



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO**



**POSGRADO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA
MECÁNICA**

**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PRUEBAS DE UN
SISTEMA AIR-LIFT PARA EXTRACCIÓN DE
FLUIDOS GEOTÉRMICOS.**

TESIS

**PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS EN
INGENIERÍA MECÁNICA**

PRESENTA:

ING. JUAN PABLO ARRIAGA VILLAGRÁN

ASESORES:

DR. J JESÚS PACHECO IBARRA

DR. CARLOS RUBIO MAYA

**TESIS APOYADA POR EL CONSEJO NACIONAL DE HUMANIDADES CIENCIAS Y
TECNOLOGÍAS**



CONAHCYT

Morelia, Michoacán a Noviembre del 2023

AGRADECIMIENTOS

RESUMEN

La energía geotérmica ha tenido un gran desarrollo en las últimas décadas, debido al desarrollo tecnológico para la explotación de este recurso no solamente limitándose a yacimientos de alta entalpía, sino también el aprovechamiento de yacimientos de media y baja entalpía, los cuales son los recursos más abundantes en el planeta. Respecto a los recursos de media y baja entalpía, estos cuentan con características similares, siendo una de las principales, la temperatura a la que se encuentran, siendo otra característica en conjunto, su explotación, que en algunos casos no es posible mediante los métodos convencionales, sino que se requieren otro tipo técnicas, debido a que no fluye o no se mantiene constante su flujo. Dentro de las técnicas que propone la literatura para la explotación de un yacimiento geotérmico de manera no convencional, está la implementación de un sistema *air-lift*, el cual, si bien se ha probado con éxito en la industria petrolera, así como en bioreactores, el sistema cuenta con poca aplicación a la geotermia.

El sistema *air-lift* es ampliamente utilizado en la industria Petrolera y de gas, además de reactores de biomasa, donde se inyecta aire para lograr una mezcla bifásica, provocando una disminución en la densidad, con lo cual el fluido empieza a fluir hasta la superficie. En este tipo de aplicaciones, el diseño tanto del sistema como del cabezal de inyección de aire tiene una gran incidencia sobre el éxito del mismo. Los cabezales de inyección de aire son los encargados de crear las burbujas dentro del fluido del pozo geotérmico, a la vez de crear sus patrones, formas y distribución, con lo cual la efectividad de la mezcla logrará que el fluido se mueva. Por otra parte, el sistema debe ser dimensionado de manera correcta para que este no tenga un sobredimensionamiento, además de que el sistema de sujeción de la tubería de inyección de aire debe ser el adecuado para soportar las cargas generadas, junto con un sistema de seguridad que servirá para prevenir sobrecargas en el sistema, así como de prevenir cualquier intrusión del fluido del pozo dentro del sistema.

En base a lo anterior, en el presente trabajo se realizó una investigación para el diseño, construcción y pruebas de un sistema *air-lift* para extracción de energía de yacimientos geotérmicos de mediana y baja entalpía.", el cual se considera que de manera natural no fluye o no fluye mediante las técnicas convencionales de explotación. El desarrollo de las pruebas y el diseño del sistema *air-lift* se llevaron a cabo considerando las características mecánicas en un pozo geotérmico físico que se encuentra localizado en la comunidad de San Nicolás de Simirao, Municipio de Zinapecuaro, Michoacán. Se consideró un diseño que contiene todas las medidas de seguridad de acuerdo a su dimensionamiento, así como todas las características requeridas para lograr un funcionamiento óptimo.

Palabras clave: sistema *air-lift*, pozo geotérmico, mezcla bifásica, cabezales de inyección de aire, dimensionamiento.

ABSTRAC

Geothermal energy has had a great development in recent decades, due to the technological development for the exploitation of this resource not only limited to high enthalpy deposits, but also the use of medium and low enthalpy deposits, which are the most abundant resources on the planet. Regarding medium and low enthalpy resources, they have similar characteristics, one of the main ones being the temperature at which they are found, being another characteristic as a whole, their exploitation, which in some cases is not possible by conventional methods, but other techniques are required, because their flow does not flow or is not kept constant. Among the techniques proposed in the literature for the exploitation of a geothermal deposit in an unconventional way, is the implementation of an air-lift system, which, although it has been successfully tested in the oil industry, as well as in bioreactors, the system has little application to geothermal.

The air-lift system is widely used in the oil and gas industry, as well as biomass reactors, where air is injected to achieve a biphasic mixture, causing a decrease in density, with which the fluid begins to flow to the surface. In this type of application, the design of both the system and the air injection head has a great impact on the success of the system. The air injection heads are responsible for creating the bubbles within the geothermal well fluid, as well as creating its patterns, shapes and distribution, so the effectiveness of the mixture will make the fluid move. On the other hand, the system must be sized correctly so that it does not have an oversizing, in addition to the fastening system of the air injection pipe must be adequate to support the loads generated, together with a safety system that will serve to prevent overloads in the system, as well as prevent any intrusion of the well fluid into the system.

Based on the above, in the present work an investigation was carried out for the design, construction and testing of an air-lift system for energy extraction from medium and low enthalpy geothermal reservoirs. The development of the tests and the design of the air-lift system were carried out considering the mechanical characteristics in a physical geothermal well located in the community of San Nicolás de Simirao, Municipality of Zinapécuaro, Michoacán. A design that contains all the safety measures according to its dimensioning, as well as all the characteristics required to achieve optimal operation, was considered.

Contenido

AGRADECIMIENTOS.....	ii
RESUMEN	iii
ABSTRAC.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
ÍNDICE DE TABLAS.....	xii
NOMENCLATURA.....	xiii
OBJETIVO GENERAL	xv
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	xv
DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	xvi
HIPÓTESIS	xvii
CAPÍTULO I. ENERGÍA GEOTÉRMICA	1
1.1. INTRODUCCIÓN	2
1.2. ANTECEDENTES HISTÓRICOS.....	2
1.3. RECURSO GEOTÉRMICO.....	2
1.4. USOS DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA.....	4
1.4.1. TECNOLOGÍA UTILIZADA	5
1.5. ENERGÍA GEOTÉRMICA EN EL MUNDO.	9
1.5.1. GEOTERMIA EN MÉXICO.	11
1.6. ZONA DE INTERÉS.....	14
CAPÍTULO II.....	17
SISTEMA AIR-LIFT	17
2.1. INTRODUCCIÓN	18
2.2. TECNOLOGÍA AIR-LIFT	18
2.2.1. ESTUDIOS PREVIOS DE SISTEMAS AIR-LIFT.....	21
2.2.2. PROFUNDIDAD DE INMERSIÓN PARA LEVANTAR RELACIÓN ALTURA, S: L.....	22
2.2.3. REGÍMENES DE FLUJO EN BOMBAS DEL SISTEMA AIRLIFT	25
2.2.4. MODELOS PARA EL CALCULO DE SISTEMAS AIRLIFT	25
CAPÍTULO III.	33
DISEÑO DEL SISTEMA AIR-LIFT	33

3.1. ZONA GEOTÉRMICA Y DISEÑO CONCEPTUAL	34
3.2. DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA AIR-LIFT	37
3.2.1. TUBERÍA DE INYECCIÓN DE AIRE.....	38
3.2.2. CABEZALES DE INYECCIÓN DE AIRE.....	42
3.2.3. TREN DE VÁLVULAS E INDICADORES	44
3.2.4. COMPRESOR.....	47
3.2.5. SISTEMA DE SUJECCIÓN Y PRENSAESTOPAS	47
3.3. CIRCUITO DE TUBERÍAS DE RECIRCULACIÓN PARA EL FLUIDO GEOTÉRMICO	49
3.4. ESTRUCTURA DE MONTAJE	50
3.4.1. ESTRUCTURA A.....	51
3.4.2. ESTRUCTURA B.....	51
3.4.3. SOPORTE PARA EL POLIPASTO.....	52
3.4.4. ACOPLAMIENTO DE ESTRUCTURA A Y B	53
CAPÍTULO IV.	54
CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA AIR-LIFT.....	54
4.1. CONSTRUCCIÓN DEL CIRCUITO DE TUBERÍAS DE RECIRCULACIÓN PARA EL FLUIDO GEOTÉRMICO.....	55
4.2. INSTALACIÓN Y ADECUACIONES DEL SISTEMA AIR-LIFT	60
4.2.1. TREN DE VÁLVULAS E INSTRUMENTOS	60
4.2.2. CONSTRUCCIÓN DE PRENSAESTOPA PARA SELLADO	64
4.3. EQUIPO DE BOMBEO DE AGUA FRÍA PARA CONTROL DE POZO GEOTÉRMICO	67
4.4. INSTALACIÓN DE LA TUBERÍA DE CONDUCCIÓN DE AIRE DENTRO DEL POZO GEOTÉRMICO	69
4.4.1. CONEXIONES DE UNIÓN ENTRE LA TUBERÍA DE CONDUCCIÓN DE AIRE, EL TREN DE VÁLVULAS E INSTRUMENTOS	72
4.5. ARRANQUE DEL SISTEMA AIR-LIFT.....	73
CAPÍTULO V.	75
PRUEBAS Y RESULTADOS	75
5.1. MEDICIONES DEL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA AIR-LIFT.....	76
5.2. PRUEBA A 50 METROS.....	76
5.3. PRUEBAS A 100 METROS	78

CONCLUSIONES	81
BIBLIOGRAFÍA	84
ANEXOS	88

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO I. ENERGÍA GEOTÉRMICA

Figura 1.1. Representación esquemática de un sistema geotérmico ideal.

Figura 1.2. Placas tectónicas y actividad geológica global.

Figura 1.3. Utilización de la energía geotérmica de acuerdo a su temperatura.

Figura 1.4. Esquema de una planta a vapor directo

Figura 1.5. Esquema de una planta binaria.

Figura 1.6. Esquema de una planta a *flash* acoplada a una planta binaria

Figura 1.7. Localización de las zonas con recurso geotérmico mayor a 30 °C

Figura 1.8. Estado mecánico del pozo geotérmico Z-3, al momento de su perforación.

Figura 1.9. Perfil de temperatura, presión y temperatura de saturación calculada del pozo geotérmico Z-3.

CAPÍTULO II. SISTEMA *AIR-LIFT*

Figura 2.1. Sistema típico de *air-lift*.

Figura 2.2. Configuraciones típicas del sistema *air-lift*.

Figura 2.3. Carga dinámica que debe superar el sistema *air-lift*.

Figura 2.4. Tipos de flujo presentado en los sistemas *air-lift*.

Figura 2.5. División de las celdas en la tubería de ascenso.

Figura 2.6. Mapa de régimen de flujo.

CAPÍTULO III. DISEÑO DEL SISTEMA *AIR-LIFT*

Figura 3.1. Cabezal del pozo geotérmico Z-3.

Figura 3.2. Localización del pozo geotérmico Z-3.

Figura 3.3. Diseño conceptual del sistema *air-lift*.

Figura 3.4. Diseño del sistema *air-lift*.

Figura 3.5. Tramo de tubería para la conducción de aire.

Figura 3.6. Cople de unión entre tramos de la tubería de inyección de aire.

Figura 3.7. Piezas bajo análisis, unión de tuberías mediante cople.

Figura 3.8. Deformación unitaria de la unión de tuberías mediante cople.

Figura 3.9. Deformación total de la unión de tuberías mediante cople.

Figura 3.10. Esfuerzo de Von Mises en la unión de tuberías mediante cople.

Figura 3.11. Factor de seguridad en la unión de tuberías mediante cople.

- Figura 3.12. Patrón de orificios 3/16" de diámetro, cabezal de 10 cm.
- Figura 3.13. Patrón de orificios 1/4" de diámetro, cabezal de 10 cm.
- Figura 3.14. Patrón de orificios 1/8" de diámetro, cabezal de 10 cm.
- Figura 3.15. Patrón de orificios 3/16" de diámetro, cabezal de 20 cm.
- Figura 3.16. Patrón de orificios 1/4" de diámetro, cabezal base 20 cm.
- Figura 3.17. Patrón de orificios 1/8", 3/16", 1/4" y 5/16" de diámetro, cabezal base 20 cm.
- Figura 3.18. Tren de Válvulas e indicador de flujo del sistema *air-lift*.
- Figura 3.19. Válvula de alivio.
- Figura 3.20. Flujómetro de aire comprimido.
- Figura 3.21. Válvula *check*.
- Figura 3.22. Válvula de cierre manual.
- Figura 3.23. Abrazadera de sujeción e instalación para el sistema *air-lift*.
- Figura 3.24. Sistema de sellado por compresión (Prensaestopas).
- Figura 3.25. Diagrama del Prensaestopas.
- Figura 3.26. Circuito de recirculación y reinyección de la salmuera geotérmica.
- Figura 3.27. Vista Isométrica (Estructura A).
- Figura 3.28. Vista Isométrica (Estructura B).
- Figura 3.29. Vista isométrica (Soporte polipasto).

CAPÍTULO IV. CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA AIR-LIFT

- Figura 4.1. Presentación de la tubería de 10".
- Figura 4.2. Colocación de la tubería sobre los soportes cimentados y alineación de la tubería de 10".
- Figura 4.3. Unión completa de la tubería de 10".
- Figura 4.4. Alineación y medición de la tubería de 4" con la tubería de 10".
- Figura 4.5. Ajuste de la tubería de 4" con el cabezal de válvulas. (Entrada y salida del cabezal de válvulas).
- Figura 4.6. Acabado final del circuito de tuberías de recirculación.
- Figura 4.7. Instrumentos de medición (flujo metro)
- Figura 4.8. Instrumentos de medición a la salida y entrada del pozo geotérmico
- Figura 4.9. Acabado final del cabezal de válvulas conectado con el circuito de tuberías de recirculación.
- Figura 4.10. Montaje del silenciador y conexiones en el circuito de tuberías de recirculación.

Figura 4.11. Acabado final del circuito de tuberías de recirculación con silenciador.

Figura 4.12. Circuito de tuberías de recirculación 1.

Figura 4.13. Circuito de tuberías de recirculación 2.

Figura 4.14. Presentación de elementos que componen al tren de válvulas e instrumentos.

Figura 4.15. Limpieza de los componentes del tren de válvulas e instrumentos.

Figura 4.16. Colocación y roscado de los distintos elementos del tren de válvulas e instrumentos (A).

Figura 4.17. Colocación y roscado de los distintos elementos del tren de válvulas e instrumentos. (B).

Figura 4.18. Tren de válvulas e instrumentos anclados en base.

Figura 4.19. Construcción del prensaestopa, (A).

Figura 4.20. Construcción del prensaestopa, (B).

Figura 4.21. Inserción de la pichancha con la manguera de succión dentro de la pileta de agua fría

Figura 4.22. Preparación de los componentes para el mecanismo de apagado de pozo geotérmico.

Figura 4.23. Trabajos para la inserción de la tubería de conducción de aire del sistema *air-lift* dentro del pozo geotérmico, (A).

Figura 4.24. Trabajos para la inserción de la tubería de conducción de aire del sistema *air-lift* dentro del pozo geotérmico, (B).

Figura 4.25. Trabajos para la inserción de la tubería de conducción de aire del sistema *air-lift* dentro del pozo geotérmico, (C).

Figura 4.26. Conexión del sistema *air-lift* y sus componentes.

Figura 4.27. Labores de limpieza y arranque del sistema *air-lift*, (A).

Figura 4.28. Labores de limpieza y arranque del sistema *air-lift*, B.

CAPÍTULO V. PRUEBAS Y RESULTADOS

Figura 5.1. Presión a la entrada y salida del pozo geotérmico, empleando 50 m con el sistema *air-lift*.

Figura 5.2. Manómetro análogo.

Figura 5.3. Temperatura a la entrada y salida del pozo geotérmico, empleando 50 m con el sistema *air-lift*.

Figura 5.4. Flujo del fluido geotérmico, empleando 50 m con el sistema *air-lift*.

Figura 5.5. Presión a la entrada y salida del pozo geotérmico, empleando 100 m con el sistema *air-lift*.

Figura 5.6. Temperatura a la entrada y salida del pozo geotérmico, empleando 100 m con el sistema *air-lift*.

Figura 5.7. Termómetro análogo

Figura 5.8. Flujo del fluido geotérmico, empleando 100 m con el sistema *air-lift*.

ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO I. ENERGÍA GEOTÉRMICA

Tabla 1.1. Megavatios instalados para cada tecnología, número de plantas y tamaño promedio (Datos a 2010)

Tabla 1.2. Producción mundial de electricidad por medio de energía geotérmica [9].

Tabla 1.3. Países líderes en usos directos de la energía geotérmica [8].

Tabla 1.4. Aplicaciones de la energía geotérmica de baja y media entalpia [8].

Tabla 1.5. Producción de electricidad durante el 2016 de los campos de energía geotérmica en México.

Tabla 1.6. Capacidad instalada de usos directos del calor en México.

Tabla 1.7. Proyectos piloto de CFE [12].

CAPÍTULO II. SISTEMA *AIR-LIFT*

CAPÍTULO III. DISEÑO DEL SISTEMA *AIR-LIFT*

Tabla 3.1. Configuración de tuberías y diámetros del pozo Z-3.

CAPÍTULO IV. CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA *AIR-LIFT*

CAPÍTULO V. PRUEBAS Y RESULTADOS

NOMENCLATURA

a	Fracción de volumen (fracción de vacío es la fracción de volumen de aire)
A_1	Sección transversal del tubo de succión (flujo de agua)
A_2	Sección transversal del tubo ascendente (mezcla de flujo de dos fases)
D	Diámetro de la tubería exterior
D_1	Diámetro equivalente del tubo de aspiración
D_2	Diámetro equivalente del elevador
J''	Flujo de impulso, $M_i^2 / (a_i \rho_i A^2)$, $i = g, l$
L	Longitud del tubo interior, $l_s + l_d + l_e$
M	Caudal de masa
N	Número de celdas
P	Presión
R	Constante de gas universal
R^*	Constante de gas específico: $R / (\text{peso molecular})$
Re	Número de Reynolds
T	Temperatura
U_{gs}, U_{ls}	Velocidad superficial del gas y del líquido, $V_i / A_2, i = g, l$
V	Caudal volumétrico
d	Diámetro del tubo interior
f_m	Coefficiente de fricción
g	Aceleración de la gravedad
l_d	Longitud del elevador por encima del nivel del agua
l_e	Longitud del tubo de aspiración
l_s	Longitud del elevador por debajo del nivel del agua
M	Flujo de masa, $M_i / (a_i A)$, $i = g, l$
ε	Criterio de convergencia para procedimientos iterativos.
μ	Viscosidad
ρ	Densidad
X	Parámetro Lockhart-Martinelli

Subíndices-superíndices

- $1, 2, i$ Propiedad en el punto 1, 2 o i
 f Fricción
 g, l Propiedades en fase gaseosa o en fase líquida
 k Propiedad en la cara de la celda k
 m Propiedad media de la celda

OBJETIVO GENERAL

Realizar el diseño mecánico, construcción y pruebas de operación de un sistema *air-lift* en un pozo geotérmico para extracción de energía de yacimientos geotérmicos de mediana y baja entalpía, haciendo uso de la salmuera geotérmica, de forma tal que se pudiera aprovechar para la generación de energía eléctrica a micro, pequeña o media escala por medio de un ciclo binario o un ciclo Rankine orgánico o cualquier otra aplicación directa o indirecta de esa energía.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Realizar un diseño global del sistema *air-lift* de acuerdo a condiciones del pozo geotérmico.
2. Construcción e implementación del sistema *air-lift* y pozo geotérmico seleccionado para estudio.
3. Realización de pruebas de funcionamiento y medición de los parámetros termofísicos.
4. Recopilación y análisis de datos de las pruebas realizadas.

DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

A lo largo de miles de años, el calor interno de la Tierra y sus manifestaciones en superficie se han considerado como un fenómeno caprichoso de la naturaleza. Lo que sí es un hecho cierto es que la cantidad de energía existente en el interior del globo, en forma de energía calorífica, es inmensa. En general se clasifica a los recursos geotérmicos en recursos de alta temperatura ($T \geq 200^\circ\text{C}$) y recursos de temperatura intermedia a baja ($T < 200^\circ\text{C}$). Esta clasificación obedece a la aplicabilidad de estos recursos. Los de alta temperatura pueden utilizarse para la generación de energía eléctrica de manera directa. Los de temperatura intermedia a baja son más apropiados para aplicaciones directas del calor geotérmico.

En el caso de México, se cuenta con abundantes recursos geotérmicos, debido a sus particulares características geológico-estructurales. Actualmente se cuenta con una base de datos que incluye 2,332 manifestaciones geotérmicas distribuidas en 27 de los 32 estados Mexicanos. En particular, dentro de las zonas que cuentan con potencial geotérmico tanto de media como de baja temperatura, se encuentra Araró. De igual manera, en base a varios estudios llevados a cabo, se estimó que la zona de Araró cuenta con un potencial geotérmico aproximado de 32 MWe, a pesar de que sus recursos geotérmicos se encuentran en el rango de temperaturas de media a baja. Esto representa, más que una oportunidad, un reto para la explotación de este recurso con fines de generación de energía eléctrica o aplicaciones distintas a la balneología (principal uso de este recurso en la zona). Sin embargo, en esta zona los métodos convencionales de explotación de energía geotérmica son infructuosos, lo cual no solo es característica de esta zona sino de la mayoría de las zonas que cuentan con características geotérmicas similares, lo cual provoca que estas zonas no sean explotadas, a pesar de ser el tipo de recurso geotérmico más abundante en el planeta. Por lo cual, es conveniente contar con sistemas de aprovechamiento del recurso geotérmico que permitan su extracción, de manera que haga más factible su aprovechamiento. En este sentido se puede considerar que el fluido geotérmico pueda ser extraído con fines de aprovechar su contenido energético, lo cual representa un reto el aprovechamiento del contenido energético. Motivados en estos antecedentes, se pretende realizar una evaluación de un sistema *air-lift* para la extracción del fluido geotérmico, para la extracción de energía de yacimientos geotérmicos de mediana y baja temperatura, ubicados específicamente en la zona geotérmica de Araró, ubicado en el estado de Michoacán. Se llevará acabo la implementación del sistema *air-lift* mencionada anteriormente, de manera que se permita definir, para futuras aplicaciones de aprovechamiento del potencial energético de un yacimiento geotérmico, independientemente del uso que se le dé.

La técnica *air-lift* consiste en la inyección de aire dentro del fluido que reside en el pozo geotérmico, creando una mezcla bifásica entre el aire y el fluido contenido en el pozo, de modo que la densidad resultante de la mezcla sea menor a la del fluido contenido en el pozo. Lo anterior, provoca que el fluido contenido en el reservorio empiece a fluir hasta la superficie del reservorio transportando consigo la energía geotérmica. Si bien la literatura reporta que es una técnica viable para la explotación de recursos geotérmicos, hasta el momento no se reporta de manera abierta ningún caso práctico de su implementación en un yacimiento geotérmico.

HIPÓTESIS

La implementación de un sistema *air-lift* en un pozo geotérmico, bajo condiciones específicas de diseño, podrá proporcionar un caudal volumétrico de salmuera con condiciones termodinámicas suficientes para la generación de energía eléctrica mediante un ciclo binario o un ciclo Rankine orgánico o para aplicaciones directas de la energía calórica.

CAPÍTULO I. ENERGÍA GEOTÉRMICA

1.1. INTRODUCCIÓN

El calor es una forma de energía y la energía geotérmica es el calor contenido en el interior de la Tierra que genera fenómenos geológicos a escala planetaria y está relacionada con los volcanes, aguas termales, fumarolas y géiseres.

El termino energía geotérmica es a menudo utilizado para indicar aquella porción del calor de la Tierra que puede o podría ser recuperado y explotado por el hombre; en este sentido utilizaremos dicho termino.

1.2. ANTECEDENTES HISTÓRICOS

La presencia de volcanes, fuentes termales y otros fenómenos termales debieron haber inducido a nuestros ancestros a suponer que partes del interior de la tierra estaban calientes; sin embargo, no fue hasta un período entre los siglos XVI y XVII, cuando las primeras minas fueron excavadas a algunos cientos de metros de profundidad, que el hombre dedujo, por simple sensaciones físicas, que la temperatura de la Tierra se incrementaba con la profundidad.

Las primeras mediciones mediante termómetros fueron probablemente realizadas en 1740, en una mina cerca de Belfort, en Francia. Hacia 1870, se utilizaron modernos métodos científicos para estudiar el régimen termal de la Tierra, pero no fue hasta el siglo XX, y el descubrimiento del calor radiogénico, que podemos comprender plenamente tal fenómeno como un balance térmico y la historia térmica de la Tierra [1].

1.3. RECURSO GEOTÉRMICO

Los sistemas geotérmicos pueden ser descriptos esquemáticamente en la **Figura 1.1** como la convección de agua en la parte superior de la corteza terrestre, la cual, en un espacio confinado transfiere calor desde una fuente de calor a la superficie. La fuente de calor, el reservorio, el área de recarga y las vías de conexión por las cuales el agua superficial ingresa en el reservorio (que en la mayoría de los casos emerge nuevamente a la superficie), constituyen las partes fundamentales de un sistema hidrotermal. La existencia de un sello integrado por unidades o estructuras geológicas que actúan de cubierta impermeable, cierra el sistema favoreciendo la concentración de calor.

Los recursos geotérmicos se encuentran generalmente confinados en áreas de la corteza terrestre donde el flujo de calor, más alto que en las áreas vecinas, calienta el agua contenida en rocas permeables en profundidad (reservorios). Los recursos con el mayor potencial se encuentran principalmente concentrados en los límites entre placas, donde la actividad geotérmica tal como manantiales calientes, fumarolas, geysers, etc., es frecuente. Los volcanes activos también constituyen un tipo de actividad geotérmica, pero con características particulares. También existen sistemas geotérmicos en regiones no afectadas por fenómenos volcánicos recientes, ya sea con flujo de calor elevado o normal. La circulación profunda de fluidos a través de fallas o estratos plegados, adelgazamiento de la corteza o calor residual de cuerpos ígneos instruidos en la corteza pueden ser fenómenos que generen campos geotérmicos [2].

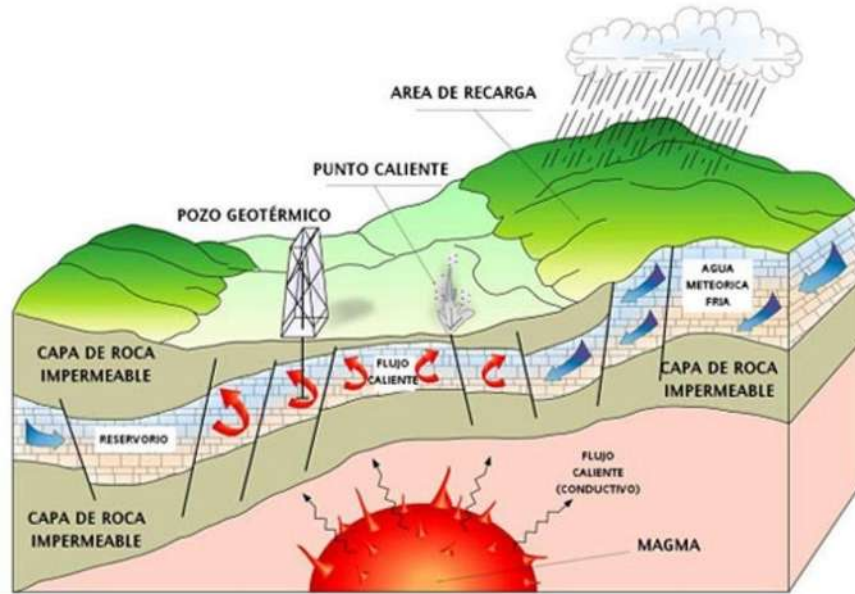


Figura 1.1. Representación esquemática de un sistema geotérmico ideal.

Las zonas activas constituyen sectores propicios donde la convección magmática permite la concentración de flujo de calor, aumentando el gradiente geotérmico a valores sensiblemente mayores que los normales, entendiéndose como gradiente geotérmico al aumento de la temperatura en la corteza terrestre en función de la profundidad, el cual normalmente es de 33°C por kilómetro. Sin embargo, existen regiones donde el valor de dicho gradiente es varias veces superior al normal. Las temperaturas originadas varían entre los 150°C y 350°C a profundidad muy variable, posibilitando la producción de fluidos de alta temperatura. Estas regiones se relacionan con los sistemas geotérmicos de alta temperatura y, aunque sólo se limitan a ciertos sectores de la corteza, su interés radica en la posibilidad de producir energía eléctrica.

En las regiones donde la corteza terrestre tiene un comportamiento relativamente estable, como el que ofrecen las plataformas continentales, existen áreas que presentan concentración de calor con flujos que tienen gradientes del orden de los 30°C a los 50°C por kilómetro de profundidad. Si en estas regiones existen estructuras favorables y se pueden realizar perforaciones apropiadas, es posible obtener fluidos con temperaturas del orden de los 50°C a 100°C a profundidades relativamente someras. Estas corresponden a los sistemas geotérmicos de baja temperatura, ampliamente distribuidos y en una gran variedad de ambientes geológicos; sus aplicaciones están vinculadas a un uso directo del calor en múltiples emprendimientos económicos.

La energía geotérmica virtualmente puede ser provista en cualquier lado. De todos modos, la mayoría de los sistemas geotérmicos de alta y media temperatura, los cuales son los mejores para la generación de energía eléctrica, se encuentran localizados en las cercanías de la actividad volcánica, como por ejemplo a lo largo de los bordes de las placas tectónicas (zonas de subducción, como la mayoría del “Anillo de Fuego” del Pacífico), dorsales

mediooceánicas (como Islandia o las Azores), rifts oceánicos (como el Rift de Africa Oriental) o hot spots (como Hawaí). En la **Figura 1.2** pueden identificarse cada una de estas zonas alrededor del mundo [3].



Figura 1.2. Placas tectónicas y actividad geológica global.

1.4. USOS DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA

La energía geotérmica tiene un amplio espectro de usos que va desde la producción de energía eléctrica, hasta el acondicionamiento climático de espacios, así como también la deshidratación de productos o para uso en centros de recreación. La energía geotérmica tiene una gran versatilidad de uso que, dependiendo del proceso que se esté llevando a cabo, dará algún producto para que este proceso se lleve a cabo. Existen dos aplicaciones para esta energía, la primera es cuando la temperatura del yacimiento es mayor a 150°C y se utiliza para la generación de electricidad de forma convencional, la segunda aplicación es cuando la temperatura tiene un intervalo menor a 150°C y las aplicaciones son para generar usos térmicos o electricidad en centrales binarias [5].

Normalmente, la temperatura del yacimiento es la que prácticamente decide la aplicación del recurso. Gracias a la actual tecnología, se han aprovechado de manera más eficiente los recursos tanto de baja como de media temperatura, ya que antes solamente había interés en los recursos de alta temperatura. En la **Figura 1.3** se muestra el rango de temperatura del fluido geotérmico y la utilización que éste podría tener, desde las temperaturas más bajas (25 °C) para piscinas, hasta las temperaturas más altas (200 °C) que se utilizan para la producción de energía eléctrica [6].

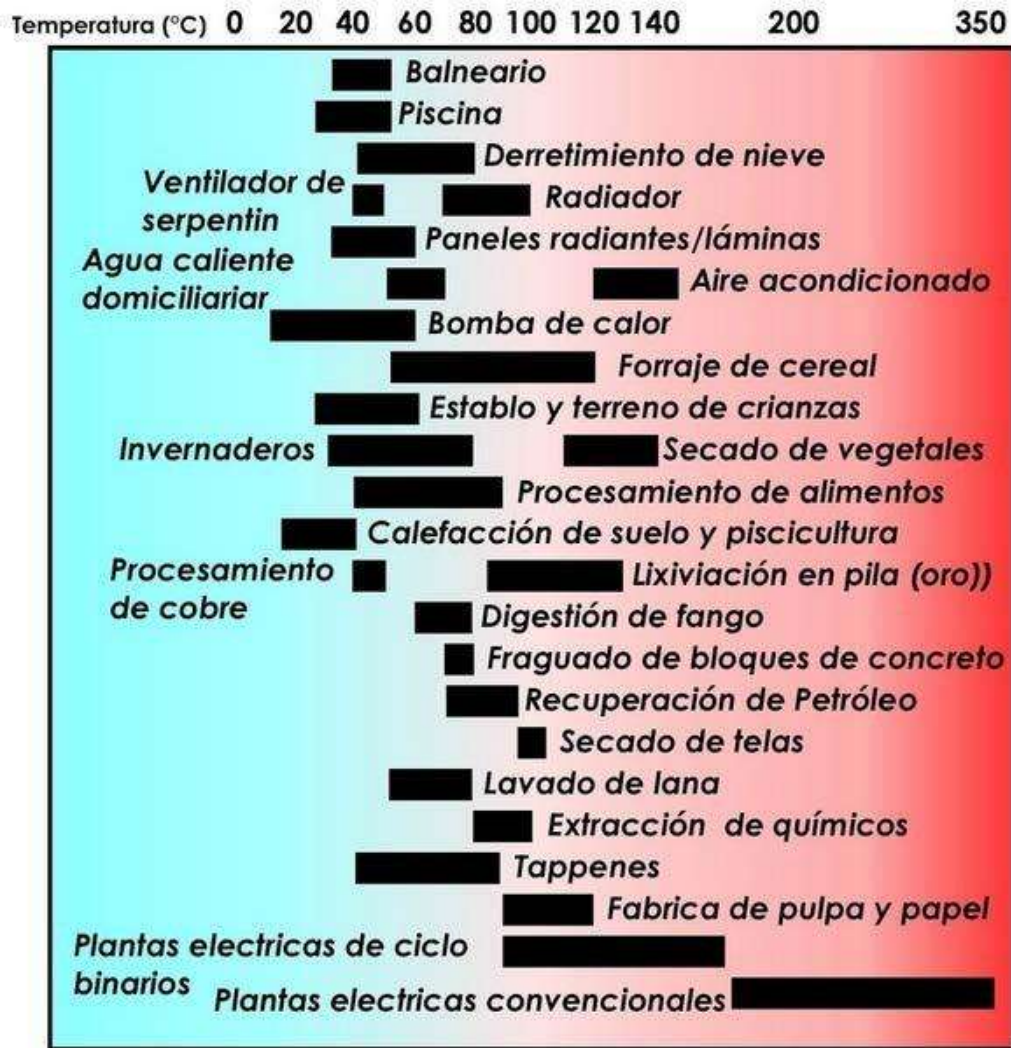


Figura 1.3. Utilización de la energía geotérmica de acuerdo a su temperatura.

Convencionalmente, lo que importa más de la energía geotérmica es su utilización para la producción de energía eléctrica. Dependiendo de la temperatura del yacimiento, así como de la composición química del fluido geotérmico y las condiciones geográficas del yacimiento, se han desarrollado distintas plantas de potencia para aprovechar este recurso. Las plantas convencionales operan con temperaturas desde los 200 a los 300 °C, aunque hoy en día se han desarrollado plantas que pueden operar con temperaturas de hasta 80 °C.

