GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DE VAPOR DEL POZO GEOTÉRMICO APACHETA AP-XI

Ing. Javier A. Velasco Villarroel
Carrera de Ingeniería Mecánica, Universidad Técnica de Oruro,
Av. Dehene s/n, Ciudad Universitaria, Oruro- Bolivia
javelascov@yahoo.es

M. Sc. Ing. Edgar S. Peñaranda M.
Sociedad de Investigación en Ingeniería Energética, Carrera de Ingeniería Mecánica,
Universidad Técnica de Oruro, Av. Dehene s/n, Ciudad Universitaria, Oruro- Bolivia
epenarandam@utonet.edu.bo

Resumen

La Empresa Sociedad Industrial Tierra S.A. produce ácido bórico en su planta de Apacheta. La energía para algunos procesos de la planta, se obtiene del pozo geotérmico Apacheta XI perforado por ENDE, que genera 30 Tn/dia de vapor a 4 bar y 140 ^{o}C. Además, éste vapor es utilizado para calefacción de las viviendas y labores domésticas. Actualmente la energía eléctrica es producida por un grupo generador, cuya potencia es 1 [MW], para lo cual semanalmente se trae diesel en cisternas desde la población de Uyuni, distante a 330 [Km] de la planta.

Se determinaron parámetros de operación del pozo y la planta. En el artículo, se presentan los parámetros termodinámicos al inicio y a la salida del escalonamiento, la potencia que puede desarrollar la turbina, dimensiones y aislamiento de los vaporductos, y dimensiones y parámetros de la corona fija y la corona móvil. Se tomaron en cuenta parámetros ambientales, sobre todo la composición y el destino de los condensados, ya que la zona se encuentra dentro del Parque Nacional Eduardo Abaroa, reserva de la flora y la fauna andina de Bolivia.

Se deberá instalar un vaporducto de 71 m y 8 pulg. de diámetro desde la salida del pozo hasta la turbina, con sus accesorios y dispositivos de control. La turbina de un sólo escalonamiento, consta de una corona fija y una corona móvil, de diámetro aproximado 1 m, y cubrirá el 47,7% de la energía eléctrica.

Keywords: Energías renovables, energía geotérmica, turbina de vapor.

Electrical generation with steam from Apacheta AP-XI geothermal well

Abstract

The “Sociedad Industrial Tierra S.A.” company produces boric acid. The factory is in the foothills of the Cerro Apacheta, at 5.020 meter of altitude above the sea level, in Sud Lipez, Potosí, Bolivia. The border with Chile is only ten kilometers away and the migration checkpoint “Hito Cajones” is only a few minutes from the company.

The energy for some processes in the factory is get from the Apacheta geothermal well, which was perforated by ENDE. The geothermal well gives 30 Tn/hr of steam at 4 bar and 140 ^{o}C. The steam is also used for heating and for domestic uses. Nowadays, the electric energy is generated by a generation group, which has 1 MW of power. Every week the fuel is brought from Uyuni, the nearest town, which is located 330 km far away from the factory.

The most important parameters of the geothermal well were determined. In the article, the thermodynamics parameters in the beginning and in the end of the steam expansion were obtained, also the power which is developed by the turbine, the size of the pipes and their isolation and finally the most important characteristics of the muzzle and the turbine were obtained. The environmental protection is very important in the development of the project, because the factory is located within the “Eduardo Abaroa” National Park, which is a protected are for the Andean flora and fauna.

A steam pipe of 71 m and almost 1 m of diameter, since the exit of the well to the turbine will be installed, with its accessories and control systems. The system will have only one muzzle and one turbine. The energy generated by the turbine will supply the 47,7% of the electricity needed by the factory.

Keywords: Geothermal energy, steam turbines.

Geração de energia elétrica a partir do vapor do poço geotérmico Apacheta AP-XI

Resumo

A empresa "Sociedad Industrial Tierra S.A." produz acido bórico. A empresa fica no sopé do Cerro Apacheta, a uma altura de 5.020 m, na província "Sud Lipez" do departamento de Potosi, Bolivia, a dez minutos da fronteira com Chile e a poucos minutos do "Hito Cajones".

A energia para alguns dos processos da planta é obtida do poço geotérmico Apacheta XI, que foi perfurado pela ENDE. O poço gera 30 Tn/dia de vapor a 4 bar y 140 ^{o}C. Além disso, este vapor também é utilizado pra calefação das moradas dos trabalhadores e para labores domesticas. Atualmente a energia elétrica é gerada por um grupo de geração, que tem uma potencia de 1 MW. Por isso, semanalmente, é traído diesel da localidade de Uyuni, que fica a 330 km da planta.

