

Análisis de una Planta Piloto Geotérmica con Ciclo Binario de Media Entalpia, Ubinas, Moquegua

Analysis of a Geothermal Pilot Plant with a Medium-Enthalpy Binary Cycle, Ubinas, Moquegua

D.T. Mendoza¹ 0009-0001-6571-5096I.S. Nina¹ 0009-0004-3328-422XE.H. Cuadros¹  0000-0001-6478-8130¹ Universidad César Vallejo, PerúE-mail: secretaria_general@ucv.edu.pe; izai_sk8@hotmail.com; dtmendoza@ucvvirtual.edu.pe; ehcuadros@ucvvirtual.edu.pe

Abstract

In a social scenario of energy deficit, the need emerge to propose alternatives for generating clean, sustainable and environmentally friendly energy. Within this framework, the study proposed the analysis of a 10MW geothermal power plant using a Medium-Enthalpy Binary Cycle, in Ubinas, Moquegua. Three fluids were used: n-pentane, isopentane and isobutane. It corresponds to applied, non-experimental research. In the data collection process, values of pressure, temperature, and heat conversion rate were collected; as well as estimates of the proposed design considering calculated and observed powers. It was found that it was not possible to reach a power of 10 MW, though it is possible to size geothermal plants with the three fluids considered, of lower power, but with differences between them in favor of isobutane, which reached values of 8,566 MW as calculated power. and 7,281 MW as real power. In conclusion, with none of the fluids the required power of 10 MW could be reached, although lower powers were achieved, useful for partial needs of the surrounding population.

Index terms— Geothermal power plant, enthalpy, binary cycle, calculated power, isobutane

Resumen

En un escenario social de déficit energético, se plantea la necesidad de proponer alternativas de generación de energía limpia, sostenible y amigable con el ambiente. En ese marco, el estudio se planteó el efectuar el análisis de una central geotérmica de 10MW de potencia usando un Ciclo Binario de Media Entalpia, en Ubinas, Moquegua. Se utilizaron tres fluidos: n-pentano, isopentano e isobutano. Corresponde a una investigación aplicada, de tipo no experimental. En el proceso de recolección de datos, se recogieron valores sobre presión, temperatura, y tasa de conversión de calor; así como estimaciones del diseño propuesto considerando potencias calculada y observada. Se encontró que no fue posible alcanzar una potencia de 10 MW, aunque sí es posible dimensionar centrales geotérmicas con los tres fluidos considerados, de menor potencia, pero con diferencias entre estos en favor del isobutano, que alcanzó valores de 8,566 MW como potencia calculada, y 7,281 MW como potencia real. En conclusión, con ninguno de los fluidos se pudo alcanzar la potencia requerida de 10 MW, aunque se alcanzaron potencias menores, útiles para necesidades parciales de la población aledaña.

Palabras clave— Central geotérmica, entalpía, ciclo binario, potencia calculada, isobutano

Recibido: 11-01-2024, Aprobado tras revisión: 08-01-2025

Forma sugerida de citación: Nina, I; Mendoza, D. (2025). "Análisis de una Planta Piloto Geotérmica con Ciclo Binario de Media Entalpia, Ubinas, Moquegua". Revista Técnica "energía". No. 21, Issue II, Pp. 28-38

ISSN On-line: 2602-8492 - ISSN Impreso: 1390-5074

Doi: <https://doi.org/10.37116/revistaenergia.v21.n2.2025.622>

© 2025 Autores



Esta publicación está bajo una licencia internacional Creative Commons Reconocimiento – No Comercial 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)



1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, existe una preocupación por investigar las posibilidades de uso de las diferentes fuentes de energías renovables [1]. En ese marco, se ha empezado a investigar las posibilidades de uso de la energía solar [2], la energía geotérmica [3] y la energía eólica; en el caso del Perú, ese interés se ha enfocado en aquellas regiones del país que cuentan con la presencia favorable de este tipo de recursos renovables, entre ellas Moquegua [4]. En los últimos años, también se ha empezado a evaluar el potencial en energía geotérmica, considerando los dos volcanes de la región y varias zonas geotermales (Titire – Puente Bello; Jesús María, Ichuña y Tolapalca; Calacoa; Ullucán – Omate; Ubinas; y Crucero) [5].

Esa es una zona geotermal donde las temperaturas registradas por los geotermómetros la caracterizan como de media entalpía, con valores que varían entre las proximidades de los 100°C y los casi 200°C, dependiendo del lugar específico donde se toma la muestra [6]. Esto hace que se considere el uso directo como la forma más apropiada de aprovechar este recurso [1]. Pero se deja inquietud abierta en torno a la posibilidad de su uso en la generación de energía eléctrica, finalidad mayormente asumida en zonas geotermales de alta entalpía.

Esa preocupación se manifiesta en algunos trabajos que ubican la posibilidad de aprovechamiento de la energía geotérmica mediante la puesta en marcha de centrales geotérmicas de diferente potencia en la región, como el de Bulnes [7], el de Gamarra [6], o el de Trujillo y Pérez [8]. Considerando que este interés es relativamente reciente e incipiente, las zonas en las que se ha empezado a examinar las posibilidades de dimensionamiento de una central geotérmica para la generación de energía eléctrica son todavía sólo las de Calacoa – Putina [8] y Jesús María [7] por ello se seleccionó la zona de Ubinas en la cual no se hizo una primera estimación de su potencial de generación geotérmica como se ve en el Anexo 2.

Se entiende la energía geotérmica como la parte o porción del calor producido por la tierra en forma continua por el decaimiento de los isótopos radiactivos de duración extensa, que es susceptible de ser recuperado y utilizado por el ser humano en los propósitos que considera convenientes [7]. Así, una zona geotermal es aquella parte de la litósfera que está sometida a tensiones que producen presiones intensas y una cantidad grande de calor, lo que deriva en la aparición de fracturas y fallas por las cuales tienden a ascender desde el manto diversos materiales, entre magma, rocas incandescentes, agua o ácido clorhídrico o sulfhídrico. Y se entiende el ciclo binario como un tipo de sistema en el cual el agua geotérmica se hace pasar a través de un intercambiador de calor, de modo tal que su calor se transfiere a otro líquido cuyo punto de ebullición es menor que el que caracteriza al agua; por lo general, ese otro líquido es isobutano o pentano y, en algunos casos isopentano [8].

En ese marco, se entiende la central geotérmica como aquel tipo de instalación cuyo propósito es la generación de energía eléctrica sobre la base del aprovechamiento de la energía geotérmica, es decir, el calor que se produce en el interior de la tierra. Y se entiende la media entalpía como aquella categoría de clasificación de la capacidad calorífica de un recurso geotérmico que se identifica cuando la temperatura del recurso se ubica entre los 150°C y los 220°C, mediante el uso de lo que se conoce como ciclo binario se puede utilizar directamente el recurso geotérmico para generar energía.