1.4.1. TECNOLOGÍA UTILIZADA

La producción de energía eléctrica se obtiene transformando la energía térmica de los fluidos en energía eléctrica utilizando turbinas a contrapresión, durante la fase de evaluación del recurso, o las plantas a vapor-directo, flash o binaria en función de las características (tipología, composición, temperatura y presión) del recurso durante la fase de explotación del campo [7].

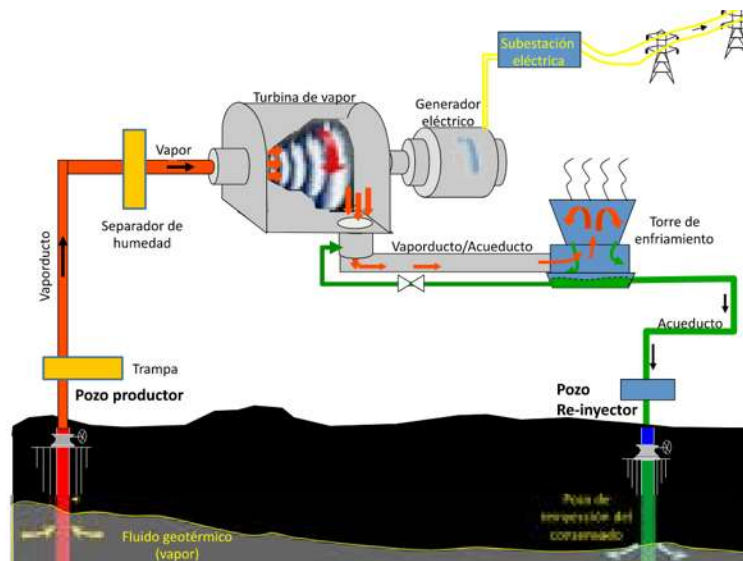
Tabla 1.1. Megavatios instalados para cada tecnología, número de plantas y tamaño promedio (Datos a 2010)

Tipo	Número de plantas en el mundo	Megavatios instalados en el mundo	Tamaño promedio de las plantas instaladas en el mundo
Vapor directo	62	2.878	46,5 MW
Binaria	236	1.178	5 MW
Flash	202	6.513	32 MW
Contrapresión	25	145	5,8 MW

1.4.1.1. PLANTAS A VAPOR DIRECTO

Cuando en el reservorio el vapor es dominante, las centrales geotérmicas son conceptualmente más sencillas: el vapor producido por los pozos es inyectado directamente en turbina. Allí, aprovechando el salto entálpico entre las condiciones de entrada y salida, la energía térmica del vapor se transforma en energía eléctrica. A la salida de la turbina, el vapor se condensa en las torres de enfriamiento para ser reinyectado en profundidad y mantener la sostenibilidad del sistema.

La mayor ventaja es que se puede aprovechar plenamente el salto entálpico del fluido geotérmico desde las condiciones del reservorio hasta las condiciones de salida a la turbina. Cabe notar, sin embargo, que el vapor geotérmico es generalmente agresivo y puede generar problemas de corrosión e incrustación que aumentan los costos de mantenimiento.

**Figura1.4.** Esquema de una planta a vapor directo

1.4.1.2. PLANTAS BINARIAS

Cuando en el reservorio el líquido es dominante con temperaturas menores de 160° C. Están conformadas por un intercambiador de calor que transfiere la energía térmica del fluido geotérmico (en el estado líquido) a un líquido orgánico (secundario) de baja temperatura de ebullición (isobutano o isopentano) para que se evapore. De allí, el vapor del líquido secundario se envía a la turbina donde ocurre la transformación de la energía térmica en

energía eléctrica, para luego ser recuperado completamente y condensado de modo que fluya nuevamente al intercambiador de calor. Así se completan el ciclo termodinámico. El fluido geotérmico que sale del intercambiador se envía a los pozos para su reinyección total. La mayor ventaja de esta tecnología es que puede producir energía eléctrica utilizando fluidos geotérmicos de baja entalpía (temperaturas menores de 160°). Su mayor desventaja es que el rendimiento térmico (o eficiencia) es limitado: primero porque las temperaturas de trabajo del ciclo termodinámico son más bajas ($100\text{--}160^{\circ}\text{C}$); segundo porque los consumos internos son elevados debido al sistema de condensación del líquido secundario; y tercero porque no todo el calor/energía del fluido geotérmico puede ser aprovechado/trasferido con eficacia al fluido secundario. Ejemplos de estas aplicaciones; en México (Los Azufres 3.3 MW, 1993); Guatemala (Zunil 24 MW, 1999; Amatitlán 24 MW, 2007); El Salvador (Berlín 9 MW, 2007); Nicaragua (Momotombo 7MW, 2002), y Costa Rica (Miravalles 18.5 MW, 2004).

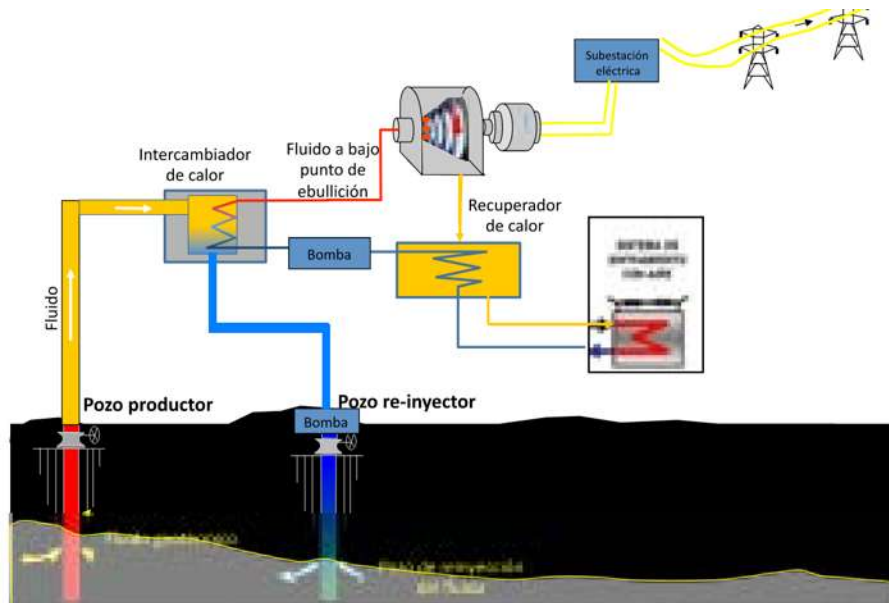


Figura 1.5. Esquema de una planta binaria.

1.4.1.3. PLANTAS FLASH

Cuando en el reservorio el líquido es dominante con temperaturas mayores de 160°C . Son las centrales geotérmicas más comunes y representan alrededor el 60% del total de la capacidad instalada. En términos simples, allí la rápida extracción de los fluidos del reservorio genera una descompresión adiabática del sistema que conduce a la formación del vapor (*flash*). Por esto, los fluidos geotérmicos producidos por los pozos se compondrán de una parte de vapor (20–30% en masa) y de una parte líquida (70–80% en masa). Estas se separarán mediante un separador ciclónico a presión y se transferirán a la planta (vapor) para que produzcan energía, y a la zona de reinyección (fase líquida) para mantener la sostenibilidad del sistema. Luego de ser enviado a la turbina donde su energía se transforma en energía eléctrica, el vapor se condensa en las torres de enfriamiento e igualmente se reinyecta en el reservorio geotérmico. La eficiencia energética de un sistema geotérmico explotado con una planta a *flash* es más baja que la de una planta a vapor directo, ya que el primero utiliza exclusivamente el poder energético de la fase de vapor (20–30% en volumen

del fluido total extraído), mientras que la energía/calor contenida en la fase líquida (70–80% en volumen) se devuelve al sistema a través de la reinyección. Para aumentar la eficiencia y la producción de energía eléctrica de un sistema geotérmico líquido-dominante con temperaturas superiores a 160/180° C, es posible acoplar una planta a *flash* con un sistema binario (**Figura 1.6**). Con esta solución, es posible utilizar ambas fases (líquida y vapor) para producir energía eléctrica. Ejemplos en México (Cerro Prieto, Los Azufres, Los Hornos), El Salvador (Auhachapán y Berlín), Nicaragua (Momotombo, San Jacinto-Tizate) y Costa Rica (Miravalles y Las Pailas).

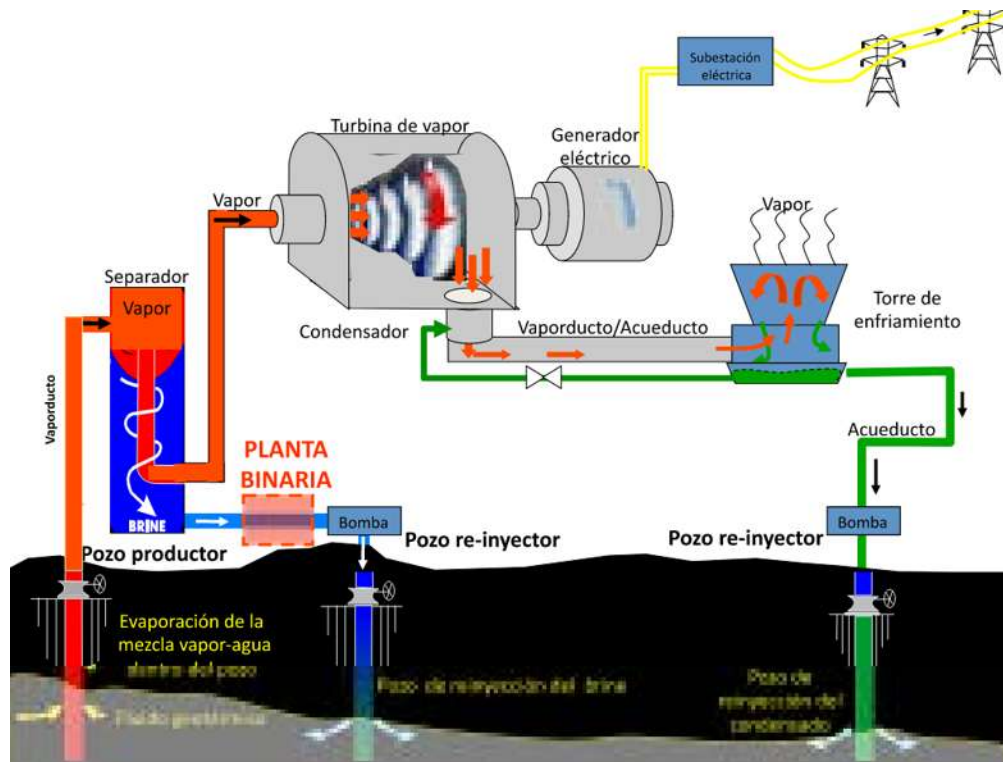


Figura 1.6. Esquema de una planta a flash acoplada a una planta binaria

1.4.1.4. TURBINAS A CONTRAPRESIÓN

Cuando durante la primera fase de evaluación del potencial un campo geotérmico. Las turbinas a contrapresión (5 y 6 MW) son soluciones flexibles, poco costosas, fáciles y rápidas de instalar y se emplean como unidades de prueba temporal tal como se hizo en San Jacinto Tizate en Nicaragua (2x5MW) antes de la construcción de la actual planta de 72 MW.

Como la descarga se hace directamente a la atmósfera, es necesario evaluar correctamente la composición química de los fluidos geotérmicos para evitar el riesgo de contaminar el medio ambiente. Además, en el caso que el recurso geotérmico se encuentre ubicado en zonas alejadas o logísticamente complejas, muchas veces la utilización de esta tecnología es económicamente no viable por los costos asociados a la construcción de las infraestructuras de conexión a la red de transmisión/distribución.

1.5. ENERGÍA GEOTÉRMICA EN EL MUNDO.

A nivel mundial, según el Informe sobre el estatus mundial de Energías Renovables la energía geotérmica representó el 0.4% de la producción de electricidad durante el 2018, junto con la energía marina y la energía solar concentrada (CPS por sus siglas en inglés) [8]. Señalan que, respecto a la energía para usos térmicos, ésta se ha producido por 83 países.

Esta producción de electricidad por medio de energía geotérmica en el mundo ha ido cambiado conforme a los años, teniendo que en el 2018 se tenía instalada una capacidad de 14,600MW, destacando con una mayor producción de electricidad, Estados Unidos, Indonesia y Filipinas, cabe destacar que México ocupa el sexto lugar [9], lo descrito anteriormente se puede visualizar en la **Tabla 1.2**.

Tabla 1.2. Producción Mundial de electricidad por medio de Energía Geotérmica, 2018. [9].

País	MW	Porcentaje
Estados Unidos	3639	24.9
Indonesia	1948	13.3
Filipina	1868	12.8
Turquía	1347	9.2
Nueva Zelanda	1005	6.9
México	951	6.5
Otros países	3842	26.3
TOTAL	14600	100

Además de su uso en la producción de electricidad, la energía geotérmica posee una versatilidad que hace posible su utilización directa en procesos industriales como en sistemas de calefacción y aire acondicionado [10]. Por lo que, durante el 2015, el consumo en estos usos fue de 70,329MW en 83 países.

Los países líderes representan el 80% de la capacidad instalada en el mundo, entre estos se encuentra, China, Estados Unidos, Suecia, Turquía y Alemania,[8], lo anterior se muestra en la **Tabla 1.3**.

Tabla 1.3. Países líderes en usos directos de la energía geotérmica [8].

Países	Capacidad instalada en usos directos MW
China	17,870.00
Estados Unidos	17,415.91
Suecia	5,600.00
Turquía	2,886.30
Alemania	2,848.60
Francia	2,346.90
Japón	2,186.17
Islandia	2,040.00
Otros	17134
TOTAL	70,328.27

Y el aprovechamiento energético de estos usos directos de la energía geotérmica fue en aplicaciones como, bombas de calor geotérmicas, calefacción, invernaderos entre otros, los cuales se pueden visualizar en la **Tabla 1.4.**

Tabla 1.4. Aplicaciones de la energía geotérmica de baja y media entalpia [8].

Aplicación de la geotermia	Utilización (TJ/yr)
Bombas de calor geotérmicas.	325028
Calefacción	88222
Invernaderos	26662
Acuicultura	11958
Otros	135916
TOTAL	587786

1.5.1. GEOTERMIA EN MÉXICO.

La geotermia es una fuente renovable que se ha utilizado en el mundo para generar energía eléctrica desde 1911, y en México desde 1959 cuando empezó a operar la primera unidad geotermoeléctrica en el país, con 3.5 MW de capacidad, en el campo geotérmico de Pathé, Hidalgo, actualmente fuera de operación. Por esta razón se considera que el país cuenta con amplia experiencia en la generación geotermoeléctrica [5].

Actualmente en México, se encuentran bajo explotación comercial cinco campos geotérmicos los cuales generan 932MW [11], cuatro plantas están a cargo de la CFE y la quinta, Domo de San Pedro es de origen privado a cargo del corporativo Grupo Dragon, por otro lado, la mayoría de los usos que se le da a la energía geotérmica en el país son de uso recreativo.

En la **Tabla 1.5**, se puede observar la capacidad instalada hasta el 2016, de estos campos, los cuales satisfacen la demanda de electricidad de dos millones de hogares mexicanos [11].

Tabla 1.5. Producción de electricidad durante el 2016 de los Campos de energía geotérmica en México.

Campos del país	Capacidad instalada
Cerro Prieto, Baja California	570 MWe
Los Azufres, Michoacán	248 MWe
Los Humeros, Puebla	94 MWe
Las Tres Vírgenes, Baja California Sur	10 MWe
Domo San Pedro. Nayarit	10 MWe

Posteriormente, durante el 2018 La Secretaria de Energía (SENER) reportó una capacidad de 925.60MW para la energía geotérmica (SENER, Reporte de Avance de Energías, 2018).

Por otro lado, en la **Tabla 1.6**. se presenta la capacidad instalada de las diferentes aplicaciones directas de calor geotérmico en México, entre las que se encuentra calefacción de espacios, acondicionamiento de invernaderos, secados de cultivos y balneología, cabe mencionar que el aprovechamiento de estos usos directos es casi en su totalidad destinado a balneología, teniendo una capacidad instalada total aproximada de 156MW durante el 2013 [12].

Tabla 1.6. Capacidad instalada de usos directos del calor en México.

Uso	Capacidad instalada (MW)
Calefacción de espacios	0.46
Acondicionamiento de Invernaderos.	0.004
Secado de cultivos	0.007
Balnearios	155.347
TOTAL	155.819

Con los datos anteriores, se muestra que estos usos han sido poco explotados en México, sin embargo, se han identificado proyectos piloto dirigidos a la agroindustria y la calefacción de espacios por parte de Comisión Federal de Electricidad, los cuales se desarrollaron en 3 zonas geotérmicas de México, las cuales son Los Azufres, Michoacán, Los Humeros, Puebla y Maguarichic, Chihuahua como se muestra en la **Tabla 1.7**.

Tabla 1.7. Proyectos piloto de CFE [12].

Campo geotérmico	Aplicaciones
Los Azufres	• Horno de secado de madera • Invernadero • Deshidratador de frutas • Calefacción de espacios
Los Humeros	• Planta productora de Hongos
Maguarichic	• Aguas terapéuticas y balneología

También, para impulsar la innovación en la energía geotérmica el Gobierno Federal, creó en el 2014, el Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica (CEMIE-Geo), su objetivo principal es impulsar a nivel nacional la investigación el desarrollo tecnológico y la innovación en geotermia [12].

Dentro de los estudios que se han llevado a cabo para determinar el potencial de México, también se encuentra el realizado por Torres [13], quien hizo una revisión documental

presencia importante de manifestaciones geotérmicas de media y baja entalpía, utilizadas para actividades de recreación o, en el mejor de los casos, para consumo humano, siendo solamente utilizados los pozos geotérmicos ubicados en Los Azufres, Mich., para la producción de energía eléctrica, desaprovechándose todo el potencial que tiene este recurso para la producción de energía eléctrica.

1.6. ZONA DE INTERÉS

El sitio donde se pretende implementar de tecnología *air-lift* del presente trabajo, es en la comunidad de San Nicolás de Simirao, perteneciente al municipio de Zinapécuaro., debido a que cuenta la zona con distintas manifestaciones termales de media y baja entalpía.

La CFE ha realizado estudios geológicos, geoquímicos y geofísicos de detalle, tanto en la zona de mayor interés como en otras zonas cercanas a la misma. Los estudios se han llevado a cabo en dos etapas, una en la década de los setenta y otra en la de los ochenta. Como conclusión de la primera etapa se perforó un pozo exploratorio en 1981, fuera de la zona de mayor interés, y como terminación de la segunda otro pozo, denominado Z-3 y perforado en 1991 a 1344 metros de profundidad. En este último pozo se registraron 101°C de temperatura al fondo, con un máximo de 135°C a 550 metros de profundidad. La mineralogía hidrotermal revela temperaturas que en el pasado debieron estar entre 250 y 300°C, mientras que los estudios de inclusiones fluidas indican paleo-temperaturas entre 218 y 247°C [5].

Además, existen estudios, en los cuales, una empresa contrata a la CFE para realizar un estudio mecánico y termal de un yacimiento geotérmico. Tal es el caso del pozo geotérmico objeto de estudio, ubicado en San Nicolás de Zimirao, tenencia perteneciente al municipio de Zinapécuaro, Michoacán, en el que se realizó un estudio por parte de la CFE [14] donde realizó un reporte de los resultados de las evaluaciones térmicas y mecánicas del pozo. En la **Figura 1.8**, se muestra el estado mecánico del pozo al momento de su perforación. De igual manera, en la **Figura 1.9**, se muestra la distribución de temperaturas a lo largo del pozo, durante el estudio realizado, al parecer en el 2011.

A pesar de que la mayoría de los estudios son realizados por la CFE, este tipo de estudios no son publicados. No obstante, con la información recabada que se tiene, se puede concluir que Michoacán cuenta con un buen potencial para explotación de este tipo de recursos. Aunque la mayoría de los yacimientos son de media y baja temperatura, existe ya la tecnología para explotar este tipo de yacimientos, que va desde la producción de energía eléctrica, hasta la deshidratación de frutas o verduras, o hasta usos para centros de recreación.

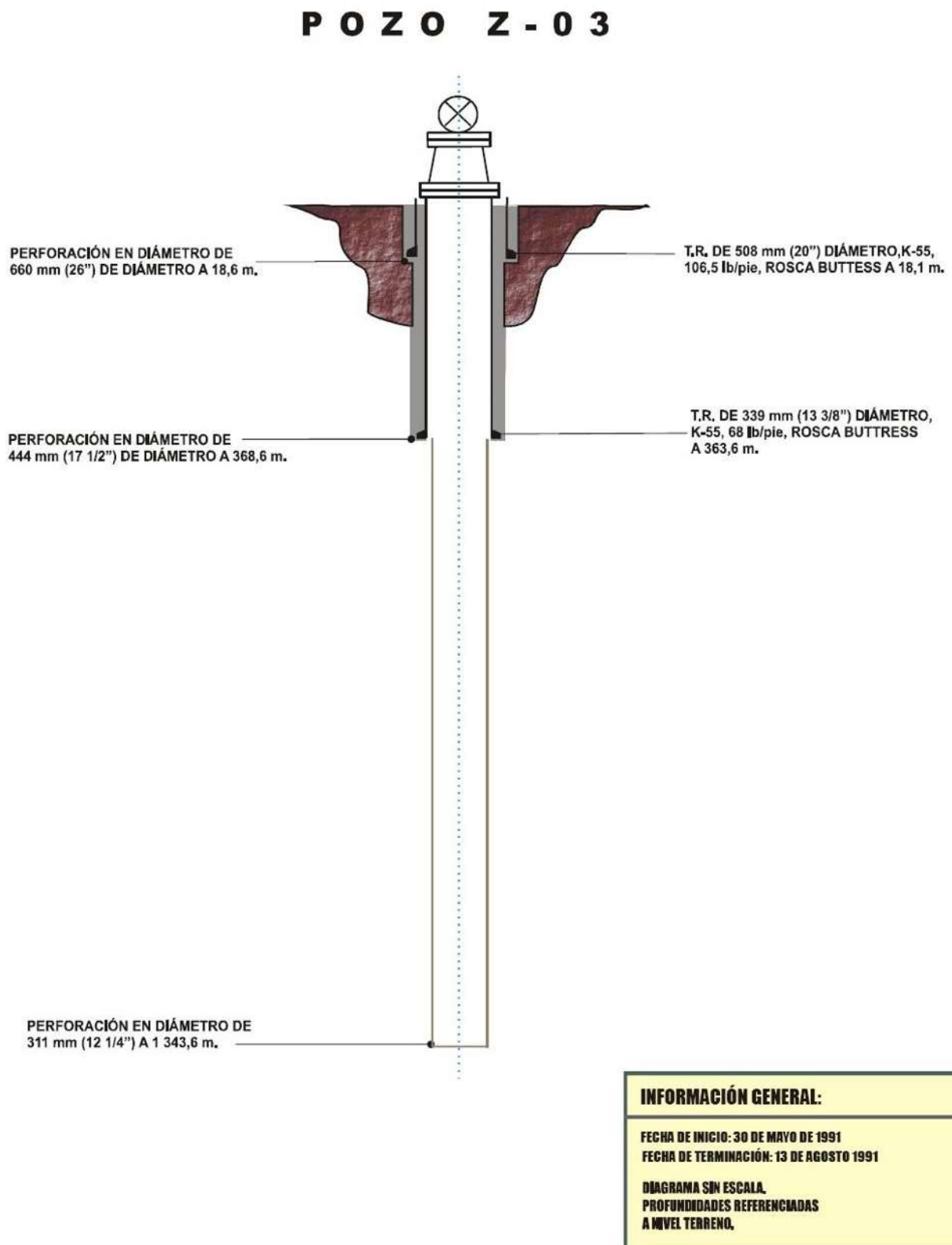


Figura 1.8. Estado mecánico del pozo geotérmico Z-3, al momento de su perforación.

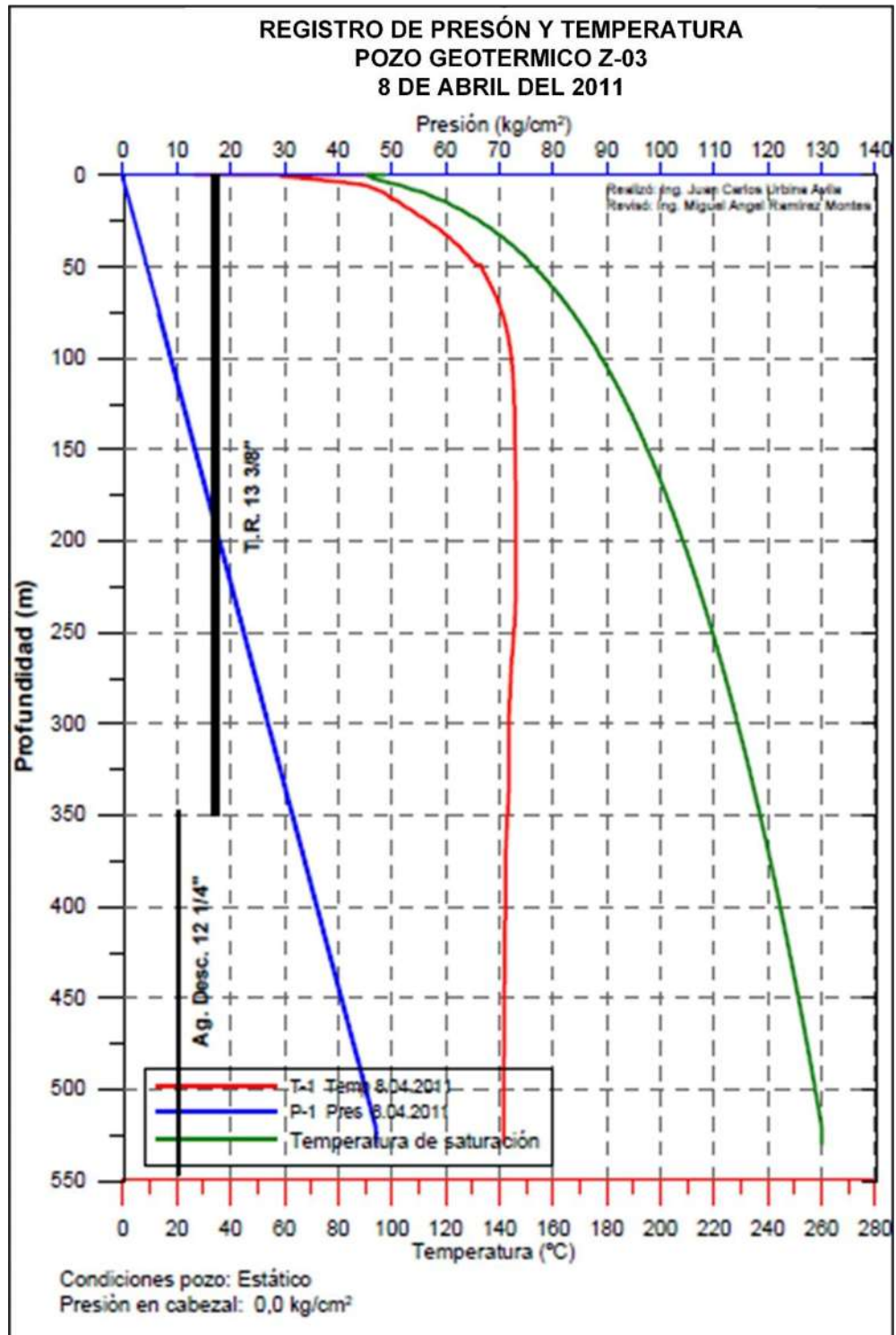


Figura 1.9. Perfil de temperatura, presión y temperatura de saturación calculada del pozo geotérmico objeto de estudio.

CAPÍTULO II.

SISTEMA *AIR-LIFT*

2.1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la energía geotérmica tiene un gran auge, ya que es una energía renovable y amigable con el ambiente. Este tipo de energía es utilizada para la generación de energía eléctrica, así como para el acondicionamiento climático de espacios. Dentro de la energía geotérmica, se puede distinguir una división de acuerdo a la temperatura del pozo: baja entalpía ($<90\text{ }^{\circ}\text{C}$), media entalpía ($90\text{-}150\text{ }^{\circ}\text{C}$) y alta entalpía ($>150\text{ }^{\circ}\text{C}$) [5].

La explotación de los yacimientos geotérmicos se da mediante múltiples técnicas, siendo la más recurrente la inducción del pozo geotérmico mediante la inyección de aire en la superficie, lo cual provoca que el fluido contenido en el yacimiento fluya y transporte consigo el calor del reservorio hacia la superficie para ser aprovechado. No obstante, existen otras técnicas no tan convencionales para la explotación de dichos recursos (recurrentemente de media y baja entalpía), que normalmente son aplicadas cuando la inducción sobre el pozo no se mantiene constante o el pozo no fluye por sí solo.

El principal motivo que lleva a emplear otras técnicas de explotación para los reservorios geotérmicos, es debido a que el calor contenido en el reservorio existe, pero las condiciones geohidrológicas del yacimiento no son las adecuadas para su explotación mediante inducción. Dentro de las técnicas alternativas para la explotación de este tipo de reservorios, se encuentra la implementación de los intercambiadores de calor geotérmicos, los cuales no emplean más que el fluido contenido en el pozo, haciéndolo recircular para que este transporte el calor contenido en el reservorio hacia la superficie. Otra alternativa que surge es el empleo de una bomba de alta temperatura para agua geotérmica, la cual se encargará de transportar el fluido geotérmico desde dentro del pozo hacia la superficie, transportando consigo la energía geotérmica contenida en el estrato. Además de las tecnologías anteriores, el sistema *air-lift* puede ser implementado de igual manera, el cual inyectaría aire al pozo geotérmico a una determinada profundidad, con lo cual la densidad de dicho fluido debido a la mezcla bifásica sería menor que la del fluido monofásico, lo cual desencadenaría en un flujo del pozo transportando consigo la energía geotérmica contenida en el reservorio.

A pesar de que se han realizado estudios y en algunos casos la implementación de las tecnologías antes mencionadas, su comercialización no es tan cotidiana, lo cual dificulta su aplicación en casos prácticos, en particular el encontrar un proveedor de bombas de alta temperatura para agua geotérmica, así como de sistemas *air-lift* para dicha aplicación. Por lo tanto, en el presente trabajo se presenta el dimensionamiento de un sistema *air-lift*, esto con el fin de dar un aporte al conocimiento, así como la tecnología necesaria para la implementación de este tipo de sistemas en pozos geotérmicos.

2.2. TECNOLOGÍA AIR-LIFT

La tecnología *air-lift* fue inventada por Carl Loscher a finales del siglo XVIII [15]. El funcionamiento se basa en el efecto de bombeo logrado cuando se inyecta aire en un líquido o una mezcla solido-líquido. Este tipo de sistema de bombeo tiene una eficiencia baja en comparación con otros métodos de bombeo. Sin embargo, la simplicidad en la construcción

y la ausencia de partes mecánicas en movimiento son dos ventajas muy importantes que lo hacen útil en ciertas aplicaciones, tales como el bombeo de líquidos corrosivos (arena o aguas saladas) [16] C. Losada Godoy, y líquidos viscosos (por ejemplo, los hidrocarburos en el aceite industria) [17]. El sistema *air-lift* también se utiliza en la perforación de pozos [18] (las perforaciones siendo levantados por el agua subterránea), minería submarina [19], en ciertos biorreactores y en las instalaciones de tratamiento de residuos, proporcionando una excelente aireación del fluido bombeado [20].

Un sistema típico de *air-lift* implica un tubo vertical de longitud L dividido en dos partes (**Figura 2.1**). Un tubo de aspiración de longitud L_e entre el extremo inferior y el puerto de inyección de aire (punto i), y un tubo de ascenso de longitud L_u entre los puertos de inyección de aire y de descarga (puntos i y 2), que se sumerge parcialmente a una longitud L_s . El tipo de flujo en el tubo de aspiración puede ser de una sola fase (líquido) o de dos fases (líquido-sólido), mientras que en el tubo de ascenso es de dos fases (aire-líquido) o de tres fases (aire-líquido-sólido). El tubo de ascenso puede tener un diámetro constante o variable, aumentando desde la inyección hasta la punta de descarga (sistemas cónicos). Estos últimos son mucho más eficientes cuando se bombea desde grandes profundidades, ya que esto asegura un flujo tipo burbuja a lo largo del tubo de ascenso. De lo contrario, cuando se utiliza un sistema de diámetro fijo, debido a la expansión del gas, los cambios provocan que el régimen sea de flujo tipo bala, que se caracteriza por una pobre eficiencia de bombeo [21].

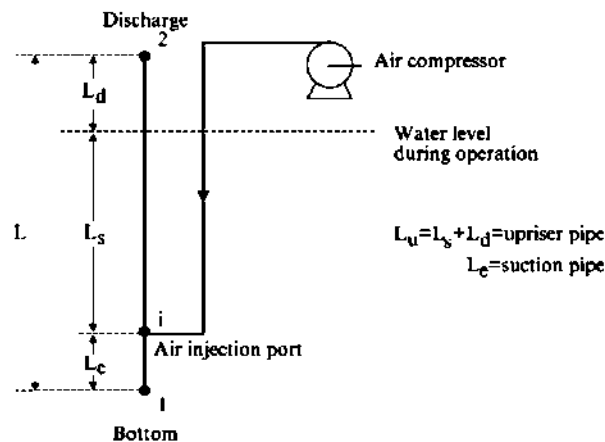


Figura 2.1. Sistema típico de *air-lift*.

Los sistemas de entrega externos son más eficientes energéticamente que los sistemas de entrega internos, pero ocupan más espacio dentro del pozo (debido a la tubería de suministro de aire). Esto limita el diámetro de la tubería de ascenso que se puede utilizar. Los sistemas de entrega internos, a pesar de que las pérdidas por fricción son más grandes (lo que disminuye la eficiencia energética) son más versátiles, además, más fáciles de instalar y operar.

Si el nivel de agua de pozo fluctúa con el tiempo, la longitud del tubo interno se puede ajustar fácilmente para asegurar las condiciones óptimas de operación. Esto es mucho más difícil de lograr con los sistemas de entrega externa. En la **Figura 2.2** se ilustran las configuraciones típicas del sistema *air-lift* (sistema interno y externo).