Foram obtidos os parâmetros da operação do poço geotérmico numa visita à planta. Também foram determinados os parâmetros termodinâmicos no inicio y no final da expansão do vapor, a potencia desenvolvida pela turbina, as dimensões e o isolamento das tubulações de vapor e as dimensões características da coroa fixa (bocal) e da coroa móbil. Foram tomados em conta os parâmetros do meio ambiente, já que a zona geotérmica fica dentro do Parque Nacional Eduardo Abaroa, que e uma reserva ecológica da flora e da fauna andina da Bolívia.

Será instalado uma tubulação de vapor de 71 m e 8 pulg. de diâmetro, desde a saída do poço até a entrada do bocal. A tubulação tem seus acessórios e os dispositivos de controle. O escalonamento tem um bocal e uma turbina, o diâmetro da turbina é aproximadamente 1 m e gerará o 47,7% da energia elétrica requerida pela planta.

Palavras chave: Energia geotérmica, turbina de vapor.

1. Introducción

Actualmente la empresa Sociedad Industrial Tierra S. A. utiliza parte del vapor geotérmico procedente del pozo Apacheta XI, perforado por la Empresa Nacional de Electricidad (ENDE). En este artículo, se plantea utilizar el vapor que no se utiliza en el proceso de producción para generar energía eléctrica para la planta, mediante una turbina de un solo escalonamiento, de tal forma, de minimizar su dependencia de combustibles fósiles que deben ser traídos desde Uyuni, localidad ubicada a 330 Km.

Otro proyecto de generación eléctrica en la zona ha sido emprendido por el gobierno de Bolivia mediante cooperación internacional, que plantea utilizar el vapor procedente de los pozos de la zona geotérmica "Sol de Mañana" para generación de energía eléctrica a gran escala y cubrir las necesidades energéticas de las poblaciones circundantes.

Aplicaciones de mayor potencia requerirán una minuciosa evaluación del impacto ambiental provocado, ya que la zona es visitada anualmente por miles de turistas debido a la majestuosidad del paisaje y a que es un santuario de la flora y fauna andina.

2. Energía Geotérmica y Matriz Energética de Bolivia

La energía geotérmica es aquella energía que puede ser obtenida aprovechando el calor del interior de la Tierra. Geotérmico viene del griego geo, "tierra", y thermos, "calor"; literalmente "calor de la Tierra".

Se obtiene energía geotérmica por extracción del calor interno de la Tierra. En áreas de aguas termales muy calientes a poca profundidad, se perfora por fracturas naturales de las rocas basales o dentro de rocas sedimentarias. El agua caliente o el vapor pueden fluir naturalmente, por bombeo o por impulsos de flujos de agua y de vapor (flashing).

Históricamente la energía geotérmica fue aprovechada en primera instancia por los romanos, que la utilizaban para fines domésticos y medicinales. Los maoríes, una tribu de Nueva Zelanda, se establecieron cerca de un yacimiento geotérmico y adaptaron todo su estilo de vida a esta fuente energética. En Islandia utilizaron la energía geotérmica para calefacción de las viviendas y para invernaderos. Sin embargo fue recién a principios del siglo XX, que se utilizó la energía geotérmica para su conversión en energía geotérmica, en Italia.

La energía geotérmica está considerada dentro de las energías renovables aunque no concuerda exactamente con la definición de éstas, ya que la cantidad de fluido geotérmico utilizado siempre es mucho mayor que la cantidad reinyectada.

Actualmente la tecnología para la utilización del vapor geotérmico en la generación de enegía electrica ha sido desarrollada juntamente con las turbinas, así como también la

tecnología para usos industriales como calefacción y usos domésticos.

Algunas ventajas de la utilización de energía geotérmica son:

- Es una fuente que evitaría la dependencia energética del exterior.
- Los residuos que produce son mínimos y ocasionan menor impacto ambiental que los originados por el petróleo, carbón, etc.
- Sistema de gran ahorro, tanto económico como energético.
- Ausencia de ruidos exteriores cuando se utiliza un silenciador a la salida del pozo.
- Los recursos geotérmicos son mayores que los recursos de carbón, petróleo, gas natural y uranio combinados, solamente que no se encuentra explorados y/o explotados.
- No está sujeta a precios internacionales, sino que siempre puede mantenerse a precios nacionales o locales.
- El área de terreno requerido por las plantas geotérmicas por megavatio es menor que otro tipo de plantas. No requiere construcción de represas, tala de bosques, ni construcción de tanques de almacenamiento de combustibles.

