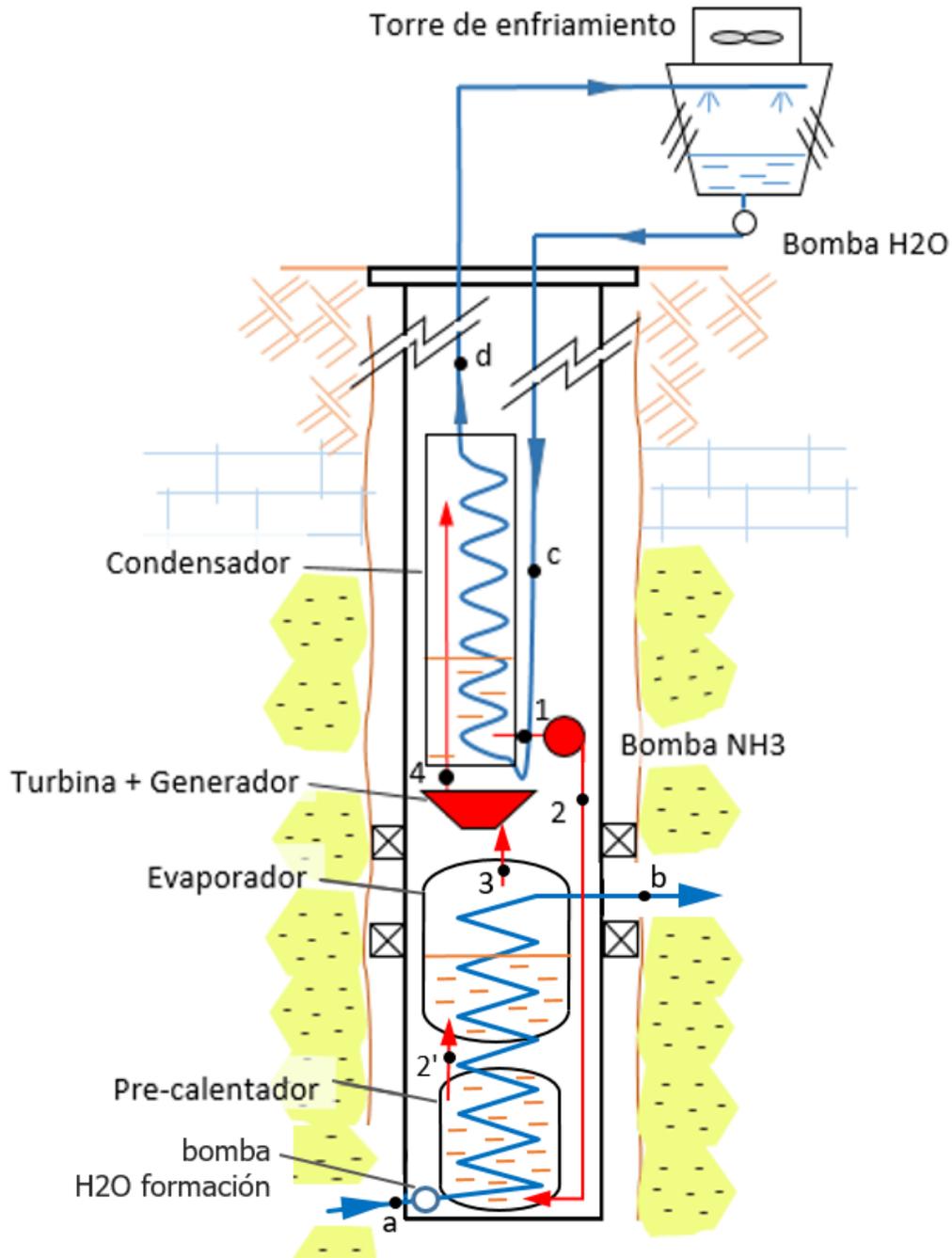


Figura N° 27. Esquema de la instalación propuesta.

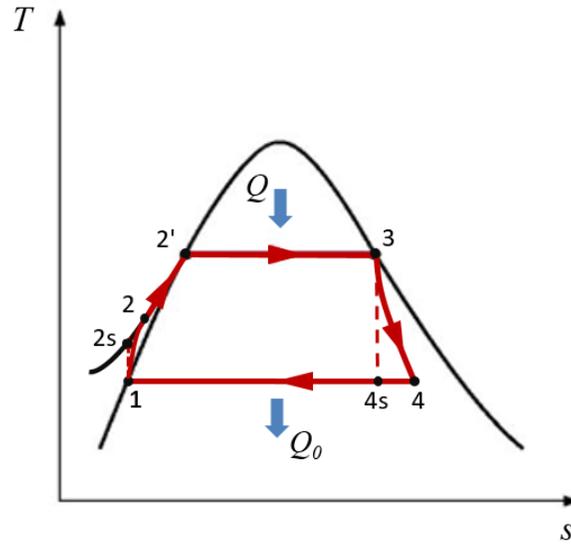


Figura N° 28. Diagrama T-s del ciclo de la máquina.

6.1 Análisis termodinámico

Separando cada componente y planteando el balance de energía o Primer Principio de la Termodinámica, y el balance de masa para un sistema abierto, se encuentran los diferentes parámetros de la máquina. El análisis está basado en el trabajo de Di Pippo (2012).

6.1.1 Análisis en la turbina

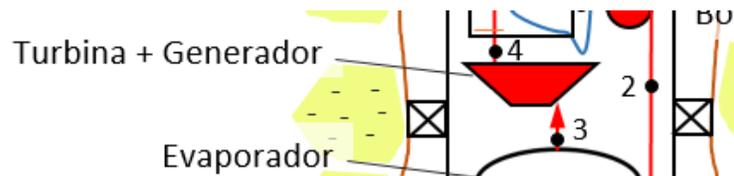


Figura N° 29. Esquema de la Turbina

Potencia en la turbina:

$$\dot{W}_t = \dot{m}_{ft}(h_4 - h_3) = \dot{m}_{ft}\eta_t(h_{4s} - h_3)$$

En la ecuación \dot{m}_{ft} es el caudal másico del fluido de trabajo, η_t es el rendimiento isoentrópico de la turbina y h_i son los valores de entalpía en la entrada y salida de la turbina.

Los valores puntuales de entalpía están determinados por la selección del fluido de trabajo y los valores de presión y temperatura que tenemos en el proceso. La potencia entregada por la turbina dependerá del caudal másico que se alcance, considerando las limitaciones de tamaño que se tienen en este caso.

6.1.1.1 Tamaño de la Turbina

Se puede tener una primera aproximación del tamaño de la turbina calculando su área de salida. El caudal másico en dicho punto es:

$$\dot{m}_{ft} = \rho AV = \frac{\dot{W}_t}{w_t} = \frac{\dot{W}_t}{(h_4 - h_3)}$$

Luego, el área de salida de la turbina es:

$$A = \frac{\dot{W}_t}{(h_4 - h_3) \rho K a_2}$$

K es una fracción y a_2 es la velocidad del sonido en el fluido a la salida de la turbina. La velocidad del sonido se puede aproximar de tablas y utilizando diferencias finitas.

6.1.2 Análisis en el condensador

El calor que debe ser evacuado desde el fluido de trabajo hacia el medio, que en este caso es el agua proveniente de la torre de enfriamiento, está dado por:

$$\dot{Q}_c = \dot{m}_{ft}(h_1 - h_4) = \dot{m}_{ae}(h_d - h_c) = \dot{m}_{ae}\bar{c}_a(T_d - T_c)$$

Se considera al calor específico del agua \bar{c}_a , como constante en el pequeño rango de temperaturas de trabajo. Esta ecuación también permite calcular el caudal de agua de enfriamiento \dot{m}_{ae} .

