

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE POSGRADO  
DIPLOMADO EN GEOTERMIA PARA AMÉRICA LATINA  
EDICIÓN 2019**



TEMA:

**“SITUACIÓN ACTUAL Y PROPUESTA DE MEJORA PARA SISTEMA DE  
REINYECCIÓN EN CENTRAL GEOTÉRMICA DE EL SALVADOR”**

PRESENTAN:

**FLORES SOTO JOSÉ ALBERTO  
RODRÍGUEZ ZELAYA CLAUDIA LISSETH  
WANG DE ARTIGA DE-HSUAN**

ASESORES:

**ING. OSCAR FERNANDO CIDEOS NÚÑEZ  
LICDA. PATRICIA JACOBO**

**CIUDAD UNIVERSITARIA, NOVIEMBRE 2019**

## RESUMEN

El presente documento se realizó como trabajo de investigación final para el Diplomado en Geotermia para América Latina, Edición 2019; el cual se enfoca en determinar la situación operativa actual del sistema de reinyección de agua para una central geotérmica de El Salvador, que cuenta con una estación de bombeo para garantizar la efectiva reinyección a los pozos, una evaluación de criticidad del sistema y una propuesta de mejora, que contribuya a mantener la funcionalidad del mismo.

El sistema de reinyección comprende desde la separación de las fases (líquido-vapor) en los pozos productores, hasta la disposición del agua en los pozos reinyectores. Cuatro bombas centrifugas están encargadas de elevar la presión del agua geotermia a 9Bar aproximadamente, con un flujo másico total de 670 kg/s y un rango de temperatura de 110 a 115 °C.

El sistema de reinyección en estudio tiene una alta importancia operativa, tanto para la Central Geotérmica como para la sostenibilidad del reservorio.

## ABSTRACT

*The present document, developed as a final research work for the geothermal course, focuses on determining the current operational situation of the water reinjection system for a geothermal plant in El Salvador that has a pumping station to ensure effective reinjection to the wells, a criticality evaluation of the system and a proposal for improvement that contributes to maintaining the functionality of the system.*

*The reinjection system involves from the separation of the phases (liquid-vapor) in the producing wells to the disposal of the water in the reinjection wells. Four centrifugal pumps are responsible for raising the pressure of geothermal water to approximately 9 Bar, with a total mass flow of 670 kg / s and a temperature range of 110 to 115 ° C.*

*The reinjection system under study is of high operational importance for the Geothermal Power Plant and for the sustainability of the geothermal reservoir.*

## ÍNDICE DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	i
1. FORMULACIÓN DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN .....	1
1.1. Planteamiento del problema .....	1
1.2. Justificación del estudio .....	1
1.3. Objetivos.....	2
1.3.1. Objetivo general .....	2
1.3.2. Objetivos específicos .....	2
1.4. Metodología de la investigación.....	2
1.5. Marco teórico .....	3
1.5.1. Reinyección de agua geotérmica. ....	3
1.5.2. Parámetros de la reinyección.....	3
1.5.3. Tipos de fluidos de reinyección. ....	8
1.5.4. Componentes del Sistema de Reinyección de Agua Geotérmica ...	9
2. ANÁLISIS Y DESARROLLO.....	12
2.1. Características técnicas del sistema de reinyección de agua geotérmica en estudio.....	12
2.2. Modelo de flujo de operación de sistema de bombeo para reinyección de agua geotérmica.....	14
2.3. Evaluación de importancia operativa de un sistema de bombeo en una central geotérmica .....	19
2.4. Mantenimiento basado en confiabilidad.....	22
2.4.1. Análisis de criticidad de equipos .....	23
2.5. Instrumentación para mantenimiento predictivo .....	27
3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	29
4. AGRADECIMIENTOS.....	30
5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	31
6. APÉNDICES.....	32

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Temperaturas del fluido de reinyección para los diferentes tipos de sistemas. Fuente: (A.R.Díaz, E.Kaya, & S.J.Zarrouk, 2015).....	5
Figura 1.2. Componentes del sistema de reinyección geotérmica.....	9
Figura 1.3. Tuberías de acarreo en Central Geotérmica.....	10
Figura 2.1. Imagen de referencia de un diseño preliminar para una estación de bombeo (circa 2004) .....	12
Figura 2.2. Componentes básicos de un sistema de reinyección .....	13
Figura 2.3 .Modelo de flujo de sistema de bombeo, escenario actual (EES)...	15
<i>Figura 2.4. Comportamiento de caída de presión en situación actual a 670 kg/s (A); Caída de presión a 1000 kg/s (B).....</i>	<i>15</i>
Figura 2.5. Modelo de flujo de sistema de bombeo, incorporación de línea nueva (EES).....	16
Figura 2.6. Modelo de flujo de sistema de bombeo, una línea (EES) .....	17
Figura 2.7. Modelo de flujo de sistema de bombeo, dos líneas (nueva y antigua) (EES) .....	17
Figura 2.8. Comportamiento de caída de presión en escenario mejora a 670 kg/s (A); Caída de presión a 1000 kg/s (B) .....	18
Figura 2.9. Densidad del agua geotérmica a salida de Flashers .....	20
Figura 2.10. Cálculo de densidad de agua según condiciones operativas actuales .....	20
Figura 2.11. Análisis de criticidad de equipos involucrados en la reinyección de agua en la Central Geotérmica .....	24
Figura 2.12. Ejemplo de resultado de análisis predictivo según instrumentación en sitio .....	28

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Medición de densidades a la salida de Flasher y línea de acarreo de agua geotérmica .....	19
Tabla 2. Extracto de volumen de equipos en sistema de reinyección de agua geotérmica .....	23
Tabla 3. Extracto de análisis de fallas.....	25
Tabla 4. Técnicas a utilizar en el sistema de bombeo de reinyección de agua geotérmica .....	25
Tabla 5. Extracto de plan de mantenimiento.....	26

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfica 1. Frecuencia de aplicación de técnicas predictivas.....	26
------------------------------------------------------------------	----

## INTRODUCCIÓN.

Como parte del proceso de generación de energía eléctrica a base de recursos geotérmicos, la disposición de las aguas es un elemento de suma importancia operativa, tanto para la central geotérmica como para la sostenibilidad del campo.

El trabajo de investigación, inicialmente conceptualiza en qué comprende la reinyección geotérmica, los parámetros más relevantes como la presión y temperatura del reservorio, la temperatura del agua de reinyección, incrustaciones de sílice y los componentes principales en el proceso.

Posteriormente se determinan los parámetros operativos más relevantes en el proceso y por medio de un modelo de flujo desarrollado con el software de análisis EES (*Engineering Equation Solver*), como sus siglas en inglés, se evalúa el comportamiento del sistema de bombeo en condiciones operativas actuales.

Seguido de una evaluación de importancia del sistema de bombeo, cuyo objetivo es establecer la criticidad para la Central Geotérmica. El resultado reveló que debe considerarse una estrategia para mantener la funcionalidad del sistema; la propuesta consiste en la implementación de un mantenimiento basado en confiabilidad RCM (*Reliability Centred Maintenance*), como sus siglas en inglés, que discrimine todos los equipos involucrados en el sistema de reinyección de agua geotérmica.

Finalmente se muestran los resultados del análisis de criticidad y un plan de mantenimiento hecho a la medida, que contribuya a aumentar la disponibilidad del sistema que reduzca la frecuencia de fallas.

Las recomendaciones se encuentran al final de cada análisis, mientras que las conclusiones están al final del documento, con base a los resultados obtenidos.

## 1. FORMULACIÓN DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

### 1.1. Planteamiento del problema

Las características operativas en una Central Geotérmica (CG) dependen mayormente de las características termodinámicas y la capacidad del campo, por lo tanto, cambios climáticos como las épocas lluviosa o seca no representan una afectación directa a la generación. La operación de una CG convencionalmente es de 24 horas al día los 365 días del año, excepto en mantenimiento mayores programados y no programados, por lo anterior, el factor de planta es considerablemente alto, mayor al 95%, en comparación a otras fuentes de energía eléctrica a base de recursos renovables.

Lo descrito anteriormente proporciona una idea del tiempo en que los equipos de la CG están operando constantemente, lo que provoca desgaste y aumenta las probabilidades de fallas; por lo tanto, uno de los propósitos es determinar la situación operativa actual del sistema de reinyección, encargado de disponer toda el agua resultante de la CG y desarrollar una propuesta que contribuya a mantener la funcionalidad del sistema. La primera afirmación de este apartado se refiere a que el sistema de reinyección trabajara la sintonía con la generación de la Central Geotérmica.

### 1.2. Justificación del estudio

Convencionalmente en una CG, el enfoque de prioridad va dirigido hacia los equipos encargados directamente en generar energía a base del vapor geotérmico, sin embargo en este estudio, el enfoque es dirigido a los equipos encargados en reinyectar el agua resultando de la separación de las fases (liquido- vapor) por las siguientes razones:

- ✓ Si el sistema de reinyección falla la CG deberá bajar carga (generar menos energía) o si es el caso, dejar de generar totalmente hasta que la funcionalidad se restablezca.
- ✓ Contribuir a la sostenibilidad del campo geotérmico, reutilizando el agua que anteriormente se desechaba, reinyectándola al subsuelo.

Uno de los principales objetivos de la reinyección de agua geotérmica, es disponer el agua resultante hacia un sitio que no afecte el proceso de generación de la central, por lo tanto, uno de los objetivos de este estudio es evaluar la situación actual en que la disipación se está dando; para este caso en particular un sistema de bombeo contribuye a lograr el objetivo de reinyección; sin tener otro método para disponer el agua, es necesario evaluar operativamente su funcionalidad y criticidad en los equipos involucrados.

### 1.3. Objetivos

#### 1.3.1. Objetivo general

Evaluar la situación operativa actual del sistema de reinyección de agua geotérmica, que comprende desde la separación de las fases en los pozos productores hasta el campo de reinyección y plantear una propuesta de mejora.

#### 1.3.2. Objetivos específicos

- ✓ Establecer los parámetros operativos actuales más representativos del sistema de reinyección de agua geotérmica.
- ✓ Desarrollar y analizar el comportamiento del sistema de bombeo por medio de un modelo de flujos.
- ✓ Evaluar la importancia del sistema de bombeo para la reinyección de agua en la central geotérmica en estudio.
- ✓ Desarrollar una estrategia de mejora para garantizar mantener la funcionalidad del sistema de bombeo para reinyección de agua geotérmica.

### 1.4. Metodología de la investigación

El presente trabajo de investigación tiene como propósito determinar la situación operativa actual del sistema de reinyección de en una Central Geotérmica, por lo tanto, la secuencia a seguir es la siguiente.

Descripción y determinación de los equipos involucrados en el proceso de reinyección de agua geotérmica, que comprenderá desde la separación de las fases en los pozos productores, hasta la disposición del agua geotérmica en los pozos reinyectores.

Seguido, determinar los parámetros más relevantes en el sistema como temperatura del agua geotérmica, densidad, caudal, presión, entre otros. Con la ayuda de un modelo de flujos para el sistema de bombeo, utilizando un Software de análisis EES (*Engineering Equation Solver*) como sus siglas en inglés, para evaluar el comportamiento del sistema de bombeo.

Una evaluación de la importancia del sistema para analizar la criticidad de los equipos involucrados y desarrollar una propuesta que contemple mantener la funcionalidad de reinyectar el agua geotérmica de la central, para disponer de esta correctamente y para contribuir a la sostenibilidad del reservorio geotérmico.

Una vez se cuenten con los resultados de los análisis previamente descritos, establecer recomendaciones que podrían mejorar el sistema de reinyección de agua geotérmica.

## 1.5. Marco teórico

### 1.5.1. Reinyección de agua geotérmica.

La reinyección geotérmica implica devolver una parte, o incluso la totalidad del agua producida desde un reservorio geotérmico, con retorno al mismo sistema geotérmico, después de algún proceso en el cual se haya realizado algún intercambio de trabajo y/o calor. (Axelsson, 2012). La reinyección se presenta como una solución adecuada a los problemas de contaminación ambiental, permitiendo disminuir las posibilidades de asentamientos del terreno por efectos de la explotación y complementar la recarga natural de los acuíferos. (OLADE, 1980).

Se cree que las investigaciones con propósito de reinyectar agua geotérmica iniciaron en la década de 1960. La primera prueba conocida de reinyección de agua geotérmica a alta temperatura se realizó en el Campo Geotérmico de Ahuachapán en 1969 (Stefánsson, 1997).

Existen dos objetivos principales que se busca cumplir con las estrategias de reinyección en los campos geotérmicos: el primero es la correcta disposición de los fluidos geotérmicos, que han finalizado el proceso de extracción de energía a través del sistema de la planta; el segundo es la posibilidad de recarga del reservorio y/o la presión del mismo. (DiPippo R. , 2016). En cualquier caso, el conocimiento previo para permitir una implementación exitosa, implica una comprensión del comportamiento de los fluidos propios del campo a lo largo de la formación del reservorio. La distribución de presión sin perturbaciones y los cambios inducidos por la producción deben conocerse antes de ubicar y perforar pozos de reinyección. (DiPippo R. , 2016).

### 1.5.2. Parámetros de la reinyección.

La reinyección es un proceso propio de la explotación de recursos geotérmicos, en donde un buen conocimiento de la química del fluido, interacción agua-roca, ingeniería de reservorios geotérmicos, y la ingeniería de procesos, es esencial para el éxito.