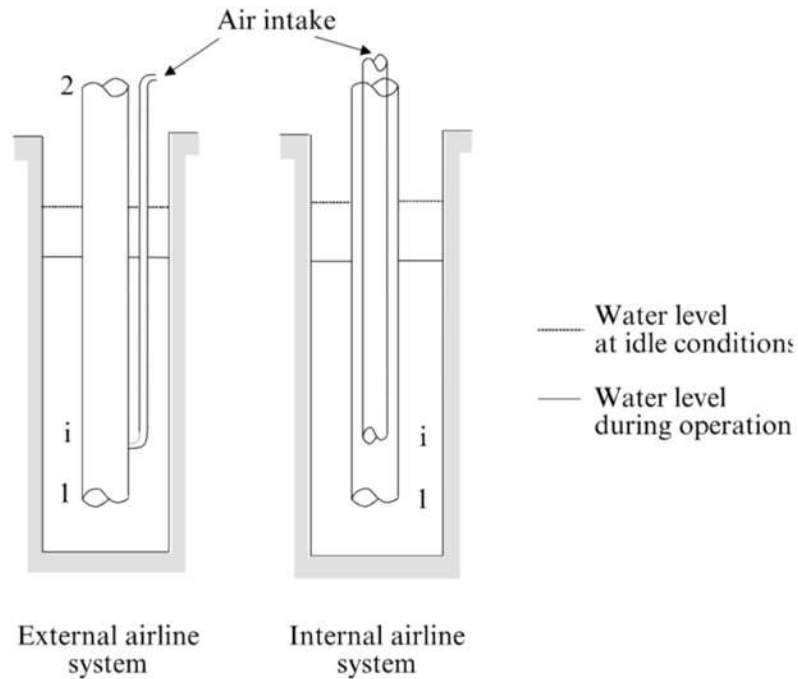


Figura 2.2. Configuraciones típicas del sistema *air-lift*.

El bombeo a través de *air-lift* es empleado para aplicaciones especiales, donde las bombas convencionales y eficientes fallan al operar. Tiene como principales ventajas:

- Su simplicidad, tanto en operación como en la instalación.
- Carencia de partes mecánicas.

El sistema *air-lift* emplea aire comprimido para mover o levantar el líquido. Este sistema opera sobre el principio de que el agua al momento de mezclarse con aire, tendrá menos peso, o en su defecto, será más boyante que si el agua no contuviera aire. Este efecto hace que la mezcla aire-agua fluya hacia arriba en la tubería de descarga donde se ventila a la atmósfera a través de una salida de descarga abierta. En efecto, el flujo de agua sigue una trayectoria recta debido al revestimiento del pozo, alrededor de la pieza del pie, y hasta la tubería de descarga. Posteriormente, a la descarga de aire-agua se encuentra un separador o deflector que alivia el agua de burbujas de aire y vapor de aire arrastrado.

Los sistemas *air-lift* son construidos por su uso cómodo, además existe una fácil disposición de materiales y las instalaciones no suelen ser complicadas. Por lo general, se emplean tubos de PVC, tubos de polietileno, accesorios de PVC, anillos de sujeción de acero inoxidable y bombas centrifugas. Además, para la instalación, se debe tener en consideración las siguientes características del sistema:

Profundidad de Inmersión: es la proporción o porcentaje de la longitud del tubo de inyección de aire sumergida por debajo del nivel dinámico también conocido como nivel de bombeo.

Presión de inyección del aire: para el cálculo de la presión del aire requerida para el sistema *air-lift*, se debe de conocer la longitud de la tubería de descarga sumergida por debajo del nivel estático del agua.

Compresor: es el encargado de inyectar aire al sistema, para así lograr la mezcla bifásica o trifásica, según sea el caso, logrando en este sentido, la circulación en el sistema.

Cantidad correcta de aire: por eficiencia, el compresor debe de inyectar la cantidad correcta de aire. Una cantidad excesiva de aire aumenta la fricción en las paredes de la tubería de descarga y se desecha aire debido a una expansión incompleta en el tubo de descarga. Por otro lado, una pequeña cantidad de aire resulta en una reducción en el rendimiento y el aumento en la intermitencia de la descarga.

Rendimiento y eficiencia: estas dos características varían principalmente por el porcentaje de inmersión y la cantidad de aire. Generalmente, se aconseja un porcentaje de inmersión del 60% o más. Para este punto, es importante conocer el nivel dinámico del pozo, si un pozo tiene un nivel dinámico considerable, se suele reducir el porcentaje de inmersión, y con esto se podría reducir la eficiencia del sistema o quizá ni se pueda operar el equipo.

2.2.1. ESTUDIOS PREVIOS DE SISTEMAS AIR-LIFT.

Como se ha mencionado el concepto de transporte por medio de un sistema *air-lift* fue descubierto por un ingeniero alemán en la industria minera con el nombre de [15] Carl E. Loescher en 1797, donde se encontró que es útil para el bombeo de pozos [22]. Gran parte de los primeros usos del *air-lift* fue visto en la industria de la minería del carbón debido a su capacidad para extraer minerales de los pozos de las minas profundas. La primera aplicación práctica de esta tecnología en los Estados Unidos no fue vista hasta 1846 donde fue utilizado en Pennsylvania en la industria del campo petrolífero [23].

Spotte [24] promovió el uso del transporte por medio del *air-lift* sobre las bombas mecánicas, debido a que tienen un menor costo inicial, menor mantenimiento, fácil instalación, capacidad de resistir a la obstrucción, requisitos de espacio reducido, diseño simplista y construcción, facilidad de regulación de caudal, y la versatilidad en muchas aplicaciones.

El transporte mediante *air-lift* ha sido utilizado para la toma de muestras de agua de mar [25], así como la circulación de agua y la aireación en los estanques de acuicultura [26]. El sistema *air-lift* también ha visto una gran cantidad de usos en sistemas de recirculación en acuicultura (RAS, por sus siglas en inglés) debido a su capacidad para airear, circular, y desgasificar el CO₂ de la columna de agua [27].

Reinemann [28] informo de que aproximadamente un tercio de la energía de bombeo empleada por un sistema de bomba centrífuga y aireador, es necesaria para un buen funcionamiento del sistema *air-lift* aplicado a RAS.

Awari [29] describió el sistema *air-lift* como un dispositivo para elevar líquidos o mezclas de líquidos (principalmente agua) y sólidos a través de un tubo parcialmente sumergido en el líquido, por medio de aire comprimido introducido en el tubo cerca del extremo inferior por medio de una abertura o boquilla.

La mayor parte de la literatura está de acuerdo en que para una configuración dada, la descarga de agua aumenta a medida que aumenta la entrada de aire hasta un punto óptimo, a partir del cual la descarga se reduce [30]. De igual manera, se debe tomar en cuenta que la descarga de un sistema *air-lift* no se producirá hasta que se alcanza un volumen mínimo de entrada del aire para un diámetro dado del sistema, el cual depende del tubo de ascenso, profundidad de inmersión, y la altura de elevación [31].

Nicklin [32] sugirió que los principales factores que contribuyen al rendimiento de los sistemas *air-lift*, son: profundidad de inmersión, la altura de elevación, el flujo de gas, y el área del tubo de subida.

Si bien la literatura la reporta como una técnica viable para la explotación de recursos geotérmicos, hasta el momento no reporta algún caso práctico de su implementación en un yacimiento geotérmico, pero si llevando a cabo distintos estudios acerca de su funcionamiento en este tipo de recursos, como lo es el trabajo de:

Mudde [33] quien realizó simulaciones en 2D y 3D de un sistema *air-lift* en un reactor con condiciones en estado estable a bajos caudales de aire, donde obtuvo que para las simulaciones 2D representan el flujo para bajas velocidades superficiales, mientras que para 3D obtuvo resultados más cercanos para velocidades mayores.

Van Baten [34] llevó a cabo una comparación de la hidrodinámica de reactores con *air-lift* internos en forma experimental y mediante simulación. Obtuvo que la simulación que llevo a cabo se apegó mucho a los resultados experimentales y, por lo tanto, se puede escalar a otros sistemas.

Cockx [35] propuso un nuevo modelo de la hidrodinámica para sistemas *air-lift* en reactores en bucle. Donde concluye que su modelo propuesto es una nueva manera para reactores de industriales de *air-lift* que son más generales que los métodos empíricos y de uso más fácil que la simulación fluidodinámica por computadora.

Nenes [36] llevó a cabo la simulación del bombeo por *air-lift* para pozos de moderada profundidad, donde propone el modelo integral para el análisis de estos sistemas, respecto al caudal obtenido de agua con aire el aire inyectado en el pozo.

2.2.2. PROFUNDIDAD DE INMERSIÓN PARA LEVANTAR RELACIÓN ALTURA, S: L.

La altura de elevación total (L) se define como la combinación de la altura del agua estática y la pérdida de carga dinámica que el sistema *air-lift* debe superar (**Figura 2.3**) La altura estática de agua se define como la distancia a la que se está bombeando el líquido por encima del espejo circundante. La pérdida de carga dinámica se define como la pérdida de presión incurrida en el circuito de agua que precede al punto de descarga del sistema *air-lift*, la cual, comúnmente se conoce como pérdida de carga por fricción. En la práctica, L se define generalmente en unidades de pulgadas de agua.

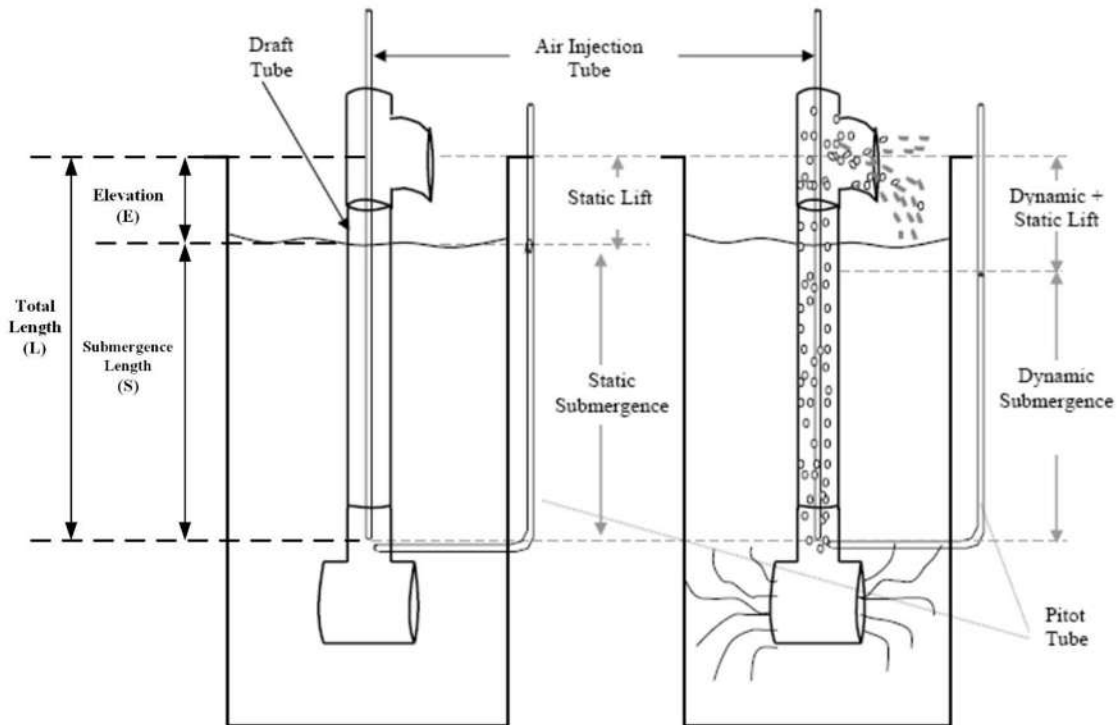


Figura 2.3. Carga dinámica que debe superar el sistema *air-lif* [37].

El segundo mayor factor que controla la operación del sistema *air-lift* es la profundidad de inmersión (S). Por lo general, se define como la distancia vertical entre el nivel del agua del tanque y la profundidad de inyección de aire (inmersión estática). Por otro lado, la variable S, en esta aplicación es mejor concebida como la distancia vertical entre el nivel de agua en un tubo de pitot situado justo antes del punto de aire de inyección y el nivel del agua en el depósito sólo cuando el agua está fluyendo a través del sistema *air-lift* (sumersión dinámica). La diferencia entre la inmersión estática y dinámica refleja la pérdida de carga significativa que se puede presentar en los flujos de agua desde el tanque a través del filtro y tuberías posteriores antes de llegar al sistema *air-lift*. Además, la variable S dicta la energía requerida o la presión necesaria para impulsar la operación del sistema *air-lift*.

Las variables presentadas anteriormente (L y S), normalmente son descritas de manera entrelazada mediante la relación ascenso-inmersión (S:L) o porcentaje de sumersión. Para un sistema *air-lift* que tiene una sustentación dinámica de 12 pulgadas y una inmersión de 48 pulgadas, la relación S:L será 4:1 ó solo 4, y el porcentaje de inmersión sería de 80% con una elevación de 20%. Respecto a esta relación, [37] Gudipati (2001) estudió la capacidad de bombeo de 2" y 3" de diámetro en un sistema *air-lift* con un porcentaje de sumersión de 67%, 75% y 80%, las cuales presentan las relaciones 2:1, 3:1 y 4:1 respecto a la relación S:L, respectivamente. Usando un tubo de aspiración de 3", se encontró que era necesaria una tasa de flujo de entrada de aire de 3 cfm para una sumersión 80%, 4 cfm para una sumersión 75% y 7 cfm para una sumersión 66% con el fin de bombear 15 galones por minuto.

Otro de los factores que influye en la operación de un sistema *air-lift* es la entrada de aire (Qg) o el flujo de aire inyectado. La relación gas-líquido (Qg:Qw) se refiere a la cantidad de

gas que se requiere para generar un flujo de líquido o agua dado (Q_w) en un sistema *air-lift*. La relación $Q_g:Q_w$ también conocida como G:L, ayuda a determinar el nivel de eficiencia bajo el que está operando una bomba. En la industria de la acuicultura. Por ejemplo, una relación $Q_g:Q_w$ de 1.6 para un sistema de *air-lift* dado, implicaría que se necesitan 1.6 galones por minuto de aire para bombear 1 galón por minuto de agua.

[38] Cachard, F.D. (1998) encontró que las dimensiones de un sistema *air-lift* pueden tener un gran impacto en la relación $Q_g:Q_w$. El uso de un sistema *air-lift* de 2" junto con el suministro de 9 cfm de Q_g , tanto al 92% de inmersión (33" inmersión, 3" elevación) como al 59% de inmersión (21" inmersión, 15" elevación), logro bombear 27 y 12 galones por minuto, respectivamente. Lo anterior expresado en una relación $Q_g:Q_w$, da unos valores de 2.5 y 6.7 para las dos configuraciones. Además, demostró que, para una profundidad dada de inyección, un pequeño aumento en la elevación estática o dinámica puede tener un impacto significativo en el rendimiento del sistema *air-lift*.

[39] Stenning, A.H. (1968) llevó a cabo varias pruebas con seis sistemas de *air-lift* al 100% de inmersión (El agua bombeada retorna a la superficie del estanque) para aplicaciones relacionadas con un estanque de desestratificación. Encontró que a profundidades de inyección de 127", 165" y 203", la más óptima esta entre estos valores, obteniendo descargas de agua de 27, 56 y 56 galones por minuto, respectivamente.

La configuración geométrica de un sistema *air-lift* y el método de inyección de aire (es decir, difusores de aire o tubería de extremo abierto) son factores que influyen en el funcionamiento del sistema. El rendimiento en sistemas *air-lift* de diámetro pequeño pueden ser mejorados a través del uso de varios métodos de inyección de aire, tales como el empleo de piedras de aire, placas de inyectoras, chaquetas de inyectoras [40] (Khalil et al, 1999; Morrison et al, 1987). Respecto a esto, [41] Bellelo, S.M., (2006) fue capaz de demostrar que al aumentar la superficie total de burbujas de gas dentro del tubo de aspiración (o número de burbujas por unidad de volumen de aire inyectado) mediante el uso de un difusor de aire, se puede mejorar significativamente el rendimiento. Este fenómeno es particularmente cierto para la transferencia de oxígeno en la columna de agua debido a la mayor cantidad de interfaz aire/agua resultante de la mayor área de superficie. Sin embargo, estas técnicas sólo han sido realmente eficaces cuando se presenta el régimen de flujo de burbuja.

Además, [42] Loyless (1995) estudió las propiedades de transferencia de oxígeno en un tubo ascendente de 2" de un sistema *air-lift* para los sistemas de recirculación en acuicultura con altura de elevación y porcentaje de inmersión de hasta 12" y 75%, respectivamente. Se encontró que las múltiples funciones admitidas por el *air-lift* podrían soportar adecuadamente las demandas de circulación y oxígeno ejercidas por un dimensionamiento adecuado del RAS.

2.2.3. REGÍMENES DE FLUJO EN BOMBAS DEL SISTEMA AIR-LIFT

Dentro del sistema *air-lift*, existen distintos tipos de flujo, dependiendo estos de la configuración, así como de la inyección de aire y su forma de hacerlo. Se tiene que, a tasas bajas de inyección de aire, aunado a que, si las pequeñas burbujas se inyectan en el tubo de aspiración a través de un difusor, se obtendrá que las burbujas permanecerán distribuidas sobre la sección transversal del tubo con poca interacción y manteniendo un régimen de flujo conocido como flujo de burbuja, el cual es ilustrado en la parte izquierda de la **Figura 2.4**. Conforme aumenta la tasa de entrada, las burbujas más pequeñas comienzan a coalescer en burbujas más grandes de gas que, en esencia, separan la columna de agua formando un flujo de bala (lado derecho de la **Figura 2.4**). La transición entre estos dos regímenes de flujo se caracteriza como el régimen de flujo burbujeante-bala (parte central de la **Figura 2.4**), donde las pequeñas burbujas se encuentran suspendidas dentro del líquido entre las balas de gas más grandes [43]. Reinemann y Timmons, 1989.

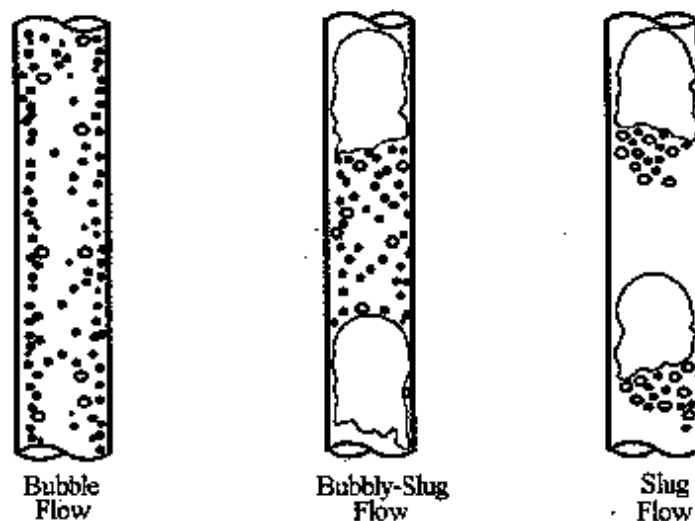


Figura 2.4. Tipos de flujo presentado en los sistemas *airlift*.

2.2.4. MODELOS PARA EL CALCULO DE SISTEMAS AIR-LIFT

2.2.4.1. MODELO DE FRACCIÓN MEDÍA DE VACÍO

Kato et al [44], desarrolló un modelo simple para modelar los sistemas *air-lift*, como el de la **Figura 2.2** donde el aire comprimido se suministra en el punto *i* (punto de inyección), ya sea externamente, o a través de una tubería interna. En el Tubería de succión, entre los puntos *1* e *i*, solo fluye agua, mientras que entre los puntos *i* y *2* (ascendente) hay un flujo bifásico agua-aire.

La sección transversal del tubo de succión se denota como A_1 , mientras que la sección transversal de los dos la sección transversal del flujo de fase (ascendente) es A_2 . En los sistemas de suministro externos, todos los elevadores se cruzan está ocupada por la mezcla bifásica. El flujo es el régimen de flujo deseado en el elevador, porque las pérdidas por fricción se vuelven mínimas, mientras que las tasas de bombeo de agua siguen siendo grande.

Este modelo lo obtuvo aplicando un balance de momentum a lo largo de la tubería de ascenso, suponiendo que la fracción de vacíos (Ec. 2.1), a_g , permanece constante.

$$a_g = \frac{\bar{V}_g}{\bar{V}_g + V_l + 0.35A_2\sqrt{gD_2}} \quad (2.1)$$

Donde $\bar{V}_g$ es el flujo volumétrico de aire promedio, V_l es el flujo volumétrico de líquido, g gravedad, A_2 es el área de sección transversal de la tubería en el punto 2 y D_2 es el diámetro de la tubería en el punto 2. El parámetro $\bar{V}_g$ se calcula asumiendo una expansión isotérmica de aire entre los puntos 2 e i, como lo muestra la Ec. 2.2.

$$\bar{V}_g = V_{g,2} \left(\frac{P_2}{P_i - P_2} \right) \ln \frac{P_i}{P_2} \quad (2.2)$$

Donde $V_{g,2}$ es el flujo volumétrico de aire en el punto 2, P_2 es la presión en el punto 2, P_i es la presión en la inyección de aire en el punto i.

Los flujos máscicos de agua M_l y aire M_g se calculan mediante la resolución de la ecuación 2.3.

$$\frac{2V_l^2 f_{mix}}{gL} \left[\frac{l_e}{D_1 A_1^2} + \frac{l_s + l_d}{D_2 A_2^2} (1 - a_g)^{-1.75} + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{1 - a_g} - \frac{3}{4} \right) \right] + \frac{l_d}{l_d + l_s} - a_g = 0 \quad (2.3)$$

Para el cálculo de f_{mix} y Re_{mix} se emplean las ecuaciones 2.4 y 2.5, respectivamente.

$$f_{mix} = 0.079 Re_{mix}^{-0.25} \quad (2.4)$$

$$Re_{mix} = \frac{M_l + M_g}{A_2 \mu_1} D_2 \quad (2.5)$$

El modelo de fracción media de vacío está limitado principalmente por dos razones:

- Solamente se considera un régimen de flujo (flujo de bala) a través de toda la tubería de ascenso. Como consecuencia, las transiciones de flujo no se consideran, lo que limita la aplicabilidad del modelo a pozos de hasta 11 m de profundidad.
- Las correlaciones propuestas para el cálculo de las pérdidas de fracción de volumen y de fricción son de una precisión limitada.

2.2.4.2. Modelo integral

Este modelo presenta mejoras respecto del modelo de fracción media de vacío, debido a que este modelo aborda las dos limitaciones presentes en el modelo de fracción media de vacío.

Los regímenes de flujo dentro de la tubería de ascenso pueden variar, por lo cual, el presente modelo los predice empleando un mapa apropiado del régimen de flujo para dicho propósito. Por otro lado, las propiedades de la mezcla de dos fases dentro de la tubería de ascenso se les permiten variar, para lo cual, se divide el ascenso en subsecciones (o celdas) Ver Figura 2.5. En cada una de estas celdas, las propiedades medias (tales como la presión y la fracción de vacíos) se consideran representativos de la celda, y difieren de las propiedades de las celdas adyacentes. Un balance de momento se aplica a cada celda, usando correlaciones para las pérdidas por fricción y fracción de vacío. Finalmente, se obtiene un sistema de ecuaciones algebraicas, y se resuelven mediante las dos condiciones de frontera de presión conocidas en los puntos 1 y 2.

De acuerdo a lo anterior, el campo de flujo dentro de la tubería de ascenso está dividido en secciones (celdas). Cada celda está definida por dos interfaces, una en el fondo (entrada) de la celda, mientras la restante en la cima (salida) de la celda. La numeración de las celdas e interfaces inician desde el punto 1 y aumentan hasta el punto 2 (**Figura 2.5**). La mezcla de dos fases entra en la celda k desde la interface y sale a través de la interface $k+1$. Las propiedades físicas (tales como fracción de vacío y presión) de ambas fases se definen en cada interfaz, mientras que las propiedades dentro de cada celda son la media de los valores de interface de k y $k+1$. Para la interfaz $k = 1$, la presión es igual a P_i , mientras que en $k=N+1$, la presión es igual a P_2 .

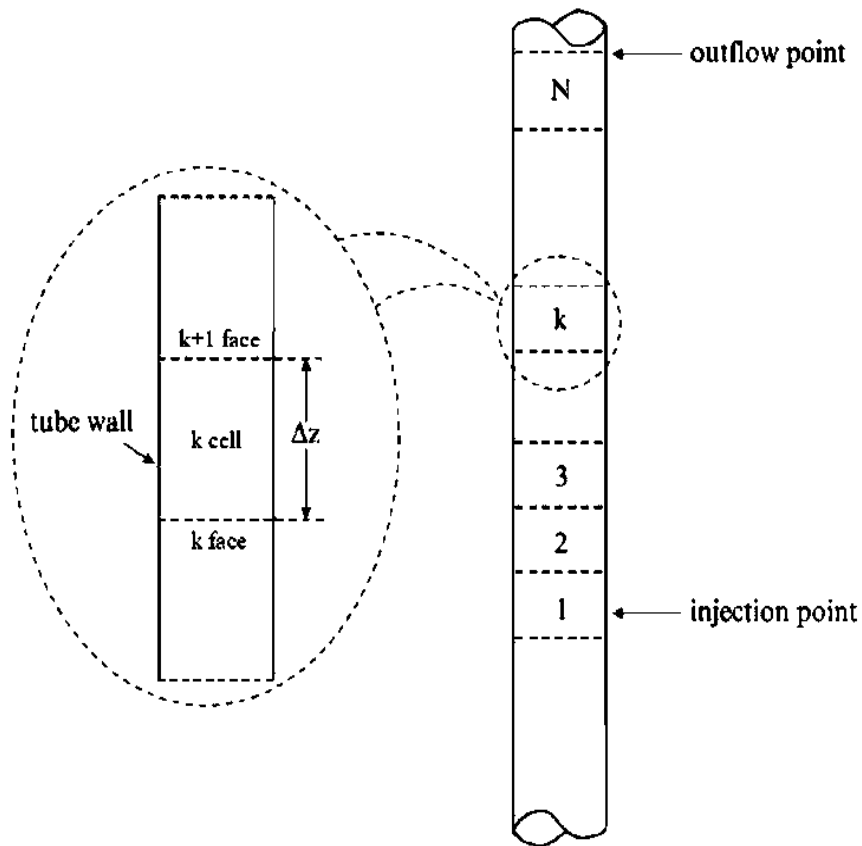


Figura 2.5. División de las celdas en la tubería de ascenso.

De igual manera, se aplica a cada celda un balance de momentum considerando estado estable, lo cual resulta en:

$$\text{Fluxes de salida}-\text{Fluxes de entrada}=\text{Fuerzas aplicadas}$$

Respecto a las fuerzas aplicadas, estas son la caída de presión, las fuerzas gravitatorias y de fricción. La caída de presión, ΔP_k , se calcula a partir de la Ec. 2.6

$$-\Delta P_k = -(P_{k+1} - P_k) \quad (2.6)$$

Las fuerzas gravitacionales (hidrostática), B_k , se calcula empleando la Ec. 2.7.

$$B_k = g \int_{z_k}^{z_{k+1}} (a_g \rho_g + a_l \rho_l) dz \approx g [a_{g,m} \rho_{g,m} + a_{l,m} \rho_l] \Delta z \quad (2.7)$$

donde

$$a_{g,m} = 0.5(a_{g,k} + a_{g,k+1}) \quad a_{l,m} = 1 - a_{g,m} \quad \rho_{g,m} = 0.5(\rho_{g,k} + \rho_{g,k+1}) \quad (2.8)$$

La fracción de vacíos en las interfaces se calcula a partir de la Ec. 2.8.

Las fuerzas de fricción, T_k , se calculan a partir de correlaciones y se expresan en términos de una caída de presión, como lo ilustra la Ec. 2.9.

$$T_k = \int_{z_k}^{z_{k+1}} \left(\frac{dP}{dz} \right)_f dz \approx \left(\frac{dP}{dz} \right)_f \Delta z \quad (2.9)$$

Para el cálculo del momentum, se debe realizar un análisis como el presentado anteriormente, donde primeramente el flux de momento entra a través de la interfaz k y sale desde la interfaz $k+1$. Por lo tanto, el cambio de flux de momentum, $\Delta J_k''$, se expresa como

$$\Delta J_k'' = J_{k+1}'' - J_k''$$

Donde, para el cálculo de los momentos, se emplean las Ec. 2.10 y 2.11, respectivamente.

$$J_{k+1}'' = J_{g,k+1}'' + J_{l,k+1}'' = \frac{M_{g,k+1}^2}{a_{g,k+1} \rho_{g,k+1} A_2^2} + \frac{M_{l,k+1}^2}{a_{l,k+1} \rho_l A_2^2} \quad (2.10)$$

$$J_k'' = J_{g,k}'' + J_{l,k}'' = \frac{M_{g,k}^2}{a_{g,k} \rho_{g,k} A_2^2} + \frac{M_{l,k}^2}{a_{l,k} \rho_l A_2^2} \quad (2.11)$$

Si se supone que el aire se comporta de manera ideal, el flujo volumétrico de aire, $V_{g,k}$, y la densidad, $\rho_{g,k}$, están dados por

$$V_{g,k} = \frac{T_k}{P_k} \left(\frac{P_0 V_{g0}}{T_0} \right)$$

$$\rho_{g,k} = \frac{P_k}{R^* T_k}$$

Para las ecuaciones anteriores, se tiene que R^* es $0.2867 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ para el aire, mientras que V_{g0} es la velocidad de suministro del compresor de aire a las condiciones de referencia T_0 , P_0 (aire a condiciones ambiente).

Las propiedades medias de las celdas se utilizan para el cálculo de la fracción de vacíos y la fricción, para lo cual se requiere el empleo de correlaciones apropiadas. Estas correlaciones son generalmente funciones del flujo volumétrico y la densidad, como se ilustra en las Ec. 2.12 y 2.13.

$$\left(\frac{dP}{dz} \right)_f = f_1 \{ \dot{V}_{g,m}, \rho_{g,m} \} \quad (2.12)$$

$$a_{g,m} = f_2 \{ \dot{V}_{g,m}, \rho_{g,m} \} \quad (2.13)$$

Para el cálculo de P_k , se emplea la ecuación 2.14

$$P_k = P_{k+1} + \left(\frac{M_{g,k+1}^2}{a_{g,k+1} \rho_{g,k+1} A_2^2} + \frac{M_{l,k+1}^2}{a_{l,k+1} \rho_l A_2^2} - \frac{M_{g,k}^2}{a_{g,k} \rho_{g,k} A_2^2} - \frac{M_{l,k}^2}{a_{l,k} \rho_l A_2^2} \right) + g(a_{g,m} \rho_{g,m} + a_{l,m} \rho_l) \Delta z + \left(\frac{dP}{dz} \right)_f \Delta z \quad (2.14)$$

Por otro lado, para el flujo en la tubería de succión, se aplica un balance de momento sencillo, aplicando la ecuación de Bernoulli entre los puntos 1 e i , se obtiene

$$P_i = P_1 - \rho_l g l_e + \left(\frac{dP}{dz} \right)_{f,l} l_e \quad (2.15)$$

La presión en el punto 1 es igual a la presión hidrostática (según lo dictado por el nivel de agua en el pozo) menos las pérdidas por fricción en la entrada de la tubería de aspiración, por lo cual se tiene:

$$P_1 = P_2 + \rho_l g (l_s + l_e) + (\text{Fricción})$$

Las pérdidas por fricción en la entrada se calculan como:

$$(Fricción) = -\xi \frac{M_l^2}{2\rho_1 A_1^2}$$

Donde ξ es el factor de entrada (aproximadamente de 0.5 dependiendo de la geometría considerada).

Para el cálculo de P_i , se emplea la ecuación 2.16.

$$P_i = P_2 + \rho_l g l_s - \xi \frac{M_l^2}{2\rho_1 A_1^2} + \left(\frac{dP}{dz} \right)_{f,l} l_e \quad (2.16)$$

Las pérdidas por fricción en el interior del tubo de aspiración se calculan a partir de la Ec. 2.17.

$$\left(\frac{dP}{dz} \right)_{f,l} = -f_m \frac{4}{D_1} \frac{M_l^2}{2\rho_1 A_1^2} \quad (2.17)$$

donde

$$f_m = \frac{16}{Re_l} \text{ para } Re \leq 2000$$

$$f_m = 0.079 Re_l^{-0.25} \text{ para } Re > 2000$$

Donde Re_l es el Reynolds del agua en la tubería de succión.

2.2.4.3. REGÍMENES DE FLUJO, CORRELACIONES DE FRICCIÓN Y FRACCIÓN DE VACÍOS

Las correlaciones usadas para calcular la fracción de vacío y las pérdidas por fricción en las ecuaciones (2.12), (2.13) dependen del régimen de flujo existente en cada celda. Para determinar el régimen de flujo, se emplea un mapa de régimen de flujo (**Figura 2.6**) Cuando cambian los regímenes de flujo, las correlaciones utilizadas cambian; esto puede introducir discontinuidades en la fricción y la fracción de vacíos. Debido a lo anterior, distintos problemas de convergencia pueden ser encontrados en el proceso de solución. Para hacer frente a esto, se asume una región de transición (y no una línea de transición) entre dos regímenes de flujo. Dentro de esta región, las propiedades son una media ponderada de los valores calculados para los dos regímenes.

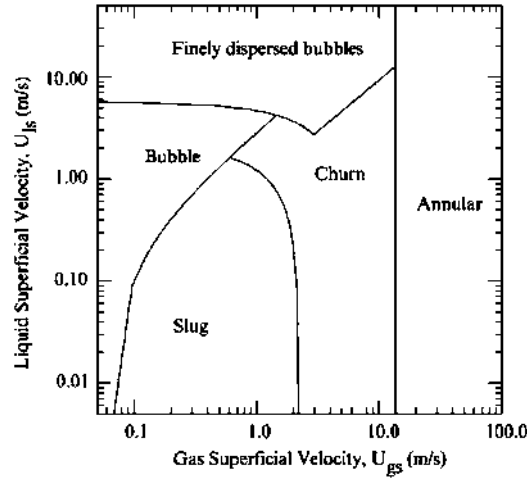


Figura 2.6. Mapa de régimen de flujo.