Algunos inconvenientes de la utilización de energía geotérmica son:

- En ciertos casos emisión de ácido sulfhídrico, que se detecta por su olor a huevo podrido, pero que en grandes cantidades no se percibe y es letal.
- Contaminación de aguas próximas con sustancias como arsénico, amoníaco, etc.
- Contaminación térmica.
- Deterioro del paisaje.
- No se puede transportar (como energía primaria).
- No está disponible más que en determinados lugares.

Algunos usos actuales de la energía geotérmica son:

- Balneología.
- Servicio doméstico.
- Generación de energía eléctrica.
- Calefacción, suministro de agua caliente y acondicionamiento de aire.
- Cultivos agrícolas y acuacultura.
- Extracción de minerales.
- Aplicaciones industriales del vapor como fuente de energía.

Actualmente el potencial geotérmico mundial utilizado para la generación de energía eléctrica es de 11.200 [TWh/año], de los cuales el mayor potencial se encuentra en Asia con 2.970 [TWh/año] seguido de América Latina con 2.800 [Twh/año].

Tradicionalmente la plataforma energética de Bolivia está sustentada en los recursos tradicionales no renovables como ser: gasolina y diesel, ambos combustibles derivados del petróleo; gas natural, del cual Bolivia es el segundo país con mayores reservas después de Venezuela y actualmente exporta grandes volúmenes a Brasil y Argentina; y la biomasa que es utilizada principalmente en la población rural, que aún sigue siendo mayoritaria en Bolivia. La generación eléctrica en Bolivia es mediante centrales termoeléctricas (55%) y también en centrales hidroeléctricas (45%).

En Bolivia existen zonas que tienen gran potencial geotérmico, ubicadas en la zona volcánica de la Cordillera Occidental, que sirve de límite entre Bolivia y Chile. Son: la zona de Laguna Colorada, que alberga los pozos Apacheta y Sol de Mañana, y la zona del Volcán Sajama.

El occidente boliviano se caracteriza por ser una de las zonas con mayor incidencia de radiación solar, por lo cual tiene un gran potencial para la utilización de este tipo de energía. También en todo el altiplano, principalmente en el altiplano orureño y paceño, los vientos son constantes y de gran velocidad, teniéndose un gran potencial de energía eólica.

A pesar de este potencial, actualmente en Bolivia la utilización de energías alternativas es mínimo, reduciéndose a pequeñas aplicaciones en al área rural, principalmente de energía solar, y algunos proyectos en energía eólica.

3. Ubicación Geográfica de la Empresa y Datos Generales del Pozo Geotérmico

3.1. Ubicación Geográfica y Reserva Nacional de Flora y Fauna Silvestre Eduardo Avaroa

La Sociedad Industrial Tierra S.A. produce ácido bórico a partir de ulexita y ácido sulfúrico, en su planta industrial ubicada en la localidad de Apacheta, a una altura de 5.020 metros sobre el nivel del mar, a 7 Km del hito 78 de la frontera con la República de Chile, en el cantón Quetena, Provincia Sud Lípez del Departamento de Potosí – Bolivia, y a escasos 10 minutos del Hito Cajones, puesto fronterizo para el acceso a Chile, siendo la población más cercana San Pedro de Atacama.

El área geotérmica se encuentra ubicado en la región comprendida entre 22º00’ – 23º00’ latitud Sud y 67º30’ – 68º00’ longitud Oeste. La distancia en línea azimut de las poblaciones más cercanas es [1]:

Ciudad de Potosí:	372 Km – Az 213º
Población de Uyuni:	240 Km – Az 203º
Estación Ferroviaria Chiwana:	150 Km – Az 168º

Figura 1. Vista satelital de la planta de ácido bórico de la Sociedad Industrial Tierra S. A.

Actualmente, la energía eléctrica, necesaria para el funcionamiento de dicha planta, se genera en un grupo electrógeno que funciona con diesel. El consumo de diesel de este grupo es de alrededor de 1.200 Litros/día y la demanda máxima de la planta es de 1 MW.

La zona geotérmica así como la planta de ácido bórico se encuentra dentro de la Reserva Nacional de Flora y Fauna Andina "Eduardo Avaroa". Este Parque Nacional tiene un área de 7.150 km^2, se encuentra a una altura promedio de 4.000 m.s.n.m., la temperatura promedio anual es de 3 ^oC y la precipitación media anual de 65 mm. Dentro de la Reserva Nacional se encuentra el Volcán Licancabur, Laguna Verde, Laguna Colorada, etc; albergando además 190 especies de plantas y árboles de la región, 80 especies de aves entre las cuales la más representativa es el flamenco andino y 23 especies de mamíferos.

