

## **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](mailto: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 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.

$$P_k = P_{k+1} + \left( \frac{M_{g,k+1}^2}{a_{g,k+1} \rho_{g,k+1} A_2^2} + \frac{M_{l,k+1}^2}{a_{l,k+1} \rho_l A_2^2} - \frac{M_{g,k}^2}{a_{g,k} \rho_{g,k} A_2^2} - \frac{M_{l,k}^2}{a_{l,k} \rho_l A_2^2} \right) \quad (1)$$

$$+ g(a_{g,m} \rho_{g,m} + a_{l,m} \rho_l) \Delta z + \left( \frac{dP}{dz} \right)_f \Delta z$$

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

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

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 m<sup>3</sup>/s). Con ese flujo debería obtenerse un flujo de pozo de 350 gpm (galones por minuto, equivalente a 0.0220815 m<sup>3</sup>/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<sup>-7</sup> m/m, mientras el máximo es de 6.0864 x 10<sup>-4</sup> m/m. En la Fig. 8 se observa la deformación total que presenta la unión, con un valor máximo de 1.1248 x 10<sup>-5</sup> m y uno mínimo de 1.5071 x 10<sup>-7</sup> 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 10<sup>8</sup> 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 encargara 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.

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

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

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, $M,/(a, A), i = g, l$
$\Delta z$	$(l_s + l_d)/N$
$\mu$	Viscosidad
$\rho$	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.*