En cuanto al isobutano, conocido también como metilpropano, se trata de un compuesto de carácter orgánico que se agrupa dentro de los así llamados alcanos [9]. Su fórmula es C₄H₁₀. En cuanto al isopentano, también se le conoce por su nombre químico, metilbutano, e incluso como 2-metilbutano. Se trata también de un compuesto de carácter orgánico que se incluye dentro de los alcanos; en este caso, se caracteriza por su cadena ramificada de cinco átomos de carbono [9]. La fórmula que lo identifica es C₅H₁₂. Y en cuanto al n-pentano, se le conoce comúnmente como pentano. Se trata también de un hidrocarburo de constitución saturada (alcano) que, a diferencia de los otros alcanos que se presentan en estado gaseoso, este lo hace como líquido considerando la temperatura del ambiente [9]. Estos fluidos de trabajo determinan la eficiencia de la central en base a su comportamiento termodinámico ya que su principal característica es su presión crítica y temperatura de ebullición son menores a los del agua, tanto el isobutano, n-pentano y isopentano son fluidos secos es decir que a la salida de una turbina solo tiene una sola fase (vapor) por ello son recurrentemente usados en geotermia [19].

Esta investigación se justifica, primero, desde una perspectiva teórico científica. Así, se investiga la posibilidad de analizar una central geotérmica para la generación de energía eléctrica en base a un ciclo binario de temperaturas medias, el que normalmente se enfoca en el uso directo del recurso [10]. Segundo, desde una perspectiva socioeconómica, este estudio contribuye a proporcionar información para autoridades del sector energético y autoridades locales, respecto de la posibilidad de aprovechamiento de los recursos que se generan en esta zona geotermal, en beneficio de la población [11]. Y tercero, desde una perspectiva ambiental, el planteamiento de uso de recursos geotermales en reemplazo de los combustibles fósiles, representa la posibilidad de incorporar una fuente de energía absolutamente renovable con un muy bajo nivel de contaminación ambiental, en comparación con sus equivalentes en base a gas u otros combustibles fósiles [12].

Finalmente, se plantea como objetivo analizar y dimensionar una central geotérmica de 10MW de Potencia usando un Ciclo Binario de Media Entalpía, en la zona de Ubinas, Moquegua. Por consiguiente, la etapa a seguir es: A) Determinar la potencia de una central

geotérmica usando un Ciclo Binario de Media Entalpía, en base a n-pentano.

B) Determinar la potencia de una central geotérmica usando un Ciclo Binario de Media Entalpía, en base a isopentano.

C) Determinar la potencia de una central geotérmica usando un Ciclo Binario de Media Entalpía, en base a isobutano.

En función de lo señalado, se sostiene como hipótesis la siguiente: Usando un Ciclo Binario de Media Entalpía, es factible desarrollar el análisis técnico de una central geotérmica de 10MW de Potencia, en la zona de Ubinas, Moquegua.

2. MATERIALES Y MÉTODO

2.1. Tipificación del estudio

Este estudio corresponde a la investigación aplicada con diseños no experimentales, y diseño descriptivo.

2.2. Muestra

Para efectos del análisis de la central geotérmica, se considera como muestra los resultados suministrados por el Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET) para la zona geográfica del proyecto en el Anexo 1.

2.3. Modelo de la central geotérmica

En la Fig. 1 se identifica el diseño general de la central geotérmica donde el punto 5 y 6 pasan a ser a y b respectivamente para el uso de los cálculos y poder diferenciar fácilmente los fluidos utilizados (fluidos de trabajo y fluido geotermal).

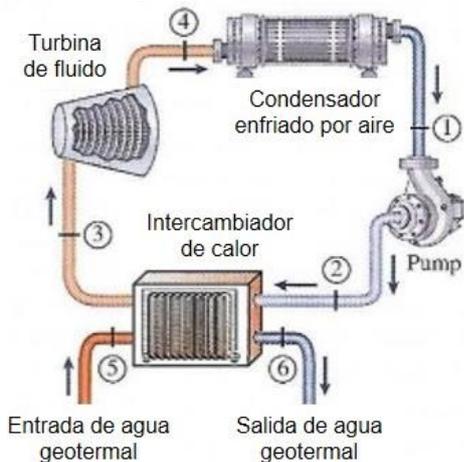


Figura 1: Diseño general de la central geotérmica (Y. Cengel & M. Boles 8va edición)

2.4. Acerca del software utilizado

Para el análisis y resolución de los balances energéticos, se utilizó el software Engineering Equation Solver Professional V9.944-3D (EES). Se tomaron en cuenta ecuaciones que vinculan el comportamiento termodinámico en función de los ciclos que corresponden a cada configuración. El software alcanza una solución para un grupo de ecuaciones algebraicas y resolución de

ecuaciones diferenciales. Asimismo, proporciona valores optimizados de los parámetros sobre la base de variaciones y cambios multivariantes. En ese sentido, se le puede utilizar para trabajar con fluidos susceptibles de ser utilizados en ciclos binarios, considerando incluso gases comunes.

2.5. Respecto de la turbina

La turbina SST-400 GEO es un modelo que se deriva de la SST-400, aunque con un diseño interior que privilegia la optimización de sus parámetros, para responder a condiciones de uso poco favorables, más acordes con los ciclos de expulsión de vapor geotérmico. Así, esta turbina se pone en uso proyectos geotérmicos donde se trabaja con vapor directo que se lleva a sobrecalentamiento, aunque también con vapor flash o ciclo combinado. Además, de ello la Turbina SST-400 GEO se instala en la carcasa de su similar Siemens y hace uso de los accesorios de tipo turboset de vapor, que consta de engranajes, generador y bastidor de soporte. Las condiciones y características primordiales de la Turbina SST-400 GEO son:

Vapor de entrada: hasta 250 °C (482 °F) / 15 bar

Condiciones del vapor de escape:

Condensación: hasta 0.4 bar.

Sin Condensación: hasta 1.4 bar.