3.2. Pozo Geotérmico Apacheta XI

En la zona existen varios pozos perforados, en Apacheta está el pozo AP-X1 y en Sol de Mañana están los pozos: SDM-X1, SDM-X2, SDM-X3.

Algunas características del vapor obtenido del pozo geotérmico son:

- Caudal: 30 Tn/hr de una mezcla de líquido y vapor.
- Composición: El vapor del pozo geotérmico es en realidad una mezcla de agua y vapor de agua, con una calidad aproximada del 45%
- Actualmente la planta utiliza entre 2 a 3 Tn/hr de vapor directamente del pozo, parte de cual se utiliza para los procesos de producción y otra parte para la calefacción de las viviendas de los trabajadores.
- Temperatura del vapor: 140 [ºC].
- Presión del vapor a la salida del pozo: 4 [bar]
- El vapor tiene pequeñas piedras y arenilla.
- Las necesidades de energía eléctrica de la Planta Industrial de Apacheta son de alrededor de 1 [MW].

4. Descripción del Proceso de Fabricación de Ácido Bórico

La Sociedad Industrial TIERRA S. A. extrae el mineral de boro del yacimiento que se encuentra en el Salar de Kapina, que se encuentra a una distancia aproximada de 62 Km de la planta Industrial de Ácido Bórico situada en Apacheta.

El mineral se extrae del yacimiento de forma manual, y se transporta a las canchas de secado en volquetas, donde es secado en forma natural. Para apurar el secado, el mineral se remueve utilizando tractores agrícolas. En la cancha, el mineral es acumulado en diferentes lugares de acuerdo al sector de donde fue extraído, debido a que el contenido de óxido de boro (B_2O_3), cloruros (Cl^-), insolubles, humedad etc., en el mineral, varía en el yacimiento de lugar a lugar.

El flujograma de la operación de la planta se muestra en la siguiente figura:

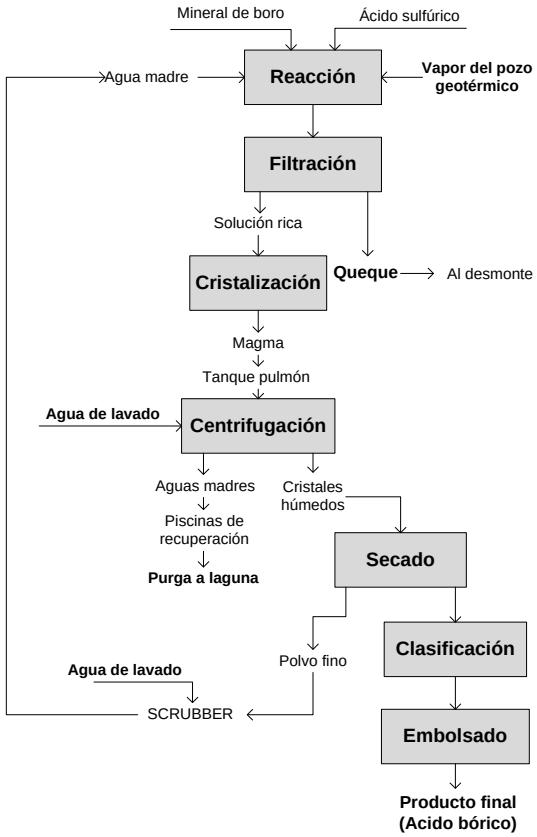

Figura 2. Flujograma de operación de la Planta Industrial de Ácido Bórico de la Sociedad Industrial Tierra S. A.

Para la fabricación del ácido bórico, la planta cuenta con dos reactores de tipo tanque agitado, cada uno de 49 m^3 de capacidad, que operan en forma discontinua y con una temperatura de pulpa de 85 ^oC. Como medio de calefacción del reactor se introduce directamente en él vapor del pozo geotérmico. El proceso dura aproximadamente dos horas, tiempo luego del cual en la solución se tienen aproximadamente 95 g/l de B_2O_3 y un pH entre 3 a 3.1. La pulpa caliente es filtrada, y la solución rica es enfriada lentamente hasta aproximadamente 38 ^oC, para formar los cristales de ácido bórico (H_3BO_3) y luego es centrifugada para separar los cristales de ácido bórico de la solución. Finalmente, se lavan los cristales en las mismas centrífugas con agua pura y se secan en un secador flasch.