Las correlaciones presentadas a continuación son empleadas para el cómputo de la fracción de vacío. Lockhart-Martinelli [45] desarrollaron una correlación expresada por la Ec. 2.18.

$$a_g = (1 + X^{0.8})^{-0.378} \quad (2.18)$$

Donde el parámetro X de Lockhart-Martinelli está dado por

$$X^2 = \left(\frac{M_l}{M_g} \right)^{1.8} \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} \right) \left(\frac{\mu_l}{\mu_g} \right)^{0.2} \quad (2.19)$$

Existen varias correlaciones empleadas para la fricción, dependiendo estas del tipo de flujo que se presente en el fluido. Para un flujo de burbuja, se tiene la Ec. 2.20 para el cálculo de la fricción.

$$\left(\frac{dP}{dz} \right)_f = -2 \frac{f_T (U_{gs} + U_{ls}) \rho_l}{D_2} \quad (2.20)$$

$$f_T = 0.046 N_{Re}^{-0.20}, \quad N_{Re} = \frac{D_2 (U_{gs} + U_{ls}) \rho_l}{\mu_l}$$

Para el caso en el cual se presenta un flujo tipo bala [46], se emplearía la siguiente Ec. 2.21 para la fricción.

$$\left(\frac{dP}{dz} \right)_f = \Phi_{LO}^2 \left(\frac{dP}{dz} \right)_{LO} \quad (2.21)$$

donde

$$\Phi_{LO}^2 = E + \frac{3.24FH}{Fr^{0.045}We^{0.035}}$$

$$Fr = \frac{m^2}{gD_2\rho_{TP}} \quad We = \frac{m^2D_2}{\rho_{TP}\sigma} \quad \rho_{TP} = \left(\frac{x}{\rho_g} + \frac{1-x}{\rho_l} \right)^{-1}$$

$$H = \left(\frac{\rho_l}{\rho_g} \right)^{0.91} \left(\frac{\mu_g}{\mu_l} \right)^{0.19} \left(1 - \frac{\mu_g}{\mu_l} \right)^{0.71} \quad F = X^{0.78}(1-X)^{0.224}$$

$$E = (1-X)^2 + X^2 \left[\frac{\rho_l}{\rho_g} \left(\frac{\mu_g}{\mu_l} \right)^{1/4} \right] \quad X = \frac{M_g}{M_g + M_l}$$

Por otra parte, cuando se presenta agitación y un flujo anular [47], se sugiere la siguiente Ec. 2.22.

$$\left(\frac{dP}{dz} \right)_f = \Phi_{LO}^2 \left(\frac{dP}{dz} \right)_{LO} \quad \Phi_{LO} = aX^b \quad (2.22)$$

Donde X es el parámetro de Martinelli. Para las variables a y b, cuando se presenta un flujo de agitación, estas se calcularán con las siguientes Ec. 2.23.

$$a = \frac{14.2}{\left(\frac{M_l}{1.6404\pi D_2} \right)^{0.1}} \quad b = 0.75 \quad (2.23)$$

Mientras que para un flujo anular se emplearan las siguientes Ec.2.24. Presentadas.

$$a = 4.8 - 0.3125 \left(\frac{D_2}{0.0254} \right) \quad b = 0.343 - 0.021 \left(\frac{D_2}{0.0254} \right) \quad (2.24)$$

donde

$$\left(\frac{dP}{dz} \right)_{LO} = - \frac{2f_{LO}m^2}{D_2\rho_l} \quad f_{LO} = 0.079 N_{Re_{LO}}^{-0.25} \quad N_{Re_{LO}} = \frac{mD_2}{\mu_l} \quad m = \frac{M_g + M_l}{A_2}$$

CAPÍTULO III.

DISEÑO DEL SISTEMA

AIR-LIFT

3.1. ZONA GEOTÉRMICA Y DISEÑO CONCEPTUAL

Si bien, los trabajos descritos anteriormente se enfocan al comportamiento del sistema *air-lift*, no existe una clara referencia a su diseño. Por lo tanto, en este trabajo se muestra la implementación de un sistema *air-lift* para la extracción de energía geotérmica considerando las condiciones y diseño de un pozo geotérmico, ubicado en la localidad de San Nicolás de Simirao, Michoacán y ya descrito con anterioridad.

El diseño se pensó para instalarse en un pozo geotérmico, que se ubica en la localidad de San Nicolás de Simirao. Dicho pozo cuenta con una profundidad de 1350 m, encontrándose una obstrucción a los 550 m, según el estudio realizado por la CFE en 2011. La máxima temperatura registrada en el pozo fue de 146.5°C a los 256 m, respecto al perfil de temperatura, presión y temperatura de saturación calculada del pozo geotérmico que se mostró en la **Figura 1.9**. La configuración de tuberías y diámetros del pozo se muestra en la **Tabla 3.1**.

Tabla 3.1. Configuración de tuberías y diámetros del pozo objeto de estudio.

Diámetro agujero	Diámetro tubería	Profundidad final
26"	20"	18.1
17 1/2"	13 3/8"	363.6
12 1/4"	-----	1350

En la **Figura 3.1** se ilustra el cabezal del pozo geotérmico, ubicado en la localidad de San Nicolás de Simirao. En dicho cabezal, se pretende instalar el sistema *air-lift* para la extracción de calor geotérmico.



Figura 3.1. Cabezal del pozo geotérmico Z-3.

Para el diseño del sistema *air-lift* se tuvo que tomar en cuenta tanto el cabezal del pozo, así como la zona donde se encuentra, debido a que estas condiciones regirán varias cuestiones mecánicas que el sistema debe considerar. Además, en base a esto, se tiene una idea de la colocación de los elementos del sistema, así como una estructura para las maniobras de instalación.

En la **Figura 3.2** se muestra la localización de la comunidad de San Nicolás Simirao. Donde se observa de manera más particular la zona del ejido perteneciente a la comunidad, donde se observa la delimitación de la planta geotérmica, marcada con una línea amarilla y la localización del pozo geotérmico donde se realizaron los trabajos, marcado con un círculo rojo, en el cual se pretende emplear para distintas pruebas.



Figura 3.2. Localización del pozo geotérmico Z-3.

En la **Figura 3.3** se muestra el diseño conceptual del sistema *air-lift* a emplearse, donde se muestran los componentes con los que debe estar conformado el sistema, así como su posible arreglo. Dentro de los elementos que conforman el diseño conceptual, se encuentra el compresor de aire, el cual se encarga de suministrar el aire a presión. Además, se observa un tren de válvulas e indicadores que tienen como objetivo regular y mantener el sistema seguro. De igual manera, se muestra la tubería de conducción y los cabezales de inyección de aire que son encargados de generar los patrones de burbujas requeridos para la creación de la mezcla bifásica. Por último, se ilustra el sistema de sujeción de la tubería de conducción y los cabezales, el cual se va encargar de soportar el peso de estos dentro del pozo.

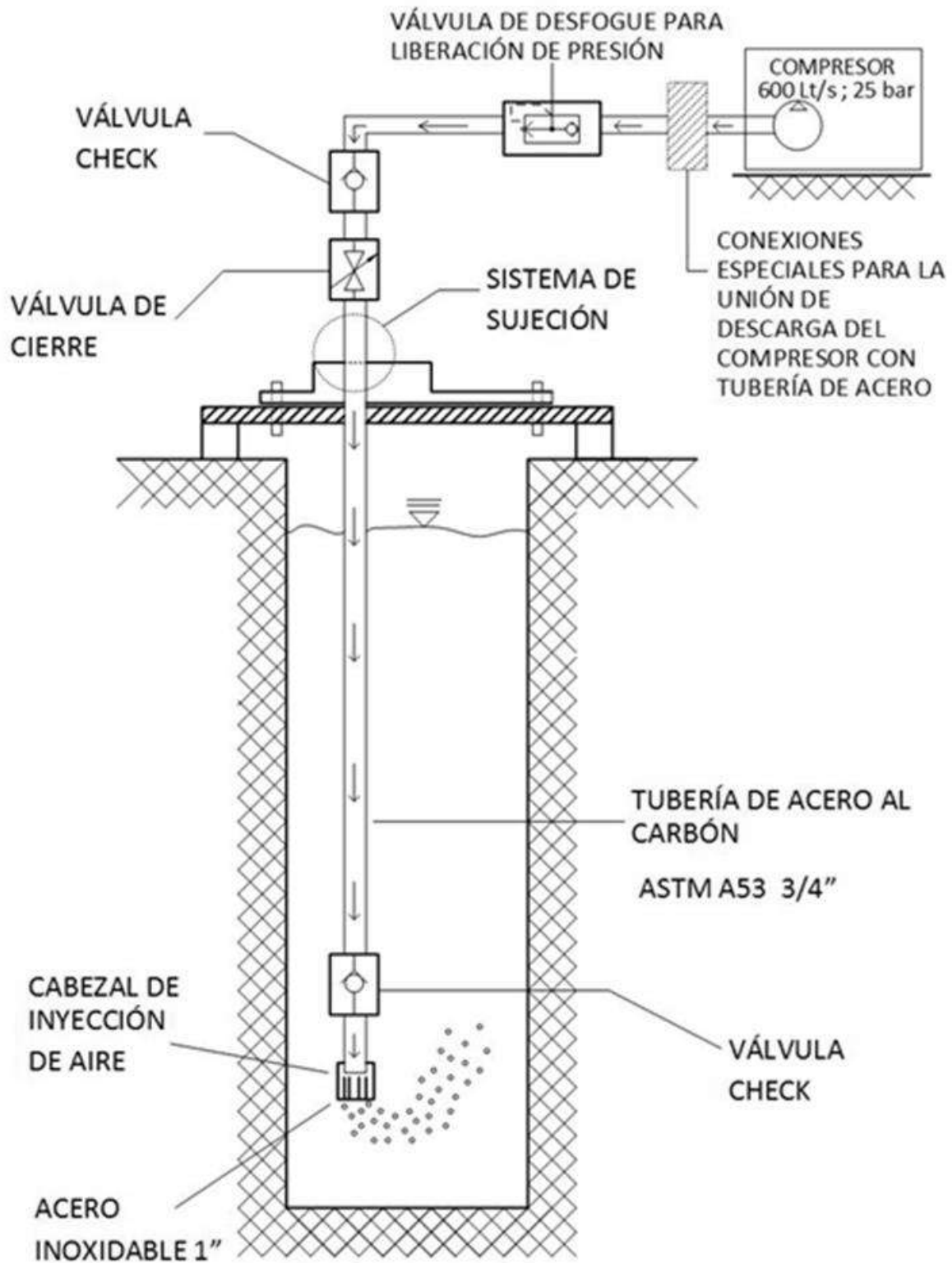


Figura 3.3. Diseño conceptual del sistema *air-lift*.

3.2. DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA AIR-LIFT

Para el dimensionamiento del sistema, se tomó como objetivo proporcionar el gasto que requiere una planta de ciclo binario de 300 kW, el cual es de aproximadamente 70 ton/h de agua a una temperatura promedio de 150°C. El sistema *air-lift* inyectaría aire en el pozo, emplazado a unos 100 m de profundidad, que es donde el pozo empieza a presentar una temperatura de 140°C que se mantiene casi constante hasta la obstrucción, tal como se puede apreciar en la **Figura 1.9**.

Se empleó el Modelo Integral para el dimensionamiento del sistema. Este es un modelo que presenta mejores características que el Modelo de Fracciones Vacías, debido a que se aplica en pozos mayores a 11 m y para distintos tipos de flujos que sean diferentes al tipo de burbuja grande (slug) [36]. A pesar de que el Modelo Integral presenta un error de 29%, es el modelo con mayor exactitud que hasta el momento existe para el dimensionamiento del sistema *air-lift* [36].

Con base en las ecuaciones (2.14), (2.18) y (2.19), en conjunto con las condiciones de dimensionamiento, se obtuvo el flujo másico de aire a emplearse, el cual resultó ser de 612.5 cfm (pies cúbicos por minuto, equivalente a 0.28906753 m³/s). Con ese flujo debería obtenerse un flujo de pozo de 350 gpm (galones por minuto, equivalente a 0.0220815 m³/s).

Tomando en cuenta tanto el diseño conceptual del sistema *air-lift*, así como las condiciones existentes en el terreno y en el cabezal del pozo geotérmico, se diseñó el sistema *air-lift* mostrado en la **Figura 3.4**. Cabe destacarse que el diseño del sistema *air-lift* cuenta con los elementos necesarios para su funcionamiento y disposición.

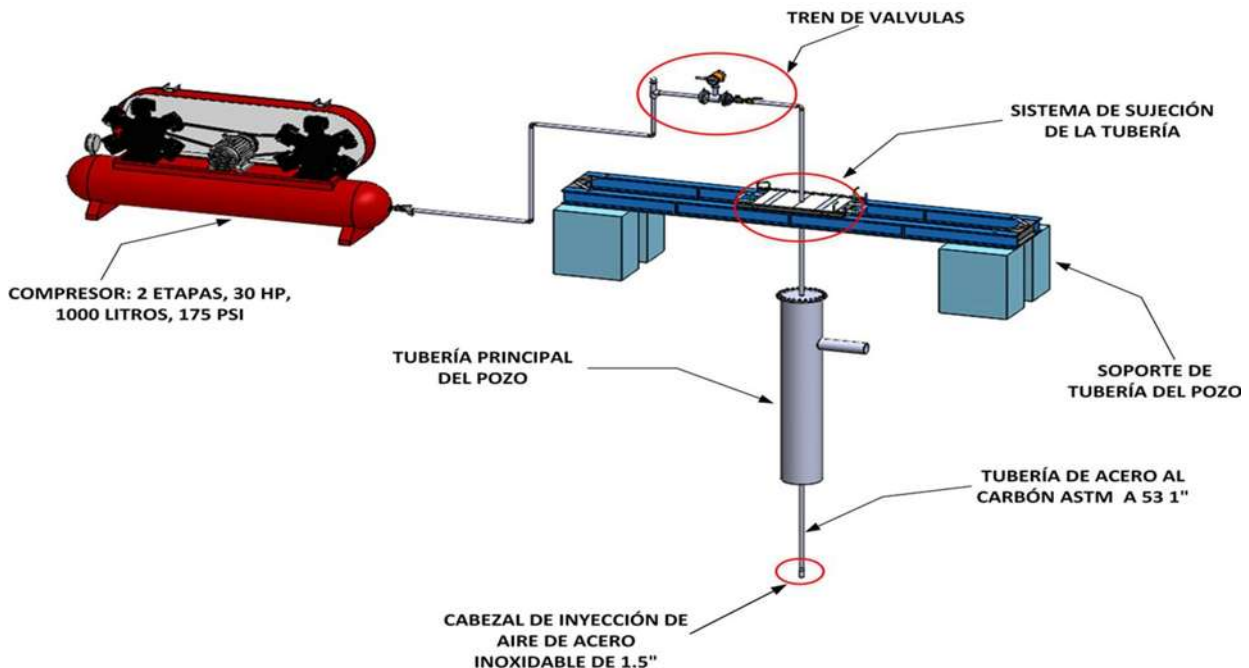


Figura 3.4. Diseño propuesto del sistema *air-lift*.

3.2.1. TUBERÍA DE INYECCIÓN DE AIRE

Respecto a la tubería de inyección de aire, esta debe cumplir con los requerimientos del propio sistema *air-lift*, así como su adaptabilidad a las condiciones predominantes en el pozo geotérmico. Dentro de las posibilidades a emplear en el sistema, surge la opción de emplear acero inoxidable, que, si bien es resistente a la corrosión, así como a las temperaturas que presenta el yacimiento geotérmico, su costo es demasiado elevado en comparación con otro tipo de aceros que cumplen la misma función. Además de tener en cuenta las condiciones anteriores, se debe tomar en cuenta la expansión térmica de la propia tubería, así como el tipo de unión de la misma, ya que, de acuerdo al diseño presentado, la tubería de conducción de aire tendrá un sistema de sujeción en el cabezal del pozo, pero a partir de esa sujeción la tubería se encuentra suspendida dentro del pozo, por lo cual, la unión entre tramos de tubería debe ser la adecuada para soportar las cargas presentes en el sistema.

En el caso específico del acero ASTM A53, este presenta una gran flexibilidad para su empleo en un gran número de casos, contando con presentaciones de 3 y 6 m el tramo de este material. En especial, para la conducción de aire a la presión requerida, así como su empleo para soportar las condiciones predominantes en el pozo geotérmico. De igual manera, su costo es bastante menor que el del acero inoxidable y la unión entre tramos de este tipo de tubería puede ser de manera soldada o roscada, dependiendo de los requerimientos. Además, la expansión ocasionada por las diferencias de temperatura es menor y no compromete la integridad de la misma tubería, así como del sistema. Por otro lado, la tubería se encuentra disponibles con diferentes números de cedula, de acuerdo a la aplicación requerida.

De acuerdo a lo anterior, se propone para la tubería de conducción de aire del sistema *air-lift*, acero ASTM A53. Las características de la tubería a emplearse son: unión roscada (tipo cónica NPT), diámetro nominal de 1", cedula 40, longitud total de 100 metros, tramos de 3 m y unión entre tramos de tubería mediante coples (rosca tipo cónica NPT). En la **Figura 3.5** y **Figura 3.6** se presenta un tramo de tubería para la conducción de aire con las características antes mencionadas y el cople de unión entre tramos de tubería para la conducción de aire, respectivamente.

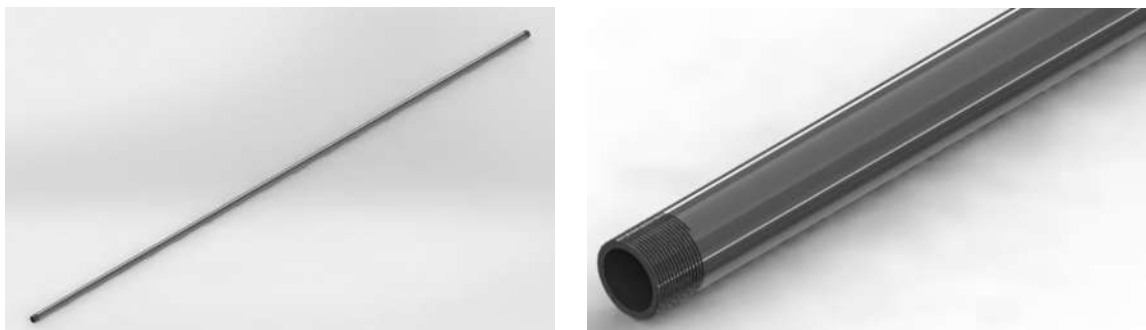


Figura 3.5. Tramo de tubería para la conducción de aire.



Figura 3.6. Cople de unión entre tramos de la tubería de inyección de aire.

Debido a que las uniones de la tubería de conducción de aire, se proponen roscadas, se calcularon los esfuerzos tanto en las roscas de la tubería como en el cople de unión, ya que de estos dependerá que la tubería resista el propio peso de la misma. Para la determinación de estos esfuerzos, se tuvo en consideración que toda la línea de inyección de aire se va encontrar solamente sujeta en el cabezal del pozo, siendo esto, que la última unión de cople-tramo va a soportar todo el peso de la línea de tubería suspendida dentro del pozo, por lo cual estos elementos serán los sujetos de análisis, debido a que las condiciones más críticas se presentan en estos elementos.

Para el cálculo de los esfuerzos presentes en estos elementos, se consideró el peso total de la línea de tubería de inyección más accesorios y cabezales, además, se consideró un factor de seguridad del 40%, dando un peso de 150 kg. En base a lo anterior, en la **Figura 3.7** se muestra las piezas bajo análisis, las cuales son la unión entre tramos de tubería mediante un cople.

Sobre las piezas ilustradas en la **Figura 3.7** se realizaron simulaciones numéricas para determinar la deformación total, la deformación unitaria, el esfuerzo de Von Mises y el factor de seguridad. En la **Figura 3.8** se muestra la deformación unitaria, donde el valor mínimo es de 1.2×10^{-7} m/m, mientras el máximo es de 6.0864×10^{-4} m/m. En la **Figura 3.9** se observa la deformación total que presenta la unión, con un valor máximo de 1.1248×10^{-5} m y uno mínimo de 1.5071×10^{-7} m. En la **Figura 3.10** se muestran los esfuerzos de Von Mises que se generan en la unión debido a las cargas, con un valor máximo de 1.0523×10^8 Pa y uno mínimo de 11,736 Pa. Por último, se muestran los factores de seguridad en la unión en la **Figura 3.11**, donde el valor máximo es de 15, mientras el mínimo es de 2.2806.

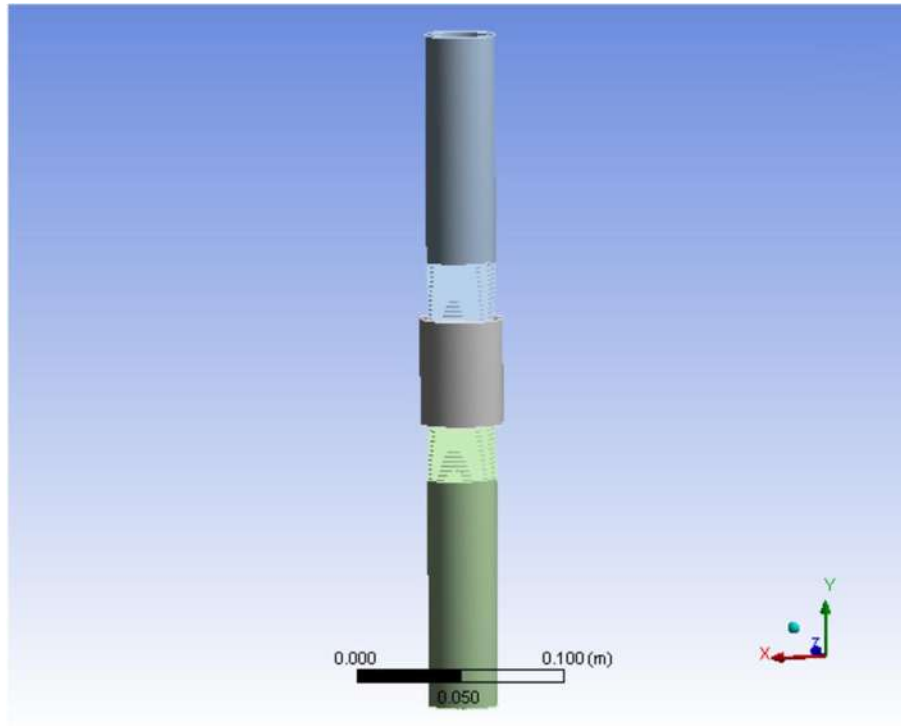


Figura 3.7. Piezas bajo análisis, unión de tuberías mediante cople.

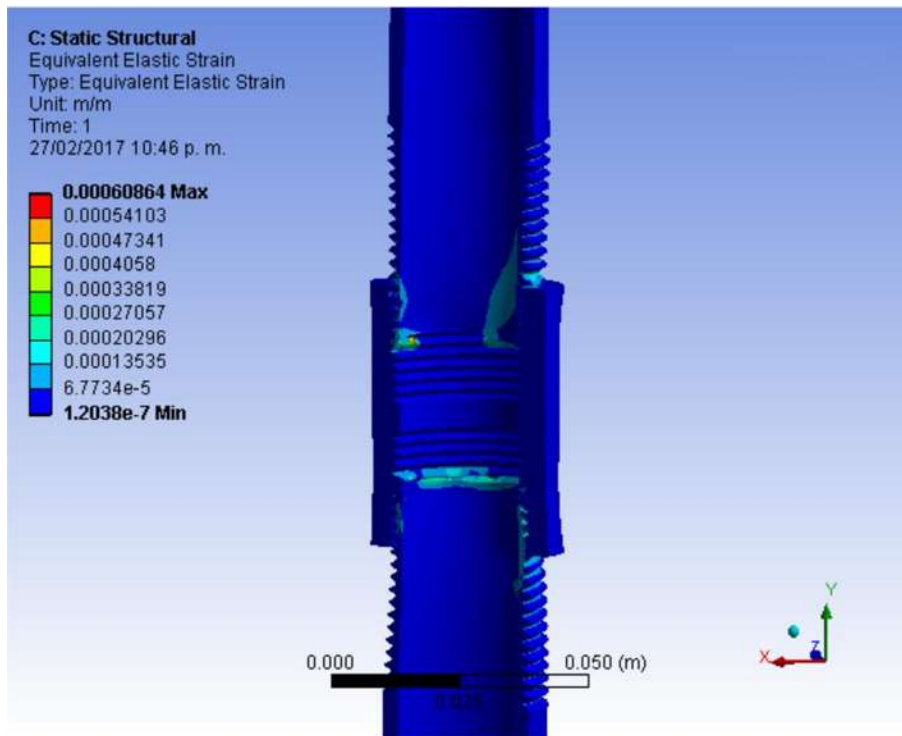


Figura 3.8. Deformación unitaria de la unión de tuberías mediante cople.

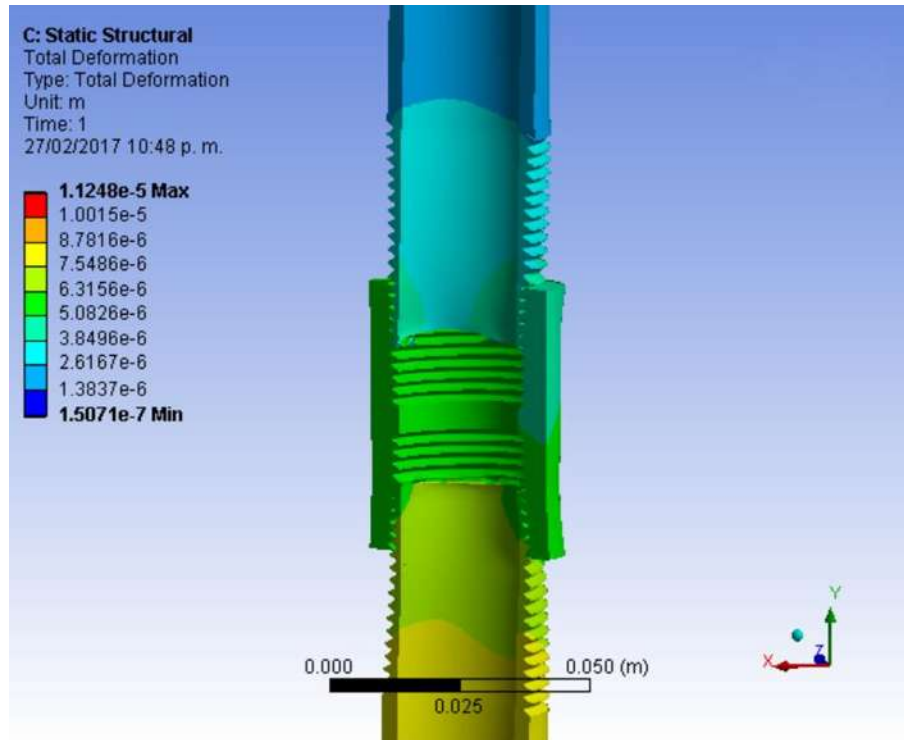


Figura 3.9. Deformación total de la unión de tuberías mediante cople.

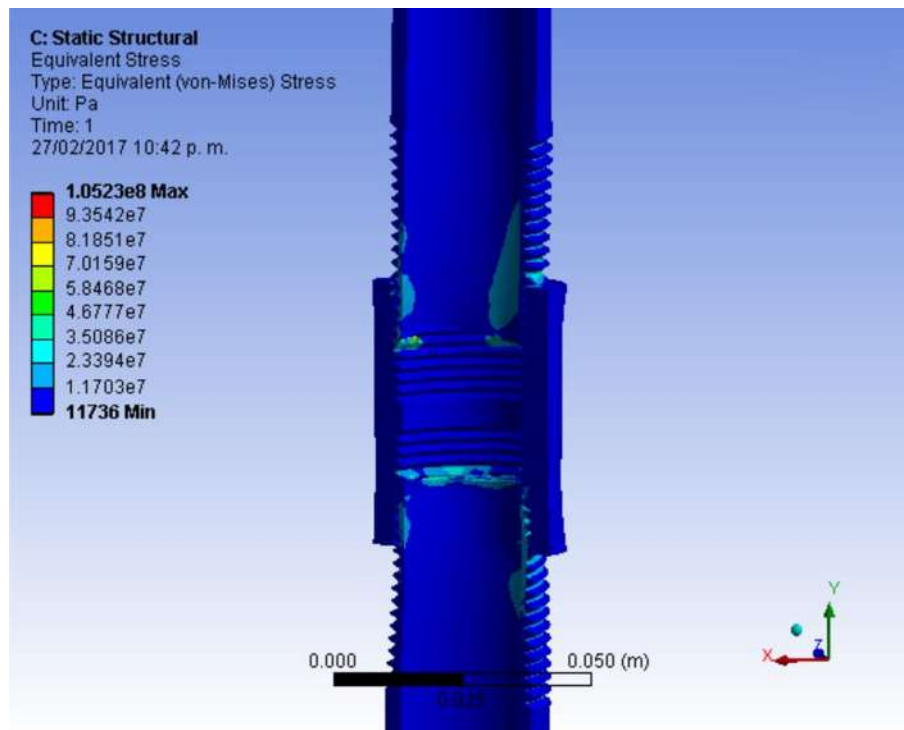


Figura 3.10. Esfuerzo de Von Mises en la unión de tuberías mediante cople.

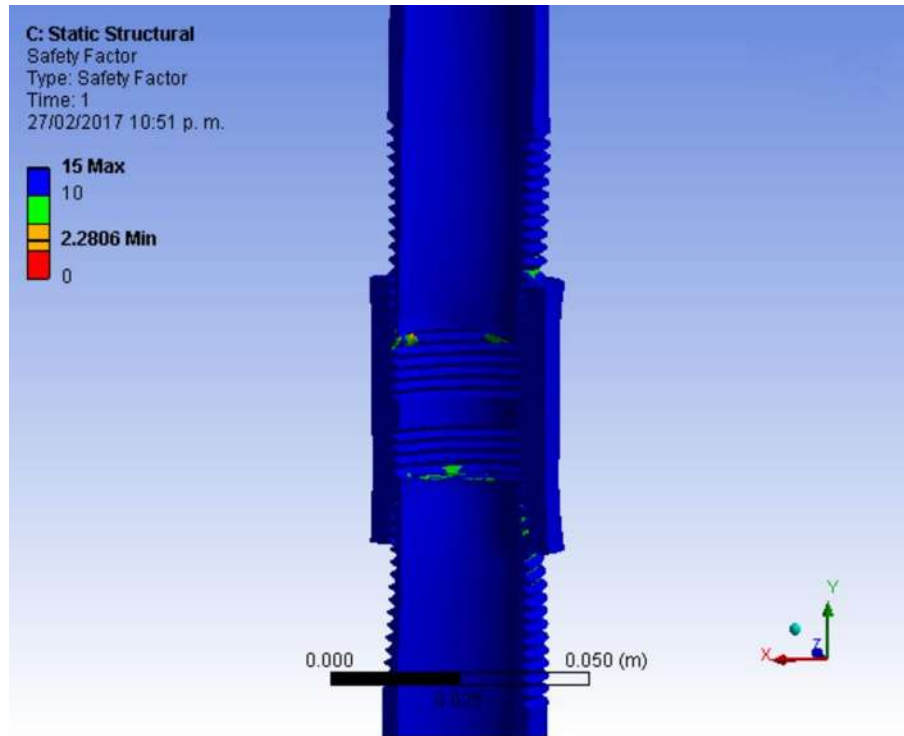


Figura 3.11. Factor de seguridad en la unión de tuberías mediante cople.

3.2.2. CABEZALES DE INYECCIÓN DE AIRE

El cabezal del sistema *air-lift* para la inyección de aire es de gran importancia, debido a que este no solamente inyectará el aire en el fluido del pozo geotérmico, sino que de él dependerá la configuración de las burbujas de aire que se van a formar.

La configuración de burbuja de aire incidirá directamente en la eficacia del sistema, por lo cual es importante contar con una configuración que no solamente se enfoque en el tamaño de la burbuja, sino en su cantidad, patrón, distribución y configuración geométrica.

Hasta el momento, la literatura no reporta una configuración de cabezal para aplicaciones geotérmicas. Sin embargo, se proponen dos configuraciones base de 1 1/2" de diámetro para los cabezales del sistema *air-lift*. La primera configuración base tiene un largo de 10 cm y la segunda de 20 cm. Ambas configuraciones cuentan en uno de sus extremos con un roscado para la unión con la tubería de inyección de aire, y después del roscado sigue un barrenado con el mismo diámetro hasta 2 cm antes del extremo contrario. Por otra parte, el material propuesto para los cabezales es acero inoxidable, debido a los pequeños orificios con los que va a contar el cabezal, lo cuales están expuestos al fluido geotérmico y pueden corroerse y obstruirse más fácilmente debido a sus pequeñas dimensiones.

Para la configuración base de 10 cm, todos los patrones de orificios se encuentran en el extremo contrario de donde se encuentra la rosca, es decir, los orificios se encuentran sobre la cara circular dentro de un círculo de diámetro de 1". En la **Figura 3.12** se ilustra uno de los patrones de orificios propuestos, con un diámetro de 3/16". De igual manera, en las

Figuras 3.13 y 3.14, se muestra el patrón con orificios de 1/4" y 1/8" de diámetro, respectivamente.



Figura 3.12. Patrón de orificios 3/16" de diámetro, cabezal de 10 cm.



Figura 3.13. Patrón de orificios 1/4" de diámetro, cabezal de 10 cm.



Figura 3.14. Patrón de orificios 1/8" de diámetro, cabezal de 10 cm.

Por otra parte, para los cabezales de 20 cm los orificios se encuentran distribuidos a lo largo de toda la cara cilíndrica, pero sin contar con orificios en la cara opuesta al roscado. En la **Figura 3.15** se observa el patrón de orificios a lo largo del cabezal de 20 cm, que tienen un diámetro de 3/16".

En la figura 3.16 se muestra el patrón de orificios de 1/4" de diámetro, y en la figura 3.17 se ilustra un patrón de orificios con distintos diámetros de 1/8", 3/16", 1/4" y 5/16".



Figura 3.15. Patrón de orificios 3/16" de diámetro, cabezal de 20 cm.



Figura 3.16. Patrón de orificios 1/4" de diámetro, cabezal base 20 cm.



Figura 3.17. Patrón de orificios 1/8", 3/16", 1/4" y 5/16" de diámetro, cabezal base 20 cm.

3.2.3. TREN DE VÁLVULAS E INDICADORES

A pesar de que las presiones empleadas en sistemas típicos *air-lift* no son demasiado altas, el diseño debe contar con dispositivos de seguridad que actúen ante cualquier mal funcionamiento o imprevisto. Por lo anterior, el sistema debe contar con un tren de válvulas

(Fig. 3.18) para mantener un funcionamiento correcto, y asegurar la integridad física de los operarios ante cualquier eventualidad o ‘arranque’ del pozo.

El tren de válvulas cuenta con una disposición de válvulas específicas, partiendo del compresor donde se encuentra primeramente una válvula de seguridad (Fig. 3.19) cuya función es permitir un desfogue en caso de que el sistema sufra una sobrepresión. Posteriormente a la válvula de seguridad, se encuentra un indicador de flujo (Fig. 3.20), cuya función es indicar el gasto de aire que el sistema está entregando y prevenir cualquier mal funcionamiento. Después del indicador de flujo se localiza una válvula check (Fig. 3.21), que cumple con la tarea de prevenir cualquier retorno de fluido, ya sea de aire o del propio fluido del pozo geotérmico ante un eventual ‘arranque’, evitando que el sistema presente un fallo. Por último, se encuentra una válvula de cierre manual (Fig. 3.22), que permitirá cerrar el sistema en caso que así se requiera, o cuando el sistema no se encuentre operando.