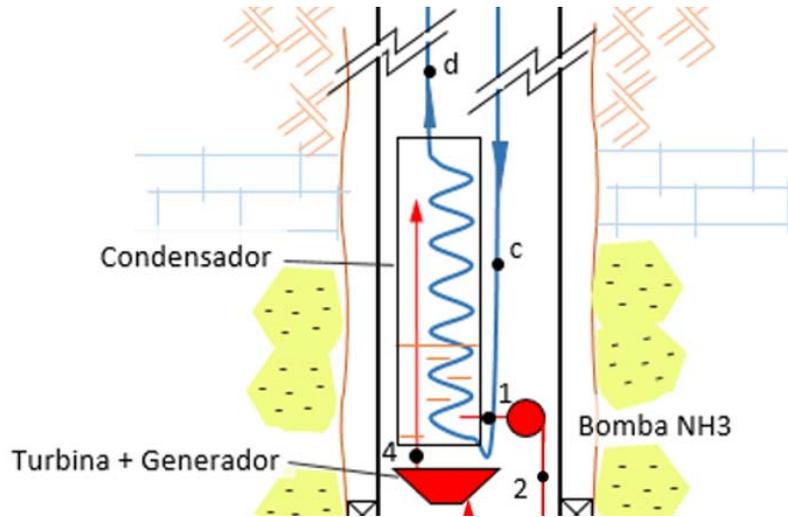


Figura N° 30. Esquema del Condensador

6.1.3 Análisis en la bomba

La potencia requerida para mover el fluido de trabajo es:

$$\dot{W}_b = \dot{m}_{ft}(h_2 - h_1) = \dot{m}_{ft} \frac{(h_{2s} - h_1)}{\eta_b}$$

η_b es el rendimiento isoentrópico de la bomba.

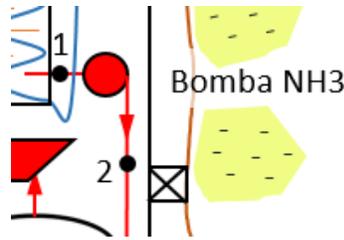


Figura N° 31. Bomba para mover el fluido de trabajo

6.1.4 Análisis en el pre-calentador y evaporador

Se asume en principio régimen estacionario y que las diferencias entre salida y entrada de las energías potencial y cinética son despreciables. Este último punto deberá revisarse en un análisis más detallado, ya que por el diseño de la máquina la longitud de los intercambiadores puede ser significativa, y la diferencia de energía potencial puede no ser despreciable. El balance de energía del sistema completo pre-calentador y evaporador es:

$$\dot{Q} = \dot{m}_{ft}(h_3 - h_2) = \dot{m}_{af}(h_b - h_a) = \dot{m}_{af}\bar{c}_a(T_b - T_a)$$

De esta ecuación, y dados los parámetros de diseño del ciclo, se puede despejar el caudal de agua de formación \dot{m}_{af} requerido.

En los primeros cálculos se consideró un esquema de flujo cruzado para el pre-calentador y el evaporador. Sin embargo, luego de un proceso iterativo donde se plantearon diferentes diámetros de cañerías y caudales asociados a fin de ubicar las diferentes partes de la instalación, la potencia neta resultante era prácticamente nula. Esto debido a las altas pérdidas de carga en las cañerías de subida y bajada del agua de formación. Dada esta situación, se decidió modificar el esquema a flujo paralelo en el pre-calentador y evaporador, tomando agua de formación desde la parte más profunda del pozo y devolviéndola en la parte superior del evaporador, como detalla la Figura N°32. De esta forma se evitan las cañerías de subida y bajada de agua de formación y las pérdidas de carga asociadas. Además, este esquema permite tener un diámetro de carcasa mayor en el evaporador por lo que su longitud disminuye, así como las pérdidas de carga dentro del mismo.

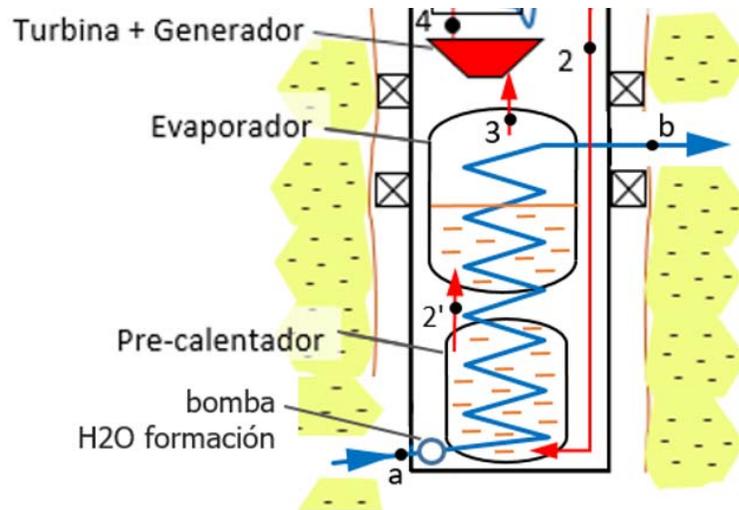


Figura N° 32. Esquema del Pre-Calentador y Evaporador

El diseño individual de los equipos requiere la revisión de otro diagrama termodinámico, el diagrama “Transferencia de Calor – Temperatura”, $T-q$. El eje de las abscisas representa la cantidad total de calor transferido desde el agua de formación al fluido de trabajo.

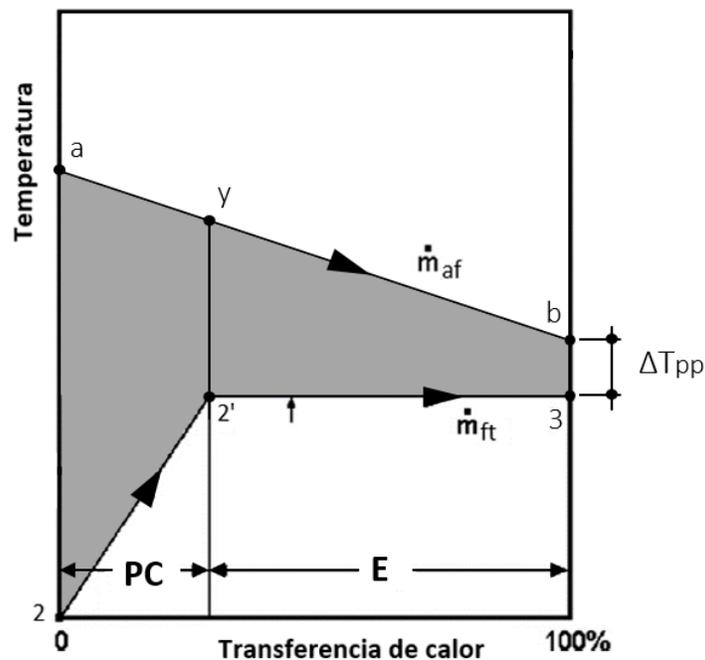


Figura N° 33. Esquema Transferencia de Calor – Temperatura para el caso del Pre-Calentador y Evaporador de flujo paralelo (Elaboración propia en base a Di Pippo)

El pre-calentador proporciona calor sensible para llevar al fluido de trabajo a su punto de ebullición, estado 2'. El proceso de vaporización 2'-3 ocurre a lo largo de una isoterma puesto que se considera un fluido de trabajo puro. El punto en el intercambiador de calor donde el fluido de trabajo y el agua de formación experimentan la mínima diferencia de temperaturas se denomina *pinch point*, ΔT_{pp} .

Los estados 2, 2' y 3 se conocen del ciclo de trabajo especificado. El estado 2 es líquido comprimido, la salida de la bomba. El estado 2' es líquido saturado a la temperatura del evaporador. El estado 3 es vapor saturado, la misma condición de entrada a la turbina. Luego, los dos intercambiadores de calor pueden ser analizados por separado:

$$\text{Pre-Calentador:} \quad \dot{Q}_{PC} = \dot{m}_{af}(h_b - h_y) = \dot{m}_{af}\bar{c}_a(T_b - T_y) = \dot{m}_{ft}(h_{2'} - h_2)$$

$$\text{Evaporador:} \quad \dot{Q}_E = \dot{m}_{af}(h_y - h_a) = \dot{m}_{af}\bar{c}_a(T_y - T_a) = \dot{m}_{ft}(h_3 - h_{2'})$$

La temperatura de entrada del agua de formación T_a se conoce. La diferencia de temperatura en el *pinch-point*, ΔT_{pp} , generalmente la especifica el fabricante del intercambiador de calor. Nihous (2007), informa un $\Delta T_{pp} = \Delta T/16$, siendo ΔT la diferencia total de temperatura entre la fuente caliente y fuente fría en el diseño de una planta tipo OTEC. Siguiendo esta sugerencia, el ΔT_{pp} en nuestro caso es de 2.3 °C.