5. Parámetros Termodinámicos

Mediante una matriz de decisión se elige el ciclo más adecuado para este caso, resultando ser que el ciclo directo presenta más ventajas que el ciclo con intercambiador de calor binario. El ciclo directo sin condensación es el ciclo más simple y más barato en cuanto a inversión inicial de todos los ciclos geotérmicos. El vapor del pozo, se hace pasar simplemente por un escalonamiento (corona fija y corona móvil) y se descarga. Este tipo de turbinas tiene sus aplicaciones como plantas piloto, plantas de reserva y para pequeños suministros locales desde pozos aislados, como es el caso de Apacheta. También se utilizan éstas máquinas sin condensación cuando el conte-

nido de gases no condensables en el vapor es mayor del 50%, debido a la alta energía que se requiere para extraer éstos gases en un condensador.

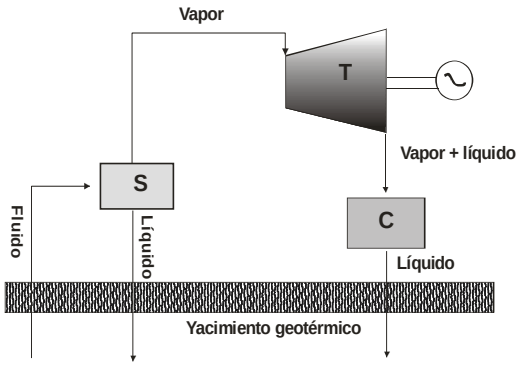

Figura 3. Esquema del ciclo de expansión directa.

Actualmente no se cuenta con un separador líquido – vapor, por lo cual la mezcla de agua y vapor es llevada a los equipos actuales de la planta con una calidad de 46% donde el vapor es utilizado para el proceso químico y para calefacción de las viviendas. Para mejorar la vida útil de la turbina, reducir costos de reparación y renovación de la turbina y evitar un plan demasiado estricto de mantenimiento, es recomendable la instalación del separador de tal forma que el vapor salga del mismo en condiciones casi de vapor saturado. Con ello, a la salida del separador se tendrían los siguientes parámetros termodinámicos.

Temperatura del vapor = 143,6 ^{o}C
Presión del vapor = 4 bar
Calidad = 98%
Flujo másico de vapor saturado = 12,6 Ton/hr

Una vez instalada la turbina y el separador, se plantea utilizar el vapor que sale del pozo en las proporciones mostradas en la siguiente figura.

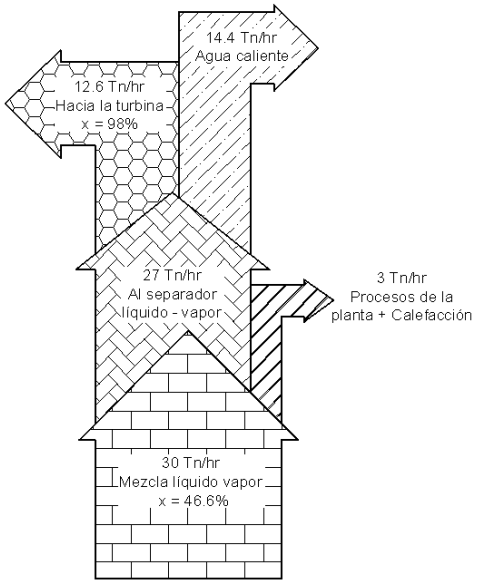

Figura 4. Distribución del flujo másico de vapor saturado que sale del pozo geotérmico.

La presión atmosférica en Apacheta, (5.020 m.s.n.m) es de 0,558 bar. La presión al final de la expansión deberá ser un 10% mayor que la atmosférica, es decir, 0,614 bar.

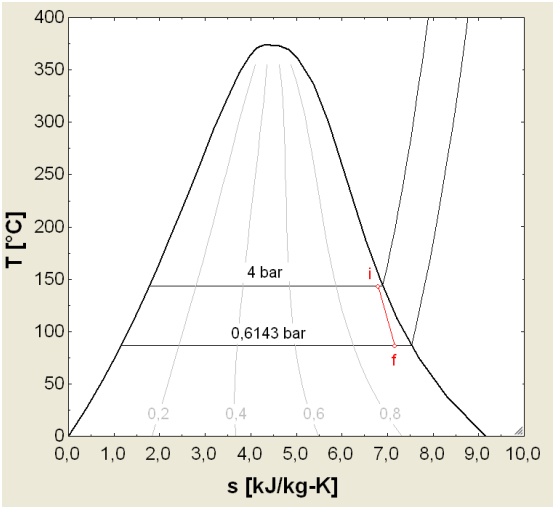

Figura 5. Diagrama T-s de la expansión

Tomando en cuenta la caída de presión en la tubería de vapor que lo transporta desde el pozo, la presión de entrada a la corona fija de la turbina es de 3,748 bar.