2.6. Análisis de datos

Para el análisis, se consideraron las siguientes relaciones y procedimientos de cálculo:

Donde:

h_n = entalpía en el punto n

n = punto o etapa del ciclo termodinámico del fluido

\dot{m}_{Fgeo} = flujo másico del fluido geotérmico

\dot{m}_{Ftra} = flujo másico del fluido de trabajo

η_{turb} = eficiencia de la turbina

η_{bom} = eficiencia de la bomba

η_{int} = eficiencia del intercambiador de vapor

P = potencia teórica producida

P_{real} = potencia real producida

Fórmulas de cálculo

$$h_2 = \frac{h_{2s} - h_1}{\eta_{bom}} + h_1 \quad (a)$$

$$h_4 = h_3 - \eta_{turb} (h_3 - h_{4s}) \quad (b)$$

Balance térmico en el evaporador

$$\eta_{int} * \dot{m}_{Fgeo} (h_a - h_b) = \dot{m}_{Ftra} (h_3 - h_2) \quad (c)$$

$$\dot{m}_{Ftra} = \eta_{int} * \dot{m}_{Fgeo} \frac{(h_a - h_b)}{(h_3 - h_2)} \quad (d)$$

Potencia teórica producida

$$P = \dot{m}_{Ftra} [(h_3 - h_4) - (h_2 - h_1)] \quad (e)$$

Potencia real producida

$$P_{real} = \eta_{turb} * P \quad (f)$$

3. RESULTADOS

3.1. Parámetros iniciales para el dimensionamiento de la central geotérmica

En las siguientes tablas se presenta información respecto de la Zona Geotermal en función de la cual se hizo el análisis y dimensionamiento de una central geotérmica. En la Tabla 1 se presentan características generales, como la información geográfica que la identifica, las propiedades que corresponden a la zona, y los valores recurrentes de los parámetros en la zona.

Los parámetros, propiedades e información geográfica de la zona geotermal de Ubinas-Yuracmocco-Picina fueron tomados del INGEMMET donde se hizo un estudio primario de hidrogeología [20].

Así como los primeros parámetros con los cuales poder calcular con ayuda del software Engineering Equation Solver (EES) la entalpía (h) y entropía (s) del fluido geotérmico de la zona tal y como se observa en la parte inferior de la Tabla 1.

Tabla 1: Caracterización de la fuente geotermal

Datos geográficos de la Zona Geotermal de Ubinas	
Altura	3376 m.s.n.m
Extensión	874.571,12 Km ²
Propiedades de la zona geotermal de Ubinas-Yuracmocco-Picina	
Reservorio Geotermal	Líquido Dominante
Temp. Reservorio	229.24°C
Temp. Exterior	28°C
Ph	6.2

Datos iniciales de la zona geotermal

Símbolo (Unidad)	Valor adoptado	Descripción	Rango recomendado
T (°C)	229	Temperatura del recurso	-
X (%)	0	Calidad del recurso	-
\dot{m} (kg/s)	60	Caudal extraíble	42-70
n_{pozos}	1	Numero de pozos de producción	-
T (°C)	70	Temperatura de reinyección	70-100
P (bar)	27.44	Presión de reinyección	

Fluido geotérmico	T(°C)	P (bar)	X	h(kJ/kg)	s(kJ/kg-K)
a (inyección)	229		0		
b (reinyección)	70	$P_b = P_a$			

Fluido geotérmico	T(°C)	P (bar)	X	h(kJ/kg)	s(kJ/kg-K)
a (inyección)	229	27.44	0	985.3	2.601
b (reinyección)	70	27.44		295.2	0.9533

Símbolo (Unidad)	Valor adoptado	Descripción
h_a (kJ/kg)	985.3	Entalpía de inyección

s_a (kJ/kg-K)	2.601	Entropía de inyección
h_b (kJ/kg)	295.2	Entalpía de reinyección
s_b (kJ/kg-K)	0.9533	Entropía de reinyección

En esta tabla se presentan los valores válidos en la práctica internacional para el diseño de prácticas geotermiales. Se tomó como referencia los rangos recomendados por el IGME.

Y en la Tabla 2 se presentan los valores iniciales con los cuales se dio inicio al dimensionamiento de la central geotérmica, considerando presión tanto de entrada como de salida de la turbina, la temperatura del fluido, datos mecánicos de la turbina y la bomba, así como datos propios del fluido utilizado.

Tabla 2: Datos iniciales de dimensionamiento de la central geotérmica

Símbolo (unidad)	Valor adoptado	Descripción	Rango recomendado
P (bar)	15	Presión a la entrada de la turbina	Hasta 15 bar
P (bar)	0.4	Presión a la salida de la turbina	Hasta 0,4 bar
T (°C)	229	Temperatura del fluido geotérmico	-
η_{int} (%)	94	Eficiencia del intercambiador	-
η_{turb} (%)	85	Eficiencia de la turbina	-
η_{bom} (%)	90	Eficiencia de la bomba	-
\dot{m}_{geo} (kg/s)	60	Flujo másico	42 – 70
X (%)	0	Calidad	-

En esta tabla se presenta información que corresponden a las presiones máxima y mínima que soportan las turbinas de vapor SST-400 GEO. Se han tomado valores referenciales reales de desempeño según los fabricantes (específicamente de SIEMENS). Las eficiencias de los equipos se han tomado según los promedios usuales más altos de desempeño que la bibliografía académica recomienda tales como Transferencia de Calor (Hollmann), Mecánica de fluidos (Shames), Termodinámica (Cengel). Por recomendación de otros estudios y con el propósito de no elevar los cálculos de potencia, se adoptaron valores que se sustentan en la premisa de que el fluido geotérmico es aprovechado a alta temperatura, pero en su fase líquida, es decir, con una calidad igual a cero.

Los valores adoptados corresponden a una presión de entrada en la turbina de 15 bar y de salida de 0,4 bar. La temperatura corresponde a la temperatura del recurso geotermal que, para el caso, es 229°C obtenido de la Tabla 1. En cuanto a las eficiencias de los equipos se han tomado según los promedios usuales más altos de desempeño que la bibliografía académica recomienda; fueron útiles los textos de Transferencia de Calor (Hollmann), Mecánica de fluidos (Shames), Termodinámica (Cengel) y se tomaron los siguientes valores: 94% para el intercambiador; 85% para la turbina; y 90% para la bomba.



3.2. Potencia de la central geotérmica con Ciclo Binario de Media Entalpía, en base a n-pentano

En la Tabla 3 se presentan los resultados del análisis efectuado considerando como fluido de trabajo el n-pentano, y tomando en cuenta el cálculo teórico del comportamiento de la potencia, y el cálculo en base a los datos empíricos.

Los datos consideran las dos propiedades termodinámicas relevantes para el caso. Las cuatro primeras corresponden al ciclo teórico; el punto 1 es el de baja presión con fase totalmente líquida; el punto 2s corresponde a la salida de la bomba en un proceso adiabático reversible o con entropía constante. El punto 3 corresponde a la más alta presión en condición de vapor sobrecalentado para evitar daños a la salida de la turbina; la temperatura de ingreso a la turbina se ha previsto en 20°C sobre la condición de vapor saturado. El punto 4s corresponde a la salida de la turbina antes de su ingreso al condensador y, teóricamente, supone un proceso isoentrópico o adiabático reversible.

