

Comparación del rendimiento energético entre un ciclo binario y uno modificado, con recursos geotérmicos de baja entalpía

Héctor Miguel Aviña Jiménez

Instituto de Ingeniería, UNAM, Ciudad Universitaria, México, D.F. Correo: havinaj@iingen.unam.mx

Resumen

En este artículo se presenta una comparación del rendimiento energético de un ciclo binario y un ciclo binario modificado con evaporación flash (PWG: *Pressure Water Generation*), ambos utilizando un recurso geotérmico de baja entalpía. El análisis comparativo está basado en dos partes. En la primera se evalúa un ciclo binario convencional usando parámetros característicos para poder validar los datos con los reportados en la literatura. En la segunda parte se realiza la comparación del rendimiento energético dando los mismos parámetros de entrada a ambos ciclos, obteniendo los parámetros y casos en los cuales el ciclo binario modificado podría ser la elección más viable a utilizar. Cuando se tiene un recurso geotérmico con temperatura menor a los 140°C y temperatura ambiente de 25°C, el ciclo binario modificado (PWG) presenta un rendimiento mejor al obtenido con el ciclo binario convencional. Esto puede abrir nuevas áreas de oportunidad para la generación eléctrica con baja entalpía, no sólo a través de recursos geotérmicos sino también con otras fuentes renovables como la energía solar.

Palabras clave: Plantas, ciclo binario, ciclo binario modificado, PWG, rendimiento energético.

Comparison of energy performance between binary cycles and modified binary cycles using low-enthalpy geothermal resources

Abstract

In this article an energy performance comparison between a binary cycle and a modified binary cycle with flash evaporation (PWG or *Pressure Water Generation*) is presented, both using a low enthalpy geothermal resource. The comparative analysis is composed of two parts. The first one assesses conventional binary cycle using characteristic parameters in order to validate the data with those reported in the literature. In the second part the energy performance comparison is done using the same input parameters for the cycles, obtaining the cases in which the modified binary cycle (PWG) is the most viable choice to use. When the geothermal resource temperatures are below 140°C with ambient temperature of 25°C, the modified binary cycle presents a better performance than the conventional binary cycle. This can open new areas of opportunity for power generation with not only low enthalpy geothermal resources, but also with other renewable sources such as solar energy.

Keywords: Power plants, binary cycle, modified binary cycle, PWG, energy performance.

Nomenclatura

CBC Ciclo Binario Convencional

CFE Comisión Federal de Electricidad

CBM Ciclo Binario Modificado

ODP Potencial de Destrucción de Ozono

PWG *Pressure Water Generation*

GWP Potencial de Calentamiento Global

T_c	Temperatura crítica ($^{\circ}\text{C}$)	η_t	Eficiencia en la turbina (%)
P_c	Presión crítica (MPa)	\dot{m}_{ar}	Gasto del agua de enfriamiento (kg/s)
T_o	Temperatura ambiente	\bar{c}	Capacidad calorífica promedio del agua de enfriamiento (kJ/kg $^{\circ}\text{C}$)
P_o	Presión ambiental	\bar{c}_{fg}	Capacidad calorífica promedio del fluido geotérmico (kJ/kg $^{\circ}\text{C}$)
X	Calidad	T	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)
\dot{W}_t	Trabajo en la turbina (kWe)	\dot{Q}	Calor (kW)
\dot{m}_{ft}	Gasto del fluido de trabajo (kg/s)	η_u	Eficiencia del ciclo (%)
h	Entalpía (kJ/kg)	\dot{m}_b	Gasto del fluido geotérmico (kg/s)
S	Entropía (kJ/kg $^{\circ}\text{C}$)		

Introducción

Las plantas geotérmicas con ciclo binario tienen un principio termodinámico de funcionamiento similar a las plantas convencionales de combustible fósil o nuclear, en las que el fluido de trabajo circula por un circuito cerrado. Las plantas de ciclo binario trabajan con un fluido secundario que tiene un punto de ebullición menor al del agua y diferentes propiedades termodinámicas. Dicho fluido de trabajo recibe calor del fluido geotérmico en un intercambiador de calor (de tubos y coraza) y es vaporizado y utilizado para mover la turbina. Al salir de la turbina es condensado y reutilizado en un circuito cerrado (ver Figura 1; todas las figuras al final del texto).

Las plantas geotermoeléctricas pequeñas, de hasta 5 MW, tienen un grado de viabilidad muy superior a las de potencia más elevada. Autores como Entingh et al. (1994) apuntan una serie de ventajas que aconsejan el empleo de estas plantas, siendo la mayor ventaja el hecho de que hay en el mundo más yacimientos de baja entalpía que los de media y alta entalpía. Otras ventajas son las siguientes:

- Pueden construirse en módulos transportables de muy baja potencia (100-300 kW), de muy reducido tamaño, lo cual permite colocar varios módulos en un mismo sitio y así conjuntar el pequeño potencial llegando a tener plantas con potencia más considerable dependiendo del recurso geotérmico en el sitio.
- Pueden trabajar aisladas, alimentando a un pequeño consumidor desconectado de la red, ya que son muy flexibles, pudiendo trabajar al 25% de su potencia nominal en condiciones adecuadas.
- Su versatilidad permite un diseño automático muy sencillo, que les confiere un alto grado de funcionamiento autónomo.
- Al ser de baja potencia, su alimentación puede reducirse a un pozo único de alimentación, o a dos cuando mucho, lo que reduce la operación y los costos.
- La inversión es bastante reducida comparándola con las plantas de mayor tamaño, sin dejar de considerar que para cualquier proyecto geotérmico de generación eléctrica se necesita invertir en la exploración del campo geotérmico. En este caso, los pozos de exploración serían de menor profundidad, reduciendo los costos.

