



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

EVALUACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE UN PROTOTIPO DE AIRLIFT
CON DIFERENTES TAMAÑOS DE GRÁNULOS DE ARENA

AUTOR

Nicolás González Mena

AÑO

2019



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

**EVALUACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE UN PROTOTIPO DE AIRLIFT
CON DIFERENTES TAMAÑOS DE GRÁNULOS DE ARENA**

Trabajo de Titulación presentado en conformidad con los requisitos
establecidos para optar por el título de Ingeniero Ambiental en Prevención y
Remediación.

Profesor guía
MSc. Santiago Daniel Piedra Burgos

Autor
Nicolás González Mena
Año
2019

DECLARACIÓN PROFESOR GUÍA

"Declaro haber dirigido el trabajo, Evaluación del funcionamiento de un prototipo de Airlift con diferentes tamaños de gránulos de arena, a través de reuniones periódicas con el estudiante Nicolás González Mena, en el semestre 2019-1, orientando sus conocimientos y competencias para un eficiente desarrollo del tema escogido y dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación".

Santiago Daniel Piedra Burgos
Master of Science in Hydro Science and Engineering
C.I. 1715384150

DECLARACIÓN PROFESOR CORRECTOR

"Declaro haber revisado este trabajo, Evaluación del funcionamiento de un prototipo de Airlift con diferentes tamaños de gránulos de arena, del estudiante Nicolás González Mena, en el semestre 2019-1, dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación".

Daniel Hernán Hidalgo Villalba

Magister en Ciencias de la Ingeniería Especialización Ingeniería Ambiental

C.I. 180191444-9

DECLARACIÓN DE AUTORÍA DEL ESTUDIANTE

“Declaro que este trabajo es original, de mi autoría, que se han citado las fuentes correspondientes y que en su ejecución se respetaron las disposiciones legales que protegen los derechos de autor vigentes.”

Nicolás González Mena

C.I. 1716396088

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Ing. Santiago Piedra y al personal del laboratorio de aguas por su apoyo y ayuda en la experimentación. Sin el apoyo de ellos, este trabajo de investigación no hubiera sido posible

DEDICATORIA

A mis papas y a mi hermana, por su eterno esfuerzo para que esto sea una realidad.

RESUMEN

Se realizó el diseño y construcción de un prototipo físico de Airlift, con una tubería de diámetro de 75 mm y 2 m de largo, junto con un tanque de almacenamiento y recirculación. Para la evaluación del prototipo se probaron siete alturas sumergidas diferentes (60, 70, 80, 90, 100, 110 y 120 cm) de agua, con cinco caudales de aire (130, 160, 210, 250 y 300) LN/min, donde se determinó la producción del caudal de agua que genera el Airlift después de levantar el líquido 2 m. Además, se determinó los límites de succión del sistema verificando su capacidad para levantar 4 granulometrías distintas de arena, con cada una de las alturas sumergidas y caudales de aire diferentes.

Se determinaron parámetros de manera teórica, como: velocidad del agua, velocidad de burbujas, velocidad de la mezcla, densidad de la mezcla, pérdidas por fricción y eficiencia del sistema con cada uno de los casos estudiados. De manera general, se pudo concluir como a mayor altura sumergida de agua y mayor caudal de aire, se presentaron los valores más altos en caudal de agua producido, velocidad de la mezcla, eficiencia del sistema y una mayor capacidad en la succión de diferentes granulometrías de arena. La altura sumergida de 120 cm, con un caudal de aire de 300 LN/min, presentó los límites más amplios en la succión de arena, con una granulometría máxima de succión de 0.5 a 0.6 mm. Además, produjo la mayor cantidad de caudal de agua después de levantar el líquido 2 m con un valor de 1.7 L/s.

ABSTRACT

The design and construction of a prototype of Airlif was carried out with a diameter of 75 mm and 2 m length. For the evaluation of the prototype, seven different submerged heights (60, 70, 80, 90, 100, 110 and 120 cm) of water were tested, with five air flows (130, 160, 210, 250 and 300) LN/min. Where was determined the production of water flow generated by the Airlift after lifting the liquid 2 m. In addition, the suction limits of the system were determined by verifying its capacity to lift 4 different granulometries of sand, with each of the submerged heights and different airflows.