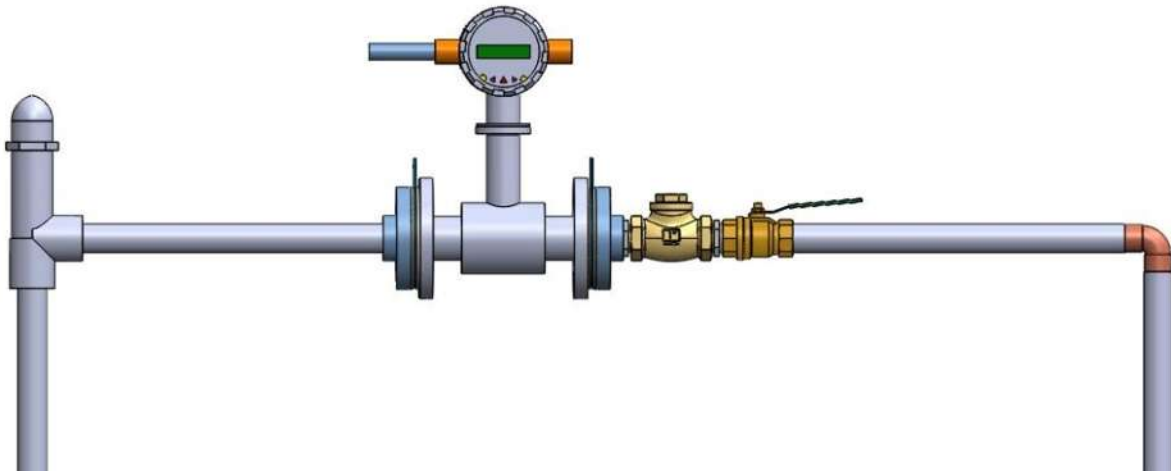


Figura 3.18. Tren de Válvulas e indicador de flujo del sistema *air-lift*.

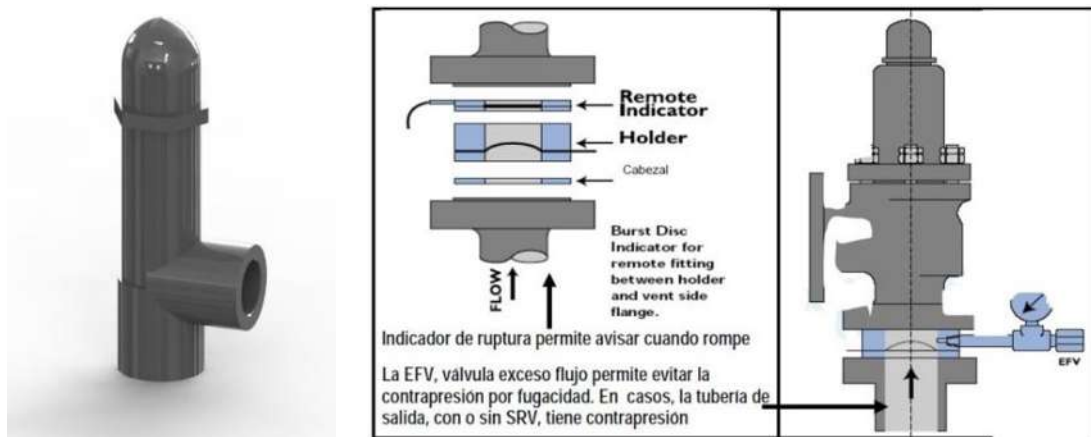


Figura 3.19. Válvula de alivio.

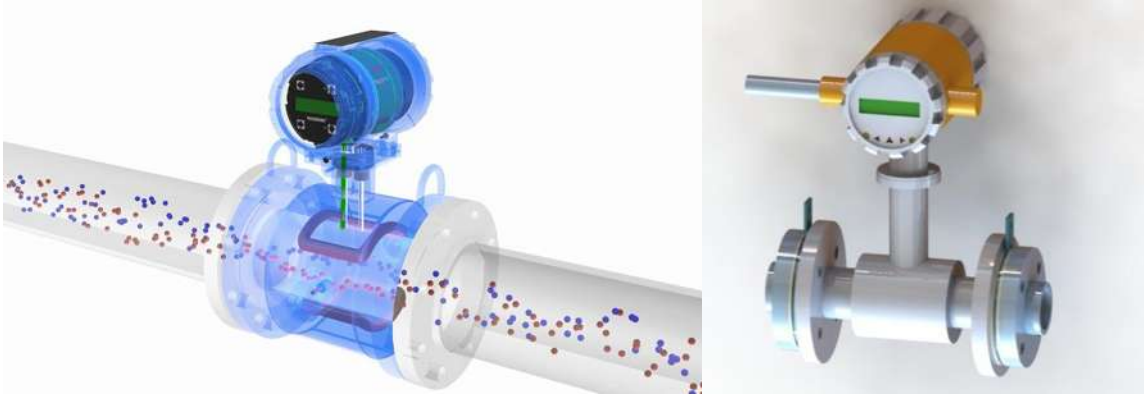


Figura 3.20. Flujómetro de aire comprimido.

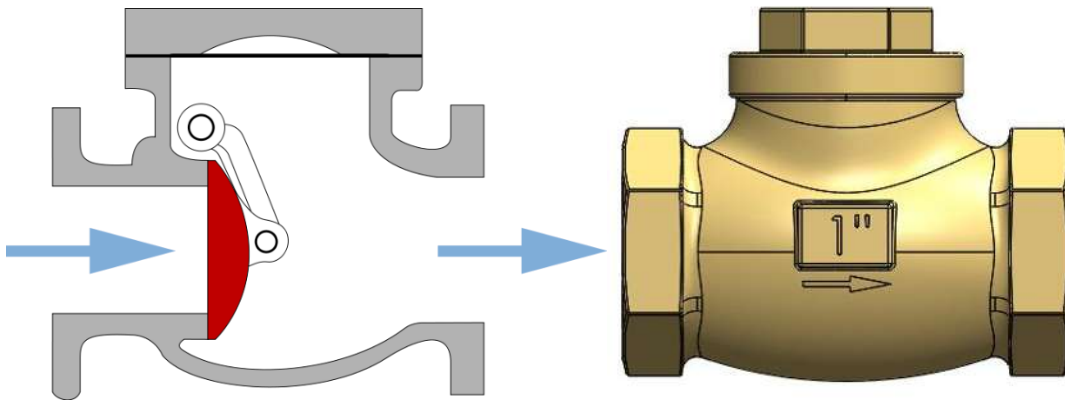


Figura 3.21. Válvula check.

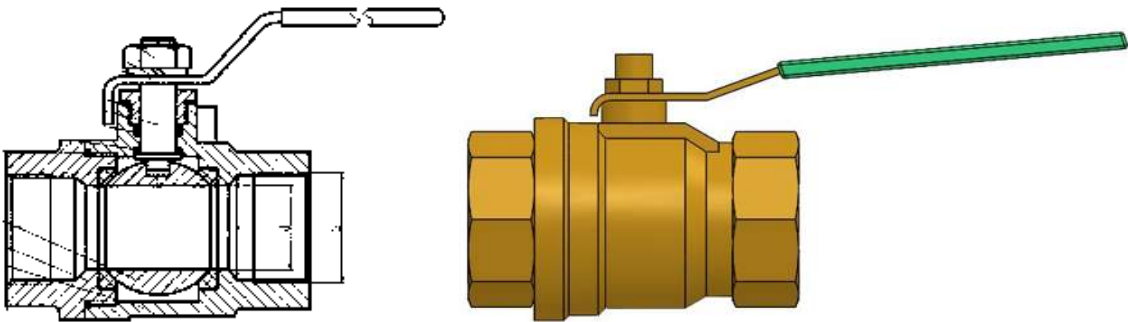


Figura 3.22. Válvula de cierre manual.

3.2.4. COMPRESOR

Este equipo se encargará de proveer el gasto de aire a la presión requerida para que el sistema *air-lift* funcione como se planea. Para determinar la presión requerida por el sistema con el gasto de aire previamente obtenido (de 350 gpm), se empleó la ecuación de continuidad (Ec. 3.1) en conjunto con la ecuación de Bernoulli (Ec. 3.2). Con esta base, se obtuvo que el compresor debe proporcionar una presión de aproximadamente 14 bar

$$\left[\frac{\partial \rho}{\partial t} + (\nabla \cdot \rho \mathbf{v}) = 0 \right] \quad (3.1)$$

$$\left[\rho D\mathbf{v}/Dt = -\nabla p + \rho \mathbf{g} \right] \quad (3.2)$$

Así, el compresor deberá proporcionar que el pozo geotérmico tenga un gasto de 350 gpm a una presión de 14 bar, además de cumplir con características adicionales, tales como conexión trifásica, voltaje de trabajo de 220/440 V, potencia de 40 hp, medidor de presión, sistema de lubricación y estar fabricado para soportar condiciones a la intemperie.

3.2.5. SISTEMA DE SUJECIÓN Y PRENSAESTOPAS

Una de las partes más críticas en la instalación del sistema *air-lift*, es la inserción de la tubería de conducción de aire dentro de pozo geotérmico, debido al propio peso de la tubería, así como las maniobras requeridas.

Para llevar a cabo las maniobras requeridas, se debe contar con una abrazadera-sujetador de tubería, la cual se ilustra en la **Figura 3.23**, donde se observa que el sujetador está conformado por dos omegas, las cuales cuentan con orificios en sus partes planas, en las cuales son insertados tornillos con tuercas de seguridad.

El sistema de sujeción deberá estar diseñado en función del dimensionamiento del sistema *air-lift*.

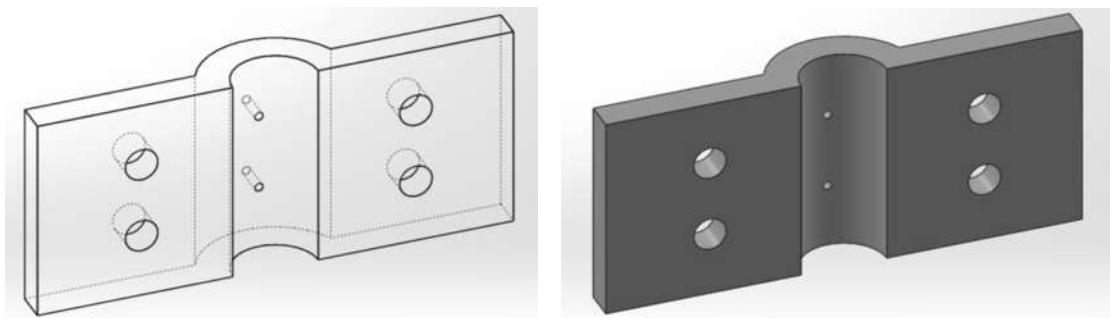


Figura 3.23. Abrazadera de sujeción e instalación para el sistema Air-Lift.

Para los prensaestopas se diseñó un sistema de sellado por compresión, que permite realizar el sellado entre la tubería de inyección de aire y el cabezal del pozo geotérmico. En las **Figuras 3.24 y 3.25** se muestra el diagrama del prensaestopas.

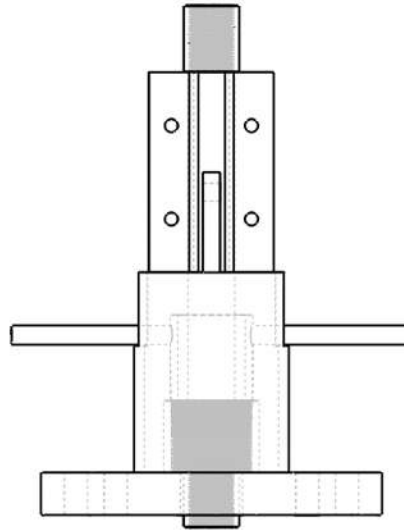


Figura 3.24. Sistema de sellado por compresión (Prensaestopas).

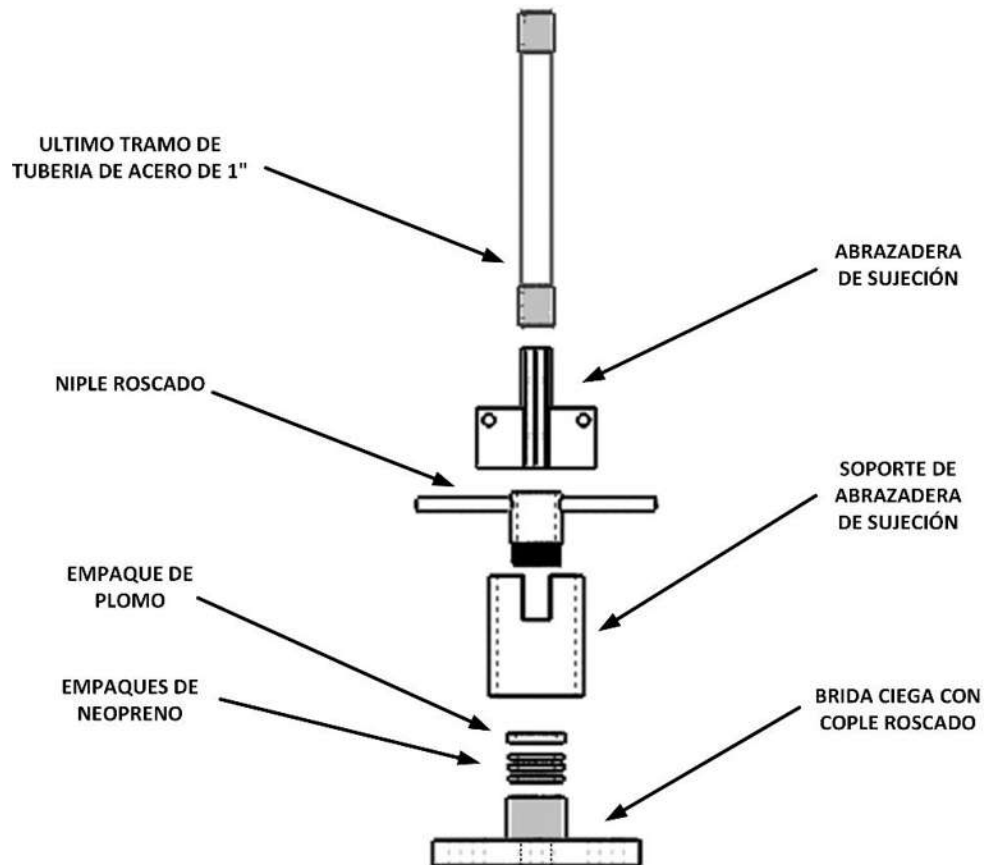


Figura 3.25. Diagrama del Prensaestopas.

Este sistema de sellado por compresión o prensaestopas, cumple varios objetivos:

- Evita la fuga del fluido geotérmico a través del orificio en el cual se encuentra ubicado la tubería de 1" y el cabezal del pozo geotérmico.
- Previene que la tubería se desplace empujándola por el diferencial de presión que actúa sobre él.
- Al momento de estar introduciendo la tubería y ante un posible arranque del pozo geotérmico tiene la forma de sellarlo inmediatamente y evitar que se des controle el pozo.
- Evita soldar el último tramo de tubería para evitar fugas, logrando con ello introducir o retirar tramos de tubería con mucha facilidad.

3.3. CIRCUITO DE TUBERÍAS DE RECIRCULACIÓN PARA EL FLUIDO GEOTÉRMICO

Para llevar a cabo las mediciones del pozo geotérmico al implementarse el sistema *air-lift*. Se llevó a cabo el dimensionamiento, diseño y construcción de un circuito de tuberías de recirculación para el fluido geotérmico extraído del pozo geotérmico, el cual tiene como objetivo el medir la cantidad de energía geotérmica extraída del reservorio (temperatura, presión y flujo). Este sistema tiene la finalidad de hacer uso exclusivamente del calor geotérmico sin consumo de fluido o salmuera geotérmica.

En la **Figura 3.26** se muestra de manera esquemática el circuito, donde se observa que a la salida del pozo geotérmico se encuentra una válvula seguida de instrumentación para medir los parámetros de extracción de energía geotérmica montada en tubería de 4" de acero. Posteriormente, al seguir en la tubería de 4", se encuentra una expansión para lograr una disminución tanto en temperatura como presión. Por último, al seguir el recorrido en la tubería de 10" se encuentra una válvula y después instrumentación, para medir la temperatura a la entrada del pozo geotérmico y tener un parámetro de la extracción de energía geotérmica que cada tecnología aporta.

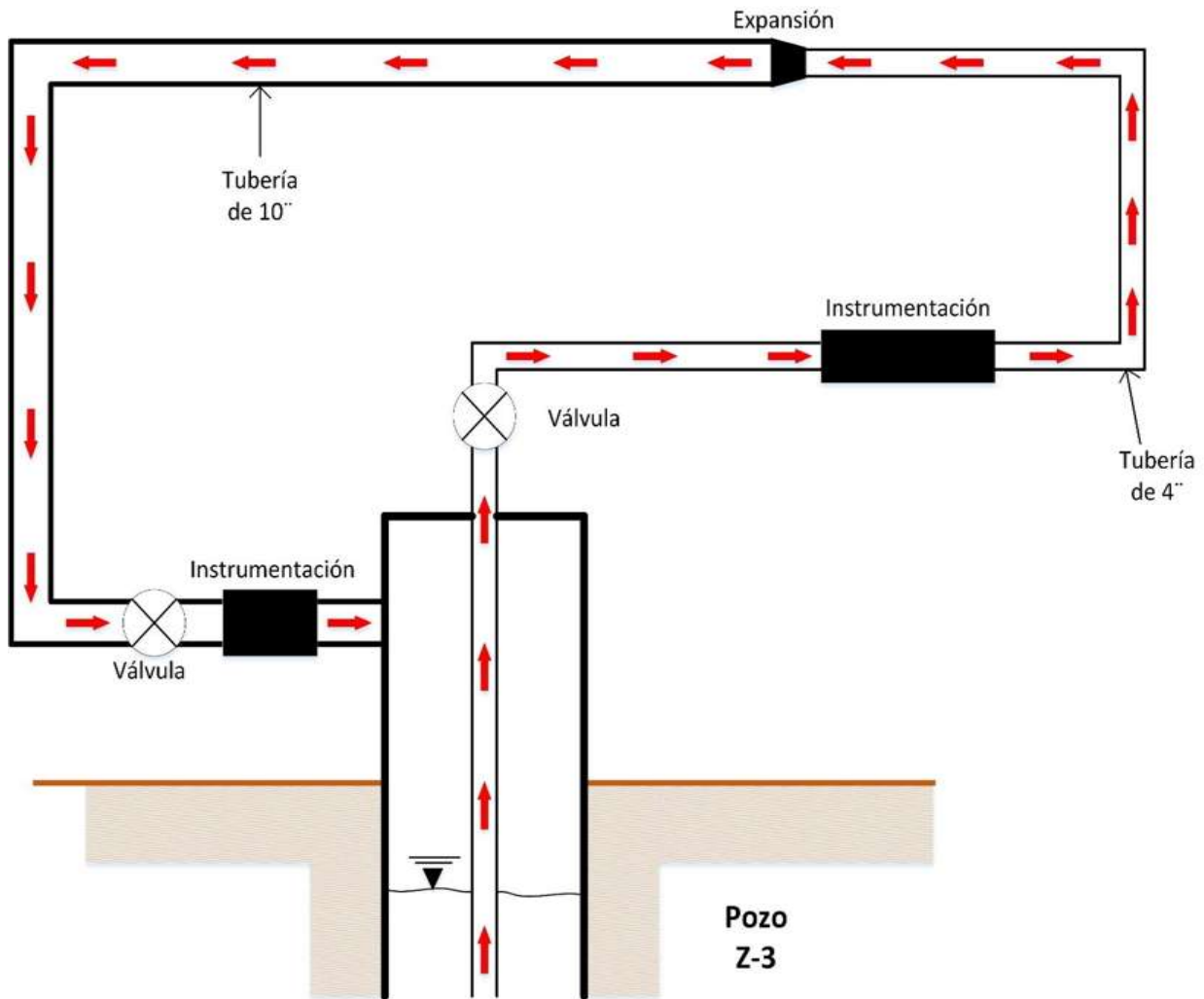


Figura 3.26. Circuito de recirculación y reinyección de la salmuera geotérmica.

3.4. ESTRUCTURA DE MONTAJE

El objetivo principal de la estructura de montaje es para la carga y maniobras para la inserción de la tubería del sistema *air-lift*, así como maniobras de mantenimiento sobre el mismo pozo geotérmico. Se realizó el diseño, la adecuación y el montaje de la estructura de carga sobre el pozo geotérmico.

De las consideraciones que se deben tomar en cuenta para su diseño son las alturas empleadas para los trabajos requeridos, se recomienda que el polipasto a emplearse tenga por lo menos una longitud de izaje de 9 m. Esta estructura se utilizará para distintos trabajos que se requieran llevar a cabo sobre el pozo existente con claros menores a 6 m.

3.4.1. ESTRUCTURA A

El cuadro principal de la estructura estará construido con tubería de 4", los escalones con tubería de 2", y en la parte de arriba de la estructura se le colocará una placa de 0.5" de grosor con barrenos de 1" para la sujeción con otras partes de la estructura general. En la Figura 3.27 se muestran las vistas principales de la estructura A.

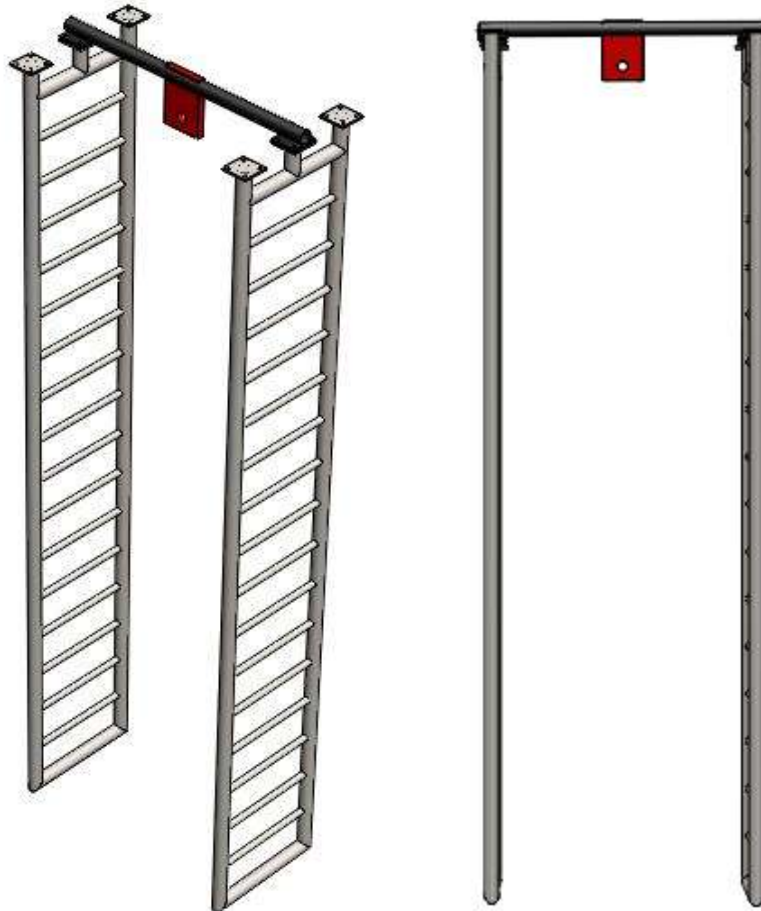


Figura 3.27. Vista Isométrica (Estructura A)

3.4.2. ESTRUCTURA B

Esta estructura B, es la estructura que se complementa con la estructura A y será empleada para trabajos que requieren un claro mayor a 6 m.

El cuadro principal de la estructura estará construido con tubería de 4", los escalones con tubería de 2", y en la parte de arriba de la estructura se le colocará una placa de 0.5" de grosor con barrenos de 1" para la sujeción con otras partes de la estructura general, y de forma de sujeción entre las partes será principalmente por el soporte para el polipasto y con ángulos cruzados. En la Figura 3.28 se muestran las vistas principales de la estructura B.

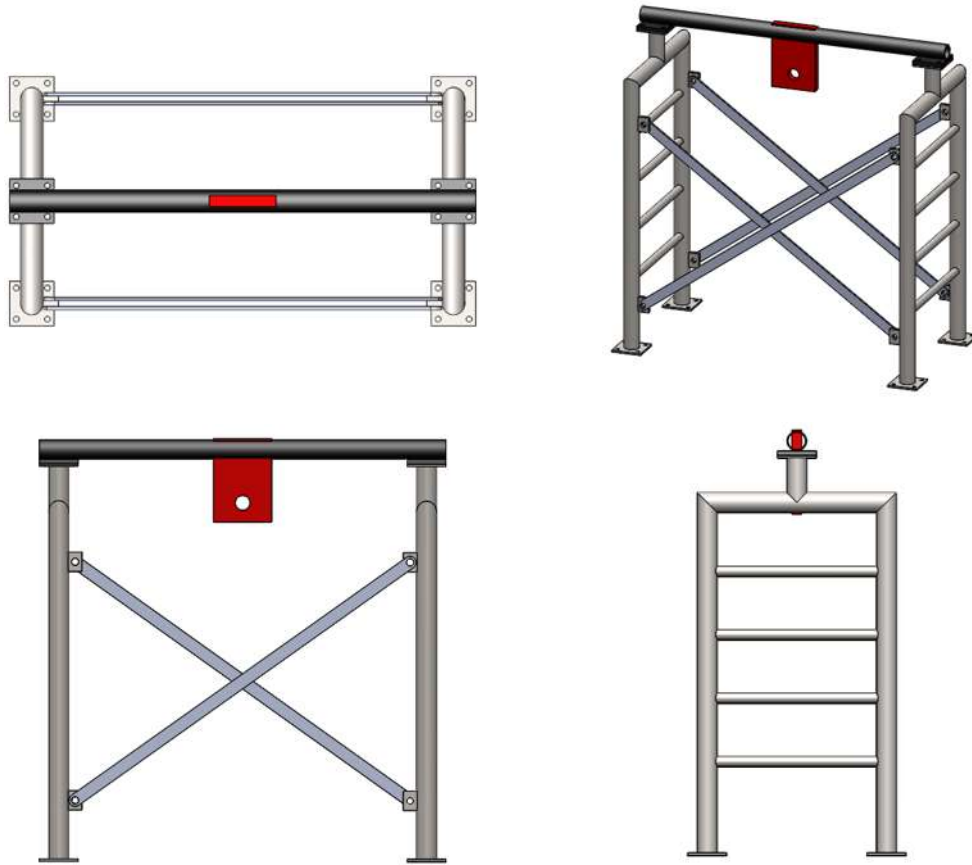


Figura 3.28. Vista Isométrica (Estructura B).

3.4.3. SOPORTE PARA EL POLIPASTO

El soporte para el polipasto es lo que unirá cualquiera de las dos estructuras por la parte de arriba o las dos en conjunto, cuyo principal objetivo es para colocar el polipasto, para realizar todas las maniobras de mantenimiento, así como de introducir o extraer tubería. En la figura 3.29 se muestra lo descrito.

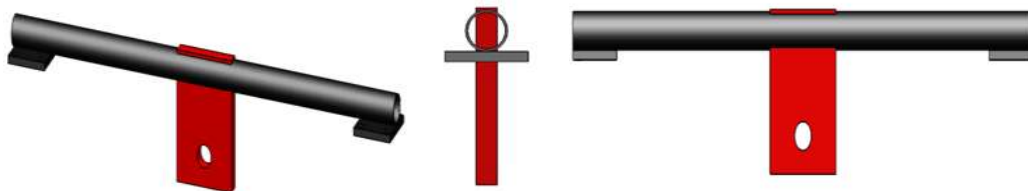


Figura 3.29. Vista isométrica (Soporte polipasto).

3.4.4. ACOPLAMIENTO DE ESTRUCTURA A Y B

El ensamble de las dos estructuras (estructura A y estructura B) se embona una con la otra, y se utilizará para introducir o extraer tubería con tramos de tubería más largos de 6m, además para el mantenimiento de equipos, etc. Para la unión entre las estructuras se realizarán con pernos de 1" de acero con rosca gruesa, además del soporte para el polipasto y con ángulos cruzados. En la figura 3.30 se muestran las principales vistas de ambas estructuras ensambladas.

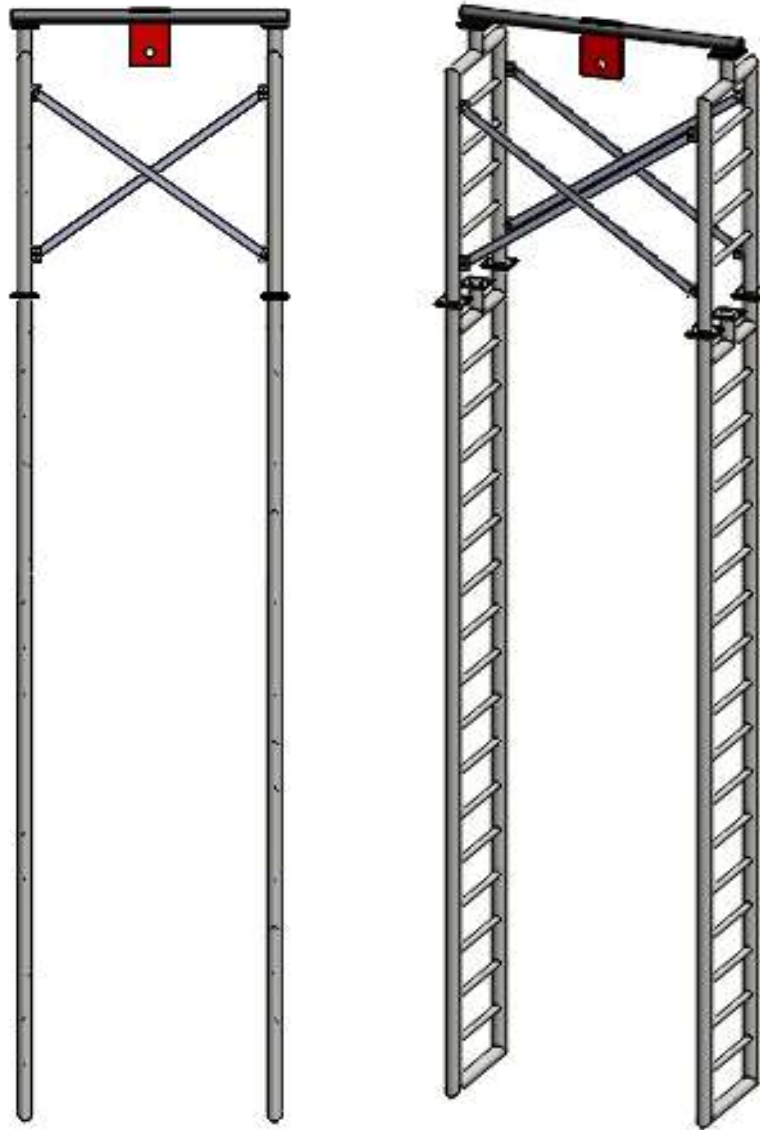


Figura 3.30. Vista isométrica (Dos estructuras)

CAPÍTULO IV.

CONSTRUCCIÓN E

IMPLEMENTACIÓN DEL

SISTEMA *AIR-LIFT*

4.1. CONSTRUCCIÓN DEL CIRCUITO DE TUBERÍAS DE RECIRCULACIÓN PARA EL FLUIDO GEOTÉRMICO

En base al diseño y dimensionamiento del circuito de tuberías de recirculación, se procedió con la construcción y el montaje de este. En primera instancia, se procedió con la presentación de la tubería de 10" mediante el empleo de una grúa, con lo cual se procedió con la construcción de los soportes cimentados. Posteriormente, una vez construidos y colocados los soportes cimentados, se prosiguió con la colocación de la tubería sobre los soportes. Una vez realizado lo anterior, se procedió a la unión de los tramos de tubería mediante soldadura. En las **Figuras 4.1, 4.2 y 4.3** se muestran imágenes de lo antes descrito.



Figura 4.1. Presentación de la tubería de 10".



Figura 4.2. Colocación de la tubería sobre los soportes cimentados y alineación de la tubería de 10".



Figura 4.3. Unión completa de la tubería de 10”.

Posteriormente a la colocación y unión de la tubería de 10”, se procedió con los trabajos necesarios para llevar a cabo la unión de la tubería de 4” con la tubería de 10”. En orden de realizar lo anterior, primeramente, fueron presentados los instrumentos de medición para obtener medidas y proceder a hacer las adecuaciones necesarias en la tubería. Posteriormente, se llevaron a cabo trabajos para conectar el circuito de tuberías con el cabezal de válvulas del pozo geotérmico, donde el ramal derecho de tuberías se conectó a la salida del pozo, mientras el ramal izquierdo fue conectado a la entrada al pozo. En las **Figuras 4.4, 4.5 y 4.6** se muestra lo anteriormente descrito de manera fotográfica.



Figura 4.4. Alineación y medición de la tubería de 4” con la tubería de 10”.



Figura 4.5. Ajuste de la tubería de 4" con el cabezal de válvulas. (Entrada y salida del cabezal de válvulas).



Figura 4.6. Acabado final del circuito de tuberías de recirculación.

Seguido de la colocación del circuito de recirculación, se colocaron las conexiones para los instrumentos de medición tanto a la entrada como a la salida del pozo, como se observa en las **Figuras 4.7, 4.8 y 4.9.**



Figura 4.7. Instrumentos de medición (flujo metro).



Figura 4.8. Instrumentos de medición a la salida y entrada del pozo geotérmico.



Figura 4.9. Acabado final del cabezal de válvulas conectado con el circuito de tuberías de recirculación.

De igual manera, a la tubería de 10" se le realizó una derivación hacia una válvula regulatoria, la cual tiene como función alimentar un silenciador. Se procedió a la construcción de las conexiones hacia el silenciador, donde se tuvo que alinear a la altura y posición correcta para proceder a soldar las piezas requeridas. Una vez colocadas las piezas, se procedió a la unión del silenciador con estas. Los trabajos anteriormente descritos se muestran en las **Figuras 4.10 y 4.11.**



Figura 4.10. Montaje del silenciador y conexiones en el circuito de tuberías de recirculación.



Figura 4.11. Acabado final del circuito de tuberías de recirculación con silenciador.

En las **Figuras 4.12 y 4.13** se muestra el circuito de tuberías ya terminado para llevar a cabo las pruebas del sistema *air-lift*.



Figura 4.12. Circuito de tuberías de recirculación 1.



Figura 4.13. Circuito de tuberías de recirculación 2.

4.2. INSTALACIÓN Y ADECUACIONES DEL SISTEMA AIR-LIFT

Antes de llevar a cabo la instalación del sistema *air-lift*, se procedió con distintas adecuaciones para lograr la correcta instalación del sistema, de las cuales se muestran a continuación.

4.2.1. TREN DE VÁLVULAS E INSTRUMENTOS

Se preparó el tren de válvulas e instrumentos bajo el diseño desarrollado en este trabajo y descrito anteriormente. En la **Figura 4.14** se ilustran los elementos que componen al tren de válvulas e instrumentos.