Cuando la temperatura del fluido geotérmico es de 150°C o menos, resulta difícil (aunque no imposible) construir una planta a condensación que funcione de forma eficiente y económica, ya que

cuanto menor es la temperatura del recurso, mayores son las dificultades para implementar una planta a condensación. De hecho, a temperaturas bajas es improbable que los pozos fluyan de manera espontánea, y en caso de que lo hagan existe alta probabilidad de que ocurran incrustaciones de calcita en los pozos. La CFE ha instalado plantas de ciclo binario en tres zonas geotérmicas: Las Tres Vírgenes, BCS, Los Azufres, Mich., y Maguarichi, Chih. Esta última cobra más importancia debido a que la planta se instaló de manera aislada de la red eléctrica nacional para proveer energía a un pequeño poblado que entonces tenía unas 600 personas, siendo así el primer y único proyecto geotérmico independiente de la red en México. Ninguna de las plantas en esas tres zonas continúa en operación actualmente. De hecho, no hay ninguna planta geotérmica de ciclo binario operando en el país a la fecha, aunque la energía geotérmica de baja entalpía en México tiene un potencial probable de generación de 200 MWe (Ordaz et al., 2011) mediante plantas pequeñas.

Para los sistemas geotérmicos de baja entalpía que se pueden aprovechar y que sólo producen agua caliente (no vapor), las plantas geotermoeléctricas de ciclo binario muestran valores muy bajos de eficiencia de primera ley (5-12%), e incluso la eficiencia de segunda ley está típicamente en el rango de 25 a 45% (Kanoglu, 2002; Kose, 2007; Moya y DiPippo, 2007). En los últimos años se han realizado muchos estudios para intentar aumentar la eficiencia de las plantas de ciclo binario, concentrándose principalmente en modificar los sistemas de combinación del fluido de trabajo y el ciclo de recuperación de calor (intercambiadores de calor).

Entre las principales modificaciones planteadas están las de DiPippo (2004, 2008), quien propuso un intercambiador de recuperación de calor con una cascada de evaporadores y el uso de un fluido de componentes múltiples de trabajo (como ocurre en un ciclo Kalina), mientras que Kanoglu (2002) propone un ciclo de recuperación con una turbina de alta y una turbina de baja presión. Gnutek y Bryszewska-Mazurk (2001) proponen una planta de generación con más de dos niveles de presión, y se han estudiado también ciclos binarios supercríticos.

Propuesta de ciclo binario modificado con una evaporación flash (PWG)

Uno de los inconvenientes que presenta el ciclo binario convencional (CBC) es que el evaporador y el precalentador al estar en contacto directo con el agua geotérmica sufren severos problemas de corrosión e incrustación, por lo que tienen que ser sometidos a un mantenimiento constante que resulta complicado y costoso. Aunado a esto, la eficiencia de esos equipos es baja, y si se desea un mayor acercamiento entre las temperaturas de los fluidos contenidos en ellos el tamaño de las unidades debe ser mucho mayor.

Para evitar dichos problemas, el proyecto IMPULSAIV del Instituto de Ingeniería de la UNAM propuso el uso de un sistema binario modificado, siendo este un híbrido entre un ciclo binario y un ciclo a condensación con un flasheo, en el cual se sustituye el evaporador y el calentador por un intercambiador de calor de placas, añadiendo una válvula de estrangulamiento (placa orificio) y un separador de flujos centrífugo. De esta manera, sólo el intercambiador de placas entrará en contacto con el fluido geotérmico (Alcocer and Hiriart, 2008). Otro cambio en este ciclo modificado o híbrido es utilizar agua como fluido de trabajo. Adicionalmente y por necesidades del ciclo propuesto, se propone el uso de una turbina de alta velocidad para cumplir con las características del ciclo de generación (Aviña et al., 2012).

En tal sistema, Figura 2, el agua geotérmica calienta al fluido de trabajo (el cual puede ser un refrigerante o agua previamente tratados), a través del intercambiador de calor de placas, hasta llevarlo a la condición de líquido saturado. Posteriormente, el fluido de trabajo se hace pasar a través de la placa

orificio, donde disminuye su energía de presión y, como consecuencia, parte de él se evapora. La mezcla bifásica generada (vapor-líquido) se conduce a un separador de fases centrífugo. El vapor separado se dirige hacia la turbina donde se realiza el trabajo y el líquido se reintegra al ciclo. A continuación, el vapor es condensado y se bombea hasta alcanzar la presión del separador y se mezcla con el líquido en un dispositivo llamado colector, para finalmente ser bombeado a la presión del intercambiador de placas donde se cierra el ciclo. El ciclo binario modificado (CBM) fue nombrado PWG por sus siglas en inglés (*Pressure Water Generation*).

A pesar de parecer un sistema más aparatoso por la cantidad de equipos utilizados, los elementos complementarios son sencillos en su caracterización y mantenimiento.