Se está en condiciones de hacer algunos cálculos preliminares básicos de las dimensiones de los intercambiadores de calor. La superficie de transferencia de calor en el evaporador, A_E , puede determinarse de la siguiente ecuación:

$$\dot{Q}_E = \bar{U}A_E LMTD|_E$$

Donde \bar{U} es el coeficiente de transferencia total de calor, y LMTD es la diferencia de temperatura media logarítmica, que para el caso del evaporador es:

$$LMTD|_E = \frac{(T_b - T_3) - (T_y - T_{2'})}{\ln \left[\frac{T_b - T_3}{T_y - T_{2'}} \right]}$$

Para el caso del pre-calentador las ecuaciones son:

$$\dot{Q}_{PC} = \bar{U}A_{PC}LMTD|_{PC}$$

$$LMTD|_{PC} = \frac{(T_y - T_{2'}) - (T_a - T_2)}{\ln \left[\frac{T_y - T_{2'}}{T_a - T_2} \right]}$$

El coeficiente de transferencia total de calor \bar{U} debe ser determinado experimentalmente. Pero, como una primera aproximación, se pueden considerar los valores de la siguiente tabla:

Fluids	Overall heat transfer coefficient \bar{U}	
	Btu/h · ft ² · °F	W/m ² · K
Ammonia (condensing) – Water	150–250	850–1400
Propane or Butane (condensing) – Water	125–135	700–765
Refrigerant (condensing) – Water	80–150	450–850
Refrigerant (evaporating) – Brine	30–150	170–850
Refrigerant (evaporating) – Water	30–150	170–850
Steam – Gases	5–50	30–285
Steam – Water	175–600	1000–3400
Steam (condensing) – Water	175–1050	1000–6000
Water – Air	5–10	25–50
Water – Brine	100–200	570–1135
Water – Water	180–200	1020–1140

Tabla N° 6. Valores aproximados de \bar{U} para diferentes fluidos y situaciones (Di Pippo, 2012)

Los intercambiadores de calor se fabrican en una variedad de configuraciones: casco y tubo, de placa, flujo paralelo, contraflujo, flujo cruzado, etcétera. Dependiendo del tipo de configuración, existen factores de corrección para las ecuaciones de calor descritas arriba, que deberán tenerse en cuenta para un análisis más detallado en una etapa posterior de desarrollo.

6.1.5 Análisis de eficiencia

Performance del ciclo según la primera ley de la Termodinámica:

$$\eta_t = \frac{|\dot{W}_{neto}|}{|\dot{Q}_{PC/E}|} = \frac{|\dot{W}_{turbina} - \dot{W}_{bomba}|}{|\dot{Q}_{PC/E}|}$$

Estas fórmulas aplican al ciclo, no a la planta. La instalación utiliza además potencia para alimentar equipos auxiliares como la bomba del agua de formación, la bomba de agua de la torre de enfriamiento y el fan de dicha torre. Estas potencias parásitas deben considerarse también en la última fórmula, disminuyendo el rendimiento de la instalación completa.

Considerando la segunda ley de la Termodinámica, se calcula la eficiencia de utilización η_U , que se define como la relación entre la potencia neta de la planta y la potencia máxima teórica obtenible del agua de formación, llamada *Exergía*:

$$\eta_U = \frac{|\dot{W}_{neto}|}{|\dot{E}_{af}|} = \frac{|\dot{W}_{neto}|}{|\dot{m}_{af}[(h_{af} - h_0) - T_0(s_{af} - s_0)]|}$$

El subíndice 0 indica las condiciones termodinámicas del agua de formación a la temperatura y presión del medio ambiente.

6.2 Aplicación de un cálculo tentativo

Se aplican las ecuaciones anteriores a un escenario hipotético, para ver qué potencia es posible obtener de la máquina. Se hace uso del software REFPROP para conocer los valores termodinámicos en los diferentes puntos del ciclo. Se considera amoníaco (NH_3) como fluido de trabajo.

Las ecuaciones se volcaron en un programa escrito en lenguaje Python, para poder realizar diferentes iteraciones con diversos parámetros. Se plantearon los diámetros de cañerías e intercambiadores de calor de forma de poder acomodar los mismos dentro de las limitaciones geométricas existentes. Se propone un diámetro de pozo de 60" (1524,0 mm) y un diámetro del revestimiento del pozo (casing) de 48" (1219,2 mm) exterior y 46" (1168,4 mm) interior. Esto deberá chequearse en un análisis ulterior, para verificar la resistencia estructural del diseño.

Las pérdidas de carga tanto en cañerías como en los intercambiadores de calor se calcularon mediante la ecuación de Darcy-Weisbach:

$$h_f = f \frac{L V^2}{d 2g}$$

Donde hf es la pérdida de carga en metros, f es el coeficiente de fricción, L es la longitud en metros, d es el diámetro en metros, V es la velocidad en metros por segundo y g es la aceleración de la gravedad en metros por segundo cuadrado.

El coeficiente de fricción f^9 se determina mediante el diagrama de Moody, cuya correlación numérica es la siguiente, la cual tiene una precisión de 5%, para números de Reynolds entre 4000 y 10^7 :

$$f = 0,005496 \left[1 + \left(20000 \frac{\varepsilon}{d} + \frac{10^6}{Re} \right)^{0,33} \right]$$

ε es la rugosidad de la cañería y Re es el número de Reynolds calculado con la siguiente ecuación:

$$Re = \frac{\rho V d}{\mu}$$

Donde μ es la viscosidad dinámica del fluido, medida en Pascal – segundo.

⁹ <https://es.scribd.com/doc/23054588/Ch-4-Pressure-Drop-in-Heat-Exchangers>, visitado el 29/3/21

La Tabla N°7 muestra los parámetros termodinámicos de estado para cada uno de los puntos del ciclo de amoníaco, así como para el agua de formación que trabaja en el pre-calentador y evaporador.

Punto	Fluido	t °C	T K	p Pa	h KJ/Kg	s KJ/KgK	ro Kg/m3	mu Pa seg	Título %
1	NH3	23,00	296,15	942830	451,24	1,8485	605,76		líquido saturado
2s	NH3	23,26	296,41	1981800	452,95	1,8485	606,32		Sub-enfriado
2	NH3	23,30	296,45	1981800	453,14	1,8492	606,26	0,00013474	Sub-enfriado
2'	NH3	49,00	322,15	1981800	578,72	2,2552	564,56		líquido saturado
3	NH3	49,00	322,15	1981800	1634,20	5,5317	15,37		vapor saturado
4s	NH3	23,00	296,15	942830	1542,00	5,5317	7,90		92,90
4	NH3	23,00	296,15	942830	1551,22	5,5628	7,84		93,69
5	NH3	23,00	296,15	942830	1625,30	5,8131	7,35		vapor saturado
a	H2O	54,00	327,15	9715530	234,34	0,75051	990,33	0,00051389	
b	H2O	51,30	324,45	8116891			990,91	0,00053648	
c	H2O	17,00	290,15	101300	71,45	0,25341	998,78	0,00107980	
d	H2O	21,00	294,15	6775669			1001,00	0,00097584	
y	H2O	51,59	324,74						

Tabla N° 7. Propiedades termodinámicas del amoníaco y agua en los diferentes puntos del ciclo (obtenidos del software REFPROP)