Tabla 3: Determinación de la potencia teórica y real con n-pentano

n-pentano	P (bar)	T(°C)	X	h(kJ/kg)	s(kJ/kg-K)
1	0.4	11.09	0	-33.91	-0.1151
2s	15	11.53		-31.62	-0.1151
3	15	166.7	100	607.3	1.568
4s	0.4	75.4	100	456.2	1.568

1	0.4	11.09	0	-33.91	-0.1151
2	15	11.64		-31.36	-0.1142
3	15	166.7	100	607.3	1.568
4	0.4	87.19	100	478.9	1.632

Unit Settings: SI C bar kJ mass deg			
$\eta_{bom} = 0.9$	$\eta_{ciclo} = 0.197$	$\eta_{nt} = 0.94$	$\eta_{turb} = 0.85$
$\dot{m}_{geo} = 60 \text{ [kg/s]}$	$\dot{m}_{fl} = 60.95 \text{ [kg/s]}$	$P = 7669 \text{ [kJ/s]}$	$P_{real} = 6519 \text{ [kJ/s]}$

En las últimas cuatro filas, los estados 1 y 3 coinciden con los valores teóricos de alta y baja presión. Considerando las irreversibilidades de los procesos tanto en la bomba como en la turbina, se han estimado las entalpías correspondientes con los rendimientos isoentrópicos según la secuencia detallada en el procedimiento 3.6. En el primer caso, se estima una potencia de 7,669 MW, mientras que en el segundo se consigue una potencia de 6,519 MW, lo que supone una diferencia de 1,15 KW entre ambas cifras.

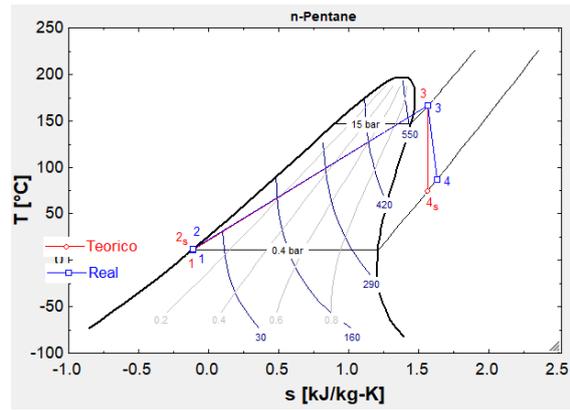


Figura 2: Determinación de la potencia teórica y real con n-pentano

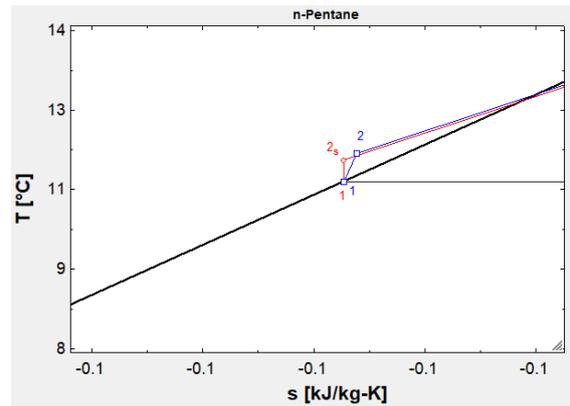


Figura 3: Determinación de la potencia teórica y real con n-pentano. Detalle 2,2

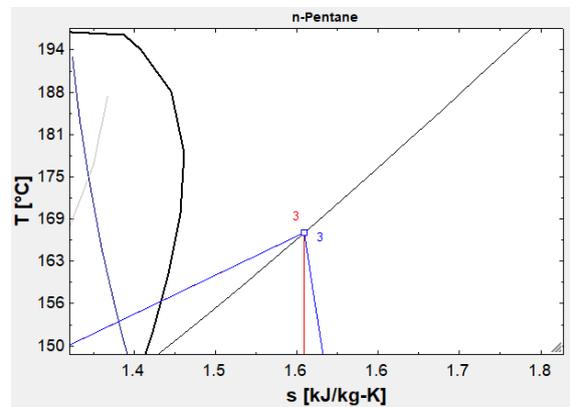


Figura 4: Determinación de la potencia teórica y real con n-pentano. Detalle 3,3

En la Fig. 2 se observa el ciclo teórico (rojo) y real (azul). La Fig. 3 muestra el pequeño salto entálpico entre 1 y 2, así como la leve variación de entropía, al pasar por la bomba; esto se refleja en un bajo o mínimo consumo energético con calentamientos mínimos en la bomba que se prevén en condiciones de diseño reales y óptimas.

La Fig4 confirma que el proceso real de la turbina termina en la región de vapor sobrecalentado y a baja presión. La primera condición garantiza una operación de turbina en ausencia de cavitación, pues no hay posibilidades de presencia de fases líquidas que implosionen o erosionen los alabes del rotor de la turbina.



3.3. Potencia de la central geotérmica con Ciclo Binario de Media Entalpía, en base a isopentano

En la Tabla 4 se presentan los resultados del análisis efectuado para el dimensionamiento de la central geotérmica considerando como fluido de trabajo el isopentano. Como en el caso anterior, también se toman en cuenta la estimación del valor teórico del comportamiento de la potencia, así como el cálculo en base a los datos empíricos.

Tabla 4: Determinación de la potencia teórica y real con isopentano

n-pentano	P (bar)	T(°C)	X	h(kJ/kg)	s(kJ/kg-K)
1	0.4	3.445	0	-397.7	-1.855
2s	15	3.89		-395.4	-1.855
3	15	157.4	100	220.7	-0.1956
4s	0.4	67.47	100	72.78	-0.1956
1	0.4	3.445	0	-397.7	-1.855
2	15	4.009		-395.1	-1.855
3	15	157.4	100	220.7	-0.1956
4	0.4	79.22	100	94.97	-0.1316

Unit Settings: SI C bar kJ mass deg

$\eta_{\text{bom}} = 0.9$ $\eta_{\text{ciclo}} = 0.2001$ $\eta_{\text{int}} = 0.94$ $\eta_{\text{turb}} = 0.85$ $\dot{m}_{\text{geo}} = 60 \text{ [kg/s]}$
 $\dot{m}_{\text{F1}} = 63.2 \text{ [kg/s]}$ $P = 7787 \text{ [kJ/s]}$ $P_{\text{real}} = 6619 \text{ [kJ/s]}$

Se prosigue el mismo procedimiento que para el n-pentano: todos los datos se han obtenido en función de las dos propiedades termodinámicas: $h(\text{kJ/kg})$ y $s(\text{kJ/kg-K})$. Las cuatro primeras filas se han tomado para el ciclo teórico; el punto 1 corresponde a baja presión con fase totalmente líquida; el punto 2s corresponde a la salida de la bomba en un proceso adiabático reversible (entropía constante). El punto 3 corresponde a la más alta presión en condición de vapor sobrecalentado para evitar daños a la salida de la turbina; la temperatura de ingreso a la turbina se ha previsto en 20°C sobre la condición de vapor saturado. El punto 4s corresponde a la salida de la turbina antes de su ingreso al condensador y, teóricamente, supone un proceso isoentrópico o adiabático reversible. En las últimas cuatro filas, los estados 1 y 3 coinciden con los valores teóricos de alta y baja presión. Considerando las irreversibilidades de los procesos tanto en la bomba como en la turbina, se han estimado las entalpías correspondientes con los rendimientos isoentrópicos según la secuencia detallada en el procedimiento 3.6. En el primer caso, se estima una potencia de 7,669 MW, mientras que en el segundo se consigue una potencia de 6,519 MW, lo que supone una diferencia de 1,15 KW entre ambas cifras.