Ventajas del ciclo PWG vs. el ciclo binario convencional

La principal ventaja que presenta el CBM (PWG) sobre una planta de CBC es que, al emplear un intercambiador de calor de placas, la eficiencia en la generación de vapor se incrementa, ya que este tipo de equipos permiten acercamientos de hasta 1°C entre los fluidos. Sus pérdidas son bajas, lo cual es sumamente importante en el aprovechamiento de la energía geotérmica, el espacio ocupado por estos intercambiadores es menor y su mantenimiento es más sencillo comparado con los de carcasa y tubos.

En este nuevo sistema con evaporación flash, y con la intención de reducir el espacio total de la planta, se considera el uso de una turbina de alta velocidad. Este tipo de turbina se seleccionó debido a las características que tendrá el vapor en este ciclo. El separador de vapor es de tipo centrífugo, ya que con él se logra una separación de, incluso, el 99.9% del líquido.

El sistema desarrollado posee diferencias significativas con respecto a los sistemas convencionales de generación con recursos geotérmicos de baja entalpía (ciclo binario) y, más interesante aún, presenta varias ventajas sobre éste, entre las que se pueden mencionar:

- Periodos de mantenimiento muy cortos, lo que significa mayor disponibilidad de los equipos.
- Mayor aprovechamiento de la energía disponible, que se traduce en mayor extracción de energía de la misma fuente.
- Espacio relativamente menor para su instalación, con respecto a los ciclos binarios convencionales.
- Uso de agua como fluido de trabajo, lo que implica ventajas medioambientales y de salud (ver Tabla 2).

Consideraciones para la comparación energética

Se han mencionado algunas diferencias conceptuales del CBC y la propuesta de CBM (PWG) con una evaporación flash. Para la evaluación energética se realizaron balances de energía y masa de los diferentes componentes de los ciclos. Con ayuda de una herramienta de Excel llamada REFPROP se obtuvieron las propiedades de los fluidos que se utilizan en los ciclos.

La selección del fluido de trabajo es una decisión muy importante en la fase de diseño, ya que tiene mucha influencia en el posterior funcionamiento de la planta binaria. Se deben tener en cuenta las propiedades termodinámicas de los fluidos, así como otras consideraciones de seguridad, salud e impacto ambiental. Para el caso este caso de estudio, se eligió utilizar isopentano que es el fluido más utilizado en plantas de ciclo binario, entre ellas las que operaron antes en el país.

La Tabla 1 muestra algunos de los fluidos que se utilizan regularmente como fluidos de trabajo, incluyéndose el agua pura como propuesta y punto de comparación.

Fluido	Fórmula	T _c (°C)	P _c (MPa)	P _{c@300K} (MPa)	P _{c@400K} (MPa)
Propano	C ₃ H ₈	96.95	4.236	0.9935	-
i-Butano	i-C ₄ H ₁₀	135.92	3.685	0.3727	3.204
n-Butano	C ₄ H ₁₀	150.8	3.718	0.2559	2.488
i-Pentano	i-C ₅ H ₁₂	187.8	3.409	0.09759	1.238
n-Pentano	C ₅ H ₁₂	193.9	3.240	0.07376	1.036
Amoníaco	NH ₃	133.65	11.627	1.061	10.3
Agua	H ₂ O	374.14	22.089	0.003536	0.24559

Tabla 1. Propiedades termodinámicas de algunos fluidos de trabajo para plantas de ciclo binario.

Claramente, todos los fluidos de trabajo que se ocupan en las plantas de ciclo binario convencionales tienen temperaturas críticas y presiones por debajo que el agua.

También hay que considerar las propiedades medioambientales, de salud y seguridad de los potenciales fluidos de trabajo al escoger el más apropiado. Estas propiedades incluyen inflamabilidad, toxicidad, potencial de destrucción de ozono (ODP) y potencial de calentamiento global (GWP). La Tabla 2 resume estas propiedades para algunos fluidos de trabajo.

Fluido	Fórmula	Toxicidad	Inflamabilidad	ODP	GWP
R-12	CCl ₂ F ₂	No tóxico	No inflamable	1.0	4500
R-114	C ₂ Cl ₂ F ₄	No tóxico	No inflamable	0.7	5850
Propano	C ₃ H ₈	Baja	Muy alta	0	3
i-Butano	i-C ₄ H ₁₀	Baja	Muy alta	0	3
n-Butano	C ₄ H ₁₀	Baja	Muy alta	0	3
i-Pentano	i-C ₅ H ₁₂	Baja	Muy alta	0	3
n-Pentano	C ₅ H ₁₂	Baja	Muy alta	0	3
Amoníaco	NH ₃	Tóxico	Baja	0	3
Agua	H ₂ O	No Tóxico	No inflamable	0	-

Tabla 2. Propiedades medioambientales, seguridad y salud de algunos fluidos de trabajo para plantas de ciclo binario (DiPippo, 2008).

En la comparación también se incluyen dos clorofluorocarbonos, el R-12 y el R-114, que eran usados hace algunos años, pero que debido a sus elevados ODP y GWP han sido prohibidos. Todos los hidrocarburos candidatos a ser utilizados como fluidos de trabajo son obviamente inflamables, y necesitan la instalación de equipos adecuados de protección contra incendios. El ODP está normalizado en 1.0 para los refrigerantes R-11 y R-12 que son los peores en este aspecto. El GWP está normalizado en 1.0 para el bióxido de carbono.

Como se observa en la Tabla 2, todos los fluidos de trabajo que se utilizan en las plantas de CBC tienen impactos o parámetros negativos para el medio ambiente y la salud. El agua, por su parte, podría ser un fluido de trabajo ambientalmente favorable, si las condiciones termodinámicas lo permiten.