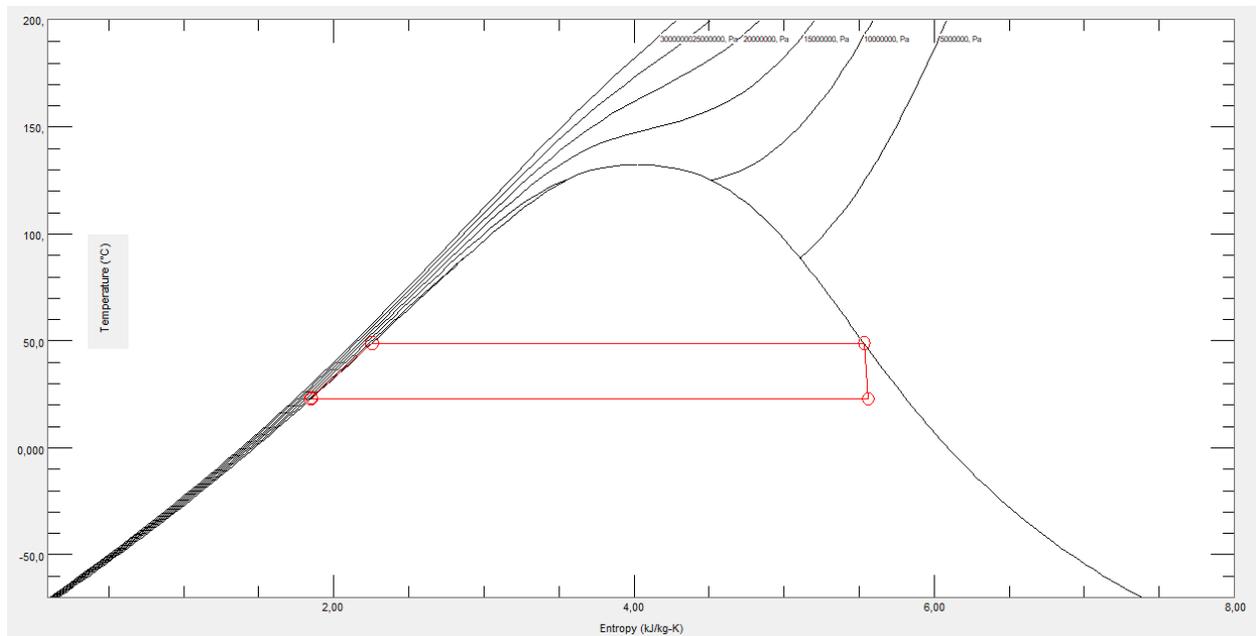


Figura N° 34. Diagrama T-s de amoníaco para el caso hipotético (Obtenido del software REFPROP)

Luego de efectuar cálculos iterativos con diversas combinaciones de caudales y parámetros geométricos, se llega a los siguientes resultados, que no son necesariamente los óptimos, pero que se ajustan bastante bien a las condiciones elegidas. Para el cálculo del diámetro de la turbina y por razones de simplicidad, se consideró un valor de la velocidad del sonido de 404,8 m/s, que corresponde a vapor saturado de Amoníaco a 23°C (REFPROP).

Potencia Neta = **-276,5 Kw**

Rendimiento Térmico de la Instalación = **4,7%** (Primera ley de la Termodinámica)

Eficiencia de la Instalación = **2,8%** (Segunda ley de la Termodinámica)

Potencia de la Turbina = **-414,9 Kw**

Diámetro de la Turbina = **25,1 cm**

Potencia de la Bomba de agua de enfriamiento = **94,9 Kw**

Potencia de la Bomba de agua de formación = **28,7Kw**

Potencia de la Bomba de amoníaco = **9,8 Kw**

Potencia del Fan de la torre de enfriamiento = **5,0 Kw** (estimado)

Calor del Condensador = **-5500 Kw**

Calor del Pre-Calentador = **628 Kw**

Calor del Evaporador = **5277 Kw**

Caudal Másico de NH₃ = **5 Kg/seg**

Caudal Másico de agua de enfriamiento = **328, 4 Kg/seg**

Caudal Másico de agua de formación = **522,4 Kg/seg**

Superficie Pre-Calentador = **25,9 m²**

Superficie Evaporador = **2024,6 m²**

Superficie Condensador = **1342,7 m²**

Longitud Pre-Calentador = **3,4 m** (30 tubos de 8 cm de diámetro)

Longitud Evaporador = **138,9 m** (58 tubos de 8 cm de diámetro)

Longitud Condensador = **140,6 m** (38 tubos de 8 cm de diámetro)

7 Estrategias institucionales

Del análisis presentado se concluye que es posible obtener potencia neta de la máquina propuesta. La conveniencia de su construcción depende de futuros análisis técnico-económicos y de potenciales proyectos de investigación. Quedan cuestiones pendientes que demandan estudios de mayor profundidad, antes de avanzar en el diseño detallado de la máquina. Se requiere considerar los puntos que son los mayores limitantes de la innovación propuesta. Se hace necesario, además, generar los caminos de vinculación con el tipo de instituciones o empresas con las que se deberían abordar dichos estudios.

7.1 Estudio de puntos pendientes

7.1.1 Caudal de agua de formación

Se necesita un caudal másico de agua de formación de 522,4 Kg/seg para el funcionamiento del pre-calentador y del evaporador. En el análisis simplificado elaborado en este trabajo, se identificaron pozos petroleros con producción mensual de agua por encima de 10.000 m³ en la cuenca neuquina. Se asume que los campos donde se encuentran estos pozos son potenciales ubicaciones de una instalación como la que se propone. El agua entra a la máquina por debajo del pre-calentador y sale a formación por encima del evaporador. Se necesita saber si es posible obtener el caudal másico de agua de formación necesario. Posibles soluciones para lograrlo:

- a. Técnica de empaquetado por grava y filtro, de forma de generar un área de contacto suficiente entre el pozo y las arenas que contienen el agua de formación.
- b. Mejorar la permeabilidad de la formación mediante el uso de la técnica de fracturamiento hidráulico.

- c. Inyección de agua residual de la industria del gas y petróleo a través de pozos sumideros vecinos al pozo de la máquina. Se requiere entender si es necesario el tratamiento del agua antes de la inyección.

Tarea	Empresa o Institución propuesta
Ubicación de áreas potenciales que tengan arenas de alta permeabilidad y agua de formación en profundidades cercanas a la longitud de la máquina, selección de la más apropiada y modelado geológico de la misma	Universidades nacionales que cuenten con grupos de investigación en áreas de geología, para el estudio de arenas que contienen agua en sus intersticios, y en simulaciones CFD (Fluidodinámica Computacional) para modelar el flujo de agua en formación.
Gradientes de presiones y temperaturas	
Estudios de porosidad y permeabilidad de arenas productoras de agua. Simulación de la recirculación entre la salida y entrada de la cañería de agua de formación, y simulación de los perfiles de temperatura en la roca. Estimación del caudal de agua de recirculación.	
Estudio y factibilidad de la técnica de empaquetado por grava y filtro	Empresas de servicios petroleros especialistas en técnicas de completaciones gravel pack y proveedoras de caños filtro. Empresas de servicios petroleros proveedoras de tecnología para el mejoramiento de la producción mediante fractura hidráulica
Estudios de mejora de la permeabilidad y aumento de la producción de agua de formación mediante fracturamiento hidráulico	

7.2 Evaluación económica inicial

Ya teniendo la seguridad de haber solventado el problema de lograr el suficiente caudal de agua de formación para la recirculación entre la salida y entrada del conjunto pre-calentador y

evaporador, es necesaria una evaluación económica inicial de los costos estimados de diseño, fabricación, montaje y puesta en marcha de la innovación. Se deben estimar los costos de generación de energía eléctrica en US\$/KWh y los costos iniciales de inversión en US\$/KW instalado.

Tarea	Empresa o Institución propuesta
Evaluación económica inicial. Comparación con respecto a otras tecnologías	Universidades nacionales e instituciones con experiencia en evaluación de proyectos relacionados a generación de energía y energías renovables. Se deben tener en cuenta no solo aspectos económicos, sino también aspectos ambientales, proyecciones futuras de energías renovables, reducción de costos por masificación del producto, etc.

Esta evaluación inicial debe luego retroalimentarse con los detalles de diseño más acabados que se tengan de los puntos siguientes, para tener una evaluación económica definitiva y más certera.

7.3 Etapa de diseño de la máquina

7.3.1 Intercambiadores de calor

Se requiere para el evaporador y para el condensador el ensamblado modular de los mismos. Las longitudes necesarias son 139 metros y 141 metros respectivamente. El precalentador necesita una longitud inferior a los 4 metros por lo que no presenta mayor problema. Una longitud cercana a 9 metros para cada módulo sería óptima, ya que se podría aprovechar la

tecnología utilizada en la perforación de pozos petroleros. Allí se utilizan equipos de torre que manejan conjuntos de tres módulos de 9 metros cada uno, Figura N°35.



Figura N° 35. Torre de perforación ¹⁰

Cada conexión entre módulos debe sellar tanto la conducción de agua que va por dentro de los tubos, como la conducción de amoníaco que circula por fuera de los tubos. Esto requerirá un diseño especial y cuidadoso, de forma de evitar fugas en las conexiones. Serán necesarios ensayos previos en el taller de fabricación para asegurar la efectiva hermeticidad.