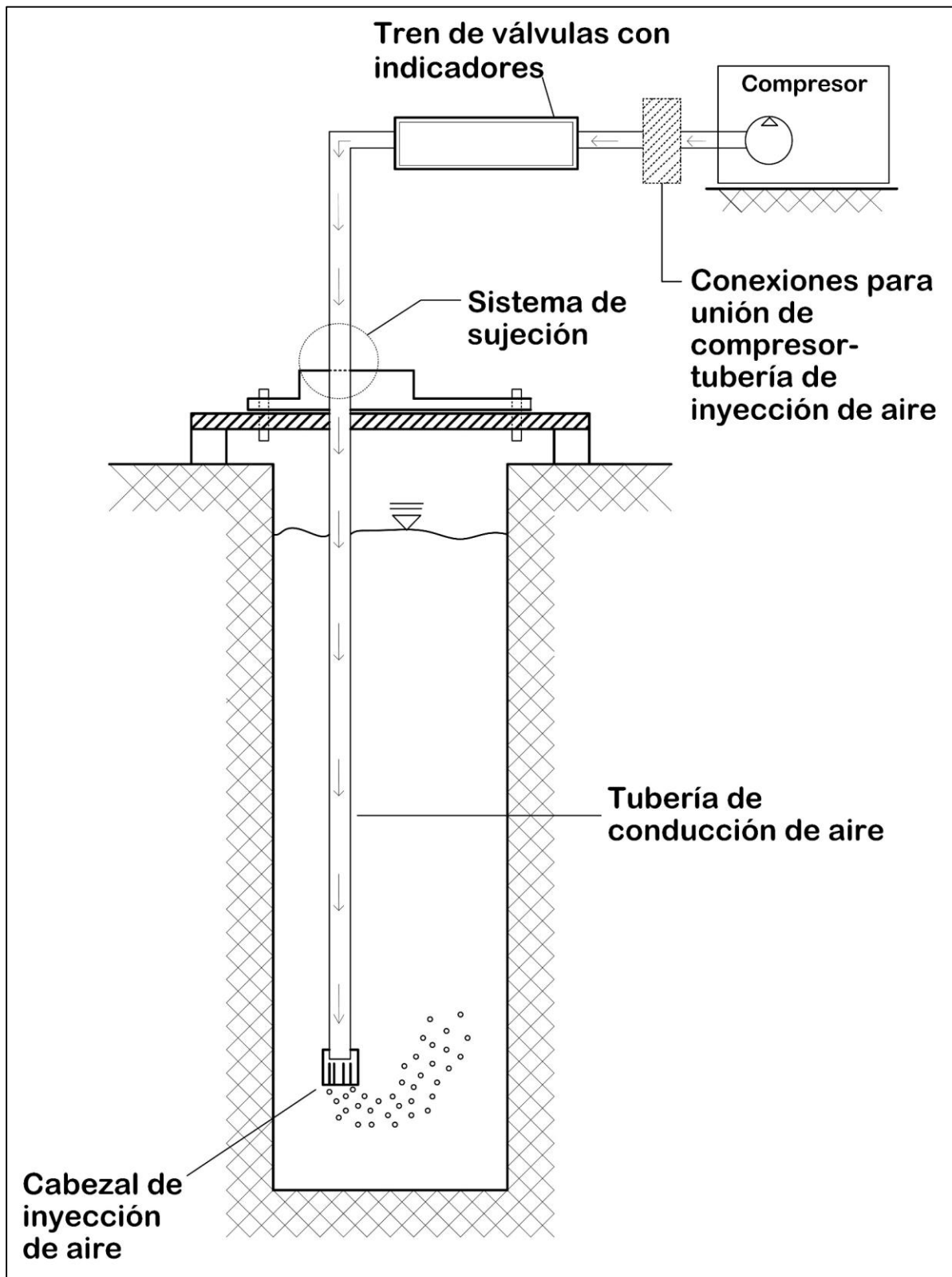


Figura 2. Diseño conceptual del sistema Air-Lift.