Calculo energético del Ciclo Binario Convencional (CBC)

El fluido orgánico, que es el fluido de trabajo en el CBC, realiza un proceso igual al de un ciclo Rankine para la generación de energía eléctrica. Para el análisis energético de la planta de CBC se elaboró una hoja de cálculo con la herramienta REFPROP de Excel, la cual ayudó a definir las propiedades termodinámicas de los fluidos (agua y orgánico) teniendo como base el esquema de la Figura 1.

En la Figura 1 se observan el proceso de intercambio de calor en cual tiene dos etapas: un precalentador y un evaporador. En el precalentador el fluido de trabajo alcanza su punto de ebullición y entra en el evaporador, del que sale en estado de vapor saturado. El fluido geotérmico se mantiene en todo momento a una presión superior a la de evaporación de acuerdo a su temperatura y a sus características propias (salinidad), justamente para evitar su evaporación y/o la aparición de gases incondensables que podrían afectar el funcionamiento del intercambiador de calor por el depósito de calcita en las tuberías.

Para la evaluación energética y el análisis termodinámico del ciclo, los componentes del CBC se dividieron para elaborar la hoja de cálculo. A continuación se enlistan las consideraciones realizadas para los equipos y en la Tabla 3 se presentan las ecuaciones empleadas.

Turbina	$\dot{W}_t = \dot{m}_{ft} \cdot (h_1 - h_2) = \dot{m}_{ft} \cdot \eta_t \cdot (h_1 - h_2)$
Condensador	$\dot{Q}_c = \dot{m}_{ft} \cdot (h_2 - h_3)$
Agua de enfriamiento	$\dot{m}_{ar} \cdot (h_y - h_x) = \dot{m}_{ft} \cdot (h_2 - h_3)$ $\dot{m}_{ar} \cdot \bar{c} \cdot (T_y - T_x) = \dot{m}_{ft} \cdot (h_2 - h_3)$
Bomba de condensado	$\dot{W}_B = \dot{m}_{ft} \cdot (h_4 - h_3) = \frac{\dot{m}_{ft} \cdot (h_{4s} - h_3)}{\eta_B}$
Precalentador	$\dot{m}_{fg} \cdot \bar{c}_{fg} \cdot (T_b - T_c) = \dot{m}_{ft} \cdot (h_5 - h_4)$
Evaporador	$\dot{m}_{fg} \cdot \bar{c}_{fg} \cdot (T_a - T_b) = \dot{m}_{ft} \cdot (h_1 - h_5)$
Rendimiento térmico	$\eta_{th} = \frac{\dot{W}_{neto}}{\dot{Q}_{Prec/Evap}}$
Eficiencia del ciclo por segunda ley	$\eta_u = \frac{\dot{W}_{neto}}{\dot{m}_b [h_B - h_0 - T_0 (S_A - S_0)]}$

Tabla 3. Ecuaciones empleadas para elaborar la hoja de cálculo del ciclo binario.

Consideraciones para los componentes del ciclo binario

- Turbina: Para la simplificación de los cálculos se consideró despreciable la variación de las energías cinéticas y potencial entre la entrada y la salida de la turbina. Se supuso que la turbina está en un proceso adiabático y el flujo másico del fluido es continuo.
- Condensador: Para disipar la cantidad de energía térmica de desecho requerida, se tendrá que elegir entre un sistema de refrigeración seco o húmedo de acuerdo a las características del sitio.
- Intercambiador de calor: Se consideró que el intercambiador de calor está suficientemente aislado térmicamente para que el intercambio de energía se dé solamente entre los fluidos de trabajo y geotérmico. También se asumió que los fluidos son continuos y que la diferencia entre sus energías cinética y potencial es despreciable.

Validación de los cálculos

Para validar los resultados obtenidos en la hoja de cálculo elaborada con la herramienta REFPROP en Excel, se tomó como referencia a DiPippo (2004, 2008), quien presenta entre los casos de estudio una planta de CBC con isopentano como fluido de trabajo, mismos que se usaron para este trabajo.

Se estableció que la potencia neta de los ciclos es de 1200 kW debido a que con esta generación se pudieron validar los resultados obtenidos. En Tabla 4 se establecen los datos de entrada.

Fluido de trabajo	Isopentano
Temperatura ambiente [°C]	25
Presión atmosférica [Mpa]	0.1
Eficiencia en turbina (%)	85
Eficiencia en bomba de circulación (%)	75
Eficiencia en intercambiador de calor (%)	95
Eficiencia en el condensador (%)	90
ΔP del intercambiador [MPa]	0.05
Acercamiento en el Intercambiador [°C]	5

Tabla 4. Datos de entrada para la validación de la hoja de cálculo.

En la Tabla 5 se presentan los valores numéricos más importantes, tanto los reportados por DiPippo (2008) como los obtenidos en la hoja de cálculo.

Parámetros comparativos	DiPippo (2008)	Hoja de cálculo
Potencia Neta [kW]	1200	1200
Temperatura de entrada del fluido geotérmico [°C]	166.85	166.85
Gasto del fluido geotérmico [kg/s]	96.20	98.46
Temperatura de rechazo del fluido Geotérmico [°C]	147.15	147.38
Presión de entrada a la turbina [MPa]	2	2
Temperatura de condensación [°C]	46.85	46.83
Gasto del fluido de trabajo [kg/s]	16.30	16.85
Rendimiento térmico (%)	15.10	14.9
Eficiencia por segunda ley (%)	11.30	11.03

Tabla 5. Comparación entre los datos de la hoja de cálculo y los reportados por DiPippo (2008).