En primera instancia se cepillaron todas las cuerdas de los componentes, así como una limpieza con diésel. Lo anterior con objetivo de que las cuerdas se encontraran en las mejores condiciones para llevar a cabo el enroscado entre las diferentes partes. En la **Figura 4.15** se muestra la limpieza de los componentes del tren de válvulas e instrumentos.



Figura 4.14. Presentación de elementos que componen al tren de válvulas e instrumentos.



Figura 4.15. Limpieza de los componentes del tren de válvulas e instrumentos.

Posteriormente se llevó a cabo la aplicación de cinta teflón en los distintos elementos, así como su unión. Para la unión se llevó a cabo el roscado de manera progresiva y hasta el punto en que la rosca fuera introducida de manera completa. Además, se hizo uso de un tornillo de banco para realizar las maniobras antes comentadas, en orden para lograr un apriete uniforme y seguro. En las **Figura 4.16 Y 4.17** se muestra la colocación y roscado de los distintos elementos del tren de válvulas e instrumentos.



Figura 4.16. Colocación y roscado de los distintos elementos del tren de válvulas e instrumentos (A).



Figura 4.17. Colocación y roscado de los distintos elementos del tren de válvulas e instrumentos. (B).

Posteriormente al ensamble del tren de válvulas e instrumentos, se presentó en su base. En la **Figura 4.18** se muestra el tren de válvulas e instrumentos ensamblado y presentado sobre su base, donde además se muestra cada sección a detalle.

Seguido de lo anterior se llevó a cabo la aplicación de pintura sobre la base y a la fijación del tren de válvulas e instrumentos ensamblado sobre su base.



Figura 4.18. Tren de válvulas e instrumentos anclados en base.

4.2.2. CONSTRUCCIÓN DE PRENSAESTOPA PARA SELLADO

Para llevar a cabo una instalación segura, así como un funcionamiento seguro, se tuvo que diseñar y construir un prensaestopa con características especiales. Este prensaestopa fue colocado en la parte superior del cabezal y tenía la función de impedir el escape de cualquier gas o liquido del pozo geotérmico y servir de sello entre el cabezal del pozo geotérmico y la tubería del sistema *air-lift*.

En la **Figura 4.19 y 4.20** se muestra la construcción del prensaestopa, donde se ilustra el inicio de la construcción del prensaestopa.



Figura 4.19. Construcción del prensaestopa (A).



Figura 4.20. Construcción del prensaestopa, (B).

4.3. EQUIPO DE BOMBEO DE AGUA FRÍA PARA CONTROL DE POZO GEOTÉRMICO

Uno de posibles sucesos que pudiera darse durante la inserción del sistema *air-lift* y sus componentes, sería que el pozo comenzara a fluir por sí solo, debido a que el pozo geotérmico se encuentra en un estado proclive a fluir ante el menor disturbio realizado sobre él.

Para lo anterior se llevaron a cabo los trabajos necesarios para la implementación de una motobomba que conectara en su parte de succión con una pileta de agua fría y en su parte de descarga con el pozo geotérmico. Esto con el objetivo, de inyectar agua fría si el pozo empezará a fluir y, en este sentido, “apagarlo” o hacer que el pozo deje de fluir debido al cambio brusco de temperatura provocado por el agua fría. En la **Figura 4.21** se muestra los trabajos hechos para la inserción de la pichancha con la manguera de succión dentro de la pileta de agua fría y en la **Figura 4.22** se muestran los trabajos llevados a cabo para la preparación de los componentes para el mecanismo de apagado de pozo geotérmico.



Figura 4.21. Inserción de la pichancha con la manguera de succión dentro de la pileta de agua fría



Figura 4.22. Preparación de los componentes para el mecanismo de apagado de pozo geotérmico.

4.4. INSTALACIÓN DE LA TUBERÍA DE CONDUCCIÓN DE AIRE DENTRO DEL POZO GEOTÉRMICO

Una vez hecho todos los preparativos y actividades anteriormente mostradas, se procedió con la instalación del sistema *air-lift* y sus componentes. Primeramente, se instaló la tubería de conducción de aire dentro del pozo geotérmico a distintas profundidades para llevar a cabo distintas pruebas a distintas profundidades. En la **Figura 4.23, 4.24 y 4.25**, se muestran los distintos trabajos para la inserción de la tubería de conducción de aire del sistema *air-lift* dentro del pozo geotérmico.



Figura 4.23. Trabajos para la inserción de la tubería de conducción de aire del sistema *air-lift* dentro del pozo geotérmico, (A).

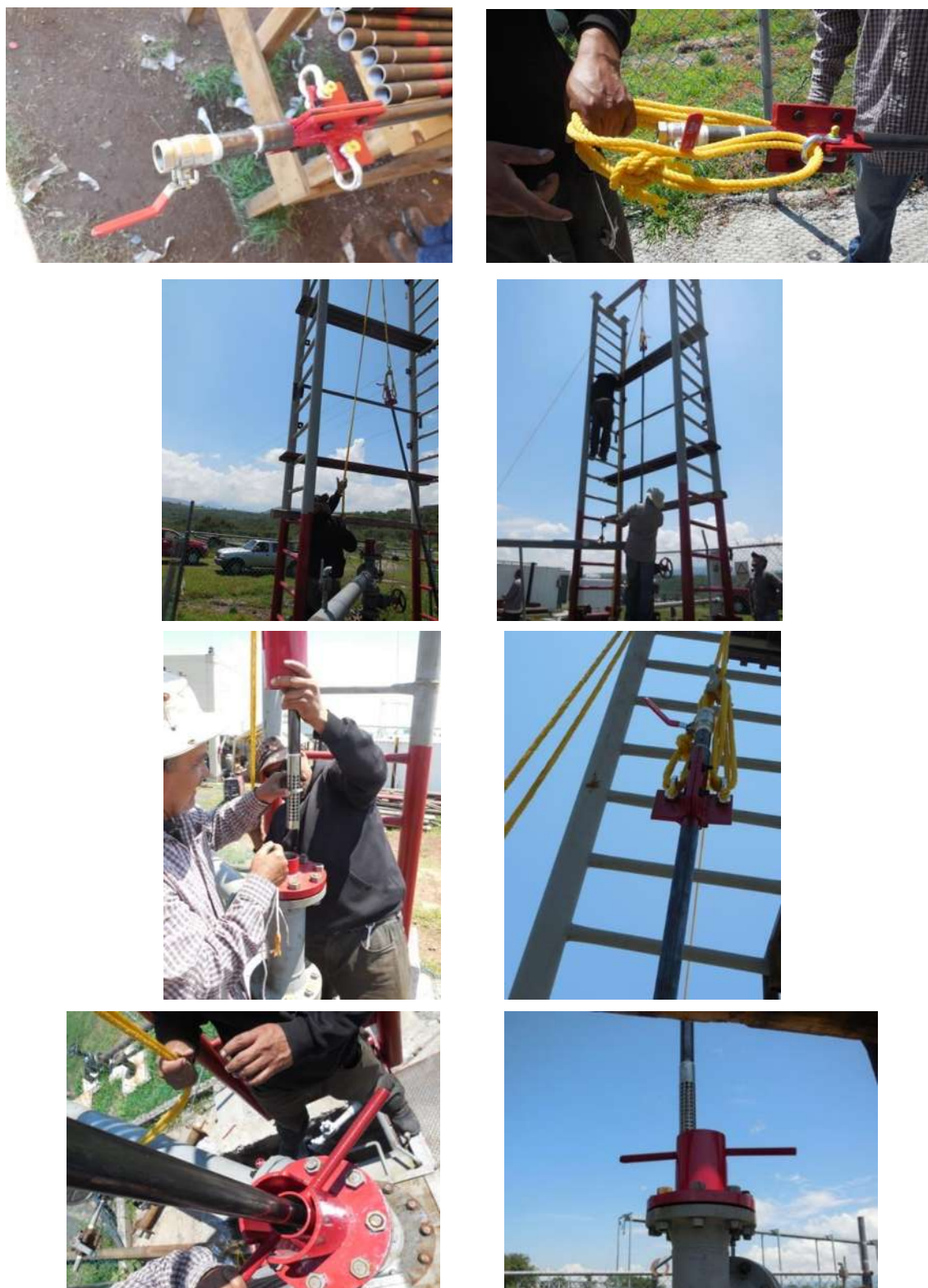


Figura 4.24. Trabajos para la inserción de la tubería de conducción de aire del sistema *air-lift* dentro del pozo geotérmico, (B).



Figura 4.25. Trabajos para la inserción de la tubería de conducción de aire del sistema *air-lift* dentro del pozo geotérmico, (C).

4.4.1. CONEXIONES DE UNIÓN ENTRE LA TUBERÍA DE CONDUCCIÓN DE AIRE, EL TREN DE VÁLVULAS E INSTRUMENTOS

Una vez puesta la tubería de conducción de aire, se procedió con la instalación del tren de válvulas e instrumentos para su conexión con la tubería de conducción de aire y con el compresor de alimentación de aire. En la **Figura 4.26** se ilustra las conexiones del sistema *air-lift* y sus componentes, para posteriormente pasar a su operación.



Figura 4.26. Conexión del sistema *air-lift* y sus componentes.

4.5. ARRANQUE DEL SISTEMA AIR-LIFT

Para realizar el arranque del sistema *air-lift*, primeramente, se realizó una limpieza del circuito de tuberías, para evitar que cualquier objeto fuera a obstruir los instrumentos, válvulas, expansiones y/o reducciones. De manera que se retiraron los instrumentos de medición y se fue limpiando por zonas el circuito y checando los distintos tramos. Se verificó que los instrumentos trabajarán de manera adecuada y se encontrarán en condiciones óptimas. Se realizó una inspección visual de que los puntos de seguridad del circuito estuvieran bien anclados, tanto los sistemas de tuberías (válvulas de admisión al circuito, válvula de recirculación, válvula de retorno al pozo, válvulas de venteo e instrumentos de medición) como el compresor de aire y el equipo de bombeo de agua fría para control de pozo geotérmico

Una vez instalado el sistema *air-lift* y todos sus componentes, se prosiguió con el arranque del sistema *air-lift*, en orden para dejarlo en punto para las pruebas requeridas. Para verificar que todo el sistema *air-lift* y el circuito de tuberías estuviera a punto, se realizó un primer arranque para confirmar su buen funcionamiento y se observó de manera detallada de que no se presentara vibraciones excesivas o fugas en la tubería tanto en el cabezal de válvulas como en el circuito de tuberías de recirculación. En la **Figura 4.27** y **Figura 4.28** se muestran las labores de limpieza y arranque del sistema *air-lift*.



Figura 4.27. Labores de limpieza y arranque del sistema *air-lift*, (A).



Figura 4.28. Labores de limpieza y arranque del sistema *air-lift*, B.

Al observar que no hubo complicaciones durante el arranque, el sistema *air-lift* quedó en punto para realizar las pruebas pertinentes del mismo.

CAPÍTULO V.

PRUEBAS Y

RESULTADOS

5.1. MEDICIONES DEL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA AIR-LIFT

Una vez dejada la instalación a punto, se procedió con la realización de distintas pruebas del sistema *air-lift* para la medición de los parámetros de extracción de energía geotérmica (Temperatura, Presión y caudal).

Se realizaron varias pruebas del sistema *air-lift* a distintas profundidades y con diferentes condiciones climáticas, teniendo muy similares resultados con muy pocas variaciones, por lo que solo se presentan los resultados de las más representativas a 50 m y 100 m, respectivamente. Las pruebas realizadas contaron con una duración de 8 horas para observar el comportamiento del pozo durante el periodo de tiempo.

5.2. PRUEBA A 50 METROS

En la **Figura 5.1** se puede observar los resultados de la presión a la entrada y salida del pozo geotérmico a una profundidad de 50 metros con el sistema *air-lift*, donde se puede observar una estabilización rápida a la entrada al pozo, debido al silenciador del circuito de tuberías de recirculación para el fluido geotérmico. En la **Figura 5.2** se observa la lectura de 0.8 Kg/m² del manómetro analógico.



Figura 5.1. Presión a la entrada y salida del pozo geotérmico, empleando 50 m con el sistema *air-lift*.



Figura 5.2. Manómetro análogo.

En la **Figura 5.3** se observa los resultados de la temperatura del pozo, donde se estabilizó rápidamente en menos de 60 minutos, y las pocas variaciones que tuvo fueron debido a las condiciones ambientales. En la **Figura 5.4** se muestran los resultados del flujo geotérmico que estuvo intermitente debido al aire inyectado.

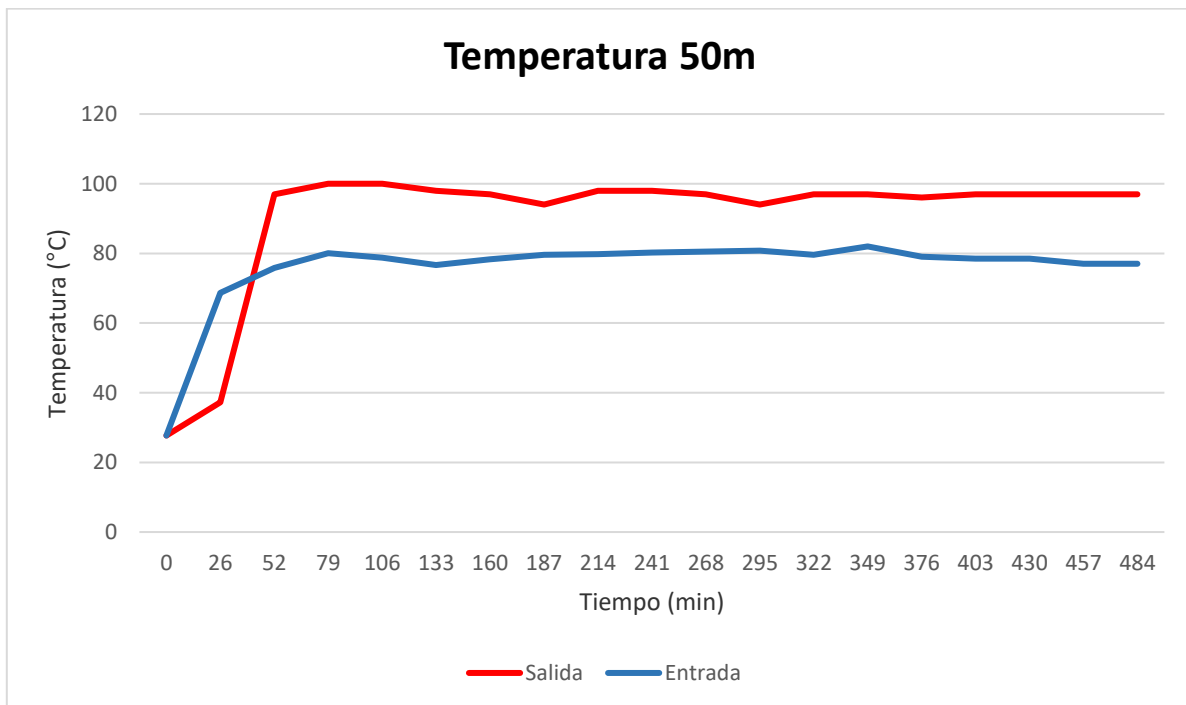


Figura 5.3. Temperatura a la entrada y salida del pozo geotérmico, empleando 50 m con el sistema *air-lift*.

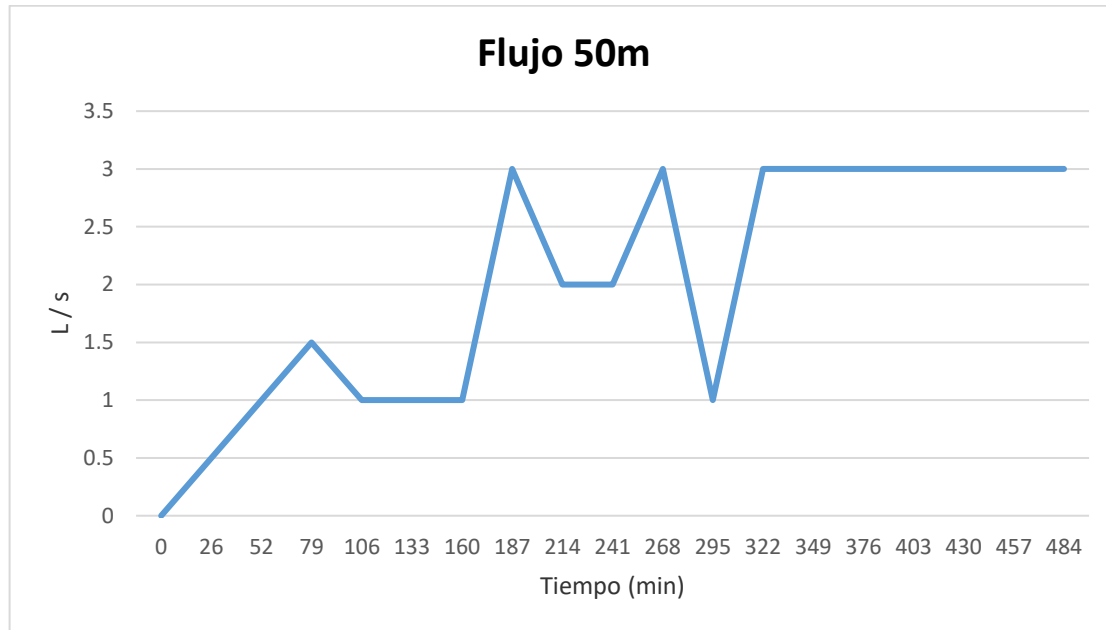


Figura 5.4. Flujo del fluido geotérmico, empleando 50 m con el sistema *air-lift*.

5.3. PRUEBAS A 100 METROS

En la **Figura 5.5** se puede observar los resultados de la presión a la entrada y salida del pozo geotérmico a una profundidad de 100 metros con el sistema, donde se puede observar una estabilización rápida tanto a la entrada como a la salida del pozo, y con muy pocas variaciones a lo largo de la prueba.

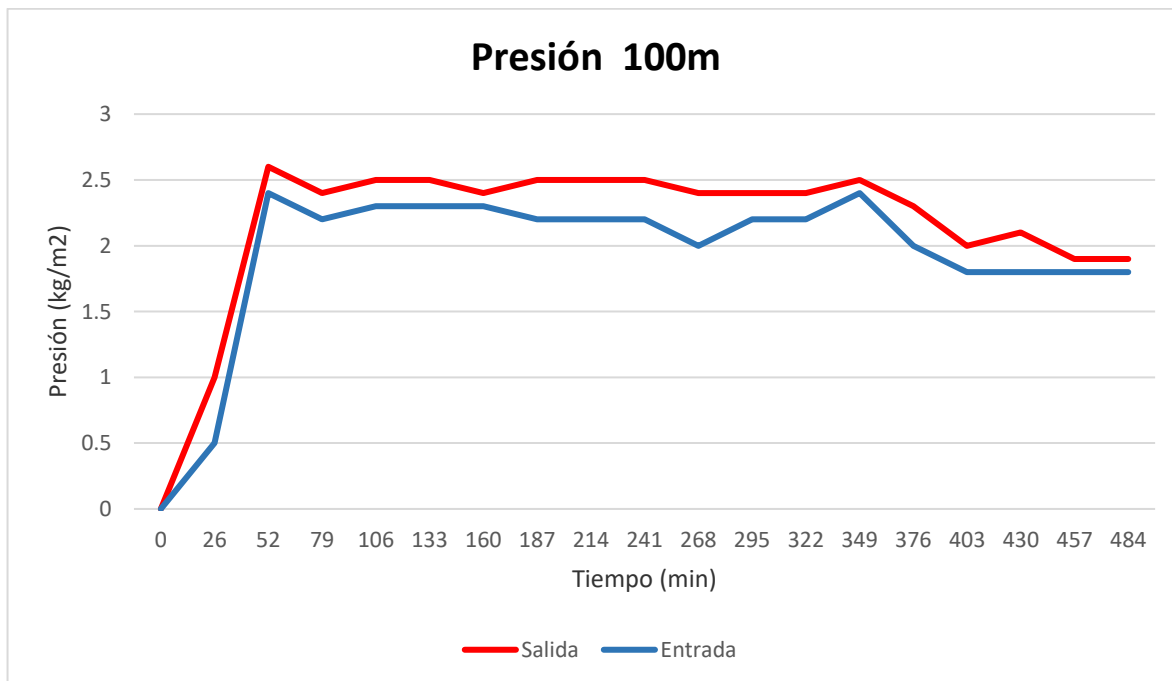


Figura 5.5. Presión a la entrada y salida del pozo geotérmico, empleando 100 m con el sistema *air-lift*.

En la **Figura 5.6** se observa los resultados de la temperatura a la entrada y salida del pozo, donde se estabilizó rápidamente en menos de 60 minutos, y se mantuvo muy constante durante toda la prueba, teniendo mínimas variaciones o casi nulas. En la **Figura 5.7** se observa la lectura de 111°C del termómetro analógico.

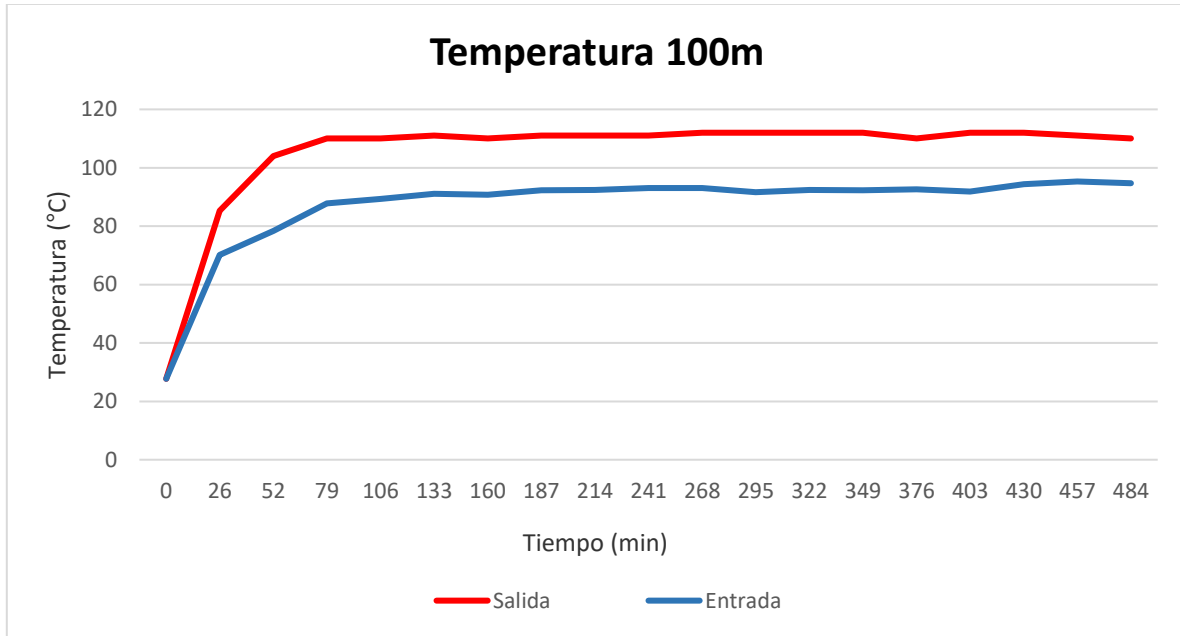


Figura 5.6. Temperatura a la entrada y salida del pozo geotérmico, empleando 100 m con el sistema *air-lift*.



Figura 5.7. Termómetro analógico

En la **Figura 5.8** se muestran los resultados del flujo geotérmico que estuvo intermitente debido a las variaciones del aire inyectado, y tarda para su estabilización.

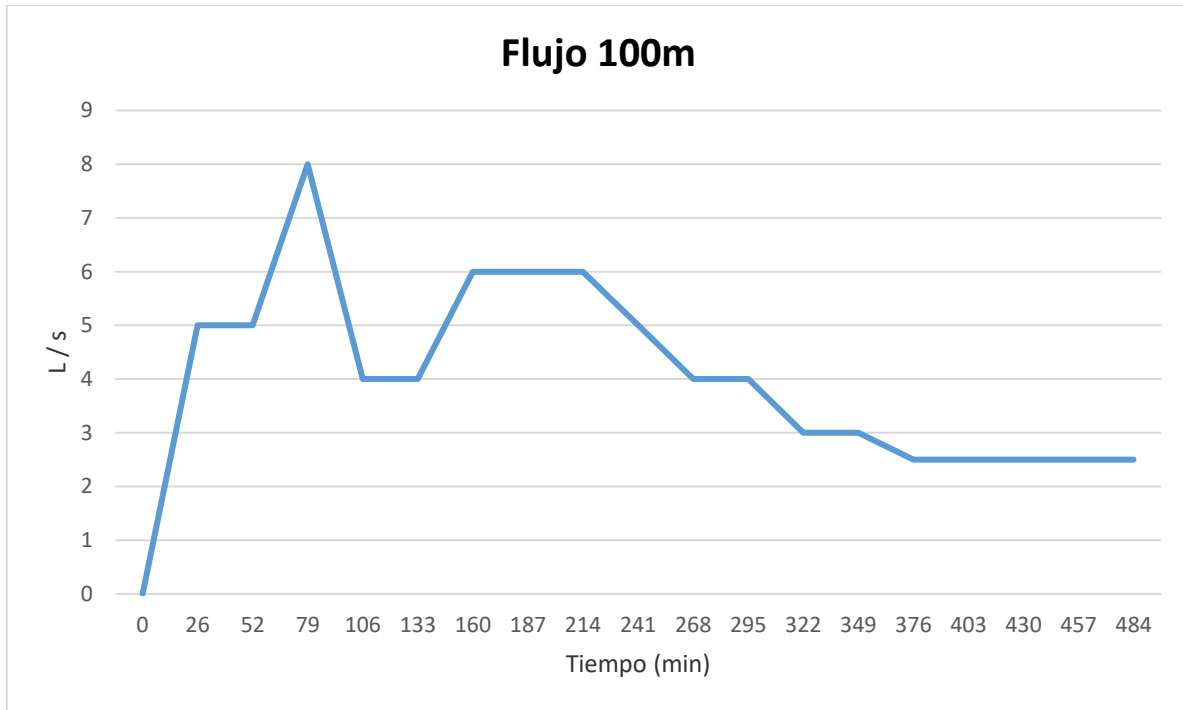


Figura 5.8. Flujo del fluido geotérmico, empleando 100 m con el sistema *air-lift*.

CONCLUSIONES

En las siguientes tablas se muestran los parámetros de salida y entrada del pozo geotérmico objeto de estudio, para distintas longitudes de inmersión de la tubería del sistema *air-lift*. Se observa que a la profundidad de 100m presenta la mejor temperatura a la salida y entrada del pozo.

LECTURA DE PARAMETROS A LA SALIDA DEL POZO							
No. medición	Tiempo (min)	50m	100m	50m	100m	50m	100m
		Flujo (l/s)	Flujo (l/s)	Presión (kg/m ²)	Presión (kg/m ²)	Temperatura (°C)	Temperatura (°C)
0	0	0	0	0	0	27.7	27.7
1	26	0.5	5	0.5	1	37.2	85.3
2	52	1	5	0.5	2.6	97	104
3	79	1.5	8	0.7	2.4	100	110
4	106	1	4	0.7	2.5	100	110
5	133	1	4	0.8	2.5	98	111
6	160	1	6	0.7	2.4	97	110
7	187	3	6	0.7	2.5	94	111
8	214	2	6	0.7	2.5	98	111
9	241	2	5	0.7	2.5	98	111
10	268	3	4	0.8	2.4	97	112
11	295	1	4	0.6	2.4	94	112
12	322	3	3	0.5	2.4	97	112
13	349	3	3	0.5	2.5	97	112
14	376	3	2.5	0.5	2.3	96	110
15	403	3	2.5	0.5	2	97	112
16	430	3	2.5	0.5	2.1	97	112
17	457	3	2.5	0.5	1.9	97	111
18	484	3	2.5	0.5	1.9	97	110

LECTURA DE PARAMETROS A LA ENTRADA DEL POZO							
No. medición	Tiempo (min)	50m	100m	50m	100m	50m	100m
		Flujo (l/s)	Flujo (l/s)	Presión (kg/m ²)	Presión (kg/m ²)	Temperatura "A" (°C)	Temperatura "A" (°C)
0	0	0	0	0	0	27.7	27.7
1	26	0.5	5	0.1	0.5	68.7	70.2
2	52	1	5	0.1	2.4	75.8	78.4
3	79	1.5	8	0.1	2.2	80.1	87.8
4	106	1	4	0.1	2.3	78.8	89.3
5	133	1	4	0.1	2.3	76.7	91.1
6	160	1	6	0.1	2.3	78.3	90.8
7	187	3	6	0.1	2.2	79.6	92.3
8	214	2	6	0.1	2.2	79.8	92.4
9	241	2	5	0.1	2.2	80.2	93
10	268	3	4	0.1	2	80.5	93.1
11	295	1	4	0.1	2.2	80.8	91.6
12	322	3	3	0.1	2.2	79.6	92.4
13	349	3	3	0.1	2.4	82	92.3
14	376	3	2.5	0.1	2	79	92.6
15	403	3	2.5	0.1	1.8	78.5	91.8
16	430	3	2.5	0.1	1.8	78.5	94.4
17	457	3	2.5	0.1	1.8	77	95.3
18	484	3	2.5	0.1	1.8	77	94.7

Se obtuvieron flujos menores de salmuera geotérmica para las pruebas con la inmersión de la tubería a 50m (3 L/s), respecto a los obtenidos para las pruebas con la inmersión de la tubería a 100m (6 L/s) que fueron al doble, esto se atribuye a que las pruebas a 100m de profundidad aprovechan con mayor eficacia el aire presurizado para un mejor mezclado con la salmuera, disminuyendo la densidad de una mayor cantidad de fluido para ser impulsado hacia la superficie por la diferencia de presiones.

Para las dos pruebas de inmersión a 50m y 100m se obtuvieron temperaturas de salida del pozo diferentes, siendo la prueba de 50m la que obtuvo menor temperatura (100°C), esto se debió a una alta proporción de aire a temperatura más baja que se inyectó a la salmuera, y el cual tuvo poco tiempo de estancia en el interior del pozo geotérmico. En comparación con la prueba de tubería a 100m (112°C), donde el tiempo de estancia del aire es mayor en el pozo debido a que tiene que realizar un recorrido de mayor tiempo tanto para su inyección bajando por el sistema *air-lift* así como para salir en la ascendente mezcla bifásica, recibiendo mayor cantidad de calor de manera que la mezcla resulta con una temperatura mayor.

Para ambas pruebas de inmersión, la temperatura fue incrementando gradualmente hasta el punto en mantener constante su temperatura, esto se debió a que al principio de la experimentación la mezcla bifásica no se homogenizaba totalmente en su recorrido por el sistema *air-lift* hacia la salida del pozo y con el tiempo de la prueba esta mezcla bifásica tuvo una mejor homogenización haciendo que el sistema alcanzara su máxima temperatura posible.

Respecto al sistema *air-lift* se puede concluir lo siguiente:

- Se cumplieron todos los objetivos específicos que se plantearon, llevando a cabo todos los trabajos de ingeniería y de campo para la implementación del sistema *air-lift*.
- En relación a los materiales y diseño del sistema *air-lift*. El resultado del análisis realizado sobre el diseño propuesto, este cumple con los factores de seguridad, y los esfuerzos presentados no superan el límite elástico de los materiales propuestos. De acuerdo con esto, los materiales y el diseño propuestos cumplen con los requisitos y factores de seguridad para una instalación de estas características, permiten cumplir con los objetivos del mismo en el pozo objeto de estudio. El sistema será funcional y resistente a los esfuerzos mecánicos a los que estará expuesto, dando como resultado ser un sistema viable desde el punto de vista técnico y económico.
- Con este sistema *air-lift*, diseñado específicamente para el caso del pozo geotérmico con las características mecánicas ya descritas, no se pudo lograr el flujo calculado para el objetivo principal que era de proporcionar el gasto que requiere una planta de ciclo binario, el cual es de 70 ton/h de agua a una temperatura de 150°C.