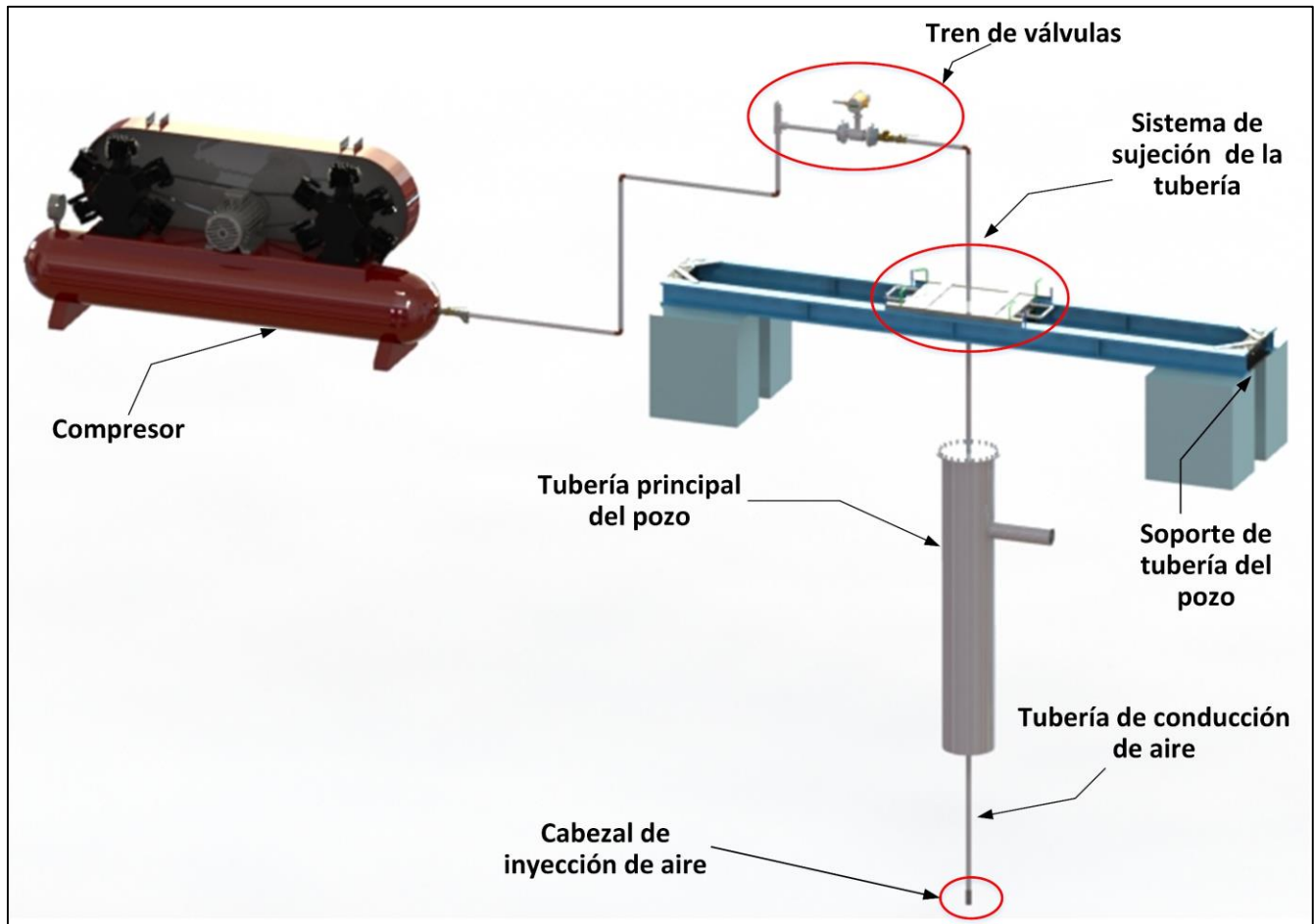


Figura 3. Diseño del sistema Air-Lift.



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

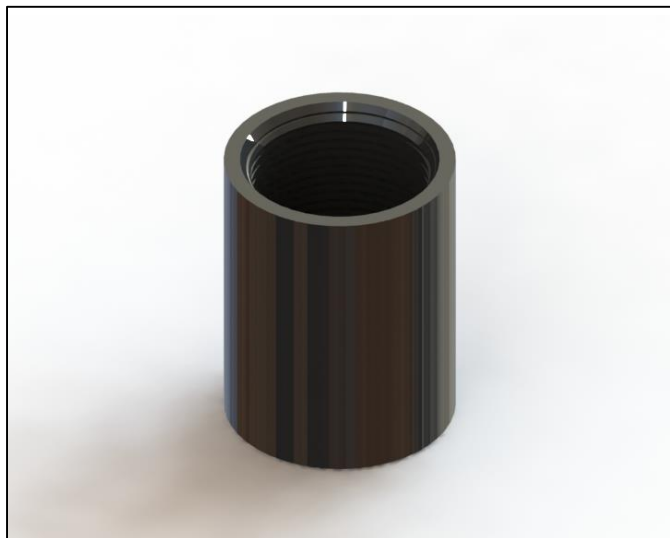


Figura 5. Cople de unión entre tramos de la tubería de inyección de aire.