Calculo energético del ciclo binario modificado con una separación flash (PWG)

El análisis energético se realizó de acuerdo a los principios básicos termodinámicos de balance de masa y energía. Para entender de manera más clara los procesos termodinámicos que ocurren en el CBM (PWG) se presenta el diagrama de proceso T-S (Temperatura vs. Entropía).

Al igual que para el ciclo binario, se dividieron los componentes para su mejor análisis: la turbina, el condensador, las bombas, y las eficiencias se calcularon igual que para el ciclo binario (ver Tabla 3). El intercambiador de calor se calculó igual que el precalentador del ciclo binario. A continuación se presentan las consideraciones y ecuaciones (Tabla 6) para el cálculo energético del CBM (PWG).

Placa orificio	$h_7 = h_8$
Separador de flujos	$X_1 = \frac{h_8 - h_5}{h_1 - h_5}$

Tabla 6. Ecuaciones empleadas para elaborar la hoja de cálculo del ciclo binario modificado PWG.

Consideraciones para los componentes agregados en el ciclo binario modificado

- Proceso de flasheo o evaporación instantánea (Placa Orificio): Al igual que en las plantas geotérmicas convencionales con plantas a condensación, para ayudar a realizar el flasheo se manipulan las presiones por medio de válvulas o placas orificio. El proceso se inicia con el fluido de trabajo después de recibir la energía térmica del fluido geotérmico en el estado 7 (ver figuras 2 y 3), la cual viene presurizada. El proceso que se lleva a cabo en la placa orificio se calcula como proceso isoentálpico, ya que se produce de manera constante y espontánea, esencialmente adiabática y sin la implicación de ningún tipo de trabajo (DiPippo, 2004). Se descarta cualquier cambio en la energía cinética o potencial del fluido a medida que experimenta el flasheo.
- Separador de flujos: La mezcla proveniente de la placa orificio entra al separador, el cual entrega líquido y vapor saturado. El proceso de separación se calcula a presión constante (isobárico).

Comparación de rendimiento energético de los ciclos

Para realizar la comparación de rendimiento energético se establecieron los valores de entrada que se encuentran en la Tabla 7. Cabe mencionar que la potencia neta propuesta es de 1200 [kW] y la temperatura de entrada del fluido geotérmico es de 140 [°C].

Fluido de trabajo	Isopentano/Agua
Temperatura ambiente [°C]	25
Presión atmosférica [Mpa]	0.1
Eficiencia en turbina %	85
Eficiencia en bomba de circulación %	75
Eficiencia en intercambiador de calor %	95
Eficiencia en el condensador %	90
ΔP del intercambiador [MPa]	0.05
Acercamiento en el Intercambiador [°C]	5/3
Temperatura agua de enfriamiento [°C]	25
Temperatura de condensación [°C]	47

Tabla 7. Datos de entrada para realizar la comparativa de rendimiento energético

En la Tabla 7 pueden notarse algunas diferencias entre el CBC y el CBM (PWG), ya que el intercambiador de calor tiene diferente punto mínimo de acercamiento (*pinch*): para el CBC es de 5°C mientras que para el CBM es de 3°C, aunque teóricamente podría llegar a 1°C. Otra diferencia es que el CBC tiene una presión de entrada a la turbina de 1 MPa y el ciclo PWG tiene una presión de entrada de 0.1 MPa, lo que repercute en el condensador y el gasto del agua de enfriamiento. La diferencia de

presión de entrada se debe al diferente fluido de trabajo de cada uno de los ciclos, y al dato de entrada de temperatura del fluido geotérmico.

Resultados y discusión

Con esos datos se obtuvo la siguiente tabla de datos teóricos comparativos entre los ciclos binario convencional y PWG (Tabla 8).

Dato	Ciclo CBC	Ciclo CBM (PWG)
Fluido de trabajo	Isopentano	Agua
Temperatura del fluido geotérmico [°C]	140	140
Gasto del fluido geotérmico [kg/s]	77.72	70.53
Gasto del fluido de trabajo [kg/s]	23.80	67.13
Usos Propios [%]	2.58	3.11
Gasto de agua de enfriamiento [kg/s]	229.25	233.10
Rendimiento Térmico [%]	11.79	13.04
Eficiencia del ciclo 2° ley [%]	20.54	22.63

Tabla 8. Comparación teórica energética entre el CBC y el CBM (PWG) para una planta de 1200 kWe.

La Tabla 8 muestra los datos puntuales comparativos del rendimiento energético para el caso específico de 1200 kW de salida de potencia, y se observa que el CBM (PWG) se encuentra dentro de un rango aceptable. Para visualizar mejor la comparación energética se elaboraron gráficas comparativas de los parámetros más importantes.

La Figura 4 muestra la variación de la eficiencia si se modifica la temperatura de entrada del fluido geotérmico. Esta gráfica ayuda a definir el rango de operación óptima para cada uno de los ciclos, pudiendo observarse que si el recurso geotérmico tiene menos de 146°C, la opción más eficiente sería usar un CBM (PWG), pero si el recurso es de mayor temperatura lo recomendable es usar un ciclo convencional CBC.