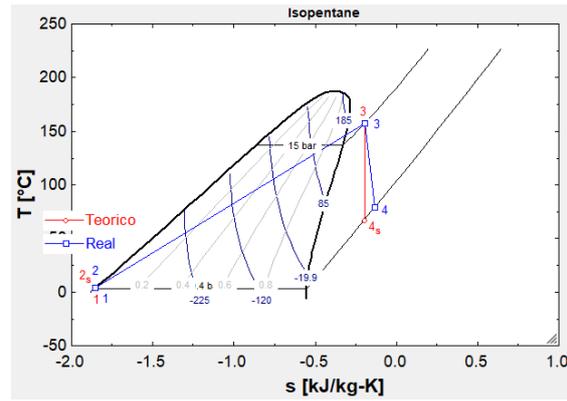


Figura 5: Determinación de la potencia teórica y real con isopentano

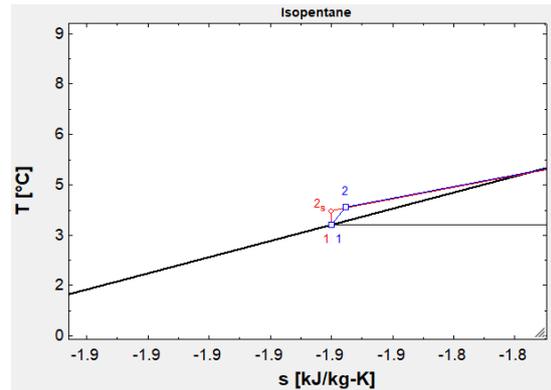


Figura 6: Determinación de la potencia teórica y real con isopentano. Detalle 2,2

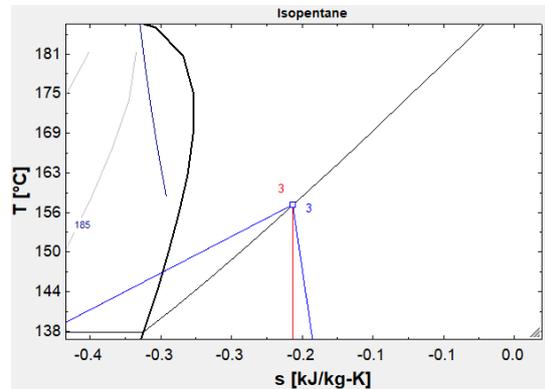


Figura 7: Determinación de la potencia teórica y real con isopentano. Detalle 3,3

Como se observó anteriormente, en la Fig. 5 se observa el ciclo teórico (rojo) y real (azul) con el isopentano como fluido. La Fig. 6 muestra el salto entálpico entre 1 y 2, así como la leve variación de entropía, al pasar por la bomba; esto se refleja en un bajo o mínimo consumo energético con calentamientos mínimos en la bomba que se prevén en condiciones de diseño reales y óptimas. La Fig. 7 confirma que el proceso real de la turbina termina en la región de vapor sobrecalentado y a baja presión. La primera condición garantiza una operación de turbina en ausencia de cavitación, pues no hay posibilidades de presencia de fases líquidas que implosionen o erosionen los alabes del rotor de la turbina.

Por otro lado, en la Fig. 3 también se presenta en forma gráfica el comportamiento de la variable, con una presentación general del mismo (Fig. 5); detalle del momento inicial (1,1) y del momento en que se produce inflexión en la curva (2,2) (Fig. 6); y detalle del momento final (3,3) con inflexión en la curva (2,2) (Fig. 7), que se alcanza cuando la temperatura empieza a caer desde el máximo alcanzado en 157,4°.

3.4. Potencia de la central geotérmica con Ciclo Binario de Media Entalpía, en base a isobutano

En la Tabla 5 se presentan los resultados del análisis efectuado para el dimensionamiento de la central geotérmica considerando como fluido de trabajo el isobutano.

Como en los casos anteriores, también se toman en cuenta la estimación del valor teórico del comportamiento de la potencia, así como el cálculo en base a los datos empíricos.

Tabla 5: Determinación de la potencia teórica y real con isobutano

P					
Isobutano	(bar)	T(°C)	X	h(kJ/kg)	s(kJ/kg-K)
1	1.4	-33.14	0	126.6	0.7145
2s	15	-32.68		129	0.7145
3	15	105.5	100	713	2.503
4s	1.4	-1.225	100	558.8	2.503
<hr/>					
1	1.4	-33.14	0	126.6	0.7145
2	15	-32.56		129.2	0.7156
3	15	105.5	100	713	2.503
4	1.4	13.32	100	581.9	2.586

Unit Settings: SI C bar kJ mass deg			
$\eta_{\text{bom}} = 0.9$	$\eta_{\text{ciclo}} = 0.22201$	$\eta_{\text{int}} = 0.94$	$\eta_{\text{turb}} = 0.85$
$\dot{m}_{\text{Fgeo}} = 60 \text{ [kg/s]}$	$\dot{m}_{\text{Ft}} = 66.67 \text{ [kg/s]}$	$P = 8566 \text{ [kJ/s]}$	$P_{\text{real}} = 7281 \text{ [kJ/s]}$

Se prosigue el mismo procedimiento descrito para los fluidos utilizados anteriormente (n-pentano e isopentano): todos los datos se obtenidos de las dos propiedades termodinámicas. Las cuatro primeras filas se han tomado para el ciclo teórico; el punto 1 corresponde a baja presión con fase totalmente líquida; el punto 2s corresponde a la salida de la bomba en un proceso adiabático reversible (entropía constante). El punto 3 corresponde a la más alta presión en condición de vapor sobrecalentado para evitar daños a la salida de la turbina; la temperatura de ingreso a la turbina se ha previsto en 20°C sobre la condición de vapor saturado. El punto 4s corresponde a la salida de la turbina antes de su ingreso al condensador y, teóricamente, supone un proceso isoentrópico o adiabático reversible. En las últimas cuatro filas, los estados 1 y 3 coinciden con los valores teóricos de alta y baja presión. Considerando las irreversibilidades de los procesos tanto en la bomba como en la turbina, se han estimado las entalpías

correspondientes con los rendimientos isoentrópicos según la secuencia detallada en el procedimiento 3.6. En el primer caso, se estima una potencia de 8,566 MW, mientras que en el segundo se consigue una potencia de 7,216 MW, lo que supone una diferencia de 1,273 KW entre ambas cifras.