Algunos de los parámetros esenciales relacionados con la reinyección son:

✓ **Disposición del fluido geotérmico.**

Pero actualmente la reinyección se considera una parte importante de la gestión integral de los recursos geotérmicos, así como una parte esencial de la utilización geotérmica sostenible y respetuosa con el medio ambiente. (Axelsson, 2012)

✓ **Consideraciones de costos.**

El proceso de reinyección involucra un costo significativo dentro del desarrollo geotérmico de un campo. El diseño, construcción y mantenimiento de un sistema de reinyección puede aumentar el costo operativo de un campo geotérmico, debido a que es necesario planificar y presupuestar perforaciones de pozos para reinyección, estaciones de bombeo, líneas de tuberías superficiales para el transporte del agua hacia los pozos de reinyección, así como pruebas y limpieza en los pozos, de tal manera que garanticen el funcionamiento óptimo de la reinyección. Una vez que la explotación de un reservorio geotérmico ocurre durante 10-20 años, se podría experimentar que la disponibilidad de agua en el reservorio limita la energía que se puede extraer; bajo estas circunstancias, la reinyección puede prolongar la vida útil del recurso y proporcionar una recuperación de energía más eficiente del reservorio. (Stefansson, 1997).

✓ **Presión de reservorio.**

La capacidad de producción está determinada por la respuesta de la presión del reservorio, por lo tanto, la reinyección aumenta la capacidad de producción. Esta afirmación aplica particularmente para sistemas cerrados, semicerrados y fronteras establecidas en el reservorio. (Axelsson, 2012).

La disminución de la producción, como resultado de la reducción de presión en el reservorio, es una característica común en todos los reservorios geotérmicos. La reinyección ayuda a mantener la presión de estos, de modo que la disminución de la producción será mucho más lenta cuando se aplica la reinyección que cuando no se hace. (Stefansson, 1997).

La explotación del reservorio geotérmico para la generación, requiere una explotación de fluido geotérmico, lo que ocasiona una caída de presión en el reservorio, si no existe reinyección del agua resultante, la sostenibilidad del reservorio se verá comprometida. La reinyección aumenta la recarga natural y contribuye a mantener la presión operativa. Será necesario determinar la vida útil del reservorio por medio de modelados matemáticos que establezcan tendencias de comportamiento.

✓ **Temperatura del reservorio.**

Bajo ciertas circunstancias, la reinyección puede afectar la temperatura del reservorio provocando enfriamiento, riesgo que podría limitar su aplicación.

Para evaluar si existe conexión de la zona de reinyección con la zona de producción se usan pruebas de trazadores. El método más común para monitorear la comunicación fluida entre el sitio de reinyección y el área de producción son las pruebas de trazadores.

✓ **Temperatura del agua de reinyección.**

Uno de los parámetros más importantes que se debe considerar dentro de la estrategia de reinyección es la temperatura del agua. Es de suma importancia mantener rangos de temperaturas que eviten la sobresaturación de sílice en el fluido, estos rangos permisibles varían con respecto a las características que presente el reservorio geotérmico.

La Figura 1.1 presenta los rangos de temperatura de fluidos geotérmicos para reinyección, clasificados por tipo de sistema geotérmico, así como los promedios aritméticos de las temperaturas de los inyectados y la diferencia de temperatura entre el reservorio y los inyectados de 26 campos. (A.R.Díaz, E.Kaya, & S.J.Zarrouk, 2015).

Category		Temperature ranges of injectates (°C)	Average temperature of injectates (°C)	Average temperature difference between reservoir and injectates (°C)
Hot-water		50 - 100	76.5	54.94
Two-phase, liquid-dominated	Low-enthalpy	55 - 150	102.5	131.00
	Medium-enthalpy	30 - 175	109	185.61
	High-enthalpy	20 - 180	106	169.10
Two-phase, vapour-dominated		No data		

Figura 1.1 Temperaturas del fluido de reinyección para los diferentes tipos de sistemas. Fuente: (A.R.Díaz, E.Kaya, & S.J.Zarrouk, 2015).

✓ **Cambios químicos en los fluidos del reservorio.**

Los fluidos reinyectados generalmente tienen una composición química diferente de los fluidos del reservorio obtenidos de la producción. Esto sucede cuando se reinyecta agua separada de una mezcla bifásica. En el proceso de separación el vapor se enriquecerá en gases no condensables, mientras que el agua separada tiene una mayor concentración de sólidos disueltos, pero menor contenido de gas produciendo cambios significativos en la química del fluido característicos de las aguas geotérmicas. La característica anteriormente descrita resulta un comportamiento similar en todos los campos donde se aplica la reinyección. (Stefansson, 1997).

✓ **Incrustaciones de sílice.**

Las incrustaciones de sílice son probablemente el problema operativo más delicado en la reinyección, pues contribuye al aumento de caída de presión en los sistemas de acarreo de fluidos, debido a que afecta el diámetro interno y la rugosidad de las paredes internas de las tuberías. (Stefansson, 1997).

Los fluidos geotérmicos están en equilibrio químico a las condiciones de reservorio, pero cuando ascienden a superficie y ocurre la separación de fases, el agua separada se sobresatura de sílice, iniciando la precipitación de este mineral, sin embargo, la

incrustación de sílice es un proceso complejo, y la velocidad de precipitación depende en parte de factores como la temperatura, pH del fluido, concentración de  $\text{SiO}_2$  y concentración de solutos coexistentes. (Axelsson, 2012). Por esta razón, la selección de la temperatura del agua inyectada resulta un parámetro de vital importancia para la reinyección, debido a que de esta depende el manejo de las sustancias químicas que poseen las aguas geotérmicas.

#### ✓ **Ubicación de los pozos de reinyección.**

La ubicación de los pozos de reinyección en relación con los pozos de producción, es uno de los parámetros más importante a considerar al momento de diseñar un sistema de reinyección. Los pozos de reinyección están diseñados para intersectar zonas de alimentación/pérdida en ciertos intervalos. (A.R.Diaz, E.Kaya, & S.J.Zarrouk, 2015). Las posibles zonas de reinyección pueden estar en el mismo nivel que el reservorio de producción principal, por encima del reservorio principal (en niveles menos profundos) o por debajo del reservorio principal (en niveles más profundos). (A.R.Diaz, E.Kaya, & S.J.Zarrouk, 2015).

Estas ubicaciones se eligen según el objetivo principal de la reinyección (por ejemplo, soporte de presión o eliminación de agua) y cambian significativamente según el tipo de sistema geotérmico. (A.R.Diaz, E.Kaya, & S.J.Zarrouk, 2015). Dependiendo de la cercanía de los pozos de reinyección con relación a los pozos de producción, podría haber algún efecto en el **mantenimiento de la presión del reservorio**. En caso de una planeación sin interferencia entre la zona de reinyección y producción, un esquema de reinyección puede tener que revisarse posteriormente, debido a la interferencia no anticipada con los pozos de producción.

Convencionalmente los reservorios geotérmicos se encuentran en áreas geológicamente activas, incluso eventos sísmicos menores pueden causar que se presenten nuevas fallas o que se cierren las existentes, alterando el flujo de los patrones de comportamiento del fluido geotérmico en la formación. (DiPippo R. , 2016). El efecto de inyectar fluido bajo presión por sí solo puede causar tales cambios, especialmente si el área de formación alrededor del pozo de inyección tiene baja permeabilidad y requiere presiones de inyección relativamente altas. (DiPippo R. , 2016). Por lo tanto, si bien la reinyección ahora se reconoce como un elemento esencial para crear un proyecto de generación de energía de larga duración, lograr una operación exitosa involucra desafíos que deben enfrentarse durante la vida del proyecto.

El monitoreo constante de pozos y pruebas de trazadores darán una advertencia temprana de problemas inminentes y permitirán adaptarse y mitigar el problema. Sucede en ocasiones que los operadores de campo cambian la configuración del sistema convirtiendo pozos inyectores en pozos productores y viceversa, durante los años de operación del proyecto para mantener una situación óptima. (DiPippo R. , 2016).

En un campo geotérmico se deben realizar registros y pruebas en los pozos de reinyección, que garanticen el buen funcionamiento y eficiencia del sistema, tales como sondeos y calibraciones del agujero, perfiles T-P-S, registros geofísicos, pruebas de inyectividad, pruebas de interferencia, pruebas de trazadores, pruebas de producción.

A continuación, se describe una de las pruebas más importantes a realizar en pozos productores y reinyectores.

### ✓ Pruebas de inyectividad

Su principal objetivo es evaluar las tasas de flujo y el movimiento de los fluidos entre pozos reinyectores y pozos productores, con el fin de monitorear y vigilar el proceso de inyección tanto en el pozo reinjector como en las formaciones. (Rubio, Guerrero Zabala, & Vergara Mendoza, 2012).

Durante una prueba de inyección, el índice de inyectividad (II) se usa a menudo como una estimación aproximada de la conectividad del pozo al reservorio que lo rodea. Aquí se presenta en unidades de (L/s)/Bar y se define como el cambio en el caudal de reinyección dividido por el cambio en la presión del reservorio estabilizado:

$$II = \Delta Q / \Delta P$$

Dónde: II = Índice de inyectividad ((L/s)/Bar)

$\Delta Q$  = Diferencial de Caudal de reinyección

$\Delta P$  = Diferencial de Presión del reservorio estabilizado

Altas Inyectividades indican que cantidades de flujo que pueden absorber el pozo por unidad de presión es alta.

Cuando un pozo se somete a una prueba de reinyección para controlar la respuesta de presión en un reservorio, se utiliza para evaluar las propiedades que rigen las características del flujo y el pozo. Al utilizar la prueba de inyección, las principales características que pueden ser determinados por modelados, son la permeabilidad, la transmisividad, la estoratividad o capacidad de almacenamiento, las propiedades del perímetro, skin, almacenamiento del pozo inicial, presión, límites de reservorios. Para estimar estos parámetros, se utilizan modelos matemáticos para simular la respuesta del reservorio. (Kewiy, 2013)

Los parámetros hidrogeológicos (como la permeabilidad) de la capa de prueba, se pueden determinar analizando datos de prueba de pozos de reinyección. Su base teórica es que el flujo de agua desde el pozo hasta el estrato deberá cumplir con las leyes del flujo de filtración en un medio poroso.

La capacidad de almacenamiento tiene un gran impacto en la rapidez con que la presión puede viajar dentro del reservorio. Además, la capacidad de almacenamiento varía significativamente entre los tipos de reservorios: **dominados por líquido, bifásicos o vapor seco**. La variación es debida a la dependencia de la compresibilidad del fluido. Los valores comunes de la capacidad de almacenamiento para los reservorios geotérmicos de líquido dominante, son alrededor de  $10^{-8} \text{ m}^3/(\text{Pa}\cdot\text{m}^2)$ , mientras que para reservorios bifásicos pueden tener valores del orden de  $10^{-5} \text{ m}^3/(\text{Pa}\cdot\text{m}^2)$ . (Kewiy, 2013)

La transmisividad describe la capacidad del reservorio para transmitir fluido, por lo tanto, afecta principalmente al gradiente de presión entre el pozo y el reservorio. La transmisividad puede variar en unos pocos órdenes de magnitud, pero los valores comunes de las pruebas de inyección en los yacimientos geotérmicos islandeses son del orden de  $10^{-8} \text{ m}^3/(\text{Pa}\cdot\text{s})$ . (Kewiy, 2013).

### 1.5.3. Tipos de fluidos de reinyección.

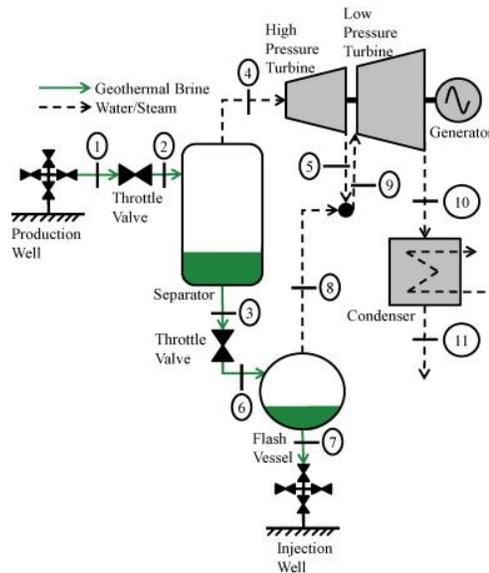
Los tipos de fluidos que se manejan en la reinyección dependen del tipo de campo que se desarrolle, por ejemplo:

- ✓ **Reservorios vapor dominante** solo hay una pequeña fracción de la masa de vapor producido que termina convirtiéndose en condensado líquido que podría ser reinyectado, aproximadamente 10-15%. Por lo tanto, se ganaría poco al devolver esto al reservorio, incluso suponiendo que pueda devolverse en una ubicación óptima. (DiPippo R. , 2016).
- ✓ **Reservorios líquido dominante**, una fracción mucho mayor del fluido producido está disponible para reinyección, hasta un 80-85% para plantas con flasheo y un 100% para plantas binarias. (DiPippo R. , 2016).

