

UNIVERSIDAD JOSÉ CARLOS MARIÁTEGUI

FACULTAD DE INGENIERÍA

CARRERA PROFESIONAL DE MECÁNICA ELÉCTRICA



**ANÁLISIS DE VIABILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA DE LA PLANTA
GEOTÉRMICA QUELLA APACHETA PARA LA GENERACIÓN DE
ELECTRICIDAD EN EL DISTRITO DE SAN CRISTÓBAL - CALACOA EN EL
AÑO 2014**

TESIS PRESENTADO POR

DANY TACO PINO

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO MECÁNICO
ELÉCTRICO**

MOQUEGUA – PERÚ

2014

DEDICATORIA

Dedico este trabajo principalmente a Dios, por haberme dado la vida y permitirme el haber llegado hasta este momento tan importante de mi formación profesional.

.

A mi madre, por ser el pilar más importante y por demostrarme siempre su cariño y apoyo incondicional sin importar nuestras diferencias de opiniones.

A mi padre, por acompañarme durante todo este arduo camino y compartir conmigo mis alegrías y logros.

A mi hermano, a quien quiero con mucho aprecio, por compartir momentos significativos conmigo y por siempre estar dispuesto a escucharme y ayudarme en cualquier momento.

A Gabriel Adrian, mi querido hijo por ser la fuente de mi inspiración para concretar esta tesis.

DANY TACO PINO

AGRADECIMIENTO

A Dios Todopoderoso: Gracias por darme la vida, por permitirme crecer en tu fe, por mis padres, hermano, toda mi familia y amigos, porque siempre me has acompañado en toda mi vida y sobre todo en mi formación profesional.

A mis padres **Wilson Taco Cruz y Gladys Pino Mamani** a quienes les dedico cada uno de mis logros, por haber estado conmigo en todo momento brindándome su amor, comprensión y apoyo incondicional y nunca permitirme darme por vencido y siempre estar pendientes de mi formación humanística y académica.

A mi hermano **Giancarlo Irwin Taco Pino**, por su comprensión y apoyo en los momentos más difíciles de mi vida como estudiante que me toco enfrentar en mi formación profesional.

A mi **esposa, familiares y amigos** por haber compartido mis tristezas y celebraciones a lo largo de mi carrera, por haber estado pendientes de mi desarrollo académico y siempre desearme lo mejor.

Muy en especial a mi querido hijo **Gabriel Adrian Taco Flores**, quien me dio la fortaleza y la inspiración mas profunda para poder concretar este proyecto.

A mi asesor **Ing. Yury Vásquez Charcape y todos mis maestros** por sus enseñanzas y todo el conocimiento que han inculcado en mí.

DANY TACO PINO

RESUMEN DEL PROYECTO

En este proyecto se evalúa, tanto técnica como económicamente, la integración de una planta de ciclo binario en una central geotérmica para la generación de electricidad.

La implantación de unidades de **ciclo binario** es una forma de aprovechar de forma eficiente y económica los recursos geotérmicos de baja, media entalpía y evitar el problema de depósito de calcita existente cuando la temperatura del fluido geotérmico es menor de 150 °C. En este tipo de plantas, el fluido geotérmico se pasa como líquido comprimido a través de intercambiadores de calor y es desechado después por medio de pozos de inyección aún en fase líquida. Además, estos sistemas de generación de electricidad hacen posible utilizar fluidos geotérmicos impuros químicamente y aprovechar el calor de la salmuera de desecho de otras unidades antes de reinyectarla de nuevo al reservorio geotérmico.

Sin embargo, las centrales de ciclo binario también presentan algunos inconvenientes que en ocasiones harán inviable su utilización, como los elevados costes de instalación y mantenimiento asociados. Otro aspecto a tener en cuenta es que los recursos geotérmicos en numerosas ocasiones se encuentran en entornos de gran valor paisajístico y biodiversidad. En esos casos, a la hora de seleccionar el fluido de trabajo adecuado será fundamental la consideración de fluidos que no sean tóxicos, no sean inflamables y presenten un bajo potencial de calentamiento global (GWP).

Hoy en día las centrales de ciclo binario son el tipo de planta geotérmica más utilizado para generar electricidad. Existen 155 unidades de ciclo binario en operación, generando 274 MW de electricidad en 16 países. Sin embargo, a pesar de constituir el 33% de todas las unidades geotérmicas en operación en el mundo, las plantas de ciclo binario generan solamente el 3% del total de la energía eléctrica de origen geotérmico.

El estudio de este proyecto se centra en la planta Quella Apacheta. El Campo Geotérmico Quella Apacheta está ubicado en las faldas del Volcán Ticsani, en los Distritos de San Cristóbal, Cuchumbaya y Carumas.