- La implementación del sistema *air-lift* se tiene que realizar dependiendo de las características del pozo geotérmico particular, para con esto regular la cantidad de aire requerido para provocar el flujo de la salmuera geotérmica. Una cantidad relativamente pequeña de aire puede llegar a provocar que un pozo geotérmico se arranque. El inyectar grandes cantidades de aire conlleva el obtener un mayor flujo de salmuera geotérmica, pero de igual manera, su purga se complica, haciendo que se tenga intermitencia en las mediciones.
- La forma más recomendable de utilizar el sistema *air-lift*, es cuando el fluido será extraído de un pozo y reinyectado en otro, esta es la mejor manera para estimular el pozo geotérmico, ya que así la inyección de aire se regula y es la mínima posible, esto para no afectar tanto al proceso que se requiera como a la propia extracción del fluido geotérmico.
- Para el caso del pozo geotérmico objeto del presente desarrollo, en donde la reinyección ocurre en el mismo pozo, donde el objetivo es proporcionar el gasto que requiere una planta de ciclo binario, el sistema *air-lift* debe estar operando de manera continua y esto representa un elevado consumo de energía y la necesidad de extraer el aire suministrado al pozo antes de ser utilizado el fluido geotérmico.
- Para la extracción de aire del proceso se recomienda la instalación de válvulas de purga, así como de trampas de aire, para que no afecten en demasía el proceso. Por otra parte, los elementos empleados para la inyección de aire deben ser los adecuados y contar con los estándares de calidad bajo norma, ya que son sometidos a presión. De igual manera, contar con sistemas de sobrepresión para cualquier aumento de presión súbito. Además, se recomienda contar con distintos puntos de purga, para que el sistema sea despresurizado una vez que éste ya no se requiera.
- El sistema *air-lift* tiene muchas ventajas sobre otros sistemas de bombeo, siendo las principales su fácil instalación y operación, además que es el método más económico.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] BULLARD, E.C., 1965. Historical introduction to terrestrial heat flow. In : Lee, W.H.K., ed. Terrestrial Heat Flow, Amer. Geophys. Un., Geophys. Mon. Ser., 8, pp.1-6.
- [2] Pesce, A. H., & Miranda, F. (2000). Catálogo de Manifestaciones Termales de la República Argentina. Volumen II - Región Noreste, Centro y Sur. Buenos Aires.
- [3] IRENA. (2017). Geothermal Power: Technology Brief. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency.
- [4] CEGA. (2016). Centro de Excelencia en Geotermia de Los Andes.
- [5] G. H. Le Bert, L. C.A. Negrín, J. Q. León, A. O. Celis, S. Espíndola, I. Hernández. "Informe para el Banco Interamericano de Desarrollo y la Comisión Reguladora de Energía", México, DF, mayo de 2011.
- [6] LINDAL, B., 1973. Industrial and other applications of geothermal energy. In: Armstead, H.C.H., ed., Geothermal Energy, UNESCO, Paris, pp.135—148.
- [7] BID. (2014). Centro de Innovación Energética: La Energía Geotérmica
- [8] Lund, J., y Boyd, T. (2015). Direct Utilization of Geothermal Energy 2015 Worldwide Review. Recuperado el 2020, de Proceedings World Geothermal Congress.
- [9] Richter, A. (12 de 2018). TOP 10 GEOTHERMAL COUNTRIES 2018.
- [10] Prol, L. R. (2013). FORO INTERNACIONAL SOBRE ENERGÍA GEOTÉRMICA. EL FUTURO DE LA GEOTERMIA EN EL SIGLO XXI, (págs. 4-12).
- [11] CEMIGEO. (05 de 2020). Geotermia en México.
- [12] SENER. (2018). Reporte de Inteligencia
- [13] Vicente Torres-Rodriguez, "GEOTHERMAL CHART OF MEXICO SCALE 1:2,000,000", Proceedings World Geothermal Congress 2000, Kyushu - Tohoku, Japan, May 28 - June 10, 2000, pp. 1867-1870.
- [14] CFE. "Medicion de la presion, temperature y calibración del pozo GSE-S01, localizado en la población de Zimirao, Municipio de Zinapecuaro, Mich.", Informe elaborado para el grupo Prados-Camelinas, DINYAC-013-2011.
- [15] Carl E. Loescher, This pump is considered to be invented by the German, who lived in the second part of the eighteenth century. He discovered the airlift pump.(1797).
- [16] C. Losada Godoy, Diseño de receptor de torre central para la generación directa de vapor con perfil de potencia variable longitudinal y trasversalmente, Licenciatura, Escuela Técnica Superior de ingenieros de Minas y Energía., 2014.
- [17] Kato, H., T. Miyazawa, S. y T. Timaya Iwasaki, "Un estudio de una bomba de puente aéreo para Solid Partículas ", Bull. JSME 18, 286-294 (1975).
- [18] Gibson, AH, "Hidráulica y sus Aplicaciones", 5ª ed., Constable, Londres (1961)

- [19] Mero, J.L, "el fondo marino Minerales: un reto Ingeniería Química", Chem. Eng., 43 (2), p. 73 (1968).
- [20] Trystam, G. y S. Pigache, "Modelado y Simulación de una gran escala de aire elevador Fermentador", en "Proc. EUR. Symp. Comp.-Aid. Proc. Eng.-2 "(1992), pp. 5171-5176.
- [21] Giot, M., "Flujo de la fase tres", en el "Manual de sistemas multifásicos", G. Hetsroni, ed., Hemisferio-McGraw Hill, Washington, p. 7.29, DC (1982)
- [22] Castro, W.E., Zielinski, P.B., Sandifer, P.B., Performance characteristics of Airlift Pumps, World Mariculture Society Meeting, 6: 451-460. (1975)
- [23] Castro, W.E. and Zielinski, P.B., Pumping characteristics of small airlift pumps, In: Proceedings of the World Mariculture Society, 11: 163-174. (1980)
- [24] Spotte, S. H., Fish and invertebrate culture. John Wiley and Sons, New York. (1970)
- [25] Tokar, J.M., Harvey, G.R. and Chesal, L.A., A gas lift system for large volume water sampling, Deep-Sea Res., 28A (11), 1395-9. (1981)
- [26] Wurts W.A., McNeill S.G., and Overhults D.G., Performance and design characteristics of airlift pumps for field applications, World Aquaculture, 25(4): 51-54, (1994).
- [27] Loyless, J.C. and Malone, R.F., Evaluation of airlift pump capabilities for water delivery, A\ereration, and degasification for application to recirculating aquaculture systems. Journal of Aquacultural Engineering, 18, 117-233. (1998)
- [28] Reinemann, D.J., A theoretical and experimental study ofairlift pumping and aeration with reference to aquacultural applications. PhD thesis, Cornell University, Ithaca, New York. (1987)
- [29] Awari, G.K.; Ardhapurkar; P. M., Wakde; D. G., and Bhuyar; L. B., Perfomance analysis of air-lift pump design, Journal of Mechanical Engineering Science, Vol. 218 Part C; 1155-1161. (2004).
- [30] Kalil M. F., Effect of air injection method on the performance of an air lift pump, International Journal of Heat and Fluid Flow 20, 598-604. (1999)
- [31] Todoroki, I., Yoshifusa, S., and Honda, T., Performance of air-lift pump, 16(94): 733-741. (1973)
- [32] Nicklin, D.J., The airlift pump: theory and optimization, Transactions of the Institution of Chemical Engineers, 41: 29-39. (1963).

- [33] Mudde, R.F, and H.E.A. Van den Akker, 2001. 2D and 3D simulations of an internal airlift loop reactor on the basis of a two-fluid model. *Journal of Chemical Engineering Science*, Vol. 56, no. 21-22, pp. 6351-6358.
- [34] Van Baten, J.M., J. Ellenberger, and R. Krishna, 2003. Hydrodynamics of internal air-lift reactors: experiments versus CFD simulations. *Journal of Chemical Engineering and Processing*, Vol. 42, no. 10, pp. 733-742.
- [35] Cockx, A., A. Lin, M. Roustan, Z. Do-Quang, and V. Lazarova, 1997. Numerical simulation and physical modeling of the hydrodynamics in an air-lift internal loop reactor. *Journal of Chemical Engineering Science*, Vol. 52, no. 21-22, pp. 3787-3793.
- [36] Nenes, A., D. Assimacopoulos, N. Markatos, and G. Karydakis, 1996. Simulation of Airlift Pumps for Moderate-Depth Water Wells. *Technika Chronika*, Vol. 14, pp. 1-20.
- [37] Gudipati. S and Malone, R.F., (Airlift-polygeyser combination facilitates decentralized water treatment in recirculating marine hatchery systems. In *Proceedings of the 34th US Japan Natural Resources Panel Aquaculture Symposium*, San Diego, California, (In Press) (2005b)
- [38] Cachard, F.D. and Delhay, J.M., Stability of small diameter airlift pumps, *International Journal of Multiphase Flow*, 24(1): 17-34. (1998).
- [39] Stenning, A.H. and Maritn, C.B., An analytical and experimental study of air-lift pump performance, *Trans. ASME Journal of Engineering for Power*, 94, 106-110.(1968)
- [40] Morrison, G.L., Zeineddine, T.I., Henriksen, M., and Tatterson, G.B., Experimental analysis of the mechanics of reverse circulation air lift pump, *Industrial Engineering and Chemical Research*, 26: 387-391. (1987).
- [41] Bellelo, S.M., Evaluation of media influence and practical applications for the use of static low density media filters in domestic wastewater treatment. Louisiana State University, M.S. Thesis. (2006).
- [42] Loyless, C.J., A feasibility study of using airlift pumps for aeration, degasification, and water movement in recirculating aquaculture system, Thesis, Louisiana State University, pp 116. (1995).
- [43] Reinemann, D.J. and Timmons, M.B., Prediction of oxygen transfer and total dissolved gas pressure in airlift pumping, *Journal of Aquacultural Engineering*, 8, 29-46. (1989).
- [44] Kato, H., T. Miyazawa, S. y T. Timaya Iwasaki, "Un estudio de una bomba de puente aéreo para Solid Partículas ", *Bull. JSME* 18, 286-294 (1975).

- [45] Lockhart, R. W., & Martinelli, R. C. (1949). Proposed Correlation of Data for Isothermal Two-Phase, Two-Component Flow in Pipes. Chemical Engineering Progress , 45 (1), 39-48
- [46] Wurts W.A., McNeill S.G., and Overhults D.G., Performance and design characteristics of airlift pumps for field applications, World Aquaculture, 25(4): 51-54, (1994).
- [47] Spotte, S. H., Fish and invertebrateculture. John Wiley and Sons, New York. (1970)

ANEXOS

ASOCIACIÓN GEOTÉRMICA MEXICANA XXIV Congreso Anual – Morelia, Mich. 2017.



Memorias del XXIV Congreso Anual – Morelia, Mich., 29-31 de marzo de 2017

Diseño de un sistema Air-Lift para extracción de energía geotérmica

Jorge Alberto Rangel Arista, J. Jesús Pacheco Ibarra, Luis Alberto Valencia Garay, Juan Pablo Arriaga Villagrán, Carlos Rubio Maya y Hugo Cuauhtémoc Gutiérrez Sánchez

Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, GREEN-ER (Grupo de Eficiencia Energética y Energías Renovables), Gral. Francisco J. Mújica S/N, Ciudad Universitaria, C.P.58030, Morelia, Mich., México. Correo: araj_02@hotmail.com

RESUMEN

La energía geotérmica ha tenido un gran desarrollo en las últimas décadas, tanto en la explotación de los yacimientos de alta entalpía como en los de media y baja entalpía, que son los recursos más abundantes en el planeta. Una característica común de los recursos de media y baja entalpía es que, en algunos casos, no es posible aprovecharlos mediante métodos convencionales debido a que los recursos no fluyen por sí mismos o bien su flujo no se mantiene constante. Dentro de las técnicas no convencionales propuestas para la explotación de este tipo de yacimientos geotérmicos, está la implementación de un sistema Air-Lift. Este sistema casi no se aplicó en yacimientos geotérmicos, pero sí se ha probado con éxito en la industria petrolera y en la de los bio-reactores. En este sentido, el diseño de sistemas Air-Lift para la explotación de recursos geotérmicos no ha avanzado gran cosa, por lo que la literatura no reporta nada al respecto. En el presente trabajo se muestra el diseño de un sistema Air-Lift para la explotación de un yacimiento geotérmico de media entalpía, el cual no puede fluir utilizando técnicas convencionales de explotación. Este yacimiento se ha identificado en el subsuelo de la comunidad de San Nicolás de Simirao, Michoacán. El diseño propuesto presenta todas las medidas de seguridad de acuerdo a sus dimensiones y reúne todas las características requeridas para su funcionamiento óptimo.

Palabras clave: Inducción de pozos, sistema Air-Lift, diseño, recursos de media entalpía.

Design of an Air-Lift System for extracting geothermal energy

ABSTRACT

Geothermal energy has experienced a great development in the last decades, exploiting both high-enthalpy and medium- and low-enthalpy resources –which are the most abundant resources on the planet. A frequent feature of the medium and low enthalpy resources is that, in some cases, are not capable to be exploited by conventional methods, due to they do not flow –or they do intermittently. Among non-conventional techniques proposed for the exploitation of these type of geothermal resources, is the implementation of an Air-Lift system. This system has been successfully tested in the oil industry and in the bioreactors industry, but has little application for geothermal resources. In this sense, the design of Air-Lift systems for the exploitation of geothermal resources has scarce development, and then there are no reports in the specialized literature. According to the above, the present paper presents the design of an Air-Lift system for the exploitation of a medium enthalpy geothermal reservoir, which does not flow through conventional exploitation techniques and is located in the community of San Nicolás de Simirao, Michoacán. The proposed design includes all the safety measures according to its size, as well as all the characteristics required to achieve an optimal operation.

Keywords: Well inductions, Air-Lift system, design, medium enthalpy resources.

INTRODUCCIÓN



Una vez localizado un yacimiento geotérmico, el reto siguiente es su explotación. En yacimientos de alta entalpía, los fluidos fluyen usualmente gracias a la presión del subsuelo, pero en los casos en que no fluyen de manera natural, las técnicas de explotación juegan un papel muy importante. Una de las técnicas más utilizadas para explotar dichos recursos es la inducción, la cual consiste en inyectar aire al pozo geotérmico y presurizarlo, para propiciar un gran diferencial de presiones. Con ello normalmente se logra que el fluido contenido en el pozo fluya hasta la superficie, transportando así la energía contenida en el reservorio. La inducción de pozos geotérmicos ha tenido una gran relevancia para la explotación de recursos geotérmicos contenidos en yacimientos que no fluyen por sí solos, independientemente de su tipo u origen.

Pero aunque la inducción es la técnica más empleada, no implica que sea la más adecuada en todos los casos. Así, ha sido necesario implementar nuevas técnicas, a raíz de la poca efectividad que en ciertos casos presenta la técnica de inducción. Dentro de esas nuevas técnicas que se encuentran en la literatura, el sistema Air-Lift se presenta como una técnica fácil de implementar y con costos, tanto técnicos como económicos, relativamente bajos.

La técnica Air-Lift consiste en la inyección de aire dentro del fluido que está en el pozo geotérmico, creando una mezcla bifásica entre el aire y el fluido, de modo que mezcla adquiera una densidad menor a la del fluido geotérmico. Con ello el fluido puede empezar a fluir hasta la superficie.

Si bien la literatura reporta que es una técnica viable para la explotación de recursos geotérmicos, hasta el momento no se reporta ningún caso práctico de su implementación en un yacimiento geotérmico. Pero sí hay reportes de distintos estudios acerca del funcionamiento de la técnica. Es el caso del trabajo de Mudde y Van den Akker (2001), quienes realizaron simulaciones en 2D y 3D de un sistema Air-Lift en un reactor con condiciones en estado estable a bajos caudales de aire. Ellos obtuvieron que las simulaciones 2D representan bien el flujo para bajas velocidades superficiales, mientras que las 3D obtuvieron resultados más representativos para velocidades mayores.

Por su parte, Van Baten et al. (2003) llevaron a cabo una comparación de la hidrodinámica de reactores con Air-Lift internos en forma experimental y mediante simulación. Obtuvieron que la simulación se apegó mucho a los resultados experimentales y, por lo tanto, se puede escalar a otros sistemas. Por otra parte, Cockx et al. (1997) propusieron un nuevo modelo de la hidrodinámica para sistemas Air-Lift en reactores en bucle, y concluyeron que su modelo era una nueva manera para simular reactores industriales de Air-Lift, que son más generales que los métodos empíricos y de uso más fácil que la simulación fluidodinámica por computadora. Por último, Nenes et al. (1996) llevaron a cabo la simulación del bombeo por Air-Lift para pozos de profundidad moderada, y propusieron un modelo integral para el análisis de estos sistemas, con respecto al caudal de agua con aire obtenido con el aire inyectado en el pozo.

Si bien, los trabajos anteriores se enfocan al comportamiento del sistema Air-Lift, no existe una clara referencia a su diseño. Por lo tanto, en este trabajo se muestra la implementación de un sistema Air-Lift para la extracción de energía geotérmica en el pozo geotérmico Z-3, ubicado en la localidad de San Nicolás de Simirao, Michoacán.

ZONA GEOTÉRMICA Y DISEÑO CONCEPTUAL

El diseño se realizó para instalarse en el pozo geotérmico Z-3, que se ubica en la zona geotérmica de San Nicolás de Simirao. El pozo fue perforado hace años hasta una profundidad de 1350 m, pero actualmente se encuentra una obstrucción a los 550 m. La máxima temperatura registrada en el pozo



es de 146.5°C, a una profundidad de 256 m. La configuración de tuberías y diámetros del pozo se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Configuración de tuberías y diámetros del pozo geotérmico Z-3.

Diámetro de agujero	Diámetro de tubería	Profundidad final (m)
26"	20"	18.1
17 1/2"	13 3/8"	363.6
12 1/4"	Agujero descubierto	1350.0

En la Figura 1 (todas las figuras al final del texto) se presenta un esquema del mismo pozo, sobre el cual se diseñó el sistema Air-Lift.

En la Figura 2 se muestra el diseño conceptual del sistema Air-Lift a emplearse en el pozo Z-3, incluyendo los componentes que deberán conformarlo, así como su posible arreglo y disposición. Dentro de los elementos que lo conforman, se encuentra el compresor de aire (encargado de suministrar el aire a presión), y un tren de válvulas e indicadores que tienen como objetivo regular y mantener el sistema seguro. También se muestra la tubería de conducción y los cabezales de inyección de aire, encargados de generar los patrones de burbujas requeridos para la creación de la mezcla bifásica. Por último, se ilustra el sistema de sujeción de la tubería de conducción y los cabezales, el cual se va a encargar de soportar el peso de ambos dentro del pozo.

DISEÑO DEL SISTEMA AIR-LIFT

Dimensionamiento

Para el dimensionamiento del sistema, se tomó como objetivo proporcionar el gasto que requiere una planta de ciclo binario, el cual es de 70 ton/h de agua a una temperatura de 150°C. El sistema Air-Lift inyectaría aire en el pozo, emplazado a unos 100 m de profundidad, que es donde el pozo empieza a presentar una temperatura de 140°C que se mantiene casi constante hasta la obstrucción.

Se empleó el Modelo Integral para el dimensionamiento del sistema. Este es un modelo que presenta mejores características que el Modelo de Fracciones Vacías, debido a que se aplica en pozos mayores a 11 m y para distintos tipos de flujos que sean diferentes al tipo de burbuja grande (*slug*) (Nenes et al., 1996). A pesar de que el Modelo Integral presenta un error de 29%, es el modelo con mayor exactitud que hasta el momento existe para el dimensionamiento del sistema Air-Lift (Nenes et al., 1996).

Las ecuaciones que rigen el modelo integral están representadas por la Ec. 1 y Ec. 2. La Ec. 1 relaciona los flujos másicos de aire y fluido, que se pretende que formen la mezcla bifásica. En la Ec. 2, se representa la fracción de espacios desarrollada por Lockhart y Martinelli (1949), donde el parámetro X se calcula empleando la Ec. 3.

$$P_k = P_{k+1} + \left(\frac{M_{g,k+1}^2}{a_{g,k+1} \rho_{g,k+1} A_2^2} + \frac{M_{l,k+1}^2}{a_{l,k+1} \rho_{l,k+1} A_2^2} - \frac{M_{g,k}^2}{a_{g,k} \rho_{g,k} A_2^2} - \frac{M_{l,k}^2}{a_{l,k} \rho_{l,k} A_2^2} \right) + g(a_{g,m} \rho_{g,m} + a_{l,m} \rho_{l,m}) \Delta z + \left(\frac{dP}{dz} \right)_f \Delta z \quad (1)$$

$$a_g = (1 + X^{0.8})^{-0.378} \quad (2)$$



$$X^2 = \left(\frac{M_l}{M_g} \right)^{1.8} \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} \right) \left(\frac{\mu_l}{\mu_g} \right)^{0.2} \quad (3)$$

Con base en las ecuaciones anteriores y en conjunto con las condiciones de dimensionamiento, se obtuvo el flujo másico de aire a emplearse, el cual resultó ser de 612.5 cfm (pies cúbicos por minuto, equivalente a 0.28906753 m³/s). Con ese flujo debería obtenerse un flujo de pozo de 350 gpm (galones por minuto, equivalente a 0.0220815 m³/s).

Tomando en cuenta tanto el diseño conceptual del sistema Air-lift, como las condiciones existentes en el terreno y en el cabezal del pozo geotérmico, se diseñó el sistema Air-Lift mostrado en la Figura 3, que presenta la disposición de los elementos que componen el sistema.

Tubería de inyección de aire

La tubería con la cual se inyectará el aire debe cumplir también con los requerimientos del propio sistema Air-Lift, pero además debe poder adaptarse a las condiciones reales del pozo Z-3. Dentro de las opciones a emplear en el sistema se consideró emplear tubería de acero inoxidable. Esta es resistente a la corrosión así como a las temperaturas que presenta el yacimiento geotérmico, pero su costo es demasiado elevado en comparación con otro tipo de aceros que cumplen la misma función.

Por ejemplo, el acero ASTM A53 presenta una gran flexibilidad para su empleo en un gran número de casos, contando con presentaciones de 3 y 6 m de largo. Es capaz de conducir el aire a la presión requerida, así como de soportar las condiciones en el pozo geotérmico. Su costo es bastante menor que el del acero inoxidable y la unión entre sus tramos puede ser soldada o roscada, dependiendo de los requerimientos.

Por ello, se propone utilizar acero ASTM A53 para la tubería de conducción de aire del sistema Air-Lift para el pozo Z-3. Sus características son: unión roscada (tipo cónica NPT), diámetro nominal de 1", cédula 40, longitud total de 100 metros, tramos de 3 m y unión entre tramos mediante coples (rosca tipo cónica NPT). En las Figs. 4 y 5 se presenta un tramo de tubería con las características mencionadas y el cople de unión.

Como se propone que las uniones sean roscadas, se calcularon los esfuerzos tanto en las roscas de la tubería como en los coples de unión, ya que de estos dependerá que la tubería resista el propio peso de la misma. Para la determinación de estos esfuerzos se tuvo en consideración que toda la línea de inyección de aire se va encontrar sujeta únicamente en el cabezal del pozo, por lo que la última unión de cople-tramo va a soportar todo el peso de la línea. Para el cálculo de los esfuerzos se consideró el peso total de la línea de tubería de inyección más accesorios y cabezales, además de un factor de seguridad del 40%, obteniendo un peso de 150 kg. En la Fig. 6 se muestran las piezas analizadas.

Sobre las piezas ilustradas en la Fig. 6 se realizaron simulaciones numéricas para determinar la deformación total, la deformación unitaria, el esfuerzo de Von Mises y el factor de seguridad. En la Fig. 7 se muestra la deformación unitaria, donde el valor mínimo es de 1.2 x 10⁻⁷ m/m, mientras el máximo es de 6.0864 x 10⁻⁴ m/m. En la Fig. 8 se observa la deformación total que presenta la unión, con un valor máximo de 1.1248 x 10⁻⁵ m y uno mínimo de 1.5071 x 10⁻⁷ m. En la Fig. 9 se muestran los esfuerzos de Von Mises que se generan en la unión debido a las cargas, con un valor máximo de 1.0523 x 10⁸ Pa y uno mínimo de 11,736 Pa. Por último, se muestran los factores de seguridad en la

unión en la Fig. 10, donde el valor máximo es de 15, mientras el mínimo es de 2.2806.

Cabezales de inyección de aire

El cabezal del sistema Air-Lift para la inyección de aire es de gran importancia, debido a que este no solamente inyectará el aire en el fluido del pozo geotérmico sino que de él dependerá la configuración de las burbujas de aire que se van a formar. La configuración de burbuja de aire incidirá directamente en la eficacia del sistema, por lo cual es importante contar con una configuración que no solamente se enfoque en el tamaño de la burbuja, sino en su cantidad, patrón, distribución y configuración geométrica.

Hasta el momento, la literatura no reporta una configuración de cabezal para aplicaciones geotérmicas. Sin embargo, se proponen dos configuraciones base de 1 1/2" de diámetro para los cabezales del sistema Air-Lift. La primera configuración base tiene un largo de 10 cm y la segunda de 20 cm. Ambas configuraciones cuentan en uno de sus extremos con un roscado para la unión con la tubería de inyección de aire, y después del roscado sigue un barrenado con el mismo diámetro hasta 2 cm antes del extremo contrario. Por otra parte, el material propuesto para los cabezales es acero inoxidable, debido a los pequeños orificios con los que va a contar el cabezal, lo cuales están expuestos al fluido geotérmico y pueden corroerse y obstruirse más fácilmente debido a sus pequeñas dimensiones.

Para la configuración base de 10 cm, todos los patrones de orificios se encuentran en el extremo contrario de donde se encuentra la rosca, es decir, los orificios se encuentran sobre la cara circular dentro de un círculo de diámetro de 1". En la Fig. 11 se ilustra uno de los patrones de orificios propuestos, con un diámetro de 3/16". De igual manera, en las Figs. 12 y 13 se muestra el patrón con orificios de 1/4" y 1/8" de diámetro, respectivamente.

Por otra parte, para los cabezales de 20 cm los orificios se encuentran distribuidos a lo largo de toda la cara cilíndrica, pero sin contar con orificios en la cara opuesta al roscado. En la Fig. 14 se observa el patrón de orificios a lo largo del cabezal de 20 cm, que tienen un diámetro de 3/16". En la Fig. 15 se muestra el patrón de orificios de 1/4" de diámetro, y en la Fig. 16 se ilustra un patrón de orificios con distintos diámetros de 1/8", 3/16", 1/4" y 5/16".

Tren de válvulas e indicadores

A pesar de que las presiones empleadas en sistemas típicos Air-Lift no son demasiado altas, el diseño debe contar con dispositivos de seguridad que actúen ante cualquier mal funcionamiento o imprevisto. Por lo anterior, el sistema debe contar con un tren de válvulas (Fig. 17) para mantener un funcionamiento correcto, y asegurar la integridad física de los operarios ante cualquier eventualidad o 'arranque' del pozo.

El tren de válvulas cuenta con una disposición de válvulas específicas, partiendo del compresor donde se encuentra primeramente una válvula de seguridad (Fig. 18) cuya función es fungir como desfogue en caso de que el sistema sufra una sobrepresión. Posteriormente a la válvula de seguridad, se encuentra un indicador de flujo (Fig. 19), cuya función es indicar el gasto de aire que el sistema está entregando y prevenir cualquier mal funcionamiento. Después del indicador de flujo se localiza una válvula check (Fig. 20), que cumple con la tarea de prevenir cualquier retorno de fluido, ya sea de aire o del propio fluido del pozo geotérmico ante un eventual 'arranque', evitando que el sistema presente un fallo. Por último, se encuentra una válvula de cierre manual (Fig. 21), que permitirá cerrar el sistema en caso que así se requiera, o cuando el sistema no se encuentre



operando.

Compresor

Este equipo se encargará de proveer el gasto de aire a la presión requerida para que el sistema Air-Lift funciones como se planea. Para determinar la presión requerida por el sistema con el gasto de aire previamente obtenido (de 350 gpm), se empleó la ecuación de continuidad (Ec. 4) en conjunto con la ecuación de Bernoulli (Ec. 5). Con esta base, se obtuvo que el compresor debe proporcionar una presión de aproximadamente 14 bar.

$$\left[\frac{\partial \rho}{\partial t} + (\nabla \cdot \rho v) = 0 \right] \quad (4)$$

$$\left[\rho Dv/Dt = -\nabla p + \rho g \right] \quad (5)$$

Así, el compresor deberá proporcionar un gasto de 350 gpm a una presión de 14 bar, además de cumplir con características adicionales, tales como conexión trifásica, voltaje de trabajo de 220/440 V, potencia de 40 hp, medidor de presión, sistema de lubricación y estar fabricado para soportar condiciones a la intemperie.

CONCLUSIONES

Los materiales y diseño del sistema Air-Lift aquí presentado permiten cumplir con los objetivos del mismo en el pozo Z-3. El sistema será funcional y resistente a los esfuerzos mecánicos a los que estará expuesto, y resulta ser el más viable desde el punto de vista técnico y económico. Con este sistema Air-Lift, diseñado específicamente para el caso del pozo Z-3, se espera obtener el flujo calculado.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo por parte del Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica (CeMIE-Geo), así como al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), a la Secretaría de Energía (SENER), al Fondo de Sustentabilidad Energética y al Grupo de Eficiencia Energética y Energía Renovable (GREEN-ER), para la realización del presente proyecto.

NOMENCLATURA

a	Fracción de volumen (fracción de vacío es la fracción de volumen de aire)
A_1	Sección transversal del tubo de succión (flujo de agua)
A_2	Upriser sección del tubo (mezcla de flujo de dos fases)
M	Caudal de masa
P	Presión
g	Aceleración de la gravedad
M	Flujo de masa, $M, I(a, A), i = g, l$
Δz	$(I_s + I_d) / N$
μ	Viscosidad
ρ	Densidad



X Parámetro Lockhart-Martinelli

Subíndices

$1,2,i$ Propiedad en el punto 1, 2 o i

f Fricción

g,l Propiedades en fase gaseosa o en fase líquida

k Propiedad en la cara de la celda k

m Propiedad media de la celda

REFERENCIAS

Cockx, A., A. Lin, M. Roustan, Z. Do-Quang, and V. Lazarova, 1997. Numerical simulation and physical modeling of the hydrodynamics in an air-lift internal loop reactor. *Journal of Chemical Engineering Science*, Vol. 52, no. 21–22, pp. 3787-3793.

Lockhart, R.W., and R.C. Martinelli, 1949. Proposed correlation of data for isothermal two-phase, two-component flow of data in pipes. *Chem. Eng. Progr.*, Vol. 45, pp. 39-48.

Mudde, R.F. and H.E.A. Van den Akker, 2001. 2D and 3D simulations of an internal airlift loop reactor on the basis of a two-fluid model. *Journal of Chemical Engineering Science*, Vol. 56, no. 21-22, pp. 6351-6358.

Nenes, A., D. Assimacopoulos, N. Markatos, and G. Karydakis, 1996. Simulation of Airlift Pumps for Moderate-Depth Water Wells. *Technika Chronika*, Vol. 14, pp. 1-20.

Van Baten, J.M., J. Ellenberger, and R. Krishna, 2003. Hydrodynamics of internal air-lift reactors: experiments versus CFD simulations. *Journal of Chemical Engineering and Processing*, Vol. 42, no. 10, pp. 733-742.

FIGURAS EN PÁGINAS SIGUIENTES



Fig. 1. Vista del pozo geotérmico Z-3.

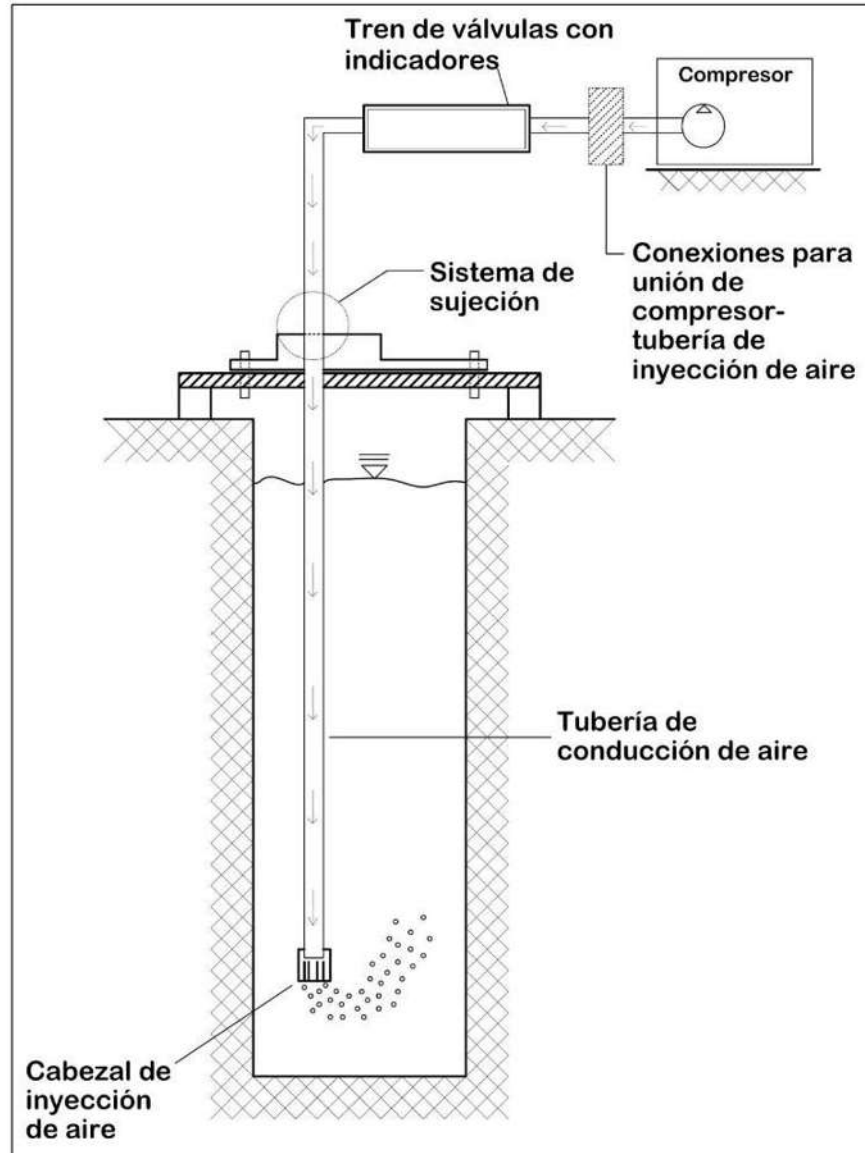


Figura 2. Diseño conceptual del sistema Air-Lift.

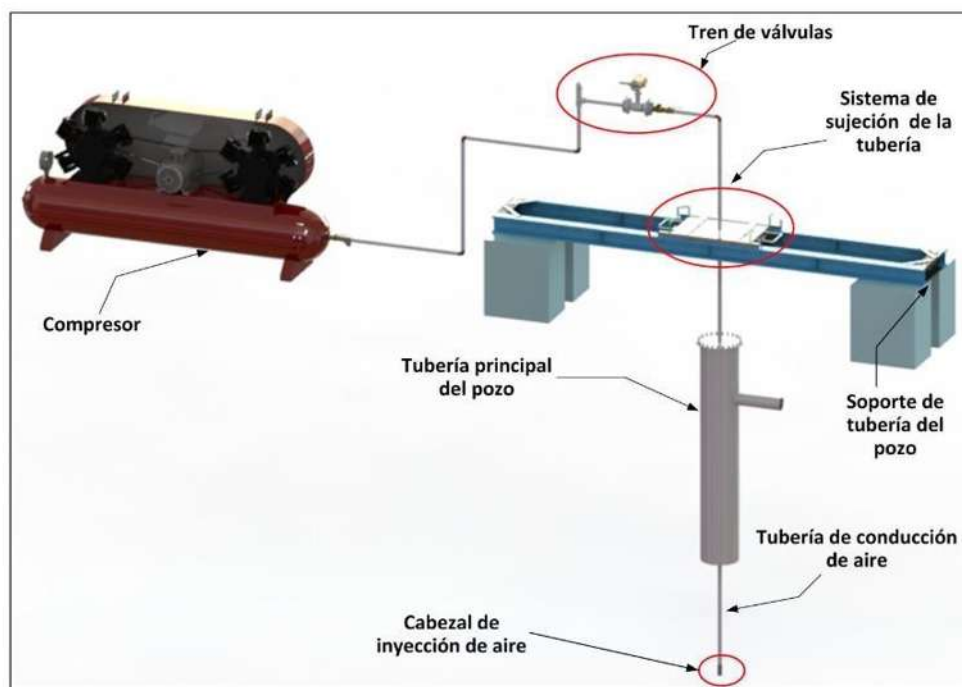


Figura 3. Diseño del sistema Air-Lift.



Figura 4. Tramo de tubería para la conducción de aire.



Figura 5. Cople de unión entre tramos de la tubería de inyección de aire.

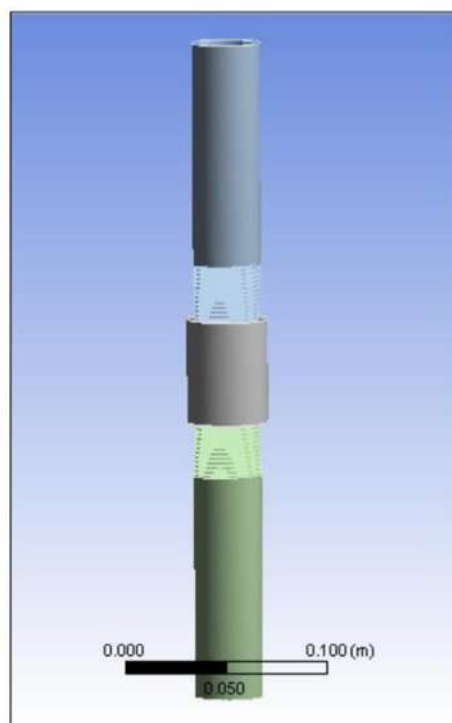


Figura 6. Piezas bajo análisis, unión de tuberías mediante cople.