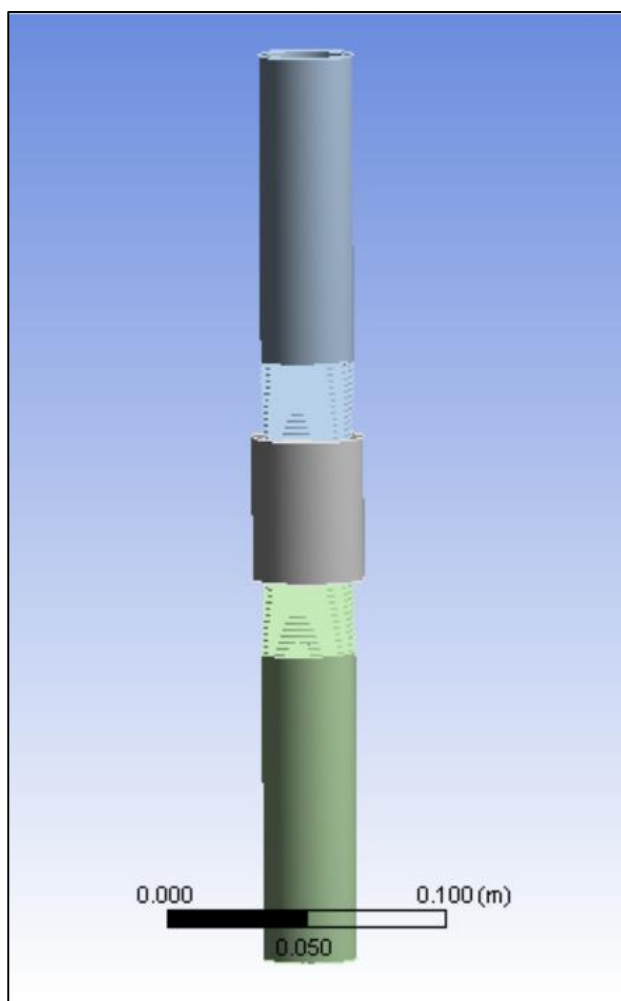


Figura 6. Piezas bajo análisis, unión de tuberías mediante cople.

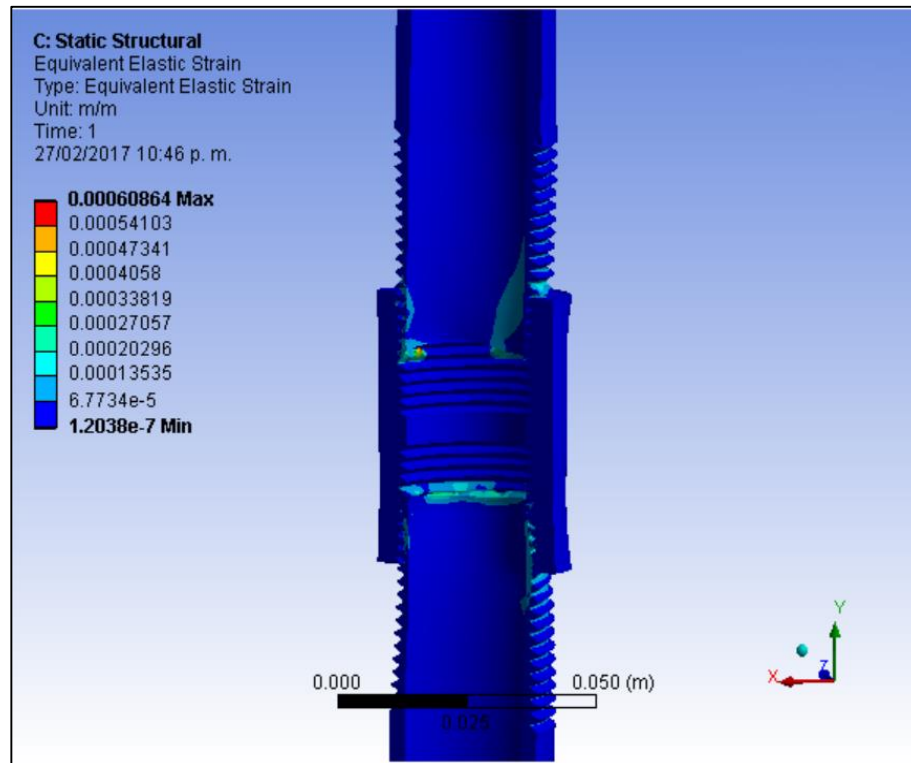


Figura 7. Deformación unitaria de la unión de tuberías mediante cople.