El complejo geotérmico Quella Apacheta constará de una planta con una capacidad instalada total de 20 MW. La única de ellas del tipo de ciclo binario es la planta Quella Apacheta, objeto de estudio de este proyecto. Está compuesta por dos unidades binarias que entrarán en funcionamiento en el año 2026 y generan desde entonces un total de 20 MW, colocando al Perú en el primer lugar en cuanto a potencia eléctrica generada con

plantas geotérmicas de ciclo binario en Sudamérica.

En esta planta como fluido de trabajo para el modelado se ha utilizado el n-pentano. Al estar la central ubicada en una zona protegida debido a la riqueza de flora y fauna existente y ser el n-pentano un fluido muy inflamable se ha estudiado en este proyecto la viabilidad de utilizar un fluido de trabajo distinto para evitar así el alto riesgo de incendio ante una eventual fuga o fallo en la planta.

Para poder proponer alguna modificación en la planta, primero hay que conocer adecuadamente los distintos componentes que la conforman y los procesos que en ellos tienen lugar. Para ello se ha modelado la planta utilizando el software EES (Engineering Equation Solver). Manteniendo como constantes la temperatura de entrada de la salmuera y la potencia de salida de la turbina, se han probado dos fluidos de trabajo como alternativa al n-pentano, Amoníaco y refrigerante R-245fa.

Los resultados con amoníaco no han podido considerarse válidos por dos motivos:

- 1.- Al no tener retroceso la curva de saturación del diagrama T-s, la expansión se hacía dentro de la campana, por lo que la turbina trabajaría con una mezcla bifásica que provoca mayor erosión y proporciona menor rendimiento.
- 2.- La temperatura de condensación a la presión de salida de la turbina queda por debajo de 0 °C. Con ello, la refrigeración ya no se podría realizar con agua, y habría que rediseñar el sistema de refrigeración por completo.

En cambio, los resultados obtenidos para el R-245fa sí arrojan valores admisibles.

Se presentan a continuación los parámetros principales para: n-pentano y R-245fa.

DESCRIPCION	n-pentane	R-245fa
\dot{W} Quella Apacheta [MW]	18.397	18.397
Tc [°C]	136	110
η térmico [%]	15.48	17.13
\dot{m} Fluido de trabajo [Kg/s]	58.15	145.8
\dot{m} Agua-Refrigerante [Kg/s]	629.8	558.9

El R-245fa tiene un potencial de calentamiento global bajo y no se trata de un fluido tóxico, por lo que las pérdidas que se produzcan no suponen riesgo para el entorno ni los trabajadores. A las anteriores ventajas se añade una mejora termodinámica, ya que es posible obtener un rendimiento térmico mayor.

Habrá que considerar que al ser menor la temperatura de salida de la salmuera trabajando con R-245fa, se debe controlar la temperatura del reservorio en el punto de reinyección, para comprobar que se mantiene por encima de los límites aconsejables. Además, el aumento del caudal del fluido de trabajo requerirá cambiar las bombas. Por tanto, dado que manteniendo la potencia de salida de las turbinas, son evidentes las ventajas en cuanto a las propiedades: termodinámicas, medioambientales, seguridad y salud, y son perfectamente subsanables los inconvenientes que presenta, el cambio de n-pentano como fluido de trabajo por el refrigerante R-245fa se considera una **solución técnicamente viable**.

- El objetivo del estudio económico es el de analizar la viabilidad económica de la planta geotérmica de ciclo binario Quella Apacheta. Para ello, se calculan los principales índices de rentabilidad, considerando una vida efectiva de la planta de 30 años.
- La inversión inicial para la construcción y puesta en marcha de la planta es de 87 989 797.947 USD, financiado con un préstamo de la empresa de capitales extranjeros Geotérmica Quella Apacheta Perú SAC.
- El PR, período de retorno o recuperación de la inversión inicial, es de 8 años desde la puesta en funcionamiento de la planta geotérmica.
- El TIR, medida de la rentabilidad relativa de un proyecto que representa el interés que el proyecto da a la inversión, es del 14.00 %.
- Al final de la vida útil se han obtenido en total unos beneficios de 288 851 261.187 USD, más de tres veces de la inversión inicial.
- Por tanto, se demuestra que los ingresos generados por la venta de electricidad son suficientes como para sufragar los gastos de la planta y asumir la devolución del préstamo a la Geotérmica Quella Apacheta Perú SAC. De todo ello se deduce que se trata de un **proyecto viable y económicamente rentable**.

SUMMARY PROJECT

In this project it is assessed, technological and economically, the installation of a binary cycle power plant.