Devolviendo este fluido al reservorio, podría ser posible extender la vida útil del proyecto e incluso incrementar la sostenibilidad estable a largo plazo. Sin embargo, a menos que se pueda encontrar alguna parte del campo que tenga suficiente permeabilidad y que no esté en comunicación directa con las áreas productoras, puede que no haya suficiente capacidad de reinyección para permitir la operación completa de la planta de energía. En realidad, una vez que la reinyección se hace más común, a menudo los pozos fallidos que se habían perforado para la producción, se utilizan como pozos de reinyección independientemente de su ubicación, siempre y cuando tengan suficiente permeabilidad. (DiPippo R. , 2016).

### 1.5.4. Componentes del Sistema de Reinyección de Agua Geotérmica

El proceso de reinyección inicia desde la separación de las fases (líquido-vapor); el vapor se dirige hacia la Central Geotérmica para alimentar las unidades de generación, mientras que el líquido, cuyo rango de temperatura ronda entre los 160 a 180 °C viaja, por medio de líneas de acarreo, hacia el sistema doble vaporización, conocido como “Flashers”. En la Figura 1.2A se puede observar un esquema general del proceso de separación de líquido-vapor de un sistema de doble flasheo en una central geotérmica. En el punto 7 indica la salida del agua geotérmica resultante, es ahí donde se incorpora el sistema de bombeo para asegurar que el 100% de flujo másico total sea reinyectado al campo geotérmico.



(A)

Sistema de doble flasheo en una Central Geotérmica.

Fuente: (Clarke & McLeskey Jr, 2013)

(B)

Separador ciclónico en pozo productor

Fuente: (DiPippo R. , 2016)

Figura 1.2. Componentes del sistema de reinyección geotérmica

## Etapa de separación de fases (líquido-vapor)

En el campo geotérmico en estudio, el principal elemento es el separador ciclónico. Convencionalmente se instala cerca de los pozos productores (Figura 1.2 B), lo cual contribuye a reducir la caída de presión hacia la turbina. La presión del separador será similar a la presión de salida del pozo, que se traduce como una relación de evaporación más baja, por lo tanto, se obtiene más vapor y más agua geotérmica resultante para disponer. (Henríquez & Aguirre, 2011).

### ✓ Tuberías de acarreo

Las tuberías de acarreo, se encargan de transportar el vapor y el agua luego de la separación de las fases en la etapa anteriormente descrita (Figura 1.3). En su diseño se deben tomar en cuenta los siguientes aspectos:

- a) Las características del fluido a transportar, incluido el caudal y la pérdida de carga permitida.
- b) La ubicación de las tuberías: su origen y destino y el terreno sobre el que pasará, la ubicación de la estación separadora y la central eléctrica
- c) El código de diseño a seguir
- d) El material a utilizar

Los factores importantes a considerar son el caudal másico, la presión, la temperatura, el índice de saturación y la pérdida de carga permitida a lo largo de la longitud de la tubería. (Henríquez & Aguirre, 2011)



Figura 1.3. Tuberías de acarreo en Central Geotérmica

Una vez separadas las dos fases, se conocerán como tuberías de acarreo de vapor y de agua geotérmica; para este estudio, el enfoque está dirigido a la reinyección del agua geotérmica; por lo tanto, el enfoque será del ciclo del agua.

✓ **Tubería de acarreo para agua geotérmica**

El agua geotérmica que sale del separador está en condiciones saturadas. Si la presión en cualquier punto de la línea es menor que la presión de saturación, el agua geotérmica se convertirá en vapor. Esto provocará un flujo anormal que puede dar lugar a fuerzas dinámicas que pueden dañar las tuberías. Las líneas de agua geotérmica están diseñadas para ganar presión estática en la cabeza. Los pozos de reinyección deben ubicarse más abajo que el separador. (Henríquez & Aguirre, 2011)

Para el diseño de tuberías para agua geotérmica es necesario tomar en consideración factores como: erosión, corrosión, incrustaciones debido a la saturación de sílice, tiempo de residencia del agua geotérmica, presión que se mantendrá por encima de la presión de saturación, presión hidrostática alta, carga dinámica del flujo potencial y golpes de ariete, flujo de canal abierto, presión, temperatura y provisión para drenaje.

✓ **Etapas de aprovechamiento del agua geotérmica**

El principio de separación de fases es el dominante en este sistema; toda el agua resultante de los pozos productores es transportada por medio de las tuberías de acarreo hacia los “Flashers” para aumentar el aprovechamiento; el agua geotérmica resultante en este proceso es reinyectada al campo geotérmico con la ayuda de un sistema de bombeo.

✓ **Pozos reinyectores**

La característica más importante de los pozos reinyectores es la permeabilidad, la cual puede disminuir principalmente debido al desarrollo de “skin” o daño de la formación.

## 2. ANÁLISIS Y DESARROLLO

### 2.1. Características técnicas del sistema de reinyección de agua geotérmica en estudio.

Los principales equipos en el sistema de reinyección se encuentran en los pozos productores y en el campo de reinyección; para el sistema en estudio, se cuenta con una estación de bombeo que contribuye a la disposición del agua geotérmica hacia los pozos reinyectores.

En las plataformas de los pozos productores se encuentra el separador ciclónico que recibe las dos fases del fluido geotérmico que sale del pozo y las separa en vapor y agua. El vapor es enviado directamente a la central geotérmica para el proceso de generación de energía eléctrica. El agua separada es enviada hacia un tanque de agua y luego a los pozos de reinyección. (Henríquez & Aguirre, 2011)

El sistema de bombeo tiene como propósito principal elevar la presión del agua geotérmica resultante para ser dispuesta en campo de reinyección. Está compuesto por 4 bombas centrífugas de eje horizontal con capacidad nominal de bombeo de 220 kg/s, potencia eléctrica de 300 kW y una cabeza dinámica de 94 m (Figura 2.1).

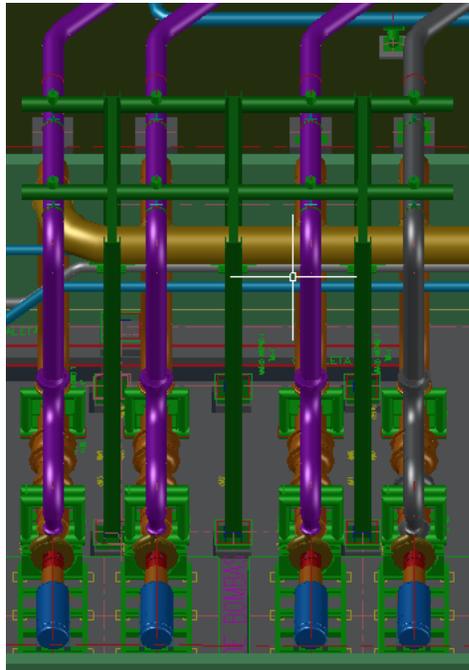


Figura 2.1. Imagen de referencia de un diseño preliminar para una estación de bombeo (circa 2004)

### Parámetros operativos actuales

- ✓ Flujo másico: 673 kg/s
- ✓ Presión de bombeo: 9 Bar
- ✓ Temperatura agua = 115-116 °C
- ✓ Capacidad total de bombear por el sistema de reinyección 880 kg/s aproximadamente, considerando el flujo másico actual (673 kg/s), es decir, el sistema de bombeo está trabajando a una carga de 76.5% aproximadamente.

Actualmente el sistema de bombeo está operando con 4 bombas, una de ellas considerada como “reserva” a espera de entrar en funcionamiento cuando una de las 3 pueda fallar. Operativamente están siendo alternadas para evitar sobre cargas o sobre esfuerzos.

El sistema de reinyección del campo geotérmico, sometido a estudio en este trabajo de investigación, esencialmente se compone de:

- ✓ Estación de bombeo (Bombas centrífugas con capacidad nominal de 220 kg/s. B1, B2, B3 y B4)
- ✓ Dos líneas de acarreo de agua geotérmica con un diámetro de 24” de 4.5 km de longitud aproximadamente, hacia el campo de reinyección.
- ✓ Acumulador de agua geotérmica con su propia estación de bombeo (Bombas M1 y M2).
- ✓ Seis pozos reinyectores (Pozo1, Pozo2, Pozo3, Pozo4, Pozo5, Pozo6),

El agua geotérmica a reinyectar presenta un rango de temperatura de entre 110 a 115°C, que viaja hacia el sistema de bombeo para ser dispuesta hacia los pozos reinyectores. En la Figura 2.2 se muestra un ejemplo de distribución esquemática de los componentes básicos del sistema de reinyección.

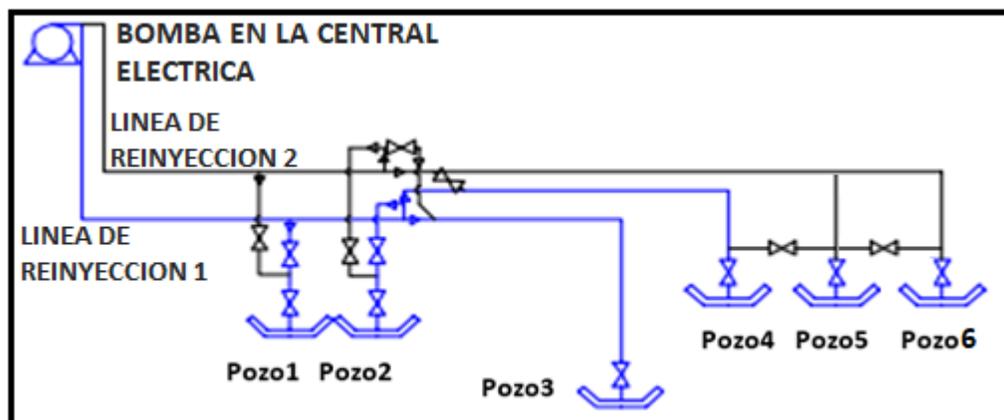


Figura 2.2. Componentes básicos de un sistema de reinyección

## 2.2. Modelo de flujo de operación de sistema de bombeo para reinyección de agua geotérmica.

Idealmente la disposición de agua geotérmica resultante se realiza por gravedad hasta el campo de reinyección, sin embargo, en algunos casos, la presión no es suficiente para transportarla. El comportamiento operativo del sistema de bombeo anteriormente descrito, es analizado utilizando el software *Engineering Equation Solver (EES)*, por medio de un modelo de flujo que involucra las siguientes correlaciones matemáticas:

### Ecuación de Bernoulli

$$\text{Ecuación 1. } P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g h_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho g h_2$$

### Ley de Darcy

$$\text{Ecuación 2. } Q = K \cdot A \cdot \frac{\Delta h}{\Delta L}$$

- ✓ Escenario Actual: Dos líneas hacia el campo geotérmico de reinyección.
- ✓ Escenario 1. Tres líneas de reinyección hacia el campo geotérmico de reinyección (incorporación de una línea nueva)
- ✓ Escenario 2. Solo una línea hacia el campo geotérmico de reinyección.
- ✓ Escenario 3. Dos líneas de reinyección hacia el campo geotérmico de reinyección, una nueva y otra existente.

Las variables básicas a considerar son la presión de bombeo 9Bar suministrada las bombas centrifugas, el flujo másico total (ṁ) de reinyección aproximadamente de 670 kg/s y el diámetro de tubería.

La situación actual cuenta con dos tuberías hacia el campo de reinyección (Figura 2.2), para un flujo másico estimado de 670 kg/s y una presión de 9Bar, se cuenta con un transmisor de presión a la entrada del “Pozo 2”, considerado como monitoreo de parámetros, la presión calculada sería de 6.89 Bar. Tal como se observa en la figura 2.3.