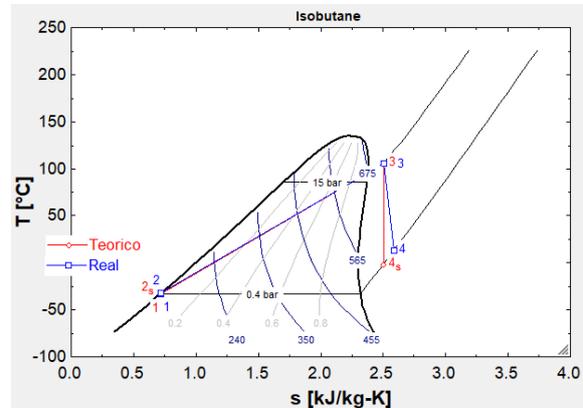


Figura 8: Determinación de la potencia teórica y real con isobutano

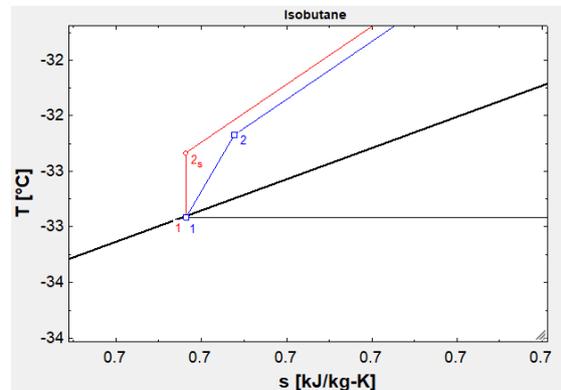


Figura 9: Determinación de la potencia teórica y real con isobutano. Detalle 2,2

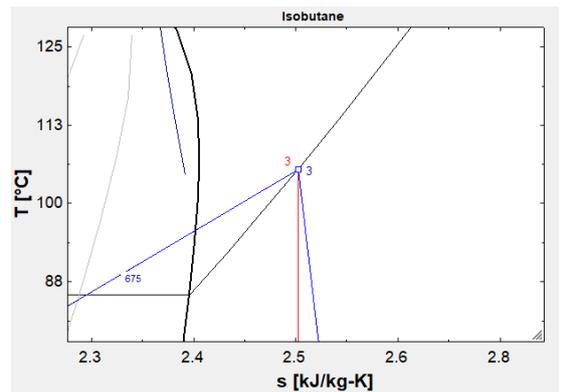


Figura 10: Determinación de la potencia teórica y real con isobutano. Detalle 3,3

En la Fig. 8 se observa el ciclo teórico (Color rojo) y real (Azul) con el isobutano como fluido. La Fig. 9 muestra el salto entálpico entre 1 y 2, así como la leve variación de entropía, al pasar por la bomba; esto se refleja en un bajo o mínimo consumo energético con calentamientos mínimos en la bomba que se prevén en condiciones de diseño reales y óptimas. La Fig. 4c confirma que el proceso real de la turbina termina en la



región de vapor sobrecalentado y a baja presión. La primera condición garantiza una operación de turbina en ausencia de cavitación, pues no hay posibilidades de presencia de fases líquidas que implosionen o erosionen los alabes del rotor de la turbina.

Por otro lado, se presenta en forma gráfica el comportamiento de la variable, con una presentación general del mismo (Fig. 8); detalle del momento inicial (1,1) y del momento en que se produce inflexión en la curva (2,2) (Fig. 9); y detalle del momento final (3,3) con inflexión en la curva (2,2) (Fig. 10), que se alcanza cuando la temperatura empieza a caer desde el máximo alcanzado en 105,5°.

4. DISCUSIÓN

Los resultados en una perspectiva teórica

Conforme se señala en la teoría general de recursos geotérmicos para aprovechamiento geotérmico, en zonas próximas a volcanes, una determinada cantidad de magma arrojado a superficie, implica un volumen hasta 10 veces mayor que permanece en el subsuelo [13] Franco y Vaccaro, 2020). Estos recursos proveen una alta posibilidad de diseñar y dimensionar centrales geotérmicas de media entalpía eficaces, aunque los valores encontrados no se correspondan con los valores esperados. La discrepancia de casi un 20% menor que lo esperado también se observó en Franco y Vaccaro [13], que trabajaron una central de solo ocho MW, e incluso en Trujillo y Pérez [8], salvando las diferencias de potencia esperada para cada caso. Eso sugiere que los resultados encontrados se ubican en una línea de hallazgos extendida que identifica una discrepancia de una quinta parte entre el valor esperado y el valor efectivo. Explicando por qué no se llegó a la potencia estimada (10MW) y logrando alcanzar los 8MW estando en condiciones de estudio similares considerando que se tomó 10MW de potencia como objetivo al tomar de referencia el estudio realizado en las demás zonas geotermales de la zona por el INGEMMET[21] como la zona Jesús María en la cual se realizó una estimación de potencial geotérmico en base a un solo pozo usando así este como referencia de una primera estimación del posible potencial de generación (10MW) de la zona Ubinas en la cual no se realizó una estimación.

Los resultados en una perspectiva de los antecedentes

Tres líneas de análisis se examinan al amparo de los resultados encontrados: primero, diferencias entre valor hipotético (o potencia hipotética, Ph) y valores estimados (potencia teórica, Pt) para cada fluido; segundo, diferencias entre valor hipotético (Ph) y valores obtenidos (Pr) para cada fluido; y diferencias entre valores estimados (potencia teórica, Pt) y valores obtenidos (Pr) para cada fluido utilizado.

Tabla 6: Resumen de estimaciones y medidas considerando fluidos y diferencias

Fluido	Ph (MW)	Pt (MW)	Pr (MW)	Dif (Ph-Pt)	Dif (Ph-Pr)	Dif (Pt-Pr)
n-pentano	10	7.669	6.519	2.331	3.481	1.15
Isopentano	10	7.787	6.619	2.213	3.381	1.168
Isobutano	10	8.566	7.281	1.434	2.719	1.285

Dos hallazgos importantes se derivan de estos valores: primero, tanto los valores calculados como los valores obtenidos para cada fluido analizado son menores que el valor hipotético; y segundo, el isobutano se impone como el fluido que alcanzó mayores valores tanto para la potencia teórica como para la potencia efectiva, aun cuando no haya alcanzado las cifras esperadas (potencia hipotética), estos resultados son también representado a pesar de la diferencia de escala en una línea reconocida también en Trujillo y Pérez [8].