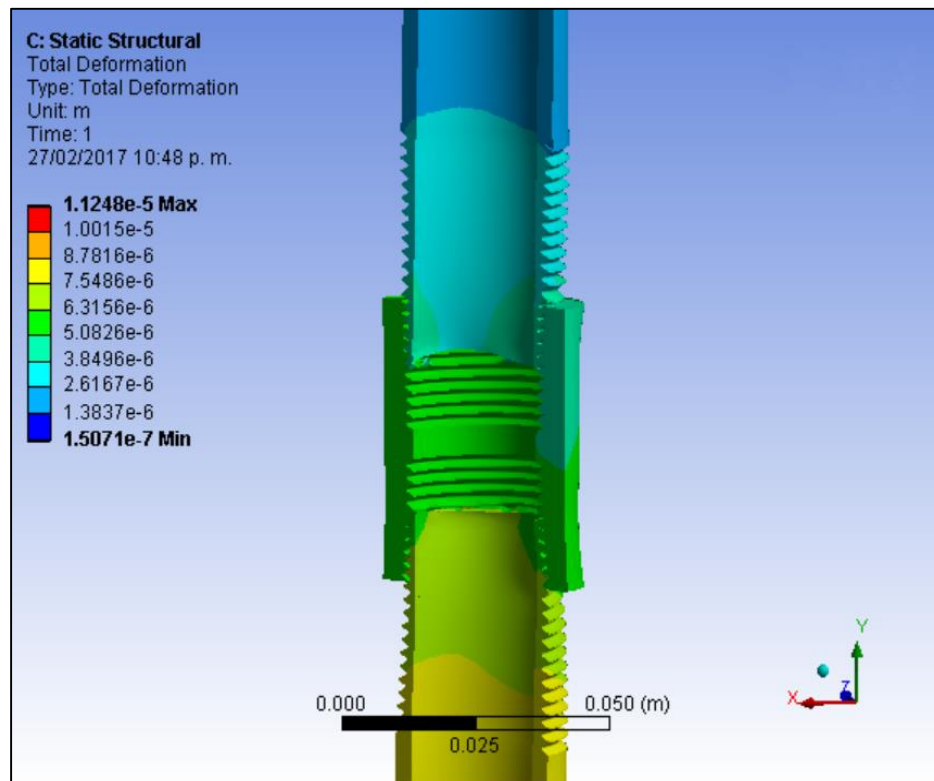


Figura 8. Deformación total de la unión de tuberías mediante cople.



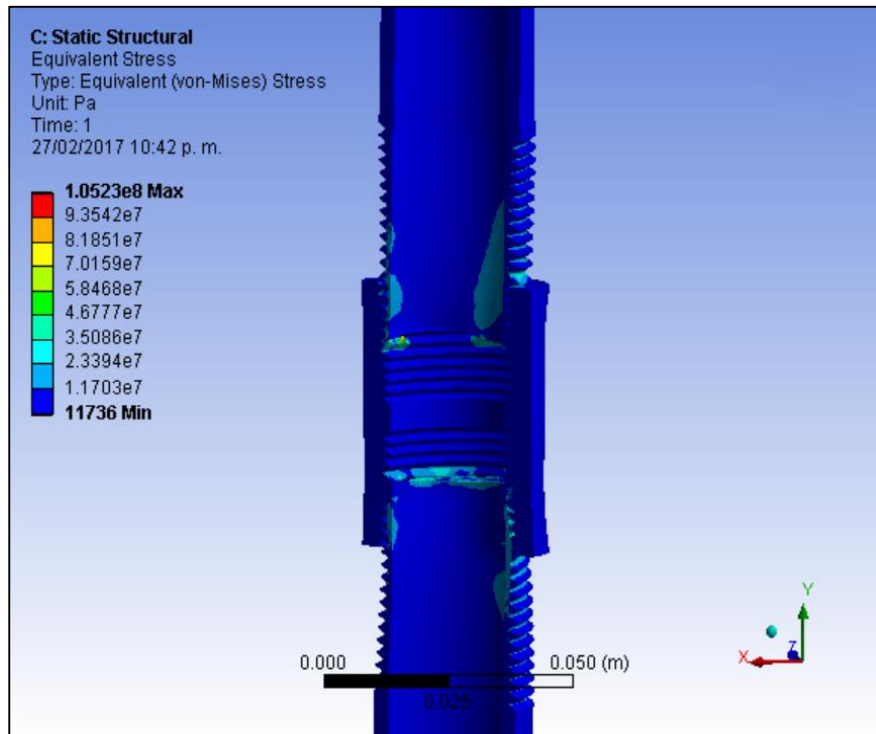


Figura 9. Esfuerzo de Von Mises en la unión de tuberías mediante cople.