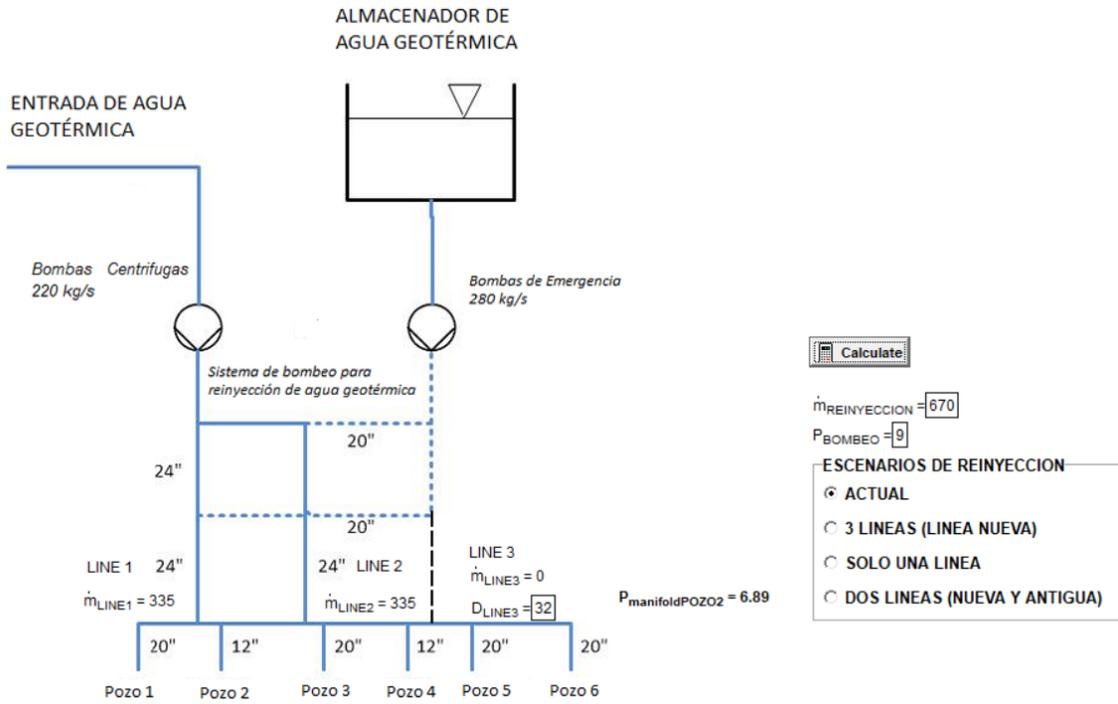


Figura 2.3 .Modelo de flujo de sistema de bombeo, escenario actual (EES)

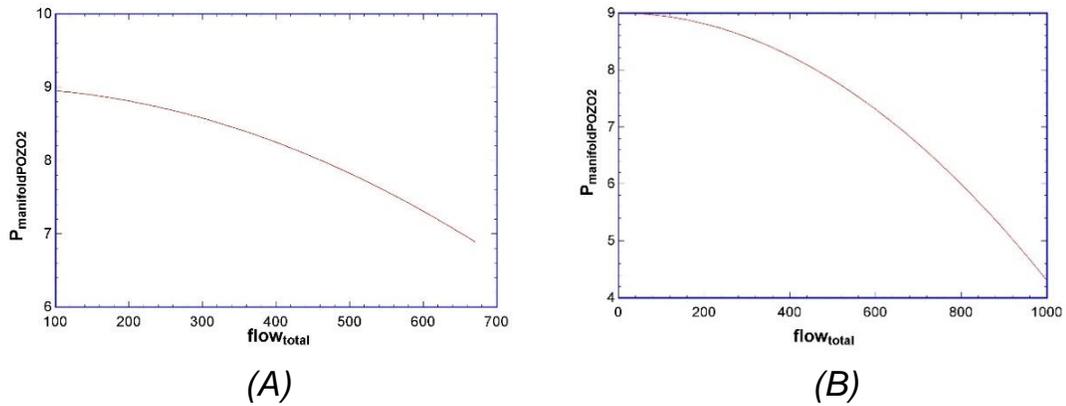


Figura 2.4. Comportamiento de caída de presión en situación actual a 670 kg/s (A); Caída de presión a 1000 kg/s (B)

De los resultados obtenidos del modelo de flujo para el escenario actual, es posible concluir que el flujo total másico se distribuirá en 50% a cada línea y existe una caída de presión aproximada de 2.11 Bar. Una curva generada de la situación puede apreciarse en la Figura 2.4A, presión - flujo total másico.

Según la situación actual, la caída de presión es proporcional al flujo másico total de agua geotérmica a disponer, es decir, entre más agua se necesite bombear hacia el campo de reinyección, mayor será la caída de presión del sistema. Si aumenta la cantidad de flujo másico total, la caída de presión presentaría un comportamiento como el que se muestra en la Figura 2.4B.

El escenario 1 implica la incorporación de una línea nueva con características similares a las existentes, diámetro de tubería de 24", del resultado del modelo que se muestra en la figura 2.5, se podría concluir que la distribución del flujo total másico corresponde al 33% en cada línea y la pérdida de presión sería de 0.938 Bar; mientras que si se considera un diámetro de tubería de 32 "la caída de presión sería de 0.194 Bar.

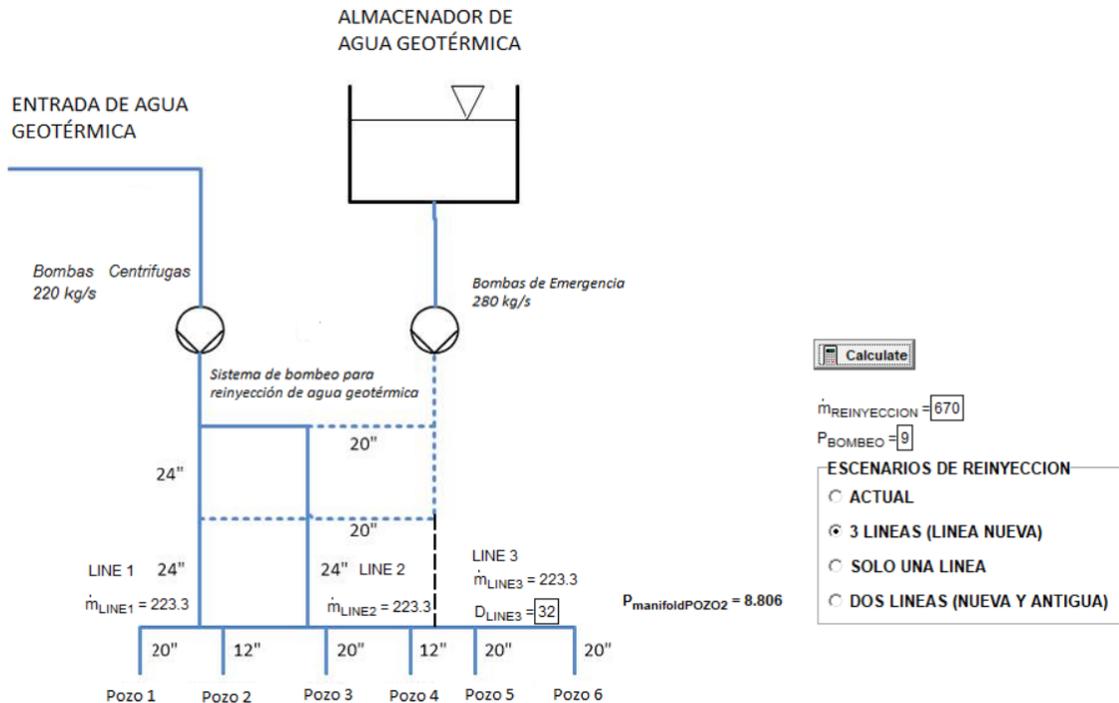


Figura 2.5. Modelo de flujo de sistema de bombeo, incorporación de línea nueva (EES)

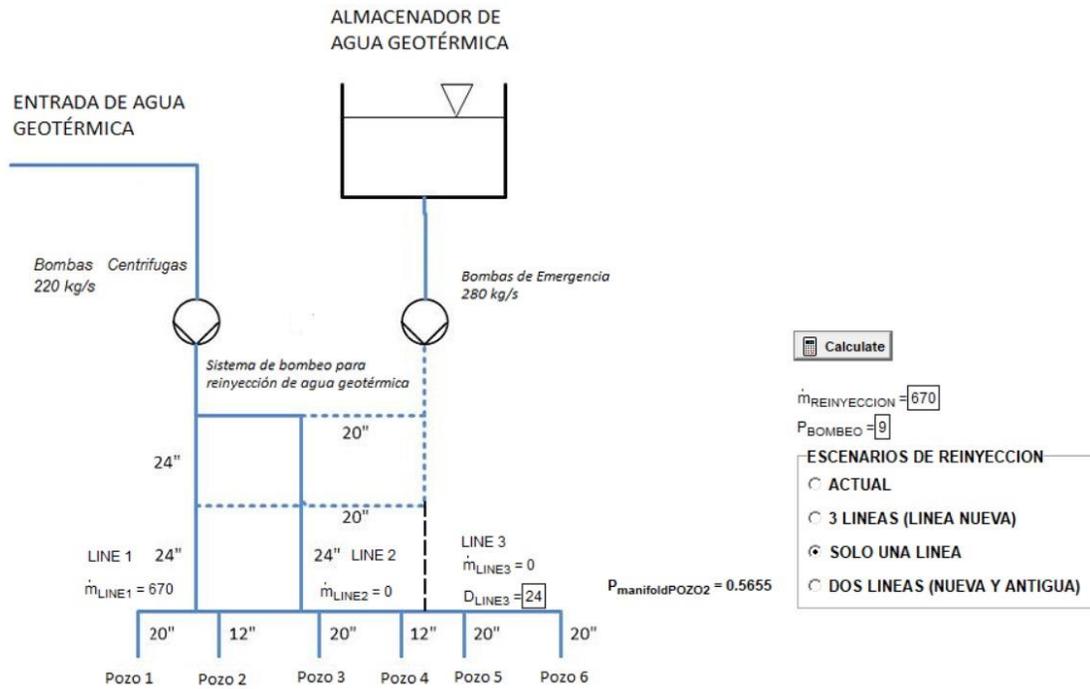


Figura 2.6. Modelo de flujo de sistema de bombeo, una línea (EES)

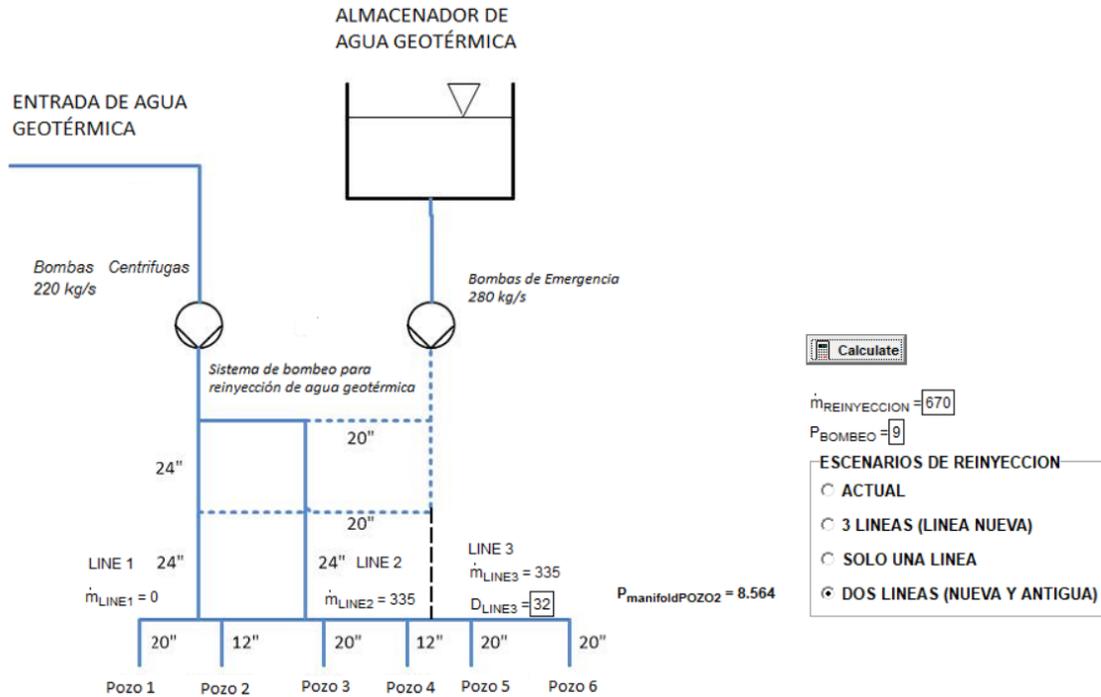


Figura 2.7. Modelo de flujo de sistema de bombeo, dos líneas (nueva y antigua) (EES)

Para el escenario 2, en el que se desarrolla el modelo de flujo haciendo uso de “solo una línea” (ver Figura 2.6), el flujo total másico tendría que transportarse en una única tubería y la caída de presión sería de 8.43 Bar aproximadamente, casi toda la presión se perdería en la disposición del agua. Mientras que para el escenario 3 (ver figura 2.7), en el que se usan “Dos líneas (nueva y antigua), es decir la incorporación de una línea nueva con un diámetro de 24”, la caída de presión es de 2.11 Bar, sin embargo, cuando se evalúa con un diámetro de 32”, la caída de presión será únicamente de 0.436 Bar.

Por lo que, a partir de los resultados obtenidos del modelado para cada uno de los escenarios, el más prometedor es el número 1, con la incorporación de una nueva línea (3 en total) con un diámetro de 32”, con lo cual el resultado calculado en el “Pozo 2” sería de 8.806 Bar, es decir, 0.194 Bar menor respecto a la inicial (9 Bar) lo que se traduce en un 2.15% de caída de presión con respecto al valor inicial.

Sin embargo, debido a los elevados costos que representaría la implementación de una tubería con un diámetro de 32”, la mejor alternativa sería la incorporación de una nueva línea con un diámetro de 24”, equivalente a las dos líneas existentes.

La curva de la Figura 2.8A representa un menor cociente de caída de presión a 670kg/s, la Figura 2.8B evalúa una proyección si la cantidad de agua aumentase a 1,000 kg/s; como resultado la presión sería poco menor a 7 Bar sin embargo casi 3 Bar mayor en comparación con la situación actual.

Es posible concluir que en la práctica sería imposible disponer del agua geotérmica con una sola línea, si tuviera que disponerse de todo el flujo.