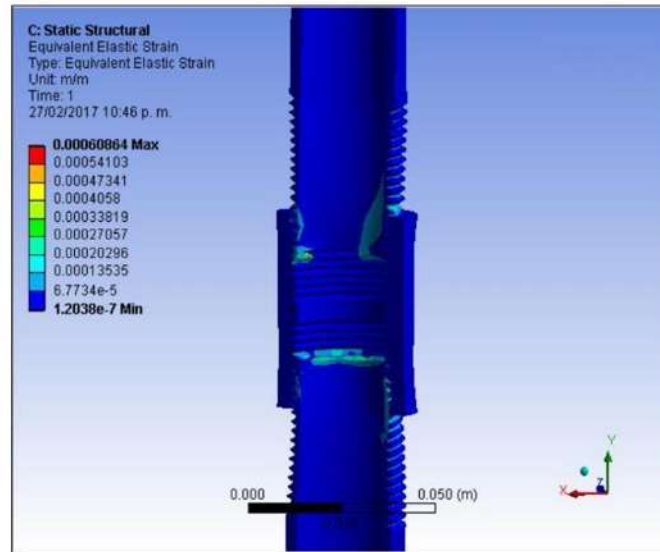


Figura 7. Deformación unitaria de la unión de tuberías mediante cople.

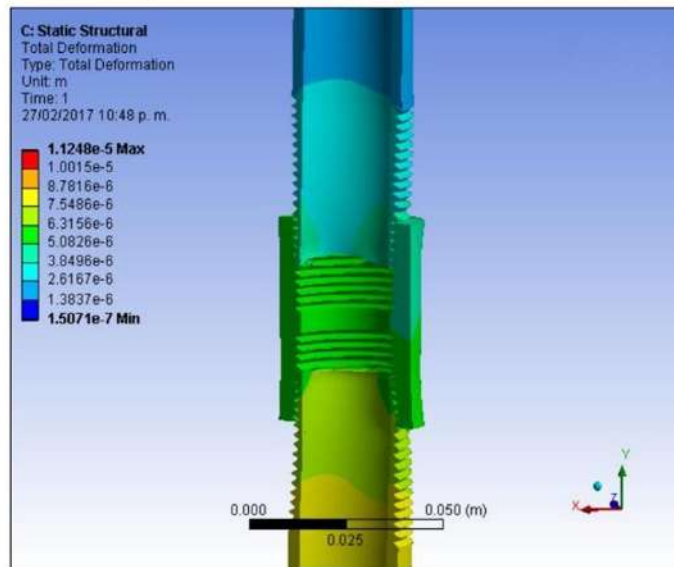


Figura 8. Deformación total de la unión de tuberías mediante cople.

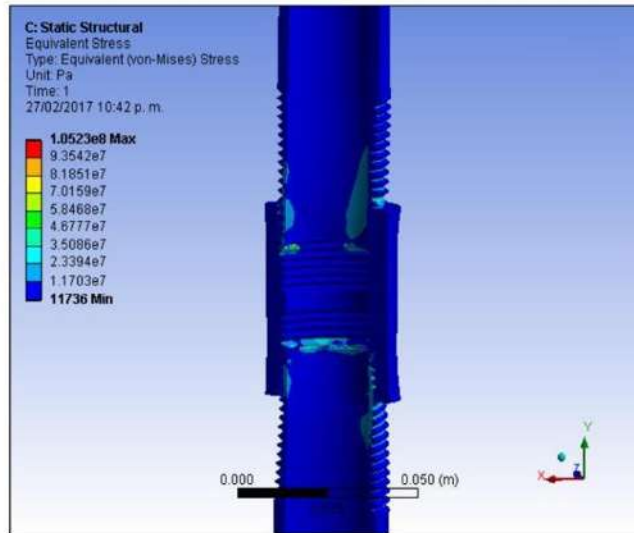


Figura 9. Esfuerzo de Von Mises en la unión de tuberías mediante cople.

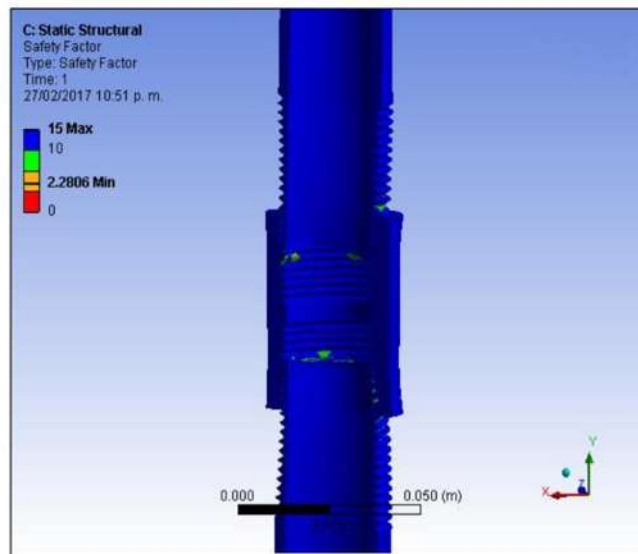


Figura 10. Factor de seguridad en la unión de tuberías mediante cople.



Figura 11. Patrón de orificios 3/16" de diámetro, cabezal de 10 cm.



Figura 12. Patrón de orificios 1/4" de diámetro, cabezal de 10 cm.



Figura 13. Patrón de orificios 1/8" de diámetro, cabezal de 10 cm.



Figura 14. Patrón de orificios 3/16" de diámetro, cabezal de 20 cm.



Figura 15. Patrón de orificios 1/4" de diámetro, cabezal base 20 cm.



Figura 16. Patrón de orificios 1/8", 3/16", 1/4" y 5/16" de diámetro, cabezal base 20 cm.

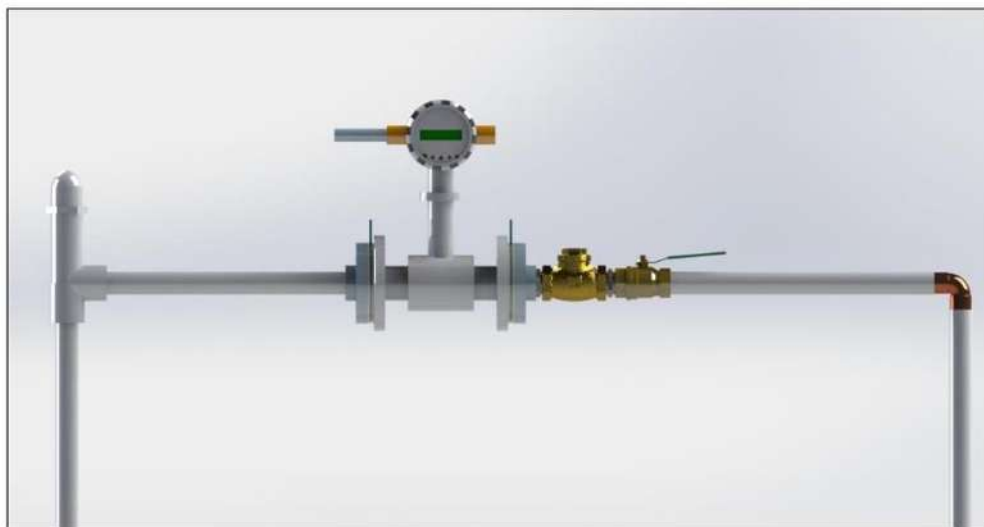


Figura 17. Tren de válvulas e indicador de flujo del sistema Air-Lift.



Figura 18. Válvula de alivio.



Figura 19. Flujometro.



Figura 20. Válvula check.

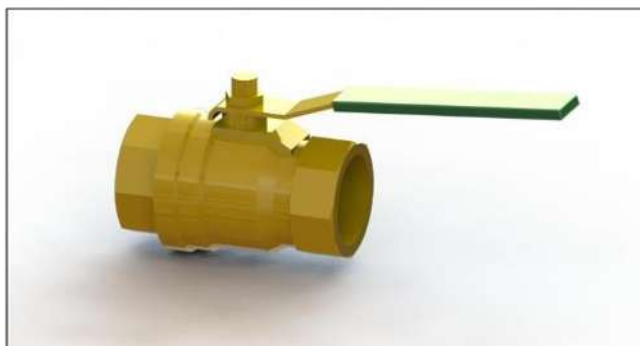


Figura 21. Válvula de cierre manual.

XXV CONGRESO INTERNACIONAL ANUAL DE LA SOMIM. MAZATLÁN, SINALOA. 2019.

MEMORIAS DEL XXV CONGRESO INTERNACIONAL ANUAL DE LA SOMIM
18 al 20 DE SEPTIEMBRE DE 2019 MAZATLÁN, SINALOA, MÉXICO

Tema A4 Termofluidos: Extracción de salmuera geotérmica

“Estudio experimental de la extracción de salmuera geotérmica a diferentes relaciones de inmersión utilizando un sistema Airlift”

J. Jesús Pacheco Ibarra^a, Javier Gutiérrez Martínez^{a*}, Carlos Rubio Maya^a, Hugo Cuauhtémoc Gutiérrez Sánchez^a, Juan Pablo Arriaga Villagrán^a, Alberto Gutiérrez Martínez^b

^a Facultad de Ingeniería Mecánica, Grupo de Eficiencia Energética y Energías Renovables, UMSNH, México.

^b Facultad de Ingeniería Eléctrica, UMSNH, México.

Autor contacto: Javier Gutiérrez Martínez. Dirección de correo electrónico: jgutierrez@umich.mx

RESUMEN

El efecto de las variables termohidráulicas sobre la extracción de calor utilizando un sistema Airlift, se estudió experimentalmente instalando este dispositivo al interior de un pozo geotérmico de mediana entalpía realizando una inyección de aire a diferentes relaciones de inmersión, habiendo identificado el estado mecánico y realizado un registro Presión-Temperatura del pozo, donde se obtuvieron temperaturas de salmuera mayores con relaciones de inmersión (SR) más altas, debido a una mayor proporción de salmuera en la mezcla extraída del sistema con diferencias de hasta 19.6 °C. Asimismo, se obtuvieron mayores flujos de salmuera y temperaturas altas para SR grandes, las de 0.94 y 0.95, respecto a las de 0.88 y 0.89, debido a que representan una mayor cantidad de salmuera con reducción de la densidad en el interior del sistema que permite incrementar la proporción de salmuera con más calor que el aire en la mezcla de elevación, incrementando la productividad.

Palabras Clave: Airlift, inmersión, mediana entalpía, productividad.

ABSTRACT

The effect of thermohydraulic variables on heat extraction using an Airlift system was studied experimentally by installing this device inside a medium enthalpy geothermal well, performing an injection of air at different immersion relationships, having identified the mechanical state and performed a Well pressure-temperature record, where higher brine temperatures were obtained with higher immersion ratios (SR), due to a greater proportion of brine in the mixture extracted from the system with differences of up to 19.6 °C (67.28 °F). Likewise, higher brine flows and high temperatures for large SR were obtained, those of 0.94 and 0.95, with respect to those of 0.88 and 0.89, because they represent a greater amount of brine with a reduction in density inside the system that allows increasing the proportion of brine with more thermal energy than air in the lift mix, increasing productivity.

Keywords: Airlift, immersion, medium enthalpy, productivity.

1. Introducción

Un Airlift es un dispositivo comúnmente utilizado para elevar líquidos, o mezclas de líquidos y sólidos (mayormente líquidos) a través de una tubería vertical parcialmente sumergida en un líquido, por medio de aire comprimido introducido a través de una tubería cerca del extremo inferior [1].

La elevación de la mezcla se genera derivado de la diferencia de presión creada al suministrar el aire a una presión tal que debe vencer tanto la columna de agua estática como dinámica, y la reducción de la densidad del agua al crear la mezcla líquido-gas. La utilización del sistema Airlift en un reservorio geotérmico, no solo se verá influenciado por la acción del diferencial de presión y la reducción de la

densidad de la mezcla líquido-gas, también tendrá la influencia de la temperatura a la que se encuentre el fluido geotérmico.

Las bombas de transporte aéreo Airlift pueden usarse para levantar sustancias corrosivas y/o tóxicas en las industrias químicas y la eliminación de lodos en plantas de tratamiento de aguas residuales [2].

Otras aplicaciones del Airlift incluyen bombear líquidos arenosos o salados viscosos como hidrocarburos en la industria petrolera, perforación de pozos, minería submarina y bio-reactores [3].

Además, son fáciles de usar en pozos de forma irregular donde otras bombas de pozo profundo no encajan. Recientemente, aplicaciones del sistema Airlift se utilizaron para bombear líquidos hirviendo donde hay un cambio de fase de líquido a gas. En los campos petrolíferos se emplean bombas elevadoras de gas o el sistema Airlift para extraer

petróleo de pozos débiles [4]. Kato y colaboradores (1975) estudiaron un Airlift experimentalmente para partículas sólidas y se propuso un modelo basado en la ecuación de momento [5]. Parker y Suttle (1987) diseñaron un sistema Airlift para aplicaciones en acuicultura [6]. Reinmann y colaboradores (1990) experimentalmente consideraron el efecto del diámetro de tubo para un diseño de Airlift de 3 a 25 mm [7].

Es importante el estudio de las propiedades termohidráulicas durante la extracción de salmuera con el sistema Airlift, que permitan comprender su operación de manera que al modificarlas se puedan obtener mejores resultados en la extracción de energía que hagan más rentable su utilización. Al inyectar la fase gas en el fondo de la tubería, y como el gas tiene una densidad más baja que el líquido este se eleva rápidamente en el tubo. La presión e inercia del gas ascendente obliga a la fase líquida a moverse en la misma dirección. Las fuerzas dominantes que actúan en la mezcla aire-agua en el sistema Airlift son gravitacional, de inercia y flotabilidad. La flotabilidad actúa como la fuerza de flotación mientras la fuerza de gravedad se le opone. Si las fuerzas motrices son lo suficientemente grandes, el líquido es elevado a través de la tubería y expulsado a un nivel más alto que el de la inmersión. De lo contrario, el líquido solo se eleva hasta el nivel donde estas fuerzas de elevación sean iguales. La fuerza de inercia de las burbujas de aire inyectadas desplaza el agua de los alrededores y lo mueve al nivel superior de la tubería [8].

Los fluidos aireados tienen importancia en áreas como la industria petrolera, en la extracción de crudo. Existen además otras aplicaciones que requieren un conocimiento detallado sobre el crecimiento y desarrollo de burbujas, por citar la industria de los polímeros. También en el estudio del magma, y tamaño de burbujas es importante ya que en este caso las burbujas aumentan la viscosidad neta del fluido [9]. En geotermia se tiene referencia del uso del sistema Airlift en la fase de perforación para limpieza de pozos, así como para evaluar la productividad instantánea relativamente rápido considerando que, los resultados que se obtienen en esta etapa temprana son preliminares y pueden no revelar el potencial sostenible completo de un reservorio, ya que se requieren pruebas hidráulicas para obtener un conjunto de datos que pueda interpretarse hacia una comprensión profunda del yacimiento. Se considera que el éxito de un pozo geotérmico generalmente se clasifica en índices de productividad e inyectividad, respectivamente, especificando la tasa de producción/inyección en función de la presión diferencial aplicada (por ejemplo, litros por segundo por bar). Durante la realización de las pruebas hidráulicas y caracterización de yacimientos del sitio de Taubkirchen en la cuenca de Molasse Bavarian, Alemania, se utilizó el sistema Airlift y estimulación química con HCl al 15 %, en dos periodos de tiempo, uno menor a 2 días con un volumen producido de 6000 m³, y otro de 1.5 días con un volumen de 7800 m³, en el pozo GT3a con profundidad de 4259 m, se asume una temperatura de 120 °C [10].

Asimismo, para las pruebas de caracterización hidrotrémica de los pozos GRT-1 y GRT-2 en Rittershoffen, Francia. En

el interior del pozo GRT-1 de 2580 m de profundidad se realizó la inyección de aire a 300 m de profundidad, durante 24 h, posteriormente se realizaron 3 pruebas descendiendo el flujo en 3 tasas (14 l/s, 11 l/s y 9.7 l/s) en periodos de 3 h cada una, con un registro de temperatura máxima de 157 °C. Posteriormente se realizó otra prueba inyectando el aire a 500 m de inmersión, durante 12 h estabilizando el flujo en 8 l/s, registrando un máximo de temperatura de 158 °C. La productividad del pozo podría estimarse en 0.45 l/s/bar [11].

2. Planteamiento del problema

En nuestro planeta la actividad humana para lograr la supervivencia y bienestar, demanda un uso creciente de energía y debido a la capacidad reducida del cuerpo humano para realizar trabajo se ha buscado la ayuda de fuentes externas de energía que permitan cubrir esta necesidad. Desde que la humanidad descubrió la manera de aprovechar la biomasa en la antigüedad y los combustibles fósiles en tiempos modernos, se han provocado efectos en el medio ambiente que ya se padecen en la actualidad. Los combustibles fósiles en el año 2010 representaban un 80.6 % del consumo mundial de energía, reportado por la Secretaría de Energía en México [12]. Con la problemática de que su combustión está generando el cambio climático que resulta en desastres naturales causados en las últimas décadas y con bajas eficiencias en el aprovechamiento de la energía procedente de combustibles fósiles, por mencionar las eficiencias para el automóvil menores al 30 % y para las centrales termoeléctricas que transforman la energía química de los derivados del petróleo en energía eléctrica con rendimientos entre el 30 y 35 %.

Las energías renovables van creciendo día con día, el potencial energético que representan las hace factibles de manera técnica y económicamente para utilizar un flujo neto ilimitado e inagotable a escala humana de viento, radiación solar, la fuerza del agua, fluido geotérmico, entre otros recursos limpios, para dejar de consumir paulatinamente los combustibles fósiles convencionales que se agotan y generan emisiones de CO₂.

Ante esta situación, el aprovechamiento del recurso geotérmico para generación de energía, así como el aprovechamiento de las sales contenidas en los reservorios con salmuera caliente en particular para la extracción de Litio, representan a una fuente renovable de alta importancia. Es por esto que, en particular la búsqueda de alternativas como el sistema Airlift para la extracción de salmuera geotérmica es relevante ya que este recurso es muy abundante y poco aprovechado respecto a su potencial y a los yacimientos de alta entalpía.

Los sistemas Airlift tienen grandes ventajas en su utilización sobre los sistemas de bombeo mecánico porque se requiere un bajo costo inicial y de mantenimiento, fácil de instalar, requerimiento de espacios pequeños, simple diseño y construcción y fácil regulación de flujo [13].

3. Metodología

Se realizó la identificación del estado mecánico resumido en la Tabla 1, la caracterización termodinámica y la determinación de las condiciones operativas necesarias para llevar a cabo la extracción de salmuera en un pozo geotérmico, utilizando el sistema Airlift.

Tabla 1. Estado mecánico del pozo

Diámetro del agujero (cm)	Diámetro de tubería (cm)	Profundidad (m)
66.04	10.16	100.0
44.45	33.973	363.6
31.11	-----	1350

En la Figura 1, se muestra la localización del pozo GSE-S01 que se localiza a 900 m al NW de la población de San Nicolás Simirao, en el Municipio de Zinapécuaro, en el Estado de Michoacán, México. Se construyó en el año de 1991 m y tiene una profundidad total de 1350 m.



Figura 1 – Se observa la localización de la comunidad de San Nicolás Simirao en el Municipio Zinapécuaro Michoacán, México.

En la Figura 2, se muestran las instalaciones de la planta híbrida geotérmica y solar, en donde se realizó la experimentación.



Figura 2 – Muestra la planta híbrida geotérmica y solar en la comunidad de San Nicolás Simirao.

En la Figura 3, se muestra la caracterización de presiones y temperaturas en el pozo, donde se observa la temperatura de saturación en la curva a la derecha, indicativo que se cuenta con líquido comprimido.

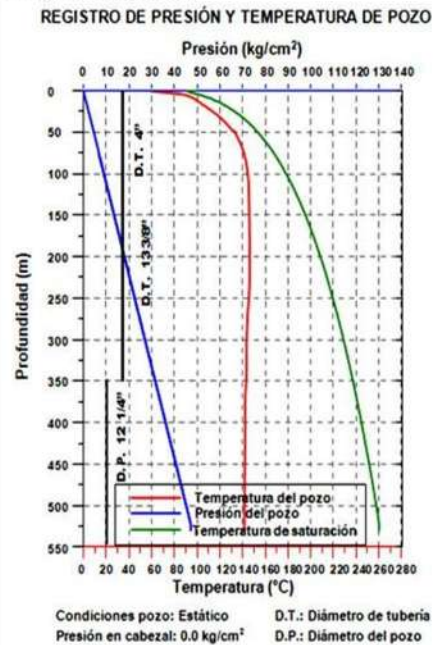


Figura 3 – Perfiles de temperatura, presión y temperatura de saturación calculada.



Figura 4 - Volumen de control del sistema Airlift en el que se muestran las secciones que lo conforman para su construcción.

Para medir la profundidad y calibración del pozo, se utilizó un malacate mecánico con regulador de velocidad y contador mecánico en metros, alambre de acero inoxidable Hastelloy de 0.092 m de diámetro. En el caso de la profundidad libre del pozo se introdujo una barra de acero inoxidable con una longitud de 1.5 m y diámetro de 1 1/4" hasta una profundidad de 550 m, en donde se registró una obstrucción. En tanto que, para la calibración se introdujo un globo de cobre de 3" de diámetro hasta la misma profundidad a la cual bajo la barra de acero y donde se registró la obstrucción.

Posteriormente se procedió con la toma del registro de presión y temperatura estando el pozo estático. Debido a la obstrucción detectada durante la calibración, se modificó el programa del registro y únicamente se bajó hasta 530 m de profundidad.

Para la toma de registros se ensambló la sonda electrónica Kuster denominada K-10 y se bajó dentro del pozo a una velocidad de 24 m/min, haciendo estaciones cada 200 m, para corroborar profundidad y tensión de la sonda. Durante el tiempo que duró el registro no se observó presión en el cabezal. Posteriormente se introdujo el sistema Airlift al interior del pozo geotérmico a las profundidades seleccionadas para la inyección del aire y la extracción de salmuera.

En la Figura 4, se muestra el sistema Airlift delimitado por líneas con puntos en un volumen de control, y se observa la parte que corresponde a la sección Lg del sistema Airlift en el tubo vertical que inicia en donde se realiza la succión y termina en donde se realiza la inyección de aire. La sección Ls, inicia en donde se realiza la succión y termina en donde se encuentra el nivel de la salmuera. La sección L es la longitud del sistema Airlift [14].

La relación de inmersión (SR), representa lo siguiente:

$$SR = \frac{(L_s - L_g)}{(L - L_g)} \quad (1)$$

$L_s - L_g$: la distancia en metros desde el punto de entrada del aire hasta el nivel de agua en el reservorio.

$L - L_g$: la distancia en metros desde el punto de extracción a la superficie de la mezcla aire-agua y el punto donde se realiza la inyección de aire.

En la Figura 5, se muestra la boquilla utilizada en la experimentación para la inyección de aire en el sistema Airlift, fabricada en acero inoxidable, de 20 cm de longitud y con 130 orificios de 5 mm de diámetro localizados en la cara cilíndrica del cabezal.



Figura 5 - Cabezal instalado en el punto de inyección de aire.

3.1 Resultados de las pruebas

Se instaló un compresor de 60 hp para inyección de 87 l/s de aire al sistema Airlift con una presión de 6.9 bar, la temperatura a la que se inyectó el aire se mantuvo en 40 °C. Los días de la experimentación la temperatura ambiente cambió debido a que en dos días de pruebas llovió y la temperatura se mantuvo a 22 °C promedio esto fue, para cuando se realizaron las pruebas con relaciones de inmersión de SR= 0.88 y 0.89 y para los días cuando se realizaron SR=0.94 y 0.95 la temperatura ambiente promedio fué de 25 y 26 °C respectivamente, éstos días fueron soleados. Cada prueba duró 4 h. La experimentación fue realizada del 19 al 24 de julio del 2018.

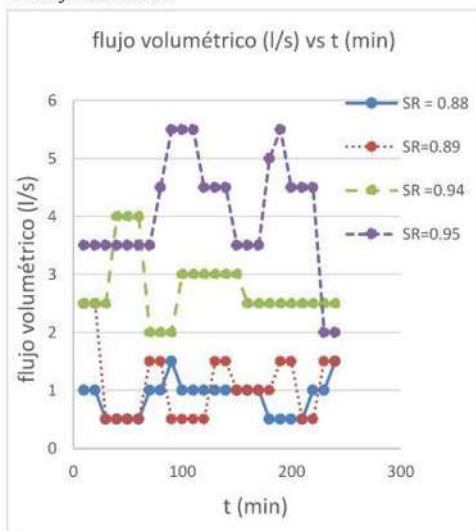


Figura 6 – Relaciones de flujos obtenidos para las diferentes tasas de inmersión (SR).

Para las relaciones de inmersión (SR) del sistema Airlift de 0.88 y 0.89 es decir, a profundidades de 30 m y 36 m para la inyección de aire, se obtuvo salmuera con flujos ponderados para cada prueba en 0.85 l/s y 1.083 l/s. En tanto que, para las relaciones de inmersión de 0.94 y 0.95 es decir, a profundidades de 60 m y 72 m para la inyección de aire, se obtuvieron flujos de salmuera de 2.75 l/s y 4.06 l/s respectivamente, como se muestra en la Figura 6. Asimismo, con las relaciones de inmersión (SR) del sistema Airlift de 0.88 y 0.89 se consiguió extraer salmuera a temperaturas superiores a 62.8 °C e inferiores a 80.8 °C. Asimismo para las relaciones de inmersión de 0.94 y 0.95, correspondientes a las profundidades de 66 m y 72 m, para la inyección de aire, se obtuvo salmuera a temperaturas de 100.4 °C y 103.7 °C, como se muestra en la Figura 7.

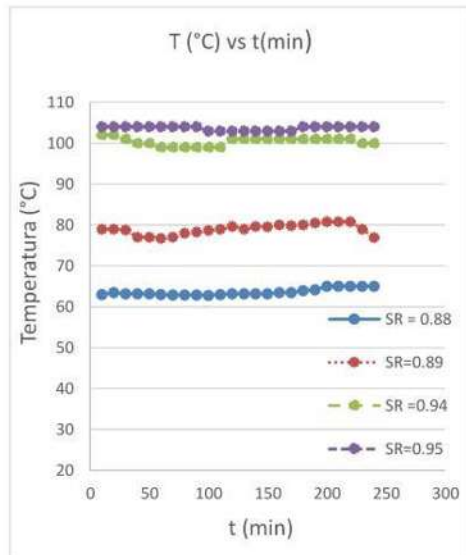


Figura 7 – Relaciones de temperaturas obtenidas para las diferentes tasas de inmersión (SR).

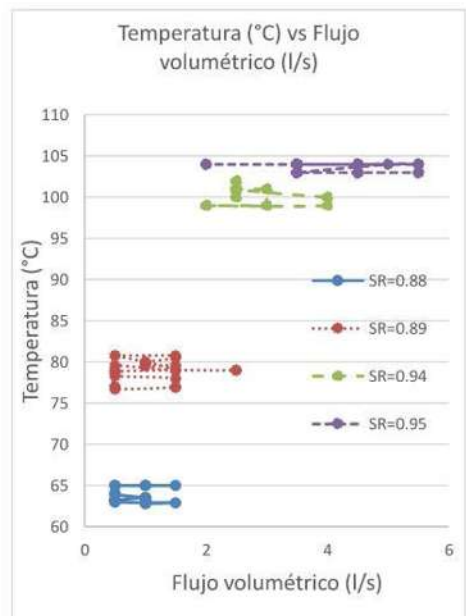


Figura 8 – Temperaturas obtenidas respecto a los flujos de salmuera extraído, para las diferentes tasas de inmersión (SR).

En función de las tasas de inmersión se incrementaron proporcionalmente por una parte el flujo y la temperatura de salmuera extraída. Para $SR=0.88$ la temperatura ponderada de extracción fue de 63.6°C y flujo de 0.875 l/s , para $SR=0.89$ la temperatura fue de 78.95°C y flujo de salmuera de 1.083 l/s , con un incremento importante para $SR=0.94$ la temperatura fue de 100.41°C y el flujo de salmuera de 2.75 l/s y finalmente para $SR=0.95$ la temperatura fue de 103.66°C y el flujo de salmuera de 4.063 l/s , un incremento en el flujo de 1.313 l/s en los últimos dos SR , como se muestra en la Figura 8.

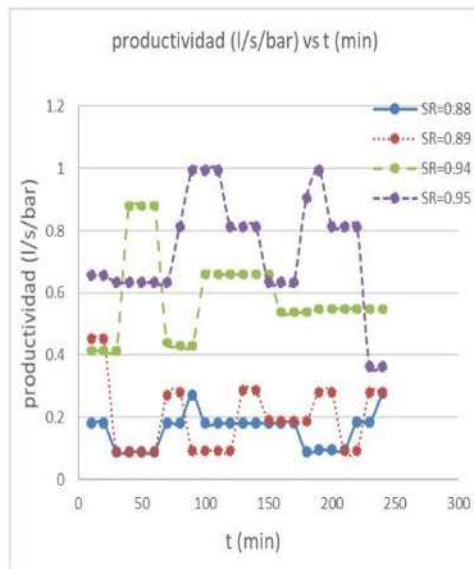


Figura 9 – Productividad obtenida durante la experimentación considerando el flujo respecto a la diferencial de presión en el sistema.

Las productividades medidas en (l/s/bar) se incrementaron en función de la tasa de inmersión (SR), para 0.88, 0.89, 0.94 y 0.95, las cuales resultaron en 0.16, 0.20, 0.59 y 0.74 (l/s/bar) respectivamente, y representan las tasas entre el gasto de salmuera extraído y el diferencial de presión en el sistema Airlift como se muestra en la Figura 9.

4. Conclusión

En condiciones estáticas, la temperatura máxima en el pozo geotérmico fue de 146°C , medida a 225 m y la presión máxima fue de 46.09 bar , medida a 530 m de profundidad. El nivel estático de la salmuera se encuentra muy cerca de la superficie, a 1.7 m , en temporada de lluvias, durante la cual se llevó a cabo la experimentación.

Se obtuvieron flujos menores de salmuera para las relaciones de inmersión 0.88 y 0.89 en la experimentación, respecto a los obtenidos para las SR de 0.94 y 0.95 que fueron dos veces mayores, atribuido a que, en estas últimas es aprovechado con mayor eficacia el aire presurizado para un mejor mezclado con la salmuera, disminuyendo la densidad de una mayor cantidad de fluido para ser impulsado hacia la superficie por la diferencia de presiones. Para las relaciones de inmersión (SR) menores se obtuvieron temperaturas de salmuera bajas respecto a la temperatura del reservorio, debido a una alta proporción de aire a temperatura más baja que se inyectó a la salmuera, y el cual tuvo poco tiempo de residencia en el interior del sistema Airlift, en comparación con las tasas de inmersión mayores en la que el tiempo de residencia del aire es mayor en el sistema debido a que tiene que realizar un recorrido de mayor tiempo tanto para su inyección bajando por el sistema así como para salir en la ascendente mezcla bifásica, recibiendo mayor cantidad de calor de manera que la mezcla resulta con una temperatura mayor.

La temperatura se incrementó durante la experimentación en la mezcla bifásica extraída, proporcionalmente con el flujo y ambas variables en función del incremento de SR, por la razón que, al incrementar esta última variable, se incrementó el flujo de salmuera extraído, debido a la disminución de la densidad de mayor cantidad de salmuera en el sistema que derivó en un incremento en la proporción de salmuera respecto al aire en la mezcla que elevó la temperatura a la salida.

Las productividades (l/s/bar) se incrementaron en función de la tasa de inmersión (SR), conforme se fue incrementando esta variable debido a que se incrementó el flujo extraído en (l/s), mientras que la presión inyectada de aire se mantuvo constante durante la experimentación en 6.9 bar .

Agradecimientos

Se agradece el apoyo para la realización de este trabajo a la Coordinación de la Investigación Científica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

REFERENCIAS

- [1] W.E. Castro, P.B. Zielinski, P.B. Sandifer, Performance characteristics of Airlift Pumps of short length and small diameter, (1975).
- [2] B. Storch, Extraction of sludges by pneumatic pumping. Proceedings of the 2nd Symposium on Jet Pumps, Ejectors and Gas Lift Techniques. Churchill College, Cambridge, England. G4-51-G4-60. (1975).

- [3] N. Hatta, H. Fujimoto, M. Isobe, J. Kang, Theoretical analysis of Flow characteristics of multiphase mixtures in a vertical pipe. *Int. J. Multiph. Flow* 24 (4), 539-561. (1998).
- [4] M.F. Khalil, K.A. Elshorbagy, S.Z. Kassab, R.L. Fahmy, Effect of air injection method on the performance of an airlift pump. *Int. J. Heat Fluid Flow* 20 (6), 598-604. (1999).
- [5] H. Kato, T. Miyazawa, S. Tiyama and T. Iwasaki, A study of an Airlift pump for solid particles, *Bull. JSME*, 18 (117), 286-294 (1975).
- [6] N. C. Parker, M. A. Suttle, Design of Airlift pumps for water circulation and aeration in aquaculture, *Aquacultural Engineering*, 6, 97-110 (1987).
- [7] D. J. Reinemann, J. Y Parlange, M. B. Timmons, Theory of small diameter Airlift pumps, *Int. J. Multiphase Flow*, 16 (1), 113-122 (1990).
- [8] A. López, C. Soriano, A. Medina. PIV En la formación de burbujas. (2010).
- [9] H. Fisch, J. Uhde, C. Bems, P. Lang, J. Bartels, Hydraulic testing and reservoir characterization of the Taufkirchen site in the Bavarian basin, Germany. (2015)
- [10] A. López, C. Soriano, A. Medina, PIV En la formación de burbujas. (2010).
- [11] C. Baujard, A. Genter, E. Dalmais, V. Maurer, R. Hehn, R. Rosillette, J. Vidal, J. Schmittbuhl, Hydrothermal characterization of wells GRT-1 and GRT-2 in Rittershoffen, France: Implications on the understanding of natural flow Systems in the rhine graben. (2017)
- [12] SENER, Prospectiva de Energías Renovables 2012-2026. (2012)
- [13] P. Hanafizadeh y B. Ghorbani, Review study on Airlift pumping Systems. (2012).
- [14] P. Hanafizadeh, S. Ganbarzadeh, M. Hassan Saici, Exergy analysis of Airlift Systems: experimental approach. (2011).