Para aislar el ducto del frío intenso que se tiene en la zona, actualmente existe un canal de 30 cm de profundidad por donde van las tuberías que no cuentan con capa de aislante. Sin embargo, se plantea utilizar como aislante térmico la magnesia [3, 4] que se utiliza comúnmente en plantas termoeléctricas. En el ducto existirá formación de condensado debido a la pérdida de calor y también disminución de temperatura. La disminución de temperatura se calcula en 2,3 ^{o}C.

6. Corona Fija y Corona Móvil del Escalonamiento

Para la corona fija, se tienen los siguientes valores a la entrada de la tobera:

TABLA 1. Parámetros termodinámicos al ingreso de la tobera.

Propiedad Termodinámica	Valor
Presión	3,748 bar
Temperatura	141,3 ^{o}C
Flujo másico de vapor	3,50 kg/s
Velocidad del vapor	20,4 m/s
Calidad	98%

Para el diseño de la tobera se toma en cuenta una caída de presión lineal a lo largo de las secciones y se utilizaron las ecuaciones de flujo compresible. Para detalles, el lector puede consultar la referencia [6].

TABLA 2. Parámetros termodinámicos y geométricos en la sección crítica de la tobera.

Propiedad Termodinámica	Valor
Presión	2,127 bar
Temperatura	122,2 °C
Volumen específico	0,797 kg/s
Entalpía	2.604 kJ/kg
Velocidad	422,8 m/s
Radio de la sección	45,82 mm
Calidad del vapor	95,2%

TABLA 3. Parámetros termodinámicos y geométricos a la salida de la tobera.

Propiedad Termodinámica	Valor
Presión	0,6143 bar
Temperatura	86,5 °C
Volumen específico	2,41 kg/s
Entalpía	2.428 kJ/kg
Velocidad	728,1 m/s
Radio de la sección	60,74 mm
Calidad del vapor	90,1%

Para la longitud de la tobera se toma en cuenta que el ángulo de la parte divergente deberá ser pequeño para evitar aumentar notoriamente las pérdidas por fricción, obteniéndose de esta manera una longitud de 50 [cm].

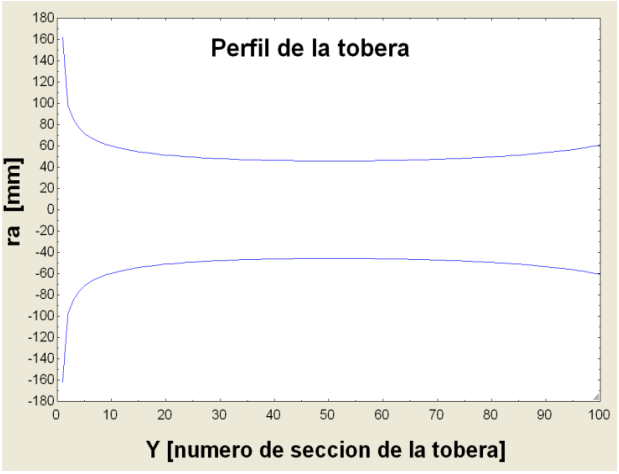

Figura 6. Perfil de la tobera.

La velocidad a la que deberá girar la turbina, por cuestiones del acoplamiento al grupo generador (la frecuencia de la corriente alterna en Bolivia es 50 Hz), y también por cuestiones constructivas en la turbina deberá ser de 3.000 rpm.

Algunas características geométricas del álabe se muestran en la siguiente tabla:

TABLA 4. Características de los álabes

	Valor
Altura radial	20 mm
Ancho a la entrada	255 mm
Ancho a la salida	350 mm
Espesor promedio	5 mm
Paso entre álabes	2^o - 3^o
Ángulo de inclinación a la entrada y salida	$23,4^o$

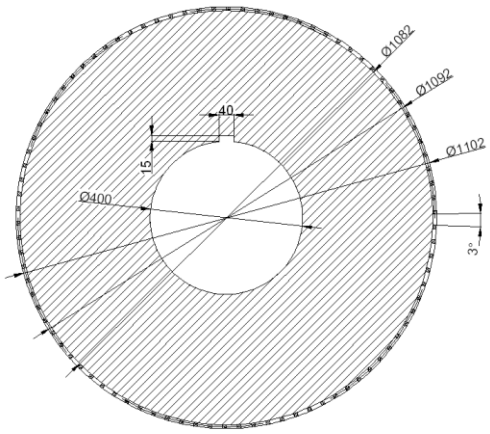

Figura 10. Vista en corte de la turbina y el álabe

Las diferentes pérdidas que se producen tanto en la tobera como en la turbina se muestran en la siguiente tabla.