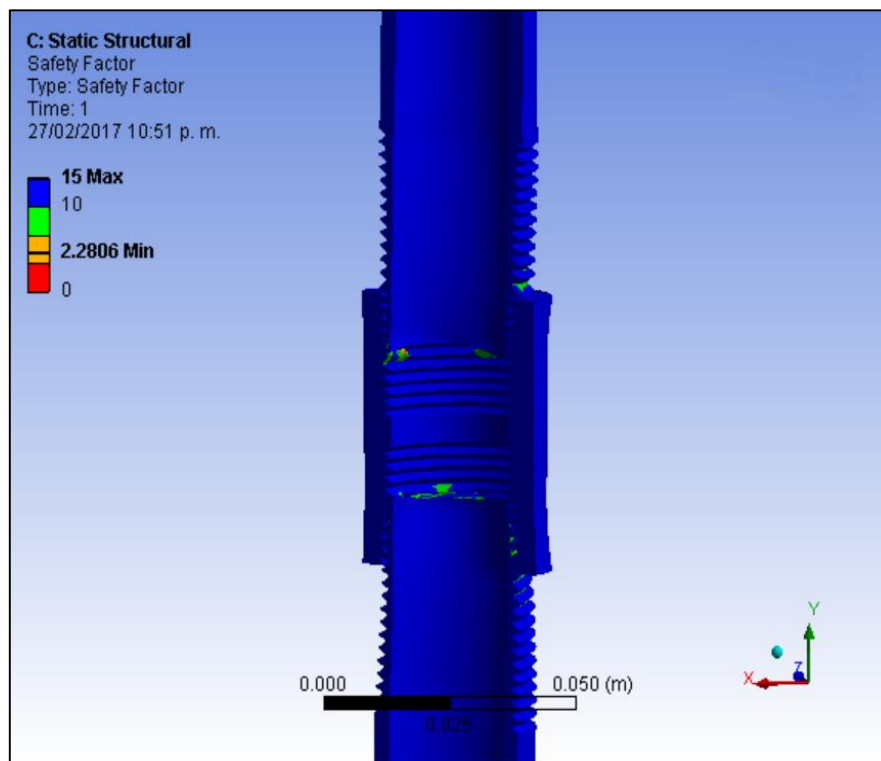


Figura 10. Factor de seguridad en la unión de tuberías mediante cople.



*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.*



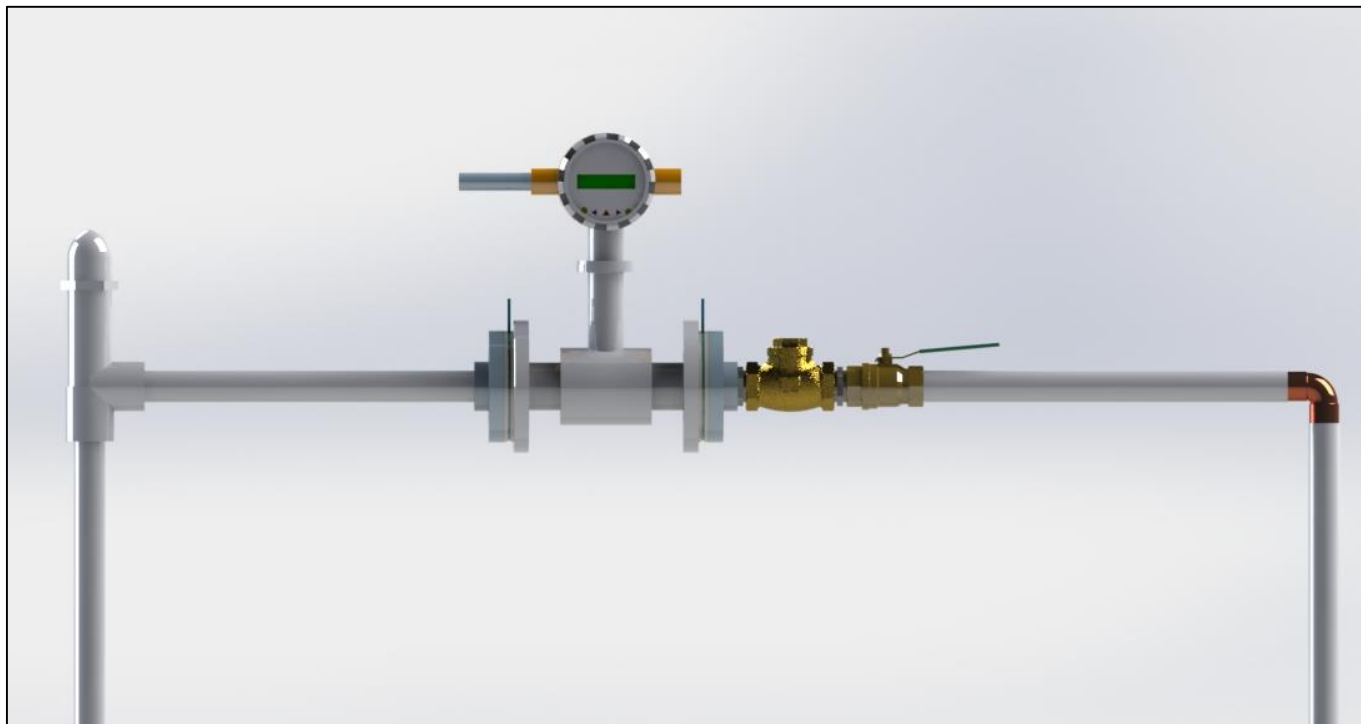
Figura 14. Patrón de orificios 3/16" de diámetro, cabezal de 20 cm.