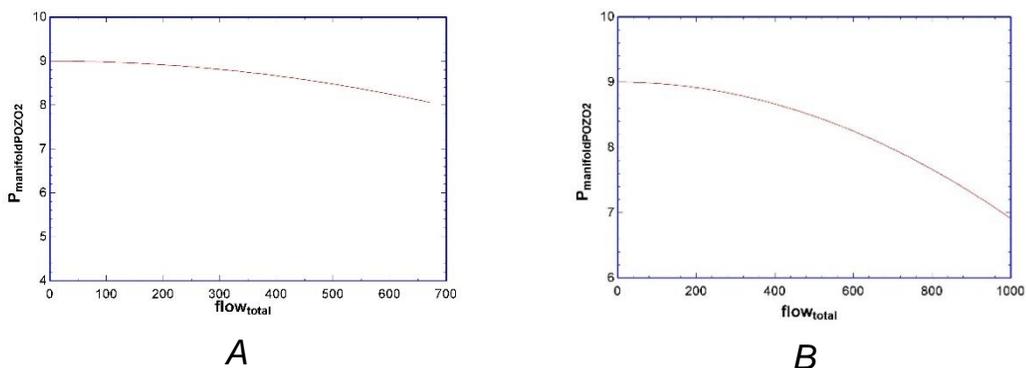


Figura 2.8. Comportamiento de caída de presión en escenario mejora a 670 kg/s (A); Caída de presión a 1000 kg/s (B)

Quedará a disposición la hipótesis para realizar una completa evaluación que incluya un análisis económico de la implementación de una nueva tubería de acarreo según los escenarios anteriormente descritos. Es recomendable que se continúe con un modelado de flujos que incluya algunos parámetros sensibles como la rugosidad, producto de las incrustaciones de sílice en la tubería, el tiempo en disponer el agua hacia el campo, entre otros.

### 2.3. Evaluación de importancia operativa de un sistema de bombeo en una central geotérmica

Con el propósito de establecer las bases respecto a la criticidad del sistema de bombeo para reinyectar agua geotérmica, a continuación, se muestran algunas evaluaciones técnicas considerando la situación en que la funcionalidad de reinyectar el agua se vea afectada.

Considerando la pérdida de funcionalidad de reinyección del agua geotérmica, el sistema automatizado enviaría el agua resultante a una presión de 1.8 Bar aproximadamente, hacia un acumulador de agua con un volumen de 8,000 m<sup>3</sup>. El sistema cuenta con dos bombas centrífugas de eje vertical con una capacidad nominal de 280 kg/s (solo se puede activar una a la vez, están diseñadas bajo redundancia operativa), para disponer el agua geotérmica que se almacena.

Por lo que bajo estas circunstancias se hace el siguiente cuestionamiento, ¿Cuánto tiempo tardaría en llenarse el acumulador? Es decir, ¿cuánto tiempo podría continuar operando a plena carga la Central Geotérmica?

La adquisición de datos de temperatura se realiza por medio de instrumentos de medición adecuados, sin embargo, para determinar la densidad del agua fue necesario tomar muestras en puntos de interés para ser analizadas en un laboratorio, garantizando la validez de la información; los resultados se detallan en la Tabla 1.

*Tabla 1. Medición de densidades a la salida de Flasher y línea de acarreo de agua geotérmica*

DATOS GENERALES						RESULTADOS	
CORRELATIVO	Código Muestra	Lugar de Muestreo	Punto de Muestreo	Fecha de Muestreo	Hora	Densidad (g/mL)	T° de análisis
1	2019-1413	Central Geotérmica	Flasher #1	17/10/2019	10:15	1.0120	24.0
2	2019-1414	Central Geotérmica	Flasher #2	17/10/2019	10:20	1.0083	24.0
3	2019-1415	Central Geotérmica	Flasher #3	17/10/2019	10:30	1.0142	24.0
4	2019-1416	Central Geotérmica	Línea #1 a Campo de reinyección	17/10/2019	11:10	1.0115	24.0

Las muestras fueron evaluadas a temperatura ambiente, 24 °C, sin embargo, en la operación de la Central Geotérmica, la temperatura es cercana a 115 °C y la presión de salida de 1.8 Bar.

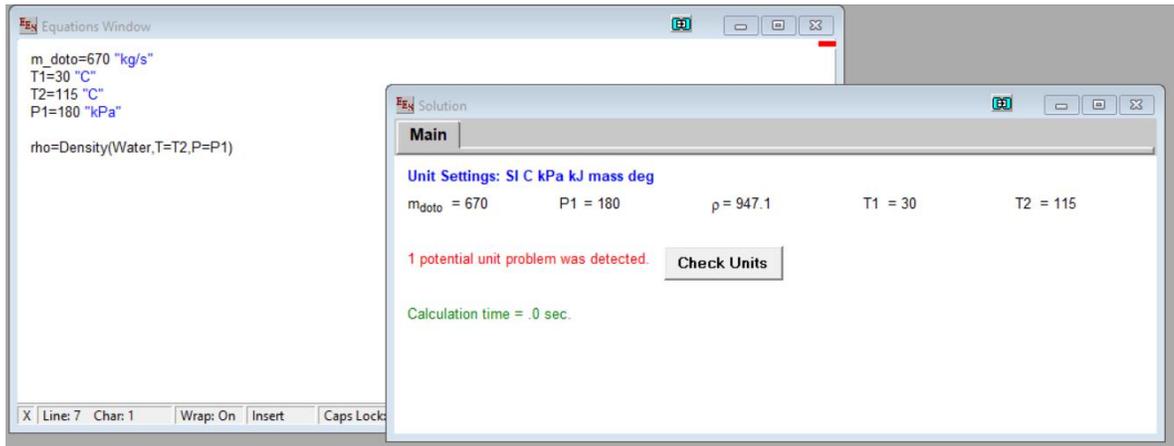


Figura 2.9. Densidad del agua geotérmica a salida de Flashers

El cálculo resultante (Figura 9) indica que la densidad es de  $\rho=947.1 \text{ kg/m}^3$

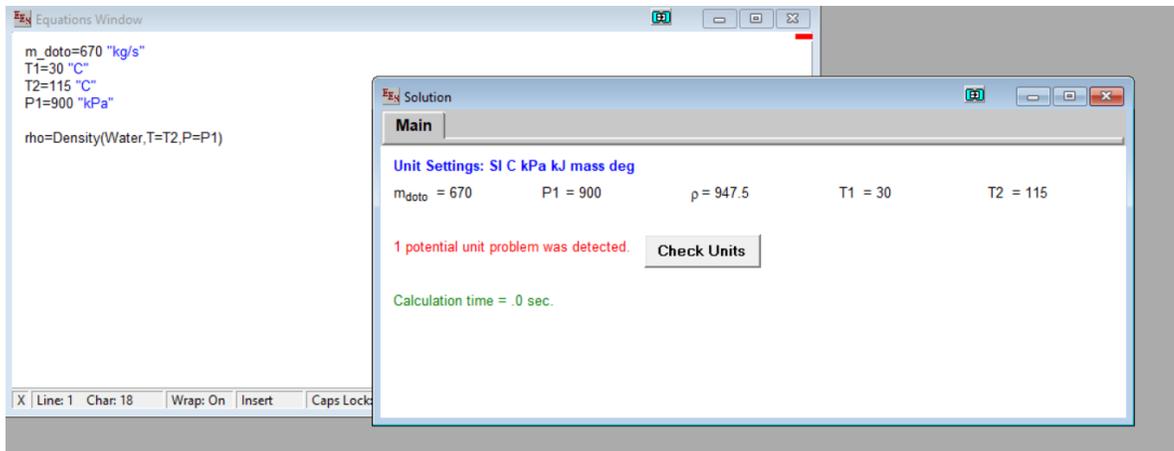


Figura 2.10. Cálculo de densidad de agua según condiciones operativas actuales

El cálculo determinó la densidad del agua según los parámetros operativos actuales (Figura 2.10): presión de 9 Bar, temperatura de 115 °C aproximadamente, flujo másico a 670 aproximadamente. Como resultado la densidad es de  $\rho=947.1 \text{ kg/m}^3$ . Haciendo uso de estos datos se procede a determinar el tiempo que tardaría en llenarse el acumulador.

Datos:

$$v = 8000m^3$$

$$\dot{m} = 673 \text{ kg/s}$$

$$\rho = 947.1 \text{ kg/m}^3$$

$$v = \left(\frac{\dot{m}}{\rho}\right) t$$

$$t = \frac{v}{\left(\frac{\dot{m}}{\rho}\right)} = \frac{8000m^3}{\left(\frac{673 \text{ kg/s}}{947 \text{ kg/m}^3}\right)}$$

$t = 3.12 \text{ h} = 3 \text{ horas y } 7 \text{ minutos aproximadamente}$

El análisis previo determina que para los parámetros actuales se dispondrá de un aproximado de **3 horas y 7 minutos** para reestablecer la funcionalidad de reinyectar el agua geotérmica. Sin embargo, por seguridad no se recomienda llevar el nivel del acumulador de agua a su capacidad máxima, pues la presión hidrostática puede comprometer la estabilidad de las paredes de concreto, por lo tanto, se considera un nivel máximo a 5,000 m<sup>3</sup>.

El resultado con la medida de seguridad anteriormente descrita revela que se dispone aproximadamente de **2 horas** para llegar al nivel del tanque seguro.

El escenario anterior no contempla la capacidad que tiene el sistema de reinyectar un porcentaje cercano al 55.7% del agua sin la presión de las bombas centrifugas, actualmente el flujo másico que puede reinyectarse es de 375 kg/s por lo tanto se plantea nuevamente las interrogantes.

$$v = 8000m^3$$

$$\dot{m}_T = (673 - 375)\text{kg/s} = 298 \text{ kg/s}$$

$$\rho = 947.1 \text{ kg/m}^3$$

$$v = \left(\frac{\dot{m}}{\rho}\right) t$$

$$t = \frac{v}{\left(\frac{\dot{m}}{\rho}\right)} = \frac{8000m^3}{\left(\frac{298 \text{ kg/s}}{947 \text{ kg/m}^3}\right)}$$

$t = 7 \text{ horas y } 3 \text{ minutos aproximadamente}$

Para un volumen del tanque de 5,000 m<sup>3</sup> se tiene un tiempo estimado de **4 horas y 24 minutos**.

Los resultados equivalen al tiempo en que la CG podría continuar su operación a plena carga, posterior a las anteriores consideraciones, deberá evaluarse tomar decisiones que probablemente comprometan la generación de energía, como reducir carga (ingresar menos flujo másico a la turbina) o en el peor de los casos detener la generación de energía completamente.

El objetivo operativo es asegurar que la central geotérmica continúe generando con normalidad, por lo cual existen dos bombas centrífugas de eje vertical con capacidad de 280 kg/s, estas son de emergencia cuyo propósito es disponer el agua que es almacenada, en casos de anomalías. Cuando el nivel del tanque sea considerablemente alto, pueden ser activadas. Según cálculos el tiempo que demoraría en disponer del agua, a un nivel cercano a 5,000 m<sup>3</sup> será de **4 horas y 41 minutos**.

En conclusión, considerando aspectos de seguridad para no comprometer la estabilidad del tanque, el tiempo que tardaría en llenarse sería de 4 horas y 24 minutos. Si se activa la bomba de emergencia, el tiempo en vaciarse sería de 4 horas y 41 minutos. Una sutil diferencia de 17 minutos que podría mantener un relativo equilibrio entre la generación y la disposición de las aguas, sin embargo, sería recomendable bajar carga para aumentar esta diferencia hasta que la funcionalidad del sistema de bombeo sea reestablecida.

Según lo descrito anteriormente, el sistema de bombeo se clasifica con una criticidad muy alta, pues si se perdiera la capacidad de reinyectar el agua geotérmica, eventualmente se deberá tomar la decisión de bajar carga, es decir, generar menos energía para tener menos agua geotérmica resultante que disponer y en el peor de los casos dejar de generar completamente.

El análisis previo revela la importancia que tiene la disposición de las aguas hacia el campo de reinyección; es posible concluir, que si se pierde la funcionalidad operativa de la estación de bombeo, la generación de energía eléctrica se verá comprometida. *El sistema de bombeo tiene una alta criticidad para la generación en la central geotérmica*

#### **2.4. Mantenimiento basado en confiabilidad**

Con base en la premisa establecida anteriormente, resulta imperativo desarrollar una estrategia para garantizar que el sistema de bombeo **no deje de funcionar**, es decir, **mantener** la reinyección de agua geotérmica.

A continuación, se analiza la alternativa de implementar un “mantenimiento a la medida”, que tenga como propósito evitar o reducir la frecuencia de fallos potenciales que pongan en riesgo la funcionalidad del sistema, esto equivale a la posibilidad de dejar de generar energía y el elevado costo que conlleva un mantenimiento correctivo.

A lo largo de los años, el desarrollo del mantenimiento de equipos ha tenido una evolución a mejora que ha pasado de ser considerado un gasto innecesario en la década de los 60's, a una necesidad que no puede ni debe ser ignorada.

Durante esta evolución también fueron cambiando los modelos de mantenimiento y entre ellos nació el (RCM) *Reliability Centred Maintenance*, como sus siglas en inglés, cuya definición indica que es un *proceso utilizado para determinar qué se debe hacer para asegurar que cualquier activo físico continúe haciendo lo que sus usuarios quieren que haga en su contexto operacional actual* (Moubray, 2004).

### 2.4.1. Análisis de criticidad de equipos

Considerando únicamente el ciclo de agua geotérmica, el primer punto es el separador ciclónico (pozos productores), posteriormente la estación de bombeo y finalmente los pozos reinyectores. La mayor cantidad de equipos con partes móviles y rotativas se encuentran en el sistema de bombeo (específicamente en las bombas centrifugas), por lo tanto, sufren mayor desgaste por tiempo operativo. El mantenimiento basado en confiabilidad se enfoca en aplicar mayor atención a los equipos que comprometan la funcionalidad del sistema.