TABLA 5. Pérdidas en la tobera y en la corona móvil.

Pérdida	Símbolo	Valor, kJ/kg
Pérdida por fricción en la tobera	y_1	29,0
Pérdida por fricción en los álabes	y_2	78,1
Pérdida por la velocidad de salida	y_3	33,5
Pérdida por rozamiento de disco y ventilación	y_5	20,1
TOTAL		160,7

Considerando estas pérdidas, se tiene la siguiente relación para entalpías del fluido a la salida de la tobera y la corona móvil.

TABLA 6. Entalpía del vapor a la salida de la tobera y de la corona móvil.

	Valor kJ/Kg
Entalpía del vapor a la entrada de la tobera	2.693
Entalpía ideal (isentrópica) del vapor a la salida de la tobera	2.399
Entalpía real del vapor a la salida de la tobera	2.428
Entalpía real del vapor a la salida de la corona móvil	2.560
Salto entálpico ideal en el escalonamiento	294
Salto entálpico real en el escalonamiento	133

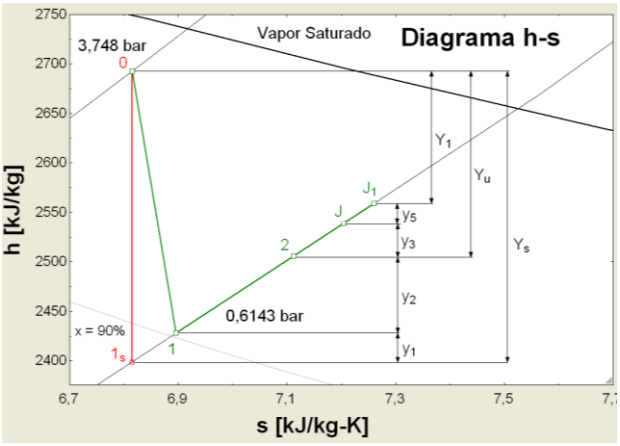

Figura 8. Diagrama h-s de la expansión en el escalonamiento.

En la figura 8, Y_1 simboliza el salto entálpico real, Y_u el salto entálpico periférico y Y_s el salto entálpico ideal isentrópico.

De la tabla 6, se puede deducir que el rendimiento del escalonamiento es del 45,23%, por lo tanto la potencia total entregada por la turbina será de 476,9 kW, es decir, que la turbina que funciona con vapor geotérmico, proporcionará el 47,7% de la demanda de energía eléctrica en la planta de ácido bórico de Apacheta.

7. Consideraciones ambientales

La utilización de energía geotérmica genera impacto ambiental mayor si es comparado con otras energías renovables, pero mucho menor si es comparado con la combustión de combustibles fósiles. Para ello, es importante tomar todas las medidas necesarias para reducir el impacto ambiental lo más posible. Principalmente el impacto ambiental generado es la contaminación atmosférica y la contaminación de las aguas cercanas (contaminación química y térmica).

TABLA 7. Probabilidad y gravedad del impacto potencial sobre el ambiente.

Impacto	Probabilidad	Gravedad de las consecuencias
Contaminación del aire	○	●
Contaminación de agua superficial	●	●
Contaminación del subsuelo	○	●
Subsidencia de terreno	○	○ ●
Altos niveles de ruido	●	○ ●
Reventones de pozos	○	○ ●
Conflictos con aspectos culturales y arqueológicos	○ ●	● ●
Problemas socio económicos	○	○
Contaminación química o térmica	○	● ●
Emisión de residuos sólidos	●	● ●

○ Bajo ● Medio ● Alto

Actualmente gran parte del vapor que sale del pozo y no se utiliza ni en los procesos de la planta ni en calefacción es conducido por una tubería hacia una laguna de condensación que se muestra en la siguiente fotografía.

Figura 9. Destino actual de los condensados

Asimismo, los condensados y residuales del vapor que pasa por los tubos de calefacción es vertido al ambiente.

En el caso de los condensados provenientes de la turbina de vapor, se propone que parte del agua que se condensa pueda ser reutilizada, siempre y cuando cumpla con los parámetros ambientales, para lo cual es necesario evaluar el impacto ambiental que pueden tener éstos condensados. El caudal de condensado generado durante la operación de la turbina será de 869 l/hr, evaluado mediante la siguiente expresión.

$$Q_{cond} = \frac{(x_f - x_0)\, m_{turb}}{\rho_{agua}}$$

Donde:

Q_{cond}: Caudal de agua condensada generada
x_f: Calidad del vapor al final de la expansión
x_o: Calidad del vapor antes de la expansión
m_{turb}: Flujo másico de vapor que pasa por la turbina
ρ_{agua}: Densidad del agua

La siguiente tabla muestra un análisis del pH del vapor y de los condensados.