The utilization of binary cycle power plants is a manner of making efficient and economical use of low, medium enthalpy geothermal resources, and avoiding calcite scaling problem which occurs when the geothermal fluid temperature is below 150 °C. In this kind of plants the geothermal fluid flows as compressed liquid across the heat exchangers and is later thrown out still in liquid phase by injection wells. Moreover, this system of electricity generation allows working with chemically impure geofluids, and using the heat of the waste brine of other units, before being placed again to the geothermal reservoir.

However, binary cycle power plants have some problems that may make unfeasible its utilization, such as the high costs of the installation and maintenance. Another point to take into account is that geothermal resources are usually based in places with rich environmental landscape and biodiversity. In these cases, it is very important to take into account the possibility of using non toxic and non inflammable working fluids, and selecting if possible one with low Global Warming Potential (GWP).

Nowadays, binary cycle power plants are the most numerous type of power plant used for electricity generation. There are 155 units working worldwide, amounting to a total of 274 MW in 16 countries. In spite of the fact that they represent the 33% of the total geothermal power plants worldwide, binary cycle power plants generate only the 3% of the total geothermoelectric energy.

The analysis of this project is focused in Quella Apacheta Power Plant. Quella Apacheta Geothermal Field is based in the side of Ticsani Volcano, in the Districts of San Cristóbal, Cuchumbaya and Carumas.

Quella Apacheta Power Station consisted of one power plants with a total power of 20 MW. Only one of them, Quella Apacheta, is a binary cycle power plant, and it is the plant analysed in this project. It was added to the existing plants in 2026 as a way of increasing the output by 20 MW, placing Perú in the first place as for electric power generated with geothermal plants of binary cycle in South America.

In this binary power plant, n-pentane is used as the working fluid. The plant is based in a protected zone, due to the importance of its flora and fauna species. As the n-pentane is a very inflammable fluid, it has been analyzed in this project the feasibility of using another sort of working fluid, in order to avoid the fire risk if a leak of fluid or a failure in the power plant takes place.

It is necessary to know perfectly the different components and the processes that take place in the plant, in order of being able to decide what modifications could be considered. With this aim, the plant has been simulated using EES software (Engineering Equation Solver). The parameters considered as constant values have been the brine inlet temperature (which is the waste brine of the other units), and the net power of the unit. The results have been tested for two working fluids: Ammonia NH₃ and refrigerant R-245fa.

The results for the ammonia as working fluid could not be assumed as valids, because of two main reasons:

1. - The T-s diagram for ammonia is not a retrograde saturated vapor curve. The process along the turbine is not as superheated vapor. The turbine would work with a two-phase fluid which produces more erosion and lower efficiency.
2. - The condensation temperature for the outlet pressure in the turbine is below 0 °C. This makes not possible the use of natural water as a source of refrigeration, and the refrigeration process unfeasible.

The results for the R-245fa can be considered as feasible.

The principal parameters for the n-pentane and R-245fa are shown below.

DESCRIPCION	n-pentane	R-245fa
\dot{W} Quella Apacheta [KW]	18.397	18.397
Tc [°C]	136	110
η térmico [%]	15.48	17.11
\dot{m} Fluido de trabajo [Kg/s]	58.15	145.8
\dot{m} Agua-Refrigerante [Kg/s]	629.8	558.9

Refrigerant R-245fa has a low Global Warming Potential, and it is a non toxic fluid. This means that losses in the circuit would not be considered as a risk for the environment or the health of the workers. Moreover, it has a thermodynamic improvement, because it is possible to achieve a better thermal efficiency with this fluid.

Due to the lower outlet brine temperature, it would be necessary to check that the temperature of the geothermal reservoir at the injection point is above desired limits. In addition, since the flow rate of the working fluid is higher, it would be necessary to change the feed pumps. To conclude, due that it is possible to maintain the net output of the turbine and there is evidence in the advantages of the thermodynamic, environmental, security and health properties, and the disadvantages are easily overcome, the change from n-pentane as working fluid to R-245fa is considered as a **technically feasible solution**.

- It has been also analyzed the economic feasibility of the Miravalles Binary Cycle Power Plant. The calculation of the main profitability rates has been made for a useful-life of 30 years.
- The initial inversion for the construction and start of the power plant amounted to 87 989 797.947 USD. financed with a loan of the company of foreign capitals Geothermal Quella Apacheta Peru SAC.
- The RP, return period of the initial inversion is 8 years from the setting in operation of the plant from the setting in operation of the geothermal plant.
- The TIR, measure of the relative profitability of a project that it represents the interest that the project gives to the investment, it is of 14.00 %.
- At the end of the useful-life of the power plant, a profit of 288 851 261.187 USD would be achieved.
- All these factors demonstrate that the incomes for the sale of the electricity are high enough as to defray the costs of the power plant installation and maintenance, and return the loan to the Geothermal Quella Apacheta Peru SAC. The project is considered as **economically feasible**.