Una vez determinado el volumen de los equipos (inventario), mayor a 650 elementos involucrados en el “ciclo de agua geotérmica”, clasificados según área, tipo, descripción y código (Tabla 2), se aplicó un análisis de criticidad para determinar cuáles de estos comprometen la funcionalidad del sistema, es decir, si fallan se pierde el objetivo de reinyectar agua geotérmica. El análisis se basa en la Ecuación 4.

*Tabla 2. Extracto de volumen de equipos en sistema de reinyección de agua geotérmica*

Área	Cant. Equipos	Tipo	Descripción	Código
Pozo Productor #1	1	Separador Ciclónico		SC1-001
Pozo Productor #1	1	Válvula Mecánica	Compuerta, 10", Flageada, WCB, Clase 300.	SC1-VM001
Pozo Productor #1	1	Válvula Mecánica	Compuerta, 10", Flageada, WCB, Clase 300.	SC1-VM002
Pozo Productor #1	1	Válvula Mecánica	Compuerta, 10", Flageada, WCB, Clase 300.	SC1-VM003
Pozo Productor #1	1	Válvula Mecánica	Compuerta, 4", Flageada, WCB, Clase 300.	SC1-VM004
Pozo Productor #1	1	Válvula Mecánica	Compuerta, 2", a rosca, Clase 800.	SC1-VM005
Pozo Productor #1	1	Válvula Mecánica	Compuerta, 2", Flageada, Clase 300.	SC1-VM006
Pozo Productor #1	1	Válvula Mecánica	Compuerta, 2", a Soldar, Clase 800.	SC1-VM007
Pozo Productor #1	1	Válvula Mecánica	Compuerta, 2", a Soldar, Clase 800.	SC1-VM008
Pozo Productor #1	1	Válvula Mecánica	Compuerta, 2", a Soldar, Clase 800.	SC1-VM009
Pozo Productor #1	1	Transmisor de presión	Marca: Rosemount, conexión de 1/2.	SC1-TP001
Pozo Productor #1	1	Transmisor de temperatura	Marca: Yokogawa, conexión de 1/2.	SC1-TT001
Pozo Productor #1	1	Manómetro	Marca: Reotemp, de 0 - 40 kg/cm2.	SC1-M001
Pozo Productor #1	1	Termómetro	Marca: Fima, de 0 - 200 grados C, rosca de 1/2.	SC1-T001
Pozo Productor #1	1	Caudalímetro	Marca: Krone	SC1-C001

*Ecuación 3. Criticidad = Frecuencia de Fallos × Consecuencias*

Donde la frecuencia de fallos es el número de fallos en un tiempo determinado, tomando como referencia un software de mantenimiento, mientras que las consecuencias están relacionadas directamente el impacto de seguridad y salud, impacto al medio ambiente, impacto a la producción y costo de mantenimiento. (Moubray, 2004)

Los resultados revelaron, como puede verse en la Figura 9, que las 4 bombas del sistema de bombeo tienen la más alta criticidad.

SC14-1	SC14-2	SC14-3	SC14-4	SC14-5	SC14-6	SC14-7	SC14-8	SC14-9	SC14-10	SC14-11	SC14-12	SC14-13	SC14-14	SC14-15	SC14-16	SC14-17	SC14-18	SC14-19	SC14-20	SC14-21	SC14-22	SC14-23	SC14-24	SC14-25	SC14-26	SC14-27	SC14-28	SC14-29	SC14-30	SC14-31	SC14-32	SC14-33	SC14-34	SC14-35	SC14-36	SC14-37	SC14-38	SC14-39	SC14-40	SC14-41	SC14-42	SC14-43	SC14-44	SC14-45	SC14-46	SC14-47	SC14-48	SC14-49	SC14-50	SC14-51	SC14-52	SC14-53	SC14-54	SC14-55	SC14-56	SC14-57	SC14-58	SC14-59	SC14-60	SC14-61	SC14-62	SC14-63	SC14-64	SC14-65	SC14-66	SC14-67	SC14-68	SC14-69	SC14-70	SC14-71	SC14-72	SC14-73	SC14-74	SC14-75	SC14-76	SC14-77	SC14-78	SC14-79	SC14-80	SC14-81	SC14-82	SC14-83	SC14-84	SC14-85	SC14-86	SC14-87	SC14-88	SC14-89	SC14-90	SC14-91	SC14-92	SC14-93	SC14-94	SC14-95	SC14-96	SC14-97	SC14-98	SC14-99	SC14-100	SC14-101	SC14-102	SC14-103	SC14-104	SC14-105	SC14-106	SC14-107	SC14-108	SC14-109	SC14-110	SC14-111	SC14-112	SC14-113	SC14-114	SC14-115	SC14-116	SC14-117	SC14-118	SC14-119	SC14-120	SC14-121	SC14-122	SC14-123	SC14-124	SC14-125	SC14-126	SC14-127	SC14-128	SC14-129	SC14-130	SC14-131	SC14-132	SC14-133	SC14-134	SC14-135	SC14-136	SC14-137	SC14-138	SC14-139	SC14-140	SC14-141	SC14-142	SC14-143	SC14-144	SC14-145	SC14-146	SC14-147	SC14-148	SC14-149	SC14-150	SC14-151	SC14-152	SC14-153	SC14-154	SC14-155	SC14-156	SC14-157	SC14-158	SC14-159	SC14-160	SC14-161	SC14-162	SC14-163	SC14-164	SC14-165	SC14-166	SC14-167	SC14-168	SC14-169	SC14-170	SC14-171	SC14-172	SC14-173	SC14-174	SC14-175	SC14-176	SC14-177	SC14-178	SC14-179	SC14-180	SC14-181	SC14-182	SC14-183	SC14-184	SC14-185	SC14-186	SC14-187	SC14-188	SC14-189	SC14-190	SC14-191	SC14-192	SC14-193	SC14-194	SC14-195	SC14-196	SC14-197	SC14-198	SC14-199	SC14-200	SC14-201	SC14-202	SC14-203	SC14-204	SC14-205	SC14-206	SC14-207	SC14-208	SC14-209	SC14-210	SC14-211	SC14-212	SC14-213	SC14-214	SC14-215	SC14-216	SC14-217	SC14-218	SC14-219	SC14-220	SC14-221	SC14-222	SC14-223	SC14-224	SC14-225	SC14-226	SC14-227	SC14-228	SC14-229	SC14-230	SC14-231	SC14-232	SC14-233	SC14-234	SC14-235	SC14-236	SC14-237	SC14-238	SC14-239	SC14-240	SC14-241	SC14-242	SC14-243	SC14-244	SC14-245	SC14-246	SC14-247	SC14-248	SC14-249	SC14-250	SC14-251	SC14-252	SC14-253	SC14-254	SC14-255	SC14-256	SC14-257	SC14-258	SC14-259	SC14-260	SC14-261	SC14-262	SC14-263	SC14-264	SC14-265	SC14-266	SC14-267	SC14-268	SC14-269	SC14-270	SC14-271	SC14-272	SC14-273	SC14-274	SC14-275	SC14-276	SC14-277	SC14-278	SC14-279	SC14-280	SC14-281	SC14-282	SC14-283	SC14-284	SC14-285	SC14-286	SC14-287	SC14-288	SC14-289	SC14-290	SC14-291	SC14-292	SC14-293	SC14-294	SC14-295	SC14-296	SC14-297	SC14-298	SC14-299	SC14-300	SC14-301	SC14-302	SC14-303	SC14-304	SC14-305	SC14-306	SC14-307	SC14-308	SC14-309	SC14-310	SC14-311	SC14-312	SC14-313	SC14-314	SC14-315	SC14-316	SC14-317	SC14-318	SC14-319	SC14-320	SC14-321	SC14-322	SC14-323	SC14-324	SC14-325	SC14-326	SC14-327	SC14-328	SC14-329	SC14-330	SC14-331	SC14-332	SC14-333	SC14-334	SC14-335	SC14-336	SC14-337	SC14-338	SC14-339	SC14-340	SC14-341	SC14-342	SC14-343	SC14-344	SC14-345	SC14-346	SC14-347	SC14-348	SC14-349	SC14-350	SC14-351	SC14-352	SC14-353	SC14-354	SC14-355	SC14-356	SC14-357	SC14-358	SC14-359	SC14-360	SC14-361	SC14-362	SC14-363	SC14-364	SC14-365	SC14-366	SC14-367	SC14-368	SC14-369	SC14-370	SC14-371	SC14-372	SC14-373	SC14-374	SC14-375	SC14-376	SC14-377	SC14-378	SC14-379	SC14-380	SC14-381	SC14-382	SC14-383	SC14-384	SC14-385	SC14-386	SC14-387	SC14-388	SC14-389	SC14-390	SC14-391	SC14-392	SC14-393	SC14-394	SC14-395	SC14-396	SC14-397	SC14-398	SC14-399	SC14-400	SC14-401	SC14-402	SC14-403	SC14-404	SC14-405	SC14-406	SC14-407	SC14-408	SC14-409	SC14-410	SC14-411	SC14-412	SC14-413	SC14-414	SC14-415	SC14-416	SC14-417	SC14-418	SC14-419	SC14-420	SC14-421	SC14-422	SC14-423	SC14-424	SC14-425	SC14-426	SC14-427	SC14-428	SC14-429	SC14-430	SC14-431	SC14-432	SC14-433	SC14-434	SC14-435	SC14-436	SC14-437	SC14-438	SC14-439	SC14-440	SC14-441	SC14-442	SC14-443	SC14-444	SC14-445	SC14-446	SC14-447	SC14-448	SC14-449	SC14-450	SC14-451	SC14-452	SC14-453	SC14-454	SC14-455	SC14-456	SC14-457	SC14-458	SC14-459	SC14-460	SC14-461	SC14-462	SC14-463	SC14-464	SC14-465	SC14-466	SC14-467	SC14-468	SC14-469	SC14-470	SC14-471	SC14-472	SC14-473	SC14-474	SC14-475	SC14-476	SC14-477	SC14-478	SC14-479	SC14-480	SC14-481	SC14-482	SC14-483	SC14-484	SC14-485	SC14-486	SC14-487	SC14-488	SC14-489	SC14-490	SC14-491	SC14-492	SC14-493	SC14-494	SC14-495	SC14-496	SC14-497	SC14-498	SC14-499	SC14-500	SC14-501	SC14-502	SC14-503	SC14-504	SC14-505	SC14-506	SC14-507	SC14-508	SC14-509	SC14-510	SC14-511	SC14-512	SC14-513	SC14-514	SC14-515	SC14-516	SC14-517	SC14-518	SC14-519	SC14-520	SC14-521	SC14-522	SC14-523	SC14-524	SC14-525	SC14-526	SC14-527	SC14-528	SC14-529	SC14-530	SC14-531	SC14-532	SC14-533	SC14-534	SC14-535	SC14-536	SC14-537	SC14-538	SC14-539	SC14-540	SC14-541	SC14-542	SC14-543	SC14-544	SC14-545	SC14-546	SC14-547	SC14-548	SC14-549	SC14-550	SC14-551	SC14-552	SC14-553	SC14-554	SC14-555	SC14-556	SC14-557	SC14-558	SC14-559	SC14-560	SC14-561	SC14-562	SC14-563	SC14-564	SC14-565	SC14-566	SC14-567	SC14-568	SC14-569	SC14-570	SC14-571	SC14-572	SC14-573	SC14-574	SC14-575	SC14-576	SC14-577	SC14-578	SC14-579	SC14-580	SC14-581	SC14-582	SC14-583	SC14-584	SC14-585	SC14-586	SC14-587	SC14-588	SC14-589	SC14-590	SC14-591	SC14-592	SC14-593	SC14-594	SC14-595	SC14-596	SC14-597	SC14-598	SC14-599	SC14-600	SC14-601	SC14-602	SC14-603	SC14-604	SC14-605	SC14-606	SC14-607	SC14-608	SC14-609	SC14-610	SC14-611	SC14-612	SC14-613	SC14-614	SC14-615	SC14-616	SC14-617	SC14-618	SC14-619	SC14-620	SC14-621	SC14-622	SC14-623	SC14-624	SC14-625	SC14-626	SC14-627	SC14-628	SC14-629	SC14-630	SC14-631	SC14-632	SC14-633	SC14-634	SC14-635	SC14-636	SC14-637	SC14-638	SC14-639	SC14-640	SC14-641	SC14-642	SC14-643	SC14-644	SC14-645	SC14-646	SC14-647	SC14-648	SC14-649	SC14-650	SC14-651	SC14-652	SC14-653	SC14-654	SC14-655	SC14-656	SC14-657	SC14-658	SC14-659	SC14-660	SC14-661	SC14-662	SC14-663	SC14-664	SC14-665	SC14-666	SC14-667	SC14-668	SC14-669	SC14-670	SC14-671	SC14-672	SC14-673	SC14-674	SC14-675	SC14-676	SC14-677	SC14-678	SC14-679	SC14-680	SC14-681	SC14-682	SC14-683	SC14-684	SC14-685	SC14-686	SC14-687	SC14-688	SC14-689	SC14-690	SC14-691	SC14-692	SC14-693	SC14-694	SC14-695	SC14-696	SC14-697	SC14-698	SC14-699	SC14-700	SC14-701	SC14-702	SC14-703	SC14-704	SC14-705	SC14-706	SC14-707	SC14-708	SC14-709	SC14-710	SC14-711	SC14-712	SC14-713	SC14-714	SC14-715	SC14-716	SC14-717	SC14-718	SC14-719	SC14-720	SC14-721	SC14-722	SC14-723	SC14-724	SC14-725	SC14-726	SC14-727	SC14-728	SC14-729	SC14-730	SC14-731	SC14-732	SC14-733	SC14-734	SC14-735	SC14-736	SC14-737	SC14-738	SC14-739	SC14-740	SC14-741	SC14-742	SC14-743	SC14-744	SC14-745	SC14-746	SC14-747	SC14-748	SC14-749	SC14-750	SC14-751	SC14-752	SC14-753	SC14-754	SC14-755	SC14-756	SC14-757	SC14-758	SC14-759	SC14-760	SC14-761	SC14-762	SC14-763	SC14-764	SC14-765	SC14-766	SC14-767	SC14-768	SC14-769	SC14-770	SC14-771	SC14-772	SC14-773	SC14-774	SC14-775	SC14-776	SC14-777	SC14-778	SC14-779	SC14-780	SC14-781	SC14-782	SC14-783	SC14-784	SC14-785	SC14-786	SC14-787	SC14-788	SC14-789	SC14-790	SC14-791	SC14-792	SC14-793	SC14-794	SC14-795	SC14-796	SC14-797	SC14-798	SC14-799	SC14-800	SC14-801	SC14-802	SC14-803	SC14-804	SC14-805	SC14-806	SC14-807	SC14-808	SC14-809	SC14-810	SC14-811	SC14-812	SC14-813	SC14-814	SC14-815	SC14-816	SC14-817	SC14-818	SC14-819	SC14-820	SC14-821	SC14-822	SC14-823	SC14-824	SC14-825	SC14-826	SC14-827	SC14-828	SC14-829	SC14-830	SC14-831	SC14-832	SC14-833	SC14-834	SC14-835	SC14-836	SC14-837	SC14-838	SC14-839	SC14-840	SC14-841	SC14-842	SC14-843	SC14-844	SC14-845	SC14-846	SC14-847	SC14-848	SC14-849	SC14-850	SC14-851	SC14-852	SC14-853	SC14-854	SC14-855	SC14-856	SC14-857	SC14-858	SC14-859	SC14-860	SC14-861	SC14-862	SC14-863	SC14-864	SC14-865	SC14-866	SC14-867	SC14-868	SC14-869	SC14-870	SC14-871	SC14-872	SC14-873	SC14-874	SC14-875	SC14-876	SC14-877	SC14-878	SC14-879	SC14-880	SC14-881	SC14-882	SC14-883	SC14-884	SC14-885	SC14-886	SC14-887	SC14-888	SC14-889	SC14-890	SC14-891	SC14-892	SC14-893	SC14-894	SC14-895	SC14-896	SC14-897	SC14-898	SC14-899	SC14-900	SC14-901	SC14-902	SC14-903	SC14-904	SC14-905	SC14-906	SC14-907	SC14-908	SC14-909	SC14-910	SC14-911	SC14-912	SC14-913	SC14-914	SC14-915	SC14-916	
--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	--