Parameters were determined theoretically, such as: water speed, bubble speed, mix speed, mix density, friction losses and system efficiency with each of the cases studied. In general, it was possible to conclude that the higher the submerged water height and the higher air flow, the higher values were presented in the flow of water produced, the speed of the mixture, the efficiency of the system and a greater capacity in the suction of different granulometries of sand. The submerged height of 120 cm, with an air flow rate of 300 LN / min, presented the widest limits in the suction of sand, with a maximum granulometry of suction of 0.5 to 0.6 mm. In addition, it produced the greatest amount of water flow after lifting the liquid 2 m with a value of 1.7 L / s.

ÍNDICE

1. Introducción.....	1
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Alcance.....	4
1.3 Justificación.....	4
1.4 Objetivos.....	5
2. Marco Teórico.....	5
2.1. Problemática del agua y efectos sobre la población.....	5
2.1.1. Global.....	5
2.1.2. Ecuador.....	8
2.1.3. Procesos de saneamiento de agua en el Ecuador.....	8
2.2. PTAR y sus problemas.....	10
2.2.1. Tipos de tratamiento de aguas.....	10
2.2.2. Problemas Comunes en una PTAR.....	10
2.3. El sistema Airlift.....	11
2.3.1. Principios.....	11
2.3.2. Usos.....	12
2.3.3. Ventajas.....	12
2.3.4. Desventajas.....	12
3. Metodología.....	13
3.1 Diseño.....	13
3.1.1 Dimensionamiento.....	13
3.1.1.1 Tanque de recolección:.....	13
3.1.1.2 Tanque de almacenamiento:.....	14
3.1.1.3 Sistema de succión:.....	14
3.1.2 Modelo de AutoCAD.....	16

3.2 Construcción.....	18
3.3 Evaluación.....	19
3.3.1 Pruebas Hidráulicas.....	19
3.3.1.1 Cálculo Qf.....	20
3.3.2 Pruebas de Arena.....	27
4. Resultados.....	28
4.1 Pruebas Hidráulicas.....	28
4.2 Pruebas de Arena.....	38
5. Conclusiones y Recomendaciones.....	42
5.1 Conclusiones.....	44
5.2 Recomendaciones.....	45
REFERENCIAS.....	44
ANEXOS.....	49

1. Introducción

1.1 Antecedentes

América Latina, a pesar de haber incrementado su porcentaje de población con acceso directo al agua en el año 2000, sigue dejando a 77 millones de personas sin conexión directa de agua en sus hogares, de los cuales 51 millones viven en zonas rurales y 26 en zonas urbanas (World Water Council, 2006). Del mismo modo, se ha observado en la región un crecimiento del porcentaje de la población que se encuentra conectada a servicios sanitarios adecuados, sin embargo, 256 millones de individuos todavía dependen solamente de letrinas y tanques sépticos; y 100 millones no tienen acceso a ningún tipo de seguridad sanitaria (World Water Council, 2006).

En el Ecuador, el consumo de agua es liderado por el sector agrícola ocupando el 80% del caudal nacional, seguido por el sector doméstico (13%), del cual el 74% de la población tiene acceso a agua potable y 42% a servicios sanitarios adecuados, y el sector industrial (7%) (WHO/UNICEF, 2017). A pesar de ello, hay un sector de la población que es mayormente vulnerable, ya que el 11% de ciudadanos que habitan en zonas rurales y el 4% a nivel nacional, aún toman de aguas superficiales que podrían estar contaminadas. Además, el 8% de las personas en zonas rurales y 3% a nivel nacional, defecan al aire libre, es decir, aún no tienen acceso a ningún tipo de facilidad sanitaria (WHO/UNICEF, 2017).

Estudios realizados en el 2010 por la Secretaría Nacional del Agua (SENAGUA), indican que, en el país, el tratamiento del agua contaminada representa únicamente el 7%, mientras que el resto del total de agua que se descarga va directamente a las alcantarillas o ríos (CEPAL, 2011).

En todo el territorio ecuatoriano, se pueden encontrar 421 plantas de tratamiento de aguas residuales a nivel de Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales (GADs), según el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC, 2016), concentrando el mayor porcentaje de estas plantas (49.88 %) en la región Sierra, seguido por la región Costa (30.64%) y la región Amazónica (19%), y ubicándose en último lugar la región Insular (0.48%) (INEC, 2016). La mayor cantidad de GAD's envían sus aguas tratadas directamente a ríos (56.39%), en cambio, el 26.32% envía las aguas tratadas a quebradas y el porcentaje restante disponen en otros lugares que no se conocen (INEC, 2016).