En la Figura 5 se muestra la comparación entre los ciclos variando la temperatura ambiente, lo cual afecta de igual manera la eficiencia en ambos ciclos. Esta evaluación se realizó con una temperatura del fluido geotérmico igual a 140°C, por lo cual el CBM (PWG) tiene una mejor eficiencia.

La Figura 6 indica que la masa del fluido de trabajo en el CBM es mucho mayor que en CBC. Cabe resaltar que el fluido de trabajo en el CBM es agua y en el CBC es isopentano, el cual se debe tratar con precaución para experimentación y no es de tan fácil acceso como el agua.

En la Figura 7 se muestra que el CBM (PWG) tiene un mejor rendimiento en cuanto a la masa del fluido geotérmico. Aunque no hay mucha diferencia con el CBC, este puede ser un factor importante al elegir el ciclo a usar, una vez que ya estén definidas las características del recurso geotérmico en un yacimiento somero.

Conclusiones

Se ha presentado una opción alternativa de generación eléctrica con un ciclo binario modificado (CBM) con una evaporación tipo flash PWG. Esta opción, de acuerdo a los resultados obtenidos en la

comparación de rendimiento energético, es muy aceptable para generar energía eléctrica con recursos geotérmicos de baja entalpía.

Así, los resultados obtenidos en este estudio demuestran que cuando el recurso geotérmico a utilizar tiene temperatura inferior a los 140°C, el ciclo binario modificado (CBM) presenta un mejor rendimiento que el ciclo binario convencional (CBC) para una temperatura ambiente de 25°C. Esto puede abrir nuevas áreas de oportunidad para la generación eléctrica con baja entalpía, no sólo con recursos geotérmicos pero también con otras fuentes renovables.

Referencias

- Alcocer, S., and G. Hiriart, 2008. An applied research program on water desalination with renewable energies. *Am. J. Environ. Sci.* 4, pp. 204-211.
- Aviña, H., O. Ramos y J. Hernández, 2012. Propuesta del diseño analítico para una turbina experimental para micro-generación. Memorias del XII Congreso y Exposición Latinoamericana de Turbomaquinaria.
- DiPippo, R., 2004. Second Law assessment of binary plants generating power from low temperature geothermal fluids. *Geothermics* 33, pp. 565-586.
- DiPippo, R., 2008. *Geothermal power plants: Principles, applications, case studies and environmental impact*. 2nd edition, Butterworth-Heinemann, New York, NY, USA, 493 pp.
- Entingh, D.J., E. Easwaran, and L. McLarty, 1994. Small geothermal electric systems for remote powering. U.S. DoE, Geothermal Division, Washington, D.C., 12 pp.
- Gnutek, Z., and A. Bryszewska-Mazurek, 2001. The thermodynamic analysis of multicycle ORC engine. *Energy* 26, pp. 1075-1082.
- Kanoglu, M., 2002. Exergy analysis of a dual-level binary geothermal power plant. *Geothermics* 31, pp. 709-724.
- Kaplan, U., 2007. Organic Rankine cycles configuration. In: *Proceedings of the European Geothermal Congress*, 30 May-1 June, 2007, Unterhaching, Germany.
- Kose, R., 2007. Geothermal energy potential for power generation in Turkey: A case study in Simav, Kutahya. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 11, pp. 497-511.
- Moya, P., and R. DiPippo, 2007. Unit 5 bottoming binary plant at Miravalles geothermal field, Costa Rica: Planning, design, performance and impact. *Geothermics* 36, pp. 63-96.
- Ordaz M., A., M. Flores A. y G. Ramírez S., 2011. Potencial Geotérmico de la República Mexicana. *Geotermia*, Vol., 24. No. 1, pp. 35-46.

FIGURAS EN PÁGINAS SIGUIENTES

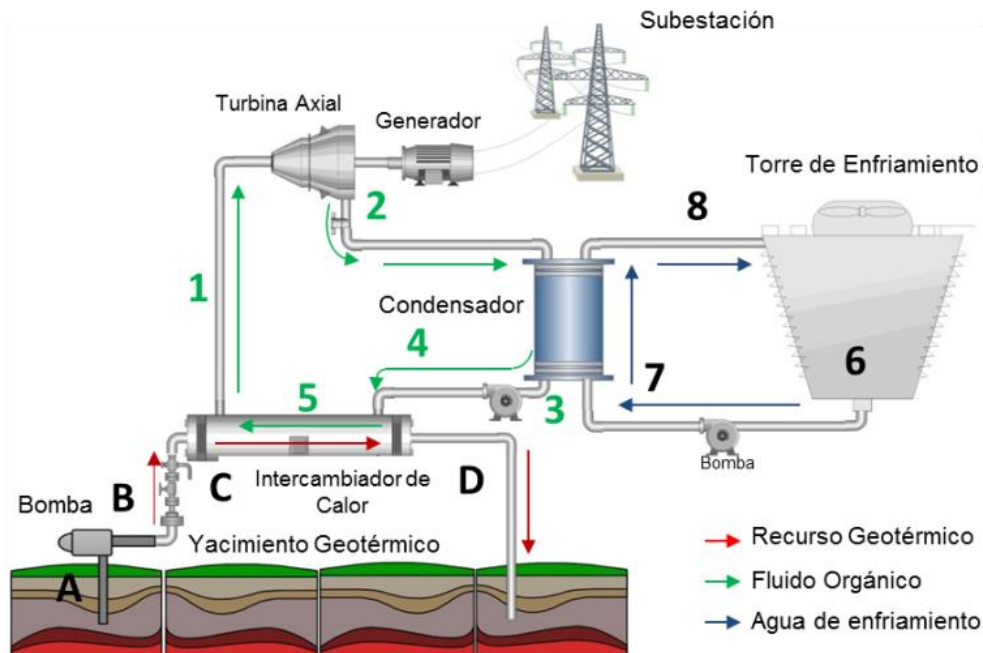


Figura 1. Esquema de un ciclo binario de generación eléctrica utilizando energía geotérmica.