¹⁰ <http://drillingrigs4u.com/1-2-5-3000hp-skid-mounted-drilling-rig/214247/>, visitado el 30/3/21

Tarea	Empresa o Institución propuesta
Optimización del ciclo termodinámico y selección de fluido más apropiado. Análisis de sensibilidad con la variación de la temperatura ambiente (y del agua de enfriamiento). Cálculo exergético.	Universidades nacionales que cuenten con grupos de investigación en áreas de termodinámica, transferencia de calor y en simulaciones CFD (Fluidodinámica Computacional). Vinculación con empresas fabricantes de intercambiadores de calor
Ingeniería, estudio de transferencia de calor, cálculo de coeficiente total de transferencia de calor y ensayos empíricos, simulaciones CFD de transferencia de calor, pérdidas de calor durante la circulación en cañerías a superficie. Diseño de flujo cruzado o flujo paralelo. Diseño de la torre de enfriamiento.	
Ingeniería de materiales, diseño geométrico, optimización de cañerías de acuerdo a la limitación de espacio, resistencia mecánica, soldadura de componentes	Universidades nacionales y sus grupos de investigación en áreas de materiales especiales para intercambiadores de calor, trabajando en vinculación con empresas de ingeniería y diseño con procesos CAD. Especialistas en algoritmos de optimización en el área de ciencias de la computación, para buscar la mejor relación geométrica entre las diferentes cañerías, que optimice la potencia neta de la máquina
Diseño modular (innovación), uniones y sellos	Empresas de ingeniería y diseño con procesos CAD, trabajando en vinculación con las instituciones que trabajen los materiales. Empresas especialistas en uniones roscadas y sellos
Estudios de corrosión y su tratamiento, estudios para evitar la formación de incrustaciones de calcita y sílice en los	Universidades nacionales y sus grupos de investigación en áreas químicas, especialistas en corrosión, formación de incrustaciones y su

intercambiadores de calor. Análisis químico del agua de formación, presiones y temperaturas involucradas, para mantener la performance del intercambiador al máximo y llevar a un mínimo el mantenimiento de la máquina	prevención. Vinculación con empresas proveedoras de inhibidores de corrosión e incrustaciones.
Cálculo de pérdidas de carga en conductos, en carcaza, en uniones de módulos. Simulaciones CFD del flujo de fluidos.	Universidades nacionales que cuenten con grupos de investigación en mecánica de fluidos y capacidades en CFD.
Manejo de presiones. La diferencia de presión entre el circuito de agua del evaporador y el circuito de amoníaco podría inducir la mezcla de ambos componentes ante una eventual fuga. Se requiere un análisis más detallado de las presiones y la utilización de conexiones de calidad superior para minimizar y en lo posible evitar fugas	Se debe involucrar a la empresa encargada de la manufactura de los intercambiadores de calor, haciendo especial hincapié en los sellos entre módulos.

7.3.2 Turbina y generador

Tarea	Empresa o Institución propuesta
Diseño de la turbina y generador. Cálculo de irreversibilidades y optimización del diseño	<p>Empresa proveedora de turbinas de generación. Se podrá vincular a universidades nacionales con equipos de investigación de probada experiencia en simulaciones CFD.</p> <p>Empresa electromecánica con probada experiencia en generadores de electricidad.</p>

7.4 Etapa de diseño del pozo

7.4.1 Perforación de un pozo de 60 pulgadas a 1000 metros de profundidad.

Para la perforación del pozo de 60" proponemos tres etapas: (1) perforar un pozo de 12,25" con un conjunto direccional que asegure mantener al mismo de la forma más vertical posible. También es importante minimizar la tortuosidad del pozo, por lo que podría requerirse la utilización de herramientas rotarias para tal fin; (2) ensanchar el pozo con un ampliador de 12,25" x 36"; (3) ensanchar el pozo con un ampliador de 36" x 60".

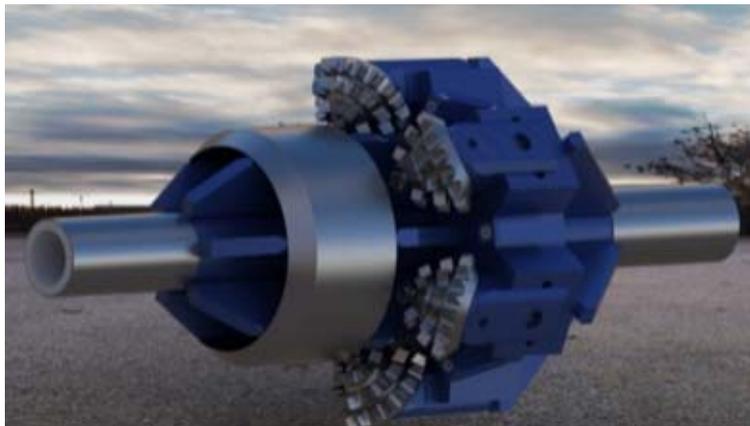


Figura N° 36. Ampliador de pozo ¹¹

Pozos de tales diámetros no son comunes en Argentina, por lo que debe preverse la disponibilidad de las herramientas y su posible importación.

Un punto importante a tener en cuenta es el preventor de surgencias en superficie, y saber si será suficiente con uno de tipo *diverter*. No se esperan grandes presiones a 1000 metros de profundidad, aunque una eventual materialización del proyecto podría requerir una profundidad de pozo mayor.

¹¹ <http://drillingrigs4u.com/1-2-5-3000hp-skid-mounted-drilling-rig/214247/>, visitado el 30/3/21



Figura N° 37. Diverter de 21" y 500 psi ¹²

Tarea	Empresa o Institución
Programa de perforación, análisis de pozos vecinos, análisis de dureza de roca, selección de trépanos y herramienta direccional para mantener verticalidad del pozo, programa de lodo de perforación. Análisis geo-mecánico, selección de densidad de trabajo y espesor de revestidor (casing). Programa de cementación y completación.	Institución o empresa encargada del proyecto a través de su vinculación con empresas de servicios petroleros.
Selección del equipo preventivo de surgencias en superficie	Empresa especialista en control de pozos
Diseño de toma de agua y retorno a formación para el pre-calentador y evaporador, diseño de empaquetaduras necesarias	Empresa de servicios petroleros con capacidades de diseño de herramientas de completación

¹² http://www.ge-energy.com/products_and_services/products/capital_drilling_equipment/, visitado el 30/3/21

7.5 Evaluación económica final

Para abordar esta evaluación, se toma como base la evaluación económica inicial del punto 7.2 y se refina con los detalles obtenidos en las instancias de diseño. De esta forma se tiene una idea más acabada de las bondades de la innovación respecto a otras formas de energía. No se debe tener en consideración solamente cuestiones económicas, sino también otras de diverso carácter, como la no necesidad de utilización de combustible, la capacidad de funcionar día y noche, la baja dependencia de condiciones climáticas (recordar que el salto térmico se ve afectado por la temperatura ambiente ya que tendrá influencia en la temperatura del agua de enfriamiento), puesta en valor de cuencas petroleras con alta producción de agua a través de la diversificación del perfil productivo, bajo nivel de contaminación e impacto superficial, no liberación de gases de efecto invernadero, impacto social a través de creación de puestos de trabajo, generación de proyectos de investigación, puesta en valor de la industria nacional, crecimiento de la capacidad eléctrica instalada del sistema nacional, entre otras.

Tarea	Empresa o Institución propuesta
Evaluación económica final. Comparación con respecto a otras tecnologías	Universidades nacionales e instituciones con experiencia en evaluación de proyectos relacionados a generación de energía y energías renovables.
Estudio de optimización para encontrar la mejor relación entre profundidad de pozo, potencia neta de la instalación y costo de capital necesario	
Cálculo de vida útil y planificación del mantenimiento	Universidades con equipos de ciencias de la computación con capacidad de trabajo en algoritmos de optimización. Especialistas en mantenimiento mecánico y eléctrico. Considerar la dificultad en el mantenimiento una vez instalada la máquina, en consecuencia, planificar herramientas con capacidad de monitoreo en tiempo real,

	<p>analítica de datos y operación desde superficie.</p> <p>Especialistas en integridad de pozo, tanto para minimizar corrosión como manejo de diferenciales de presión entre partes de la máquina.</p>
--	--

7.6 Etapa de fabricación de componentes

Una vez listos los diseños detallados en los puntos anteriores, hay componentes que deben fabricarse en plantas metalmecánicas.