**Tabla 3. Extracto de análisis de fallas**

CATEGORÍA DE FALLA	DESCRIPCIÓN DE LA FALLA	CAUSAS	EVALUACIÓN DE RIESGO				PUNTAJE							
			SEVERIDAD	FRECUENCIA	EXPOSICIÓN	DETECTABILIDAD								
FALLO DE SELLO MECÁNICO	FALLOS DE OPERACIÓN	OPERACIÓN FUERA DE PARÁMETROS NORMALES	PERSONAL CAPACITADO	MAL	RUIDO EXCESIVO, VIBRACIONES Y AUMENTO DE TEMPERATURA	NO	SI	SI	NO	NO	2	6	2	24
		OPERACIÓN A EXCESIVA BAJA VELOCIDAD	FALLO DE INSTRUMENTACIÓN	DE	RUIDO EXCESIVO, VIBRACIONES Y AUMENTO DE TEMPERATURA	NO	SI	SI	NO	SI	3	6	4	72
		OPERACIÓN EN SECO			RUIDO EXCESIVO, VIBRACIONES Y AUMENTO DE TEMPERATURA	NO	SI	SI	NO	SI	6	2	2	24
	FALLAS MECÁNICAS	MAL COLOCACIÓN DE SELLO	PERSONAL CAPACITADO	MAL	RUIDO EXCESIVO, VIBRACIONES Y AUMENTO DE TEMPERATURA	NO	SI	NO	SI	NO	3	3	5	45
		EJES DESALINEADOS			RUIDO EXCESIVO, VIBRACIONES Y AUMENTO DE TEMPERATURA	NO	SI	NO	SI	NO	4	5	6	120
		ASPAS DE IMPULSOR DESBALANCEADAS	ACUMULACIÓN DE SÍLICE		RUIDO EXCESIVO, VIBRACIONES Y AUMENTO DE TEMPERATURA	NO	SI	NO	SI	NO	5	4	6	120
	FALLAS DE LOS COMPONENTES DEL SELLO	DESGASTE NORMAL			RUIDOS Y FUGA EXCESIVA DE AGUA	NO	SI	NO	NO	NO	3	3	6	54
		INCOMPATIBILIDAD DE MATERIALES DEL SELLO	MALA ESPECIFICACIÓN DE MATERIAL	DE	RUIDOS Y FUGA EXCESIVA DE AGUA	NO	SI	NO	SI	NO	3	2	6	36
			ERROR DE PROVEEDOR		RUIDOS Y FUGA EXCESIVA DE AGUA	NO	SI	NO	SI	NO	3	2	6	36

El mantenimiento basado en confiabilidad a la medida, tiene como propósito anticipar una anomalía funcional, por lo tanto, una vez se identifique las fallas más probables y la frecuencia de ellas se puede realizar un plan detallado. Durante la elaboración del AMFEC se determina el “Numero de Ponderación de Riesgos” (NPR), expuesto al extremo derecho de la Tabla 3, cuyo objetivo es facilitar la identificación de los puntos más críticos en base a riesgo operativo y frecuencia de fallos.

La implementación considera un avance tecnológico con el aprovechamiento de técnicas de mantenimiento predictivo, como se detalla en la Tabla 4. El estudio contempla la implementación de otros tipos de mantenimiento como el preventivo por inspección y planificado. Sin embargo, considerando la complejidad y resultado que implica el predictivo este apartado se enfoca en él.

**Tabla 4. Técnicas a utilizar en el sistema de bombeo de reinyección de agua geotérmica**

<b>NOMENCLATURA</b>	<b>TÉCNICA DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO</b>
<b>PD-01</b>	<b>MEDICIÓN DE AISLAMIENTO DE VANADO</b>
<b>PD-02</b>	<b>ANÁLISIS DE VIBRACIONES</b>
<b>PD-03</b>	<b>ANÁLISIS FRECUENCIAL</b>
<b>PD-04</b>	<b>ANÁLISIS DE ULTRASONIDO</b>
<b>PD-05</b>	<b>ANÁLISIS QUÍMICO</b>
<b>PD-06</b>	<b>ANÁLISIS DE ACEITES</b>

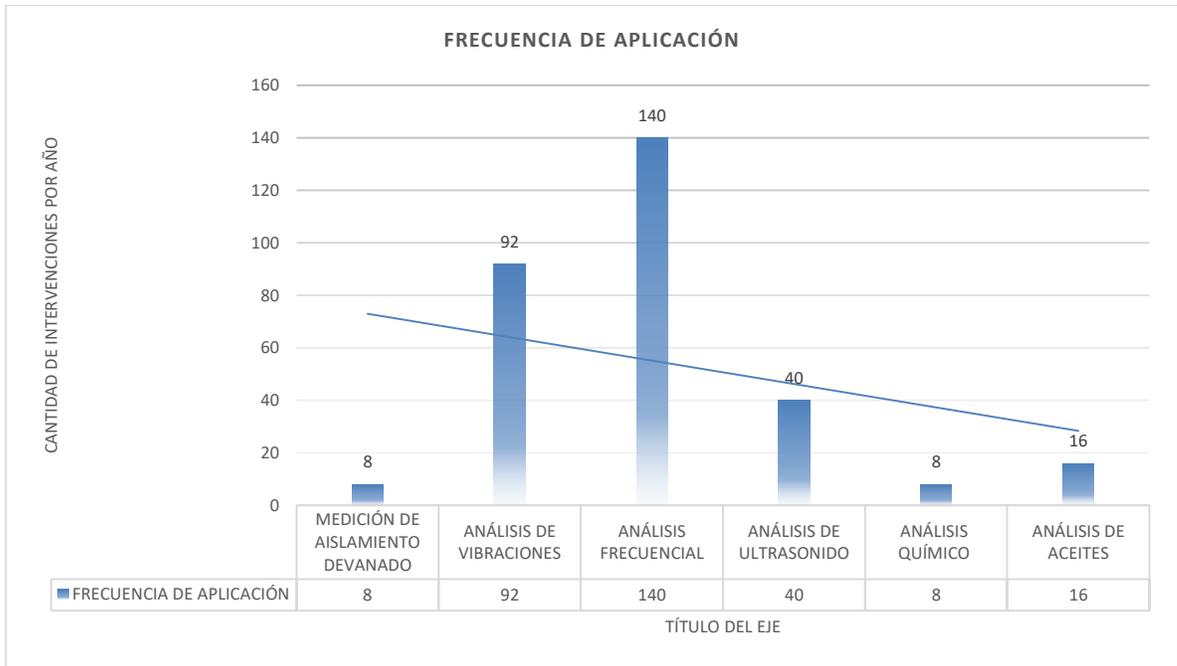
Una vez se han identificado las técnicas de mantenimiento necesarias para conocer los parámetros operativos de los equipos y apoyándose en el NPR, es posible desarrollar un plan de mantenimiento detallado y conciso, que involucre la frecuencia, descrita en el extracto de la Tabla 4, en la que se harán los análisis que se muestran en las Tabla 4.

Tabla 5. Extracto de plan de mantenimiento

MODOS DE FALLO				PLAN DE MANTENIMIENTO													
CLASIFICACIÓN A	CLASIFICACIÓN B	CLASIFICACIÓN C	CLASIFICACIÓN D	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC		
FALLO MOTOR	RODAMIENTOS ATASCADOS	ENTRADA DE AGUA O SUCIEDAD	FALLO DE RETENEDOR	8													
			MALA SELECCIÓN DE RODAMIENTOS	9		PD-02						PD-02					
		FALLO DE ENGRASE	PERIODICIDAD DE ENGRASE INADECUADA	10			PD-03			PD-03			PD-03			PD-03	
		DESALINEACIÓN CONJUNTO		11	PD-02												
			PERSONAL CAPACITADO	12													
		MAL MONTAJE	MALA SELECCIÓN DE RODAMIENTOS	13													

Las técnicas expuestas anteriormente representan una inversión considerable al monitoreo por inspección, conocido también como “mantenimiento preventivo por inspección”; sin embargo, representan un avance en la identificación de fallos que pueden afectar, como es el caso del sistema de reinyección en estudio, a toda la central geotermia.

La Grafica 1 muestra la frecuencia por año que deberán aplicarse la respectiva técnica de mantenimiento predictivo a cada bomba para conocer el comportamiento operativo en comparación al patrón de diseño.



Gráfica 1. Frecuencia de aplicación de técnicas predictivas

La hipótesis queda establecida para criterio de ejecución donde será necesario realizar una evaluación completa que involucre un estudio económico, operativo y capacitación del personal que aplicará el plan de mantenimiento basado en confiabilidad propuesto.

## 2.5. Instrumentación para mantenimiento predictivo

Uno de los propósitos de la instrumentación es la medición de parámetros relevantes para la operatividad de equipos en planta y campo, es decir establece las bases de para monitoreo en tiempo real que de acceso a las mediciones necesarias de los parámetros más relevantes; también tiene como propósito fijar las bases para un mantenimiento predictivo en función a análisis estadísticos según históricos; asimismo, la instrumentación industrial proporciona la información operativa para alimentar a los sistemas de control encargados de operar automáticamente los dispositivos y garantizar protección a funciones anómalas.

Continuando con el mantenimiento basado en confiabilidad (RCM) detallado en el apartado anterior, que se enfoca aplicar técnicas a la medida, otro tipo de mantenimiento está un peldaño más alto, el **mantenimiento predictivo**, que como su nombre lo indica, busca predecir cuándo se dará una falla.

Los resultados de los análisis de la aplicación de las técnicas según el plan de mantenimiento establecido, permitirán conocer si existen anomalías en el funcionamiento; la frecuencia (cantidad de veces que debe hacerse) está establecida con base a históricos de fallos del sistema de bombeo par, reinyección de agua geotérmica; posterior a la implementación deberá hacerse una evaluación de retroalimentación, con una validez de datos de por lo menos un año, que responda interrogantes como ¿Mejoró la operatividad del sistema? ¿se redujo la cantidad de fallas al año? ¿aumentó la disponibilidad del sistema? entre otras.