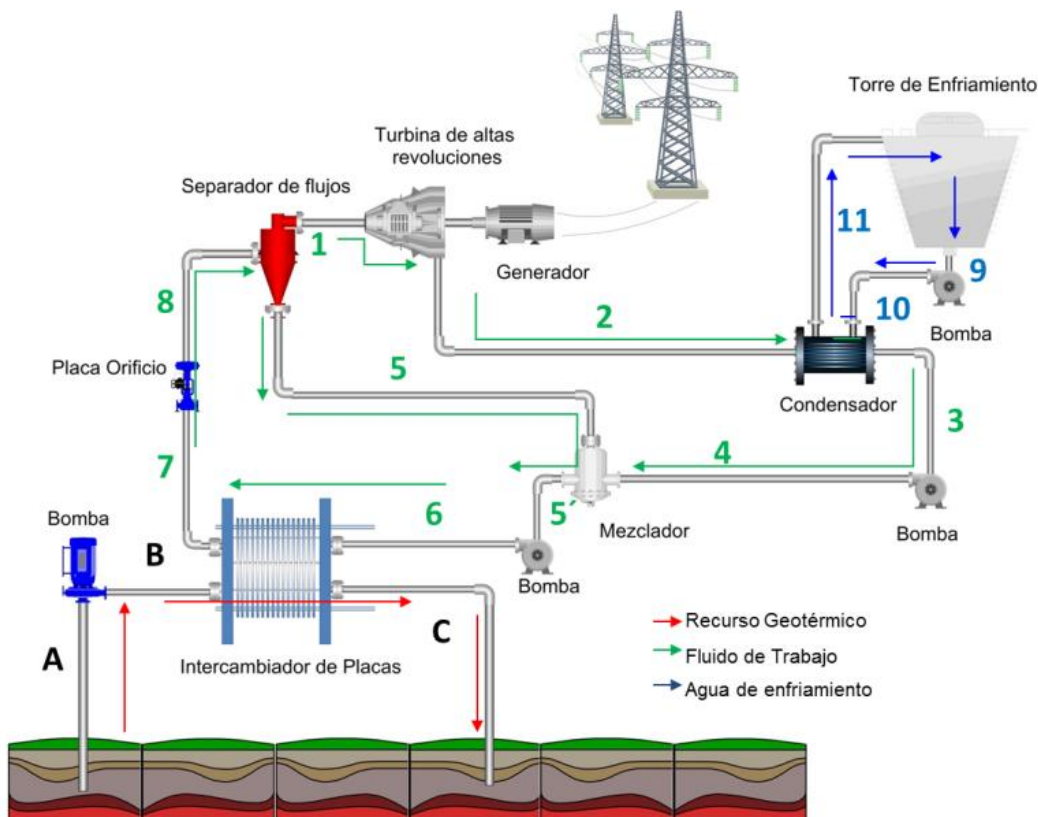


Figura 2. Diagrama del ciclo binario modificado (CBM) con PWG.

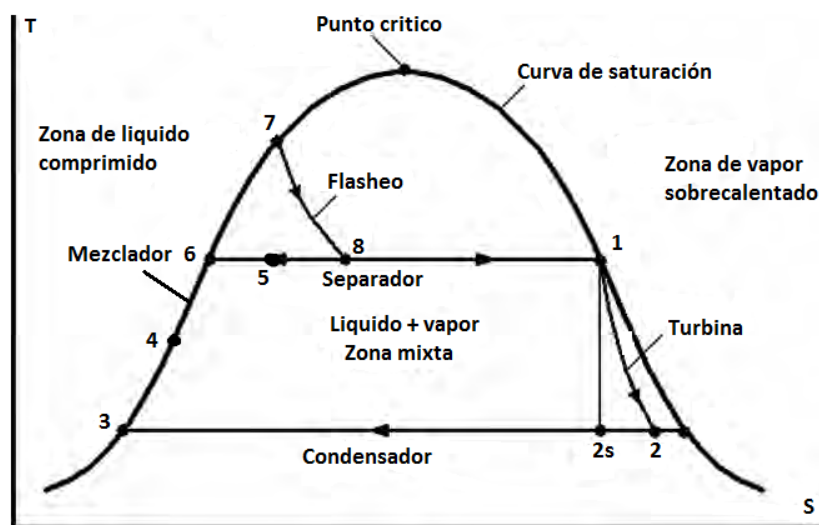


Figura 3. Diagrama Temperatura vs. Entropía del ciclo PWG

Eficiencia vs. T del fluido geotérmico

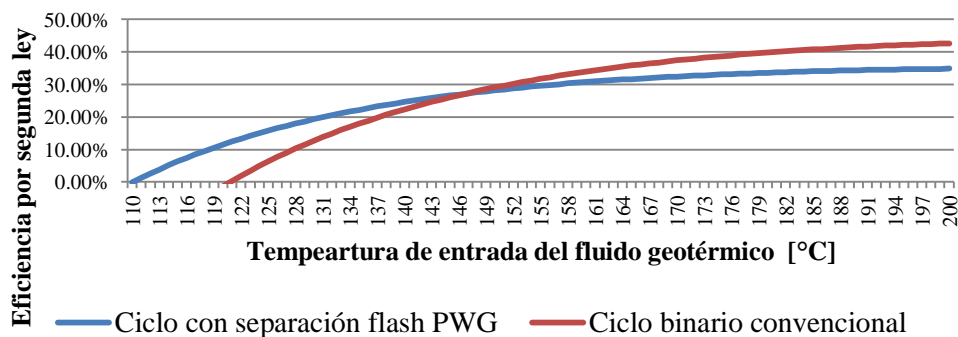


Figura 4. Comparación entre el CBC y el CBM (PWG) variando la temperatura de entrada del fluido geotérmico contra la eficiencia del ciclo.