Tarea	Empresa o Institución propuesta
Fabricación de la torre de enfriamiento	Empresa de refrigeración con experiencia en torres de enfriamiento
Intercambiadores de calor: pre-calentador, evaporador y condensador (estos dos últimos de diseño modular)	Empresa metalmecánica con experiencia en construcción de intercambiadores de calor. Deberá tener la capacidad de fabricar las uniones especiales de los módulos, para sellar cualquier posible fuga de la forma más efectiva posible
Conjunto turbina-generador. Debe preverse el cableado a profundidad	Empresa electromecánica con probada experiencia en fabricación/instalación de turbinas

Caño filtro con toma de agua de formación, bomba, y descarga a formación	Empresa metalmecánica vinculada a empresa de servicios petroleros con capacidades en completación de pozos.
Módulo de instrumentación y control en superficie	Empresa de instrumentación con experiencia en control de equipos de generación eléctrica. Considerar el auge de la Transformación Digital, tomar las precauciones para la captura, procesado de datos y su ulterior transformación en información. Potenciar la analítica de datos y la Inteligencia Artificial desde etapas tempranas del desarrollo.

7.7 Etapa de construcción de pozo y montaje

Se debe seleccionar una compañía de torre para la construcción del pozo. Debido a las medidas inusuales que se manejan, se requerirá un equipo de perforación con las características necesarias que podría no estar disponible en el país. A su vez, es importante la selección de la compañía de entubado de pozo, ya que la medida de casing o revestidor que se plantea (48”), no es común en nuestro país.

Tarea	Empresa o Institución propuesta
Selección de compañía de torre, cálculo de potencia necesaria del equipo de perforación, bombas de lodo, piletas de lodo, equipos de control de sólidos	Institución o empresa encargada del proyecto a través de su vinculación con empresas de servicios petroleros.
Selección de barras de perforación, barras extra-pesadas y portamechas	

<p>Ensamblado de cañerías del fluido de trabajo y de cañerías de agua del condensador, conexión entre módulos intercambiadores de calor y del módulo turbina-generador en la superficie de trabajo, todas operaciones conjuntas con las maniobras de bajada de la máquina. Las conexiones deben ser de calidad superior para evitar fugas y llevar al mínimo cualquier tipo de mantenimiento.</p>	<p>Trabajo conjunto entre compañía de torre, empresas de servicios de entubado de pozo y empresas de ingeniería de diseño, para delinear los sistemas de bajada de cañerías y ensamblado simultáneo</p>
<p>Conexión eléctrica de la bomba de agua de formación en el fondo del pozo, de la bomba de fluido de trabajo y del generador eléctrico. Se requieren las soluciones tecnológicas necesarias para llevar los cables necesarios a medida que se ensambla la máquina. La bomba de agua de enfriamiento se encuentra en superficie.</p>	<p>Empresa de servicios con capacidades y experiencia en bombas electro-sumergibles. Empresa de ingeniería en servicios eléctricos</p>
<p>Instrumentación y control</p>	<p>Empresa de servicios con capacidad y experiencia en instrumentación y control de equipos de generación</p>

7.8 Etapa de puesta en marcha y pruebas

Una vez construida la máquina comenzarán las tareas de puesta en marcha y testeos. Se deben llenar los circuitos con el fluido de trabajo seleccionado y pasar por los diferentes transitorios hasta la puesta en régimen. Se deben ejecutar las operaciones necesarias en el circuito eléctrico de superficie e instrumentación. La máquina debe probarse en diferentes condiciones de temperatura ambiente, que afectará el salto térmico y por lo tanto el rendimiento de la misma.

7.9 Etapa de puesta en producción y masificación

Luego de asegurar que las pruebas de la innovación son satisfactorias, es posible pasar a una etapa de masificación, bien sea en el yacimiento de prueba o en un nuevo campo. Será provechosa la estimación en la disminución de costos debido a la producción masiva de este tipo de máquinas. La utilización masiva traerá aparejada la generación de muchos datos, los cuales podrán ser examinados mediante técnicas analíticas y, tal vez, de Inteligencia Artificial, para la optimización de la máquina y futuras posibles mejoras.

7.10 Institución encargada del proyecto

Se requiere considerar cuál empresa o institución podría asumir un proyecto como el presentado en este trabajo. Dadas las posibilidades expuestas de aprovechamiento de áreas petroleras con alta producción de agua, por la similitud de muchas de las características de la instalación a un pozo petrolero, y por la reconversión provechosa hacia energías renovables, una empresa productora de petróleo y gas sería la más adecuada. Por lo estratégico que significa ampliar la matriz energética del país, se considera que la compañía petrolera de bandera nacional, YPF, podría ser la apropiada.

Se destaca la existencia de la compañía YPF Luz, cuya visión es “Ser una de las principales compañías del sector de generación de energía eléctrica, líder en energías renovables, con estándares de seguridad, tecnología, eficiencia y calidad de referencia mundial” ¹³. A esto agregamos que YPF cuenta con un sector de investigación de primera línea, Y-Tec, siempre en la búsqueda de desarrollos tecnológicos de última generación. El hecho de que la máquina propuesta es una tecnología de energía renovable, tiene un alineamiento estratégico con compañías tecnológicas de punta, que trabajan para reducir el efecto de la interacción del ser humano con el medio ambiente.

¹³ <https://www.ypluz.com/LaCompania#mision>, visitado el 30/3/21

7.11 Instrumentos de financiamiento

Existen instrumentos de financiamiento de la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCyT). Debe tenerse presente que al momento hay muy pocas convocatorias abiertas para instrumentos de financiamiento, y las que hay pueden ser no adecuadas o suficientes para nuestro proyecto. Podría necesitarse una vinculación con actores políticos estratégicos para generar el interés necesario en el desarrollo de una nueva tecnología.

Los fondos sectoriales parecen los más adecuados al financiamiento principal de este proyecto. Los fondos sectoriales son el instrumento central para la implementación de una nueva generación de políticas que intentan fortalecer la vinculación entre el sector científico y tecnológico con el sector socio productivo a fin de contribuir a la solución de problemas sociales y económicos. Para la ANPCyT es el Fonarsec, Fondo Argentino Sectorial. El eje conceptual y operativo del Fonarsec está dado por las “Plataformas tecnológicas” las cuales suministran el marco propicio para la reunión de actores públicos y privados quienes en conjunto definen los cursos de acción deseables y factibles que dependen de la investigación, el desarrollo y la innovación para concretar los objetivos de crecimiento, competitividad y sustentabilidad de corto, mediano y largo plazo de su sector de incumbencia. El Fonarsec gestiona proyectos y actividades cuyo objetivo es desarrollar capacidades críticas en áreas de alto impacto potencial y transferencia permanente al sector productivo ¹⁴.

Dentro de las áreas potenciales enfocadas por el Fonarsec, encontramos la de energía y la de ambiente y cambio climático alineadas a nuestro proyecto. El objetivo de las áreas potenciales es acelerar el desarrollo de proyectos público-privados, crear o expandir centros de investigación orientados al sector productivo, desarrollando una fuerte plataforma local que pueda ser compartida por varias empresas y/o instituciones. También hay un plan de apoyo a la creación de empresas de base tecnológicas, que podría ser de utilidad para la puesta en marcha del proyecto. Por ejemplo, el Programa de impulso a las Empresas de Base Tecnológica: EMPRETECNO. La herramienta de promoción que se distingue como adecuada es el Plan de Apoyo a la creación de Empresas de Base Tecnológicas, PAEBT.

¹⁴ <http://www.agencia.mincyt.gob.ar/frontend/agencia/instrumentos/5/convocatoria>, visitado el 30/3/21

Algunos de los proyectos de investigación generados con este trabajo podrán financiarse con instrumentos del FonCyT (Fondo para la Investigación Científica y Tecnológica). La ANPCyT apoya a través del FonCyT, proyectos de investigación cuya finalidad sea la generación de nuevos conocimientos científicos y tecnológicos. La misión del Foncyt es apoyar proyectos y actividades cuya finalidad es la generación de nuevos conocimientos científicos, tecnológicos e innovadores, tanto en temáticas básicas como aplicadas, desarrollados por investigadores pertenecientes a instituciones públicas y privadas sin fines de lucro radicadas en el país ¹⁵.