Las interrogantes serán respondidas en un futuro posterior a la implementación, junto a ellas nace una mas ¿es posible saber si las bombas centrifugas están operando normalmente en tiempo real?; **la respuesta es sí**, pero se requiere una inversión considerable de instrumentos de medición y personal altamente capacitado que desarrolle modelos predictivos, la Figura 13 es una representación gráfica de una analogía como resultado de un modelo analítico predictivo. Es una de las más efectivas formas de disminuir los fallos operacionales y garantizar que la funcionalidad del equipo no resulte comprometida; sobre todo en equipos con alta criticad como el sistema de reinyección en una central geotermia.

unit	cycle	op1	op2	op3	sensor1	sensor2	
0	1	1	34.9983	0.8400	100.0	449.44	555.32
1	1	2	41.9982	0.8408	100.0	445.00	549.90
2	1	3	24.9988	0.6218	60.0	462.54	537.31
3	1	4	42.0077	0.8416	100.0	445.00	549.51
4	1	5	25.0005	0.6203	60.0	462.54	537.07

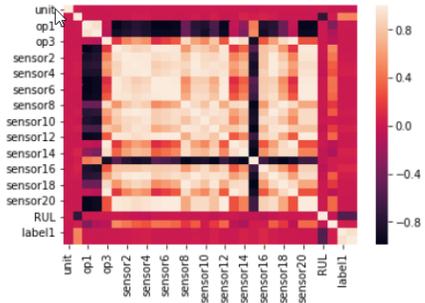


Figura 2.12. Ejemplo de resultado de análisis predictivo según instrumentación en sitio

El análisis de criticidad como resultado del plan de mantenimiento RCM puede ser usado para determinar en qué puntos debo implementar o reforzar la instrumentación de medición. Económicamente no sería rentable instalar instrumentación en todo el ciclo de agua si la criticidad está en el sistema de bombeo. Cabe mencionar que esta implementación no sustituye el plan de mantenimiento, pero contribuirá a calibrar el modelo.

*Soluciones solidas requieren previsión de tiempo, sacrificio, paciencia y disciplina; pero tienen ventajas a largo plazo. La diferencia básica entre soluciones sólidas y las soluciones rápidas es la inversión. Invertir muy poco en la búsqueda de la "Excelencia en confiabilidad" solo conduce al fracaso. Como cualquier inversión, la inversión de mantenimiento precede al retorno proactivo.*

Será criterio de los responsables la evaluación técnica y financiera de la implementación que parte como base en el estudio evaluativo de RCM descrito anteriormente. Sin embargo, es posible dar certeza que el predictivo puede disminuir las fallas, tiempos de paro y costos de reparación y aumentar proporcionalmente la fiabilidad del sistema.

### 3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. Los resultados de la evaluación del modelo de flujos para el sistema de bombeo, considerando 3 escenarios aparte del actual, reveló que la incorporación de una nueva tubería de acarreo hacia el campo geotérmico de reinyección podría contribuir a conservar la presión suministrada por las bombas, evitando pérdidas en proceso de disposición de aguas.
2. En caso de que el sistema de bombeo fallé, es decir, la capacidad de disponer el agua geotérmica de la central pierda por un periodo mayor a 4 horas y media, sería necesario tomar medidas que comprometan la generación de la central, reduciendo carga que conlleva a cierre de pozos productores.
3. Considerando la importancia del sistema de bombeo, es necesario implementar una estrategia para disminuir las probabilidades de fallas por medio de un plan de mantenimiento basado en confiabilidad, es decir, a la medida que tome en cuenta los parámetros más relevantes del sistema de bombeo. La implementación de un plan de mantenimiento puede representar una inversión considerable; sin embargo, es una medida necesaria para la seguridad operativa de la Central Geotérmica.
4. El sistema de bombeo está considerado con criticidad “muy alta” según el análisis de criticidad presentado en el apartado “Mantenimiento basado en confiabilidad” y considerando que en los escenarios no se contempla dejar de utilizarlo; otra estrategia es establecer las bases para un mantenimiento predictivo por medio de la implementación de instrumentación de monitoreo para, en un futuro, validar datos que permitan crear un modelo estadístico que contemple la frecuencia de fallo y anteponerse a la necesidades del sistema, es decir, anticipar las fallas en lugar de corregirlas.
5. Se recomienda continuar con el análisis y expandirlo a toda la central geotérmica, posteriormente comparar con los presentados en este documento y determinar los puntos más débiles no solo operativamente sino también para el bienestar de la central, campo, personal y demás. *Una cadena es tan fuerte como su eslabón más débil (Thomas Reid)*

#### 4. AGRADECIMIENTOS

Expresamos nuestra sincera gratitud a LaGeo SA de CV, Universidad de El Salvador, Universidad de las Naciones Unidas (UNU-GTP) instituciones responsables del desarrollo del Diplomado en Geotermia para América Latina edición 2019.

Al Ing. Oscar Cideos, experto en el área mecánica quien dio seguimiento a las etapas de desarrollo de esta investigación; por sus consejos y recomendaciones.

A la Licda. Patricia Jacobo, con vasta experiencia y conocimiento sobre el sistema de reinyección de agua geotérmica, su guía y consejos fueron invaluable.

Agradecimientos especiales a todos los profesores involucrados que compartieron toda su experiencia, conocimientos, apoyo experimental y de campo para culminar con éxito módulo tras módulo y llegando continuamente de la mano hasta este punto final que es la presentación del trabajo que refleja el progreso cosechado por ustedes.

## 5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- A.R.Diaz, E.Kaya, & S.J.Zarrouk. (2015). Reinjection in Geothermal Fields: A Worldwide Review Update. *Proceedings World Geothermal Congress*.
- Axelsson, G. (2012). ROLE AND MANAGEMENT OF GEOTHERMAL REINJECTION. *Short Course on Geothermal Development and Geothermal Wells*.
- Clarke, J., & McLeskey Jr, J. (2013). The constrained design space of double-flash geothermalpower plants.
- DiPippo, R. (2016). *Geothermal Power Plants. Principles, Applications, Case Studies and Environmental Impact* (Cuarta Edición ed.). North Dartmouth, Massachusetts, USA: Elsevier.
- Henríquez, J. L., & Aguirre, L. A. (2011). PIPING DESIGN: THE FUNDAMENTALS. *Short Course on Geothermal Drilling, Resource Development and Power Plants*.
- Kewiy, W. R. (2013). INJECTION AND PRODUCTION WELL TESTING IN THE GEOTHERMAL FIELDS OF SOUTHERN HENGILL AND REYKJANES. *GEOTHERMAL TRAINING PROGRAMME*, 7-8.
- Moubray, J. (2004). *Mantenimiento Centrado en Confiabilidad*. Aladon LLC.
- OLADE. (1980). Fase de desarrollo y explotación . *METODOLOGÍA DE EXPLORACIÓN Y EXPLOTACIÓN GEOTÉRMICA*, 68.
- Rubio, L. C., Guerrero Zabala, F. V., & Vergara Mendoza, M. F. (2012). Pruebas de inyektividad. *Pruebas de inyektividad en pozos inyectores, PLT*, 4-5.
- Stefansson, V.-D. (1997). GEOTHERMAL REINJECTION EXPERIENCE. . *Geothermics* Vol. 26, No. 1, pp. 99-139.



*Tabla A 1. Plan de mantenimiento predictivo basado en modelo RCM para sistema de reinyección de agua geotérmica.*

PLAN DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO				PLAN DE MANTENIMIENTO															
FALLOS FUNCIONALES	MODOS DE FALLO	CLASIFICACIÓN B	CLASIFICACIÓN C	CLASIFICACIÓN D	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC			
LA BOMBA CENTRIFUGA NO GIRA	FALLO MOTOR	EL MOTOR FUNCIONA SÓLO CON DOS FASES	FALLO DEVANADO DEL MOTOR	RUPTURA DE AISLAMIENTO DE DEVANADO	1												PD-01		
				SOBRECARGA DE MOTOR	2														
			FALLO CONEXIONES EN EL MOTOR	CONEXIÓN ELÉCTRICA INADECUADA	3														
		FALLO VENTILACIÓN	OBTURACIÓN REJILLA FILTRO ROTURA DEL VENTILADOR		DAÑOS POR CORROSIÓN	4													
				MAL MANTENIMIENTO	5														
				FATIGA EN ASPAS	6														
		RODAMIENTOS ATASCADOS	ENTRADA DE AGUA O SUCIEDAD		INGRESO DE MATERIAL A LAS ASPAS	7													
				FALLO DE RETENEDOR	8														
				MALA SELECCIÓN DE RODAMIENTOS	9		PD-02								PD-02				
		FALLO DE ENGRASE	PERIODICIDAD DE ENGRASE INADECUADA			10			PD-03			PD-03			PD-03			PD-03	
				DESALINEACIÓN CONJUNTO	11	PD-02													
				MAL MONTAJE	12														
	FALLO ACOPLAMIENTO	ROTURA CLAVIJA		PERSONAL CAPACITADO	13														
			FATIGA CLAVIJA	14	PD-04			PD-04			PD-04				PD-04				
			INSTALACIÓN INADECUADA	15															
	FALLO FIJACIÓN	DESAPRIETE TORNILLOS		MALA SELECCIÓN DE CLAVIJA	16														
			TORQUE INADECUADO DE INSTALACIÓN	17															
			FALTA DE THREADLOCK EN TORNILLOS	18															
	FALLO ELEMENTO ELÁSTICO	FATIGA DE ELEMENTO ELÁSTICO		RUPTURA DE TORNILLOS	19														
			MALA SELECCIÓN DE TORNILLOS	20															
			MATERIAL INADECUADO DE ELEMENTO ELÁSTICO	21															
	FALLO BOMBA	RODAMIENTOS ATASCADOS		ERROR DE PROVEEDOR	22														
			ENTRADA DE AGUA O SUCIEDAD	23															
			FALLO DE ENGRASE	24															
	RODAMIENTOS ATASCADOS	PERIODICIDAD DE ENGRASE INADECUADA			25			PD-03					PD-03						
			DESALINEACIÓN CONJUNTO	26	PD-03			PD-03			PD-03				PD-03				
			MAL MONTAJE	27															
	RODAMIENTOS ATASCADOS	PERSONAL NO CAPACITADO		MALA SELECCIÓN DE RODAMIENTOS	28														
			RODAMIENTOS ATASCADOS	29															
			INSERCIÓN DE PARTÍCULAS EN LA HOLGURA RODETE-CARCASA	30															
	RODAMIENTOS ATASCADOS	ACUMULACIÓN DE SÍLICE EN RODETE			31														
			RODAMIENTOS ATASCADOS	32															
			RODAMIENTOS ATASCADOS	33															
	FALLO EN TARIETA DE CONTROL	PISTAS DE TARIETA DE CONTROL QUEMADAS			32														

FALLO ARRANCADOR ELÉCTRICO	FALLO EN IGBT'S	ELEMENTOS ELECTRÓNICOS			33	
		INDEPENDIENTES QUEMADOS				
		IGBT'S EN CORTO			34	
	FALLO EN CONTACTOR AUXILIAR	IGBT'S QUEMADOS	MALA INSTALACIÓN DE	PERSONAL	MAL	35
			CONEXIONES	CAPACITADO		36
		CONTACTOS AUXILIARES			37	
		DAÑADOS				
		BOBINA DEL CONTACTOR EN			38	
		DAÑADA				
		DAÑO EN ESTRUCTURA DE	GOLPES A CONTACTOR		39	
FALLO PROGRAMACIÓN DEL ARRANCADOR	CORRUPCIÓN DE PROGRAMA DE	CONTROL	ERROR DE OPERACIÓN		40	
		PÉRDIDA DE MEMORIA DE	FALLA DE INTEGRADOS DE	MEMORIA	41	
	CONTROLADOR		PÉRDIDA DE ENERGÍA A	MEMORIA VOLÁTIL	42	
	PROGRAMACIÓN CON	PERSONAL	MAL	43		
	PARÁMETROS INCORRECTOS	CAPACITADO				
		ERROR	DE	44		
		DOCUMENTACIÓN				
	DAÑO EN PISTAS DE TARJETA DE	ENTRADA DE SUCIEDAD		45		
	CIRCUITOS	SOBRECARGA DE EQUIPO		46		
	FALLO INSTALACIÓN ELÉCTRICA	DE INSTALACIÓN ELÉCTRICA QUEMADA	FALLO EN DIMENSIONAMIENTO	DESCONOCIMIENTO DE	DE	47
DE INSTALACIÓN			CONDICIONES	DE		
OPERACIÓN						
MALA INSTALACIÓN DE		PERSONAL	MAL	48		
		CONEXIONES	CAPACITADO			
DAÑO EN PISTAS DE TARJETA DE		ENTRADA DE SUCIEDAD		49		
		CIRCUITOS	SOBRECARGA DE EQUIPO		50	
INSTALACIÓN ELÉCTRICA CORROÍDA		FALLO EN AISLAMIENTO DE	MALA ESPECIFICACIÓN DE	51		
		HUMEDAD	MATERIAL			
			ERROR DE PROVEEDOR		52	
BORNES DE CONEXIÓN DAÑADOS	MAL MANTENIMIENTO DE		53			
	INSTALACIÓN					
	MALA INSTALACIÓN DE	PERSONAL	MAL	54		
	CONEXIONES	CAPACITADO				
	EQUIPOS CON DEFECTOS DE	ERROR DE PROVEEDOR		55		
FABRICA						
EQUIPOS INADECUADOS PARA LAS	MALA ESPECIFICACIÓN DE	56				
CONDICIONES AMBIENTALES	EQUIPO					
PRESENTES	ERROR DE PROVEEDOR		57			