Sin embargo, los valores calculados y obtenidos con el isobutano se encuentran más cerca de los 8 MW, que se corresponden con la pretensión y hallazgos de Gamarra [6] o Bulnes [7] que, de los 10 MW que se habían considerado inicialmente. Estas discrepancias pueden explicarse a partir de las condiciones meteorológicas que caracterizan la zona (altura sobre el nivel del mar y bajas temperaturas ambientales), que también fueron responsables de las diferencias reconocidas por Trujillo y Pérez [8] en el dimensionamiento de una central que aspiraba a 100 MW, donde obtuvieron potencias menores que las esperadas, también en proporciones aproximadas al 20% considerando la escalabilidad con nuestro estudio al trabajar con algunos de los mismos fluidos de trabajo y estar en la misma región el estudio de Trujillo y Pérez [8] muestra por proporcionalidad que la potencia obtenida (8MW) y el 20% aproximadamente de variación entre la potencia estimada y la alcanzada no es un caso aislado ya que se ve una tendencia a la variación de un quinto entre la potencia esperada y la potencia real en condiciones parecidas de estudio.

Por otro lado, dados los datos utilizados como insumo y el caudal de fluido de trabajo que corresponde al entorno se recolectaron utilizando evidencia empírica así como datos en base a recomendaciones de estudios hechos en campos de estudio similares al no haberse realizado un estudio más exhaustivo en la zona geotermal Seleccionada (Ubinas) por el INGEMMET [21], los resultados se distancian de los hallazgos de Trujillo y Pérez [8] en el ámbito nacional, o Predovan y Blechich [14], en el ámbito internacional, que dimensionaron centrales de mayor balance masa-energía y, por lo tanto, de mucho mayor potencia esperada.

En contraste, al analizar la diferencia entre potencia requerida (10 MW) y potencia estimada, entre los tres fluidos de prueba, el n-pentano registra la mayor diferencia (2,331MW). Y al analizar la diferencia entre potencia requerida (10 MW) y potencia obtenida (8,566 MW).

En ese sentido, este resultado se corresponde con lo encontrado por Herianto y Rini Ratnaningsih [15], en tanto reconocen que el n-pentano constituye un fluido que se ajusta mejor a su uso en centrales eléctricas de pequeña escala.

Limitaciones del estudio

La mayor debilidad de este estudio radica en las dificultades de hecho para acceder al terreno en repetidas ocasiones y efectuar suficiente número de mediciones que permitan reducir de forma sensible el error de muestreo inherente a la recolección de muestras [21], especialmente cuando se trata de determinar los valores iniciales para el dimensionamiento de la central haciendo que las muestras solo puedan servir de punto de partida teniendo que apoyarnos en las propiedades y evidencia empírica de estudios con parámetros similares así como propiedades respectivas de la rama de estudio. Una segunda limitación, también vinculada a la poca practicidad de efectuar en el sitio observaciones experimentales del funcionamiento de la central, limita la identificación de elementos o factores de hecho que contribuye a la reducción de los valores de potencia, en relación con los valores esperados. Una tercera limitación es que no existen modelos experimentales de centrales geotérmicas que se hayan llevado a la práctica, con las que se puede evaluar su eficacia en condiciones reales o de campo. Esta limitación puede seguir siendo óbice para que esta línea de investigación y propuesta de intervención social se desarrolle eficazmente.

Relevancia de la investigación en relación con el contexto científico social

Las contribuciones que supone la culminación de este estudio superan sus solas pretensiones mecánico –energéticas, que constituyen su punto de partida y la premisa fundamental de su desarrollo, sino que se constituyen por sí mismas en alcances que abren posibilidades de impactar positivamente en aspectos del comportamiento social de las poblaciones con carencias de servicios. Ese reconocimiento abre espacio para aproximarse a estos escenarios sobre la base de la posibilidad de incrementar también la reflexión a esta perspectiva de valoración de los hallazgos efectuados. Así, un hallazgo relevante radica en la posibilidad de dimensionar una central de generación de energía con altísimas perspectivas de sostenibilidad debido a la casi nula probabilidad de agotamiento del recurso, amparándose en la teoría de las energías limpias. Esta posibilidad es válida incluso considerando una perspectiva de largo plazo dado que una planta de generación geotérmica de 8MW si bien esta potencia es suficiente para cubrir la demanda de las comunidades en la zona estudiada (Ubinas) también deja plazo a poder ampliar el estudio y la potencia utilizando más pozos y/o otros métodos de ciclo binario como regenerativo ,ciclo mixto o doble ciclo binario así como los demás estudios que continúan para la realización de la planta geotérmica es decir todo el estudio de factibilidad , lo que responde

a un escenario que demanda insistentemente el viraje hacia las energías renovables, como exponen Başoğul et al. [16], Bret-Rouzaut [17] o Zapata [18], entre otros.

5. CONCLUSIONES

- 1) Como conclusión general del estudio, se encontró que, el mejor resultado se obtuvo cuando se usó como fluido el isobutano, que para efectos de cálculo arroja una potencia de 8,566 MW y una potencia efectiva de 7,281 MW.
- 2) En una fuente geotermal de Ciclo Binario de Media Entalpía en la zona de Ubinas, Moquegua, al usar n-pentano en una central geotérmica se alcanzó una potencia estimada de 7,669 MW y una potencia efectiva de 6,519 MW. Esto supone una diferencia de 1,15 MW entre ambas estimaciones (teórica y real), y una diferencia de 3,481 MW por debajo de los 10 MW que se habían considerado como requerimiento.
- 3) En una fuente geotermal de Ciclo Binario de Media Entalpía en la zona de Ubinas, Moquegua, al usar isopentano en una central geotérmica se alcanzó una potencia estimada de 7,787 MW y una potencia efectiva de 6,619 MW, con el uso de isopentano. Esto supone una diferencia de 1,168 MW entre ambas estimaciones (teórica y real), y una diferencia de 3,381 MW por debajo de los 10 MW que se habían considerado como requerimiento.
- 4) En una fuente geotermal de Ciclo Binario de Media Entalpía en la zona de Ubinas, Moquegua, al usar isobutano en una central geotérmica se alcanzó una potencia estimada de 8,489 MW y una potencia efectiva de 7,216 MW. Esto supone una diferencia de 1,273 MW entre ambas estimaciones (teórica y real), y una diferencia de 2,719 MW por debajo de los 10 MW que se habían considerado como requerimiento.
- 5) Una central geotérmica con un potencial de 8 MW da paso a nuevos estudios que lleven a su creación tales como su distribución y factibilidad económica cabe recalcar que se puede aumentar la potencia de dicha central utilizando como central piloto el estudio realizado a pesar de que esta abastece la demanda de la zona.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] D. Rivera Delgado, F.J. Díaz López, y G. Carrillo González. “Transición energética, innovación y usos directos de energía geotérmica en México: un análisis de modelado temático.” *Problemas del desarrollo*, 52(206), Julio – Setiembre, 115-14. Doi: <https://doi.org/10.22201/iiec.20078951e.2021.206.69713>
- [2] R. Ccosi Cahuana. *Uso y consumo de energía solar en hogares del distrito de Moquegua, provincia mariscal nietao, Perú*, 2020. Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Mecánico. Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad José Carlos Mariátegui, Moquegua, Perú.
- [3] G.W. Huttner. “Geothermal Power Generation in the World 2015-2020 Update Report.” *Proceedings*