Un instrumento de financiamiento propuesto para los proyectos de investigación derivados del presente trabajo, es el PPL (Proyecto de Plataformas Tecnológicas) del FonCyT. Tiene por objetivo apoyar la constitución de unidades con tecnología de frontera y personal altamente especializado dedicadas a proveer productos y servicios científicos y tecnológicos avanzados, altamente especializados, necesarios para grupos de investigación de excelencia y para empresas de base tecnológica.

¹⁵ <http://www.agencia.mincyt.gob.ar/frontend/agencia/instrumentos/3>, visitado el 31/3/21

8 Escenarios alternativos

Mencionamos la importancia de que el sistema energético interconectado nacional tenga una “base” estable sobre la cual funcionar. Se requiere un suministro continuo y lo más constante posible de energía, lo cual solo puede ser entregado en este momento por sistemas que queman combustibles fósiles o bien por la energía nuclear. Como se mencionó anteriormente, la máquina propuesta tendrá en realidad una pequeña variación de su salto térmico, dependiente de la variación de la temperatura ambiente. Varía la temperatura del agua de enfriamiento que hace funcionar al condensador. Este último punto nos lleva a plantear una alternativa. La idea es aprovechar la extremadamente baja variación de temperatura del agua de mar en cada punto del lecho marino, allí situamos el condensador. Una ventaja adicional es no tener limitaciones geométricas en el condensador, ni limitaciones del caudal de agua para su operación.

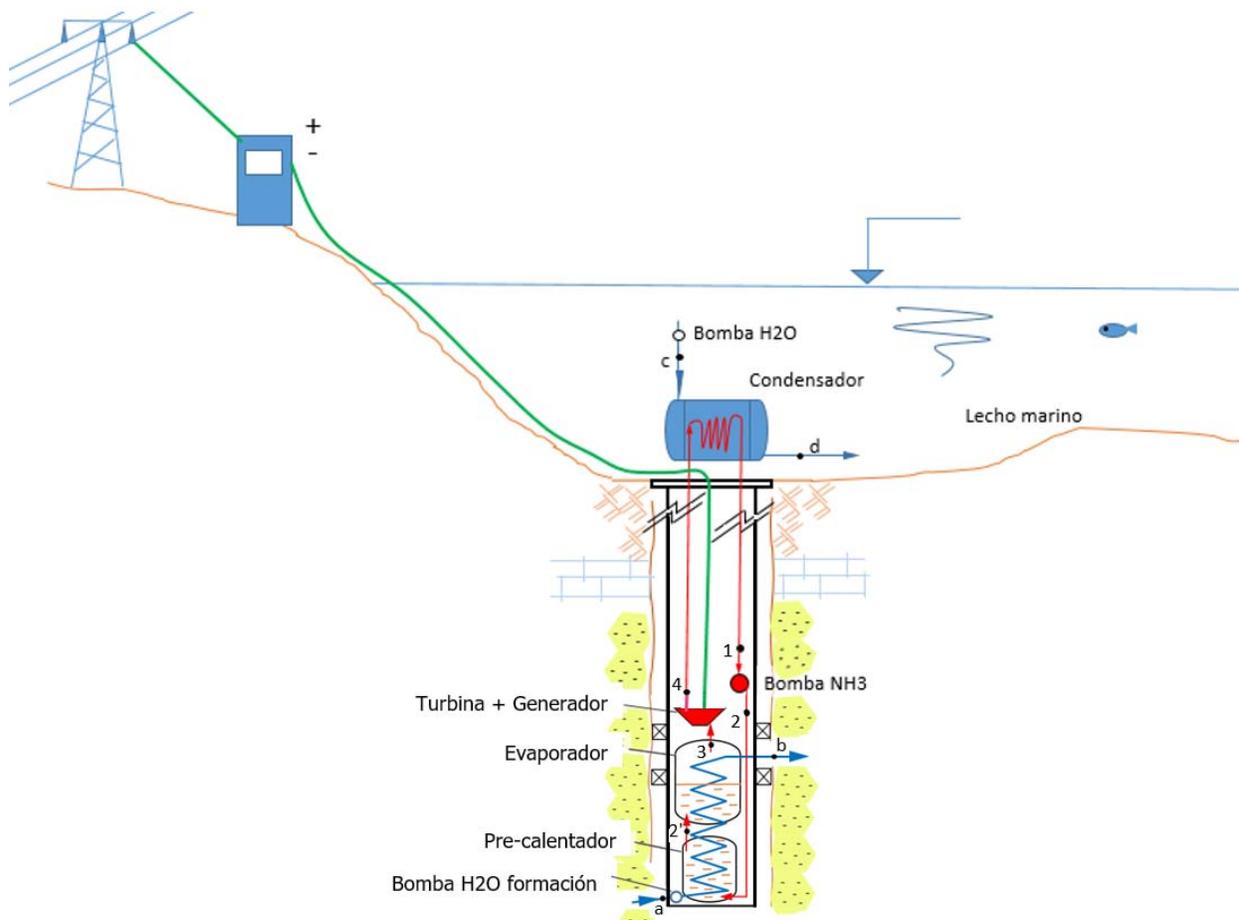


Figura N° 38. Esquema alternativo propuesto

Por supuesto, se agrega la complejidad de perforar un pozo fuera de costa. La temperatura del agua de enfriamiento será prácticamente constante. Por ejemplo, a 30 metros de profundidad en las costas de la provincia de Santa Cruz, la temperatura del agua varía anualmente desde 6 a 8°C de Sur a Norte, Figura N°39. Se sigue teniendo la misma limitante con respecto al alto caudal de agua de formación, necesario para el funcionamiento del pre-calentador y evaporador de la instalación.

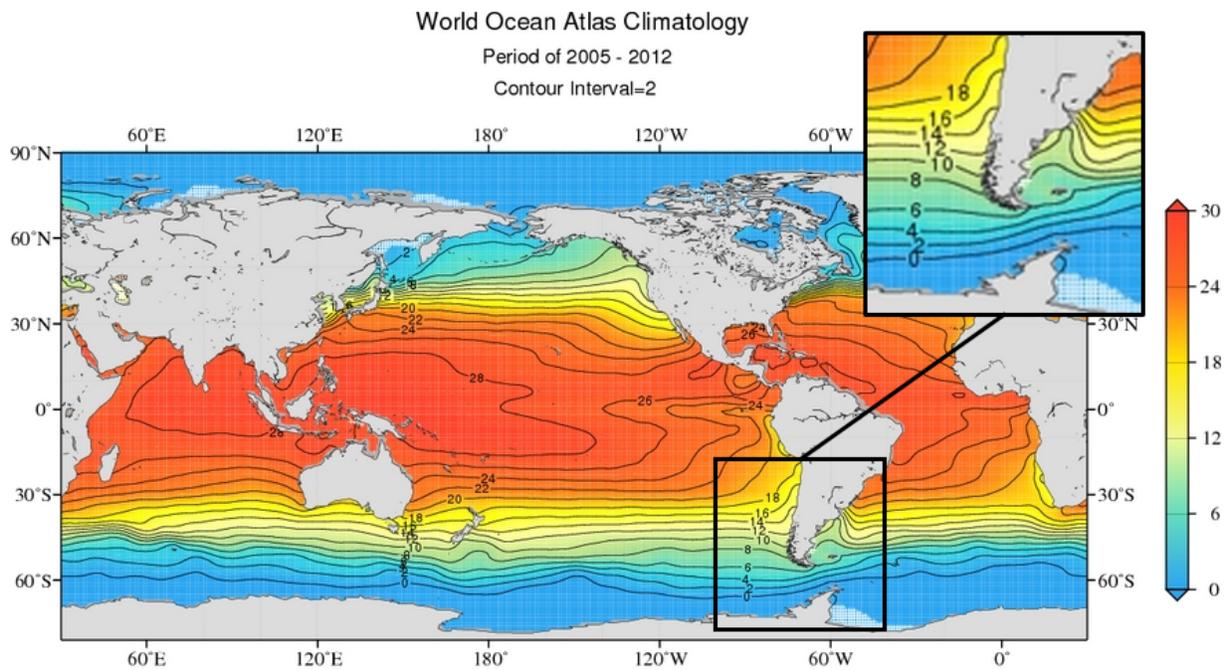


Figura N° 39. Temperatura promedio anual a 30 metros de profundidad ¹⁶

¹⁶ <https://www.nodc.noaa.gov/cgi-bin/OC5/woa13f/woa13f.pl?parameter=t>, visitado el 16/10/20