TABLA 8. Análisis de pH del vapor y de los condensados

Muestra	pH
Vapor condensado nº 957	6,64
Vapor condensado nº 963	6,65
Líquido fluido total nº 958	6,89
Líquido fluido total nº 964	6,71
Líquido vertedor después del separador nº 962	7,19
Líquido vertedor después del separador nº 965	6,78

Un análisis químico del vapor condensado muestra los siguientes resultados:

TABLA 9. Análisis químico del vapor condensado.

HCl	0,4 meq/l
Ca^{++}	1,8 mg/l
Mg^{++}	0,02 mg/l
Na^{+}	29,3 mg/l
K^{+}	5,4 mg/l
Cl^{-}	43,7 mg/l
SO_4^{--}	10,3 mg/l
H_3BO_3	3,8 mg/l
NH_4^{+}	9,56 mg/l

Actualmente la empresa tramita su licencia ambiental, donde se han analizado los impactos ambientales que genera la empresa, las medidas mitigadoras, las medidas compensatorias y el plan de monitoreamiento.

8. Conclusiones y Recomendaciones

- Por las características de la operación, lo más conveniente es instalar un separador líquido-vapor a la salida del pozo y utilizar el ciclo directo en la expansión, para maximizar la energía proveniente del vapor del pozo geotérmico y minimizar los costos de instalación y operación.
- Existe una caída de presión de 0.252 bar, debida al traslado del vapor desde el pozo hasta la entrada a la corona fija.
- Para la expansión del vapor se utilizará un sólo escalonamiento, consistente en una tobera (corona fija) y una corona móvil. Las dimensiones características de la corona fija se muestran en la figura 7 y de la corona móvil en la tabla 8 y la figura 10.
- El rendimiento interno de la turbina tomando en cuenta las pérdidas explicadas en la tabla 6 es de 45.23%
- La potencia real que desarrollará la turbina es de 476.9 kW, es decir, que la turbina proveerá el 47.7 % de la energía eléctrica total que requiere la empresa para su funcionamiento.
- Los condensados inicialmente tendrán el mismo tratamiento que se tiene actualmente con el vapor residual. Sin embargo, para esto debe evaluarse la ficha ambiental de la empresa y los impactos sobre el ecosistema local y regional
- En este estudio se ha hecho énfasis en la parte mecánica y energética del proyecto, llegándose al diseño térmico y mecánico del escalonamiento. Éste estudio deberá ampliarse haciendo el estudio de los parámetros eléctricos, principalmente en lo referido al generador y al transformador, así como su instalación.

Agradecimientos

A todo el personal de la empresa Sociedad Industrial Tierra S.A, especialmente a su gerente general Dr. Guillermo Roelants y al Ing. Pablo Canchari.

Investigación financiada por la Sociedad Industrial Tierra S.A., y realizada en el Laboratorio de Máquinas Térmicas de la Carrera de Ingeniería Mecánica – Electromecánica, Facultad Nacional de Ingeniería, Universidad Técnica de Oruro.

Referencias

1. HERNAN, H. “Geotermia en Laguna Colorada”. *Revista Técnica de YPFB*. La Paz, Bolivia, 1990.
2. CHRISTOPHER, H., ARMSTEAD, H. *Energía Geotérmica*. México: Editorial Limusa, 1989.
3. MATAIX, C. *Turbomáquinas Térmicas*. Madrid: Editorial Dossat, 1982.
4. KREITH, F., BOHN, M. *Principios de Transferencia de Calor*, 6ta Edición. México: Ed. Thomson Learning, 2001.
5. BALDERRAMA F., Fausto, RAMIREZ V., Guido; USNAYO, U., Jhovan. *Determinación del coeficiente técnico de utilización de ácido sulfúrico en la elaboración de ácido bórico en la planta de la Sociedad Industrial “Tierra S. A.”*, Mayo 2002. La Paz – Bolivia.
6. VELASCO V., Javier A., PEÑARANDA M., Edgar. “Diseño de una turbina para la generación de energía eléctrica para la empresa Sociedad Industrial Tierra S. A. a partir de vapor del pozo geotérmico Apacheta AP-XI”. En: *Congreso Chileno de Ingeniería Mecánica COCIM 2010:* 3 – 5 de noviembre de 2010, Pucón – Chile, Ed. Imp. Universidad de la Frontera. 2010.