- World Geothermal Congress 2020+1, Reykjavik, Iceland, April - October 2021.
- [4] D.J. López Zeballos. Uso de la energía solar en micro y pequeñas empresas de producción de la ciudad de Moquegua, 2015. Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Mecánico. Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad José Carlos Mariátegui, Moquegua, Perú. 2019.
- [5] V. Cruz, D. Pajuelo & G. Yupa. “Caracterización de los sistemas geotermales asociados a los volcanes activos Ubinas y Huaynaputina, región Moquegua.” INGEMMET, Boletín, Serie B: Geología Económica, 60. INGEMMET. 2019.
- [6] C.G. Gamarra Chuyo. “Dimensionamiento de una central geotérmica en Moquegua de 8 MW.” Tesis para optar el título de Ingeniero Mecánico Eléctrico. Facultad de Ingeniería, Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo, Chiclayo, Perú. 2021.
- [7] J.A. Bulnes Jiménez. “Dimensionamiento y selección de una central geotérmica basada en el ciclo Rankine orgánico ubicada en el yacimiento geotérmico Jesús María – Moquegua”. Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Mecánico Electricista. Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, Lambayeque, Perú. 2018.
- [8] P. Trujillo Julca & J. Pérez Ramírez. “Determinar las características de una Central Geotermoeléctrica en el campo geotérmico de Calacoa-Putina, en Moquegua.” Tesis para optar el título de Ingeniero Mecánico Electricista. Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad César Vallejo, Perú. 2020.
- [9] Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. Seguridad en el Trabajo. Madrid: INSHT, 2011.
- [10] P. Bona & Coviello, M. Valoración y gobernanza de los proyectos geotérmicos en América del Sur: una propuesta metodológica. Santiago: CEPAL. 2016.
- [11] G. Luciani. “Macroeconomics of the Energy Transition.” In Hafner, M. & Luciani, G. (Eds.) The Palgrave Handbook of International Energy Economics. 405-509. Palgrave Macmillan. 2022.
- [12] Hongmei, Li Chengjun, Wan Yongzhen, & Zhao Jun. “Review of geothermal power generation: a case study of ORC geothermal power generation”. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 605(2020), 012009. 2020. Doi: 10.1088/1755-1315/605/1/012009
- [13] A. Franco & M. Vaccaro, M. (2020). “Sustainable Sizing of Geothermal Power Plants: Appropriate Potential Assessment Methods”. Sustainability, 12(9), 3844. 2020. Doi:10.3390/su12093844
- [14] M. Predovan & P. Blechih. “Thermodynamic analysis of a 17.5 MW geothermal power plant operating with binary Organic Rankine Cycle”. Machines. Technologies. Materials, 15(2), 49-52. 2021. <https://stumejournals.com/journals/mtm/2021/2/49>
- [15] R. Herianto, & D. Rini Ratnaningsih. “Performance n-Pentane in Geothermal Medium Enthalpy Binary Cycle for Electric Power Small Scale”. International Journal of Renewable Energy Research, 13(1), March, 446-453. 2023. <https://doi.org/10.20508/ijrer.v13i1.13281.g8698>
- [16] A. Başoğul, O.V. Güler & A. Keçebaş. “Chapter 8 – Binary geothermal power plant”. En Ozgur, C., Akif, M., & Kikilkan, O. (eds.) Thermodynamic Analysis and Optimization of Geothermal Power Plants. 113-129. 2021. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821037-6.00013-5>
- [17] N. Bret-Rouzaut, N. “Economics of Oil and Gas Production”. In Hafner, M. & Luciani, G. (Eds.) The Palgrave Handbook of International Energy Economics. 3-22. Palgrave Macmillan. 2022.
- [18] L.A. Zapata Ojeda. (2019). “Modelamiento y simulación del potencial energético geotérmico para la generación de electricidad mediante la instalación de una central termoeléctrica en la zona Pinaya, Región de Puno”. Tesis para optar el grado académico de Maestro en Ingeniería Eléctrica. Unidad de Posgrado, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad Nacional del Callao, Perú. 2019.
- [19] J.E. Jimenez, C.J. Barrera, G.I. Lainez y H.A. Garcia “Diseño conceptual de planta Geotérmica topo binaria para Producción de electricidad” Diplomado de Especialización en Geotermia, Universidad de El Salvador. 2014. <https://repositorio.ues.edu.sv/server/api/core/bitstreams/ed762841-27a8-4f03-b8b4-144f5bea38f9/content>
- [20] J. Carpio & F. Peña. “Hidrogeología de la cuneca del Rio Tambo.” INGEMMET, Boletín, Serie H: Hidrogeología, 7. INGEMMET. 2020.
- [21] V. Cruz, V. Vargas & L. Cacya. “Caracterización y Evaluación del Potencial Geotérmico de la Región Moquegua.” INGEMMET, Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica, 58. INGEMMET. 2014.



Isaí Samuel Nina Huiza.- Nació en Moquegua, Perú en 1995. Recibió su grado de Bachiller en Ingeniería Mecánica Eléctrica de la Universidad de José Carlos Mariátegui en 2021; Su campo de investigación está relacionado al desarrollo sostenible y adaptación al

cambio climático mediante una planta piloto geotérmica con ciclo binario para la generación de energía.



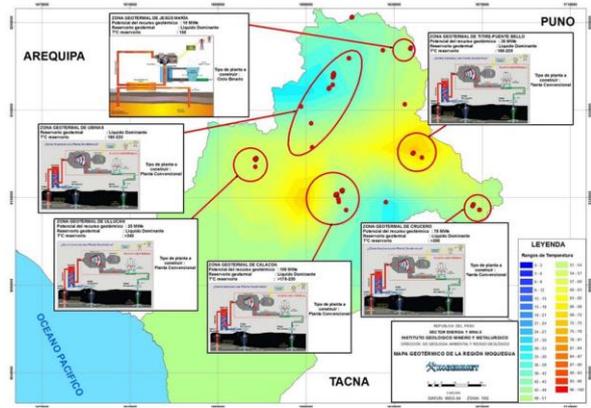
Daniels Theo Mendoza Villaverde.- Nació en Moquegua, Perú en 1999. Recibió su bachiller de Ingeniería Mecánica Eléctrica de la Universidad de José Carlos Mariátegui en 2022. Actualmente, se encuentra esperando su titulación en la Universidad Cesar Vallejo; Su

campo de investigación está relacionado al desarrollo sostenible y adaptación al cambio climático mediante una planta piloto geotérmica con ciclo binario para la generación de energía.

ANEXOS



Anexo 1: Mapa situacional de la Zona Ubina (INDECI 2023)



Anexo 2: Mapa geotérmico de la región Moquegua, donde se muestra el potencial geotérmico de cada zona geotérmica (INGEMMET, Boletín Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica N° 58). [21]