9 Conclusiones

El hecho de conocer que la energía termo-oceánica utiliza para su funcionamiento saltos térmicos del orden de 25 °C, induce a preguntar por qué no es posible aprovechar la diferencia de temperatura que se produce entre la superficie y el fondo de un pozo. El gradiente térmico estándar, es decir, en zonas no volcánicas, es de unos 30 °C/1.000 m. En la cuenca neuquina es posible encontrar temperaturas cercanas a 54 °C a 1.000 metros de profundidad. Lindal (1973), plantea una temperatura mínima de fluido, requerida para hacer funcionar una planta binaria de generación geotérmica, de 85°C. Sin embargo, Patel (2006) reporta el funcionamiento de un prototipo de 200 KW utilizando una temperatura de fluido de 74°C. Se consideró en el análisis efectuado en el presente trabajo, un salto térmico de 37 °C. Esto es, una temperatura ambiente de 17 °C y una temperatura de fondo de 54 °C. Queda pendiente un análisis de sensibilidad variando la temperatura ambiente. Con las condiciones planteadas, se ejecutó un cálculo que involucró un proceso iterativo, encontrando los siguientes parámetros fundamentales: Potencia Neta = -276,5 KW, Rendimiento Térmico de la Instalación = 4,7% (Primera ley de la Termodinámica), Eficiencia de la Instalación = 2,8% (Segunda ley de la Termodinámica), Caudal Másico de NH₃ = 5 Kg/seg, Caudal Másico de agua de enfriamiento = 328, 4 Kg/seg, Caudal Másico de agua de formación = 522,4 Kg/seg, Superficie Pre-Calentador = 25,9 m², Superficie Evaporador = 2024,6 m², Superficie Condensador = 1342,7 m².

De estos datos se destaca la necesidad de contar con un caudal de agua de formación de 522,4 Kg/seg. Por lo que se convierte en el punto inmediato de investigación posterior a este trabajo, para definir la viabilidad técnica de la innovación. Luego, se planteó un plan estratégico de pasos que involucra una evaluación económica comparativa a otras tecnologías, diversas etapas de diseño que podrían disparar múltiples trabajos de investigación, etapas de fabricación, construcción, montaje y puesta en marcha. Finalmente, se pone a disposición algunas ideas de financiamiento para el proyecto.

Con respecto al elevado costo esperado de la instalación, se argumenta en favor de la idea, que se trata de una energía renovable. El calentamiento global está en la agenda internacional, con pronunciamientos, por ejemplo, del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio

Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), que advierte sobre efectos devastadores para el planeta en caso de exceder un aumento de temperatura de 1.5°C ¹⁷.

Países como Gran Bretaña, Estados Unidos, Canadá, la Unión Europea, Alemania, Noruega, China y la India, tienen compromisos para dejar de vender autos que funcionan con combustibles fósiles, en favor de autos eléctricos, con fechas que van desde el año 2030 al 2050. En este contexto, el litio se transforma en un elemento estratégico para la economía de los países ¹⁸.

Por último, se presenta un esquema alternativo a la idea presentada, que agrega complejidad tecnológica, pero a la vez propone una solución para la operación continua y constante de aporte de energía eléctrica al sistema interconectado nacional.

Se destaca la similitud de operaciones en la construcción de la máquina, a las tecnologías encontradas en la perforación de pozos petroleros, con lo cual, se podría aprovechar capacidad instalada, bajando costos, diversificando zonas petroleras de baja producción y estimulando la economía local.

¹⁷ <https://sipse.com/mundo/cambio-climatico-papa-francisco-conferencia-companias-petroleras-335861.html>, visitado el 30/3/21

¹⁸ <https://www.reuters.com/article/climate-change-britain-factbox-idINKBN27Y19F?fbclid=IwAR12-ml-pki3iGkHYffHZS8uhEHOUDFNNg7E3S8YZApyxz7kwB8sPHGsm3g>, visitado el 30/3/31

10 Bibliografía

Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCyT). Fondos de Financiamiento. <https://www.argentina.gob.ar/ciencia/agencia>

Baehr, H. (1965). *Tratado Moderno de Termodinámica (Teoría y Aplicaciones Técnicas)*. (Primera Edición Española). Buenos Aires: Editor José Montesó.

Baraňao, J. (2010). *Potencial Geotérmico en Chile*. De la serie potencial bruto de las ERNC. Recuperado de <http://www.centralenergia.cl/2010/10/06/potencial-geotermico-de-chile/>

Barathan, D., Green, H., Link, H., Parsons, B., Parsons, J., Zangrando, F. (1990). *Conceptual Design of an Open-Cycle Ocean Thermal Energy Conversion Net Power –Producing Experiment (OC-OTEC NPPE)*. A cooperative effort of Solar Energy Research Institute Pacific International Center for High Technology Research Argonne National Laboratory. Golden, Colorado, EE. UU.

Conserve Energy Future. (2018). Various Types of Geothermal Power Plants. Recuperado de: <https://www.conserve-energy-future.com/geothermalpowerplanttypes.php>

Dickson, M. y Fanelli, M. (2004). What is Geothermal Energy? *Istituto di Geoscienze e Georisorse, CNR*. International Geothermal Association. Pisa, Italy

DiPippo, R. (2012). *Geothermal Power Plants: Principles, Applications, Case Studies and Environmental Impact*. Third Edition. University of Massachusetts, North Dartmouth.

Fridleifsson, I., Bertani, R., Huenges, E., Lund, J., Ragnarsson, A., Rybach, L. (2008). *The possible role and contribution of geothermal energy to the mitigation of climate change*. Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC SCOPING MEETING ON RENEWABLE ENERGY SOURCES. Lübeck, Germany, 20 – 25 January, 2008

García, C. (1996). *Termodinámica Técnica* (5° Edición). Buenos Aires: Librería y Editorial Alsina.

Henbest, S. y Giannakopoulou, E. (2015). *New Energy Outlook 2015*. Powering a Changing World. Recuperado de <http://www.bloomberg.com/company/new-energy-outlook/>

Hyne, N. (2012). *Nontechnical Guide to Petroleum Geology, Exploration, Drilling, and Production (Third Edition)*. Tulsa, Oklahoma: PennWell Corporation.

IAPG, 2013. Instituto Argentino del Petróleo y del Gas. Práctica recomendada: “*Gestión del agua en la exploración y explotación de reservorios no convencionales en el área de influencia de la cuenca neuquina*”. Número 11, Revisión 0.

Lindal, B. (1973). Industrial and other applications of geothermal energy. In: Armstead, H.C.H., ed., *Geothermal Energy*, UNESCO, Paris, pp. 135—148

Masutani, S., Takahashi, P. (2001). Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC). University of Hawaii at Manoa, Honolulu, HI, USA. doi:10.1006/rwos.2001.0031.

Nihous, G. (2007). *A Preliminary Assessment of Ocean Thermal Energy Conversion Resources*. Article in Journal of Energy Resources Technology. DOI: 10.1115/1.2424965.

Patel, P. (2006). Power from Not-So-Hot Geothermal. Sustainable Energy. MIT Technology Review.

Randall, T. (2015). *The Way Humans Get Electricity Is About to Change Forever*. These six shifts will transform markets over the next 25 years. Recuperado de <http://www.bloomberg.com/news/articles/2015-06-23/the-way-humans-get-electricity-is-about-to-change-forever>

Sigismondi, M., Ramos, V. (2008). *El flujo de calor en la Cuenca Neuquina*. La geofísica como integradora del conocimiento del subsuelo. CONEXPLO.

Rinkesh (2013). Recuperado de <https://www.conserve-energy-future.com/geothermalenergy.php>

Secretaría de Energía, Producción de petróleo y gas por pozo (Capítulo IV). Datos Energía / Dataset. <http://datos.minem.gob.ar/dataset/produccion-de-petroleo-y-gas-por-pozo>

United States Geological Survey, USGS (2011). <https://pubs.usgs.gov/gip/dynamic/slabs.html>

Wark, K., Richards, D. (2001). *Termodinámica*. Sexta Edición. Mc Graw-Hill / Interamericana de España, S.A.U.