Eficiencia vs. T ambiente

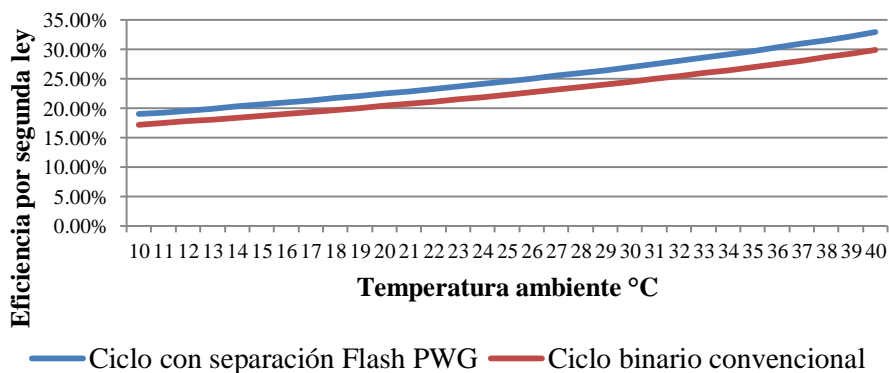


Figura 5. Comparación del CBC y el CBM (PWG) variando la temperatura ambiente contra la eficiencia del ciclo.

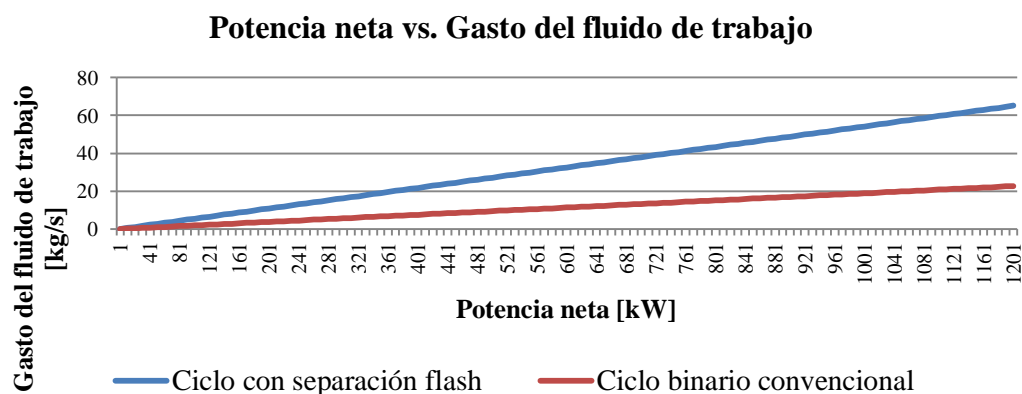


Figura 6. Comparación entre el CBC y el CBM (PWG) variando la potencia neta contra el gasto del fluido de trabajo necesario.

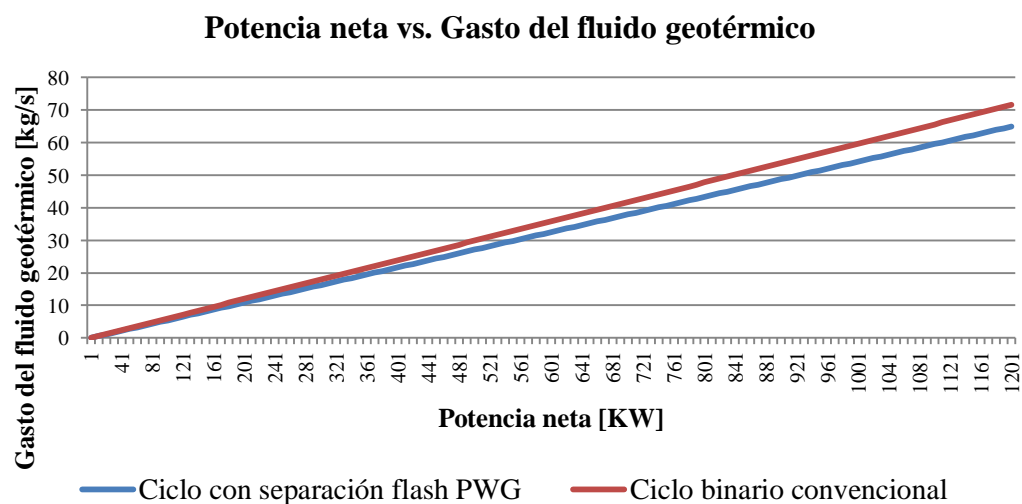


Figura 7. Comparación del CBC y el CBM (PWG) variando la potencia neta contra el gasto de fluido geotérmico necesario.