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.

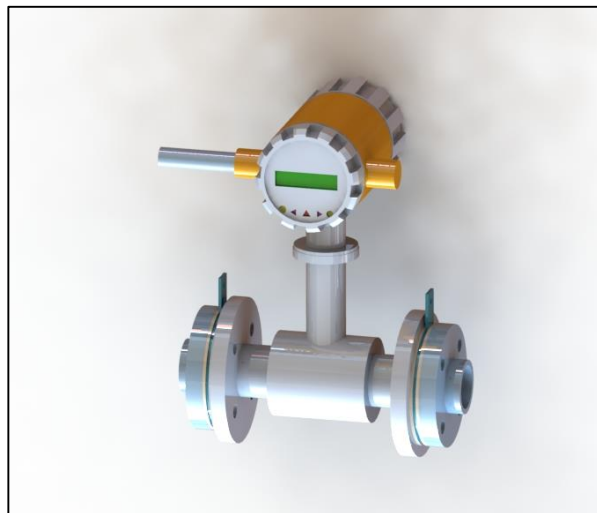


*Figura 17. Tren de válvulas e indicador de flujo del sistema Air-Lift.*



*Figura 18. Válvula de alivio.*

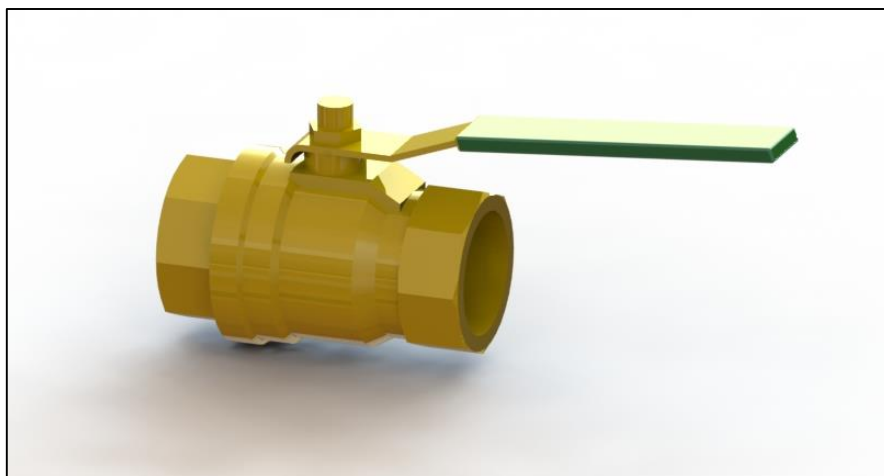




*Figura 19. Flujometro.*



*Figura 20. Válvula check.*



*Figura 21. Válvula de cierre manual.*