De manera general, existen ciertos problemas operacionales que pueden presentarse en las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR), por ejemplo: picos bajos y altos en los flujos de agua que pueden afectar en la eficiencia de la planta (Qasim, 1999), y malos olores que pueden surgir en los tanques de tratamiento por un prolongado almacenamiento de agua o un estancamiento en los colectores. Además, existen una serie de problemas que su causa principal es el mal funcionamiento de las bombas que transportan el agua (Qasim, 1999), como: mal mantenimiento de la parte eléctrica de las bombas causando un funcionamiento deficiente, sonidos extraños en las bombas por mala lubricación y paros repentinos en el funcionamiento de las bombas por ingreso de agua con exceso de grasa o arena. A pesar de ello, un sistema Airlift podría ser la solución a los problemas mencionados en cuanto al transporte de agua residual dentro de una PTAR.

La tecnología llamada Airlift Pump, consiste en la inyección de aire comprimido al fondo de la tubería de descarga que se encuentra sumergida en el líquido. Esta acción produce que el aire se mezcle con el líquido causando una mezcla de dos componentes, la cual es menos densa que el resto del líquido que se encuentra alrededor (Wurts, McNeill, y Overhults, 1994). Esto produce una succión hacia arriba por la tubería de descarga alrededor del líquido de mayor densidad, fenómeno que ocurre por la diferencial de densidad.

Un estudio realizado en Tehran, Iran, por S. Jafarinejad (2017), evaluó el costo total por año que tiene una planta de tratamiento biológico de aguas municipales para 42,000 personas, en el cual se evaluaron cuatro casos distintos, cada uno con diferente configuración. Los resultados mostraron que la configuración de tratamientos más costosa tiene un valor mayor a \$20 millones y la configuración más barata tiene un costo de \$14 millones por año, valor que incluye los costos totales de construcción, operación, mantenimiento, materiales, productos químicos, energía y amortización por año (Jafarinejad, 2017). En ninguno de los casos estudiados se propone la utilización de un sistema AirLift para el transporte del agua o lodos dentro de los distintos tratamientos, el cual podría representar un ahorro de recursos en ámbitos como el consumo de energía y mantenimiento, que representan alrededor de \$ 400000 al año en una PTAR (Jafarinejad, 2017).

El sistema AirLift, es una solución a los altos costos de inversión que significa la operación y consumo de energía de una planta de tratamiento de aguas. Esto se debe a que es un sistema con un valor económico de instalación menor al que tienen las bombas industriales normalmente utilizadas. Otra de las ventajas que significa implementar este sistema de succión, es el nulo requerimiento de partes mecánicas dentro del sistema, lo cual significa un desgaste mínimo de la bomba, reduciendo así la necesidad de mantenimiento. Por otro lado, un estudio realizado por d'Orbcastel (2009) demuestra cómo se reduce la cantidad de energía consumida en un sistema de producción de Truchas utilizando Airlift's. En este estudio se comparan dos escenarios, el primero llamado FTF (Flow through system) y el segundo RSF (Low Head Recirculating System). En el estudio se detalla como la cantidad de energía que utiliza el escenario RSF es del 24 al 40% mayor en comparación al escenario FTF. Sin embargo, se propone la utilización de 12 bombas Airlift para la circulación y aireación del agua, que tiene como resultado la reducción de energía del escenario RSF al mismo nivel de consumo que del escenario FTF, valor que representa un ahorro de energía hasta del 40% (d'Orbcastel, Blancheton y Aubin, 2009).

En el Ecuador, los problemas que presentan las PTAR no son diferentes a los que se explicaron anteriormente. Por ejemplo, la PTAR de la Universidad de las Américas (UDLA) ubicada en su campus UdlaPark, en la ciudad de Quito, lleva funcionando alrededor de 3 años y se ha tenido que interrumpir el funcionamiento de sus bombas industriales por mantenimientos o daños de motores. El principal problema que presentan estas bombas, es el ingreso de arena dentro de las partes mecánicas que hacen funcionar el equipo y ocasionan el paro repentino de la bomba o una disminución en su eficiencia. Así lo explica la Jefa de Gestión Ambiental de la UDLA, Karen Pérez.

1.2 Alcance

Este estudio pretende diseñar y construir un prototipo de Airlift en los laboratorios de la Universidad de las Américas, con el fin de evaluar su funcionamiento con cuatro diámetros distintos de arena. El funcionamiento será evaluado con cada diámetro de arena seleccionada, mediante la inspección visual de la succión a distintas alturas sumergidas y con distinto caudal de aire.

1.3 Justificación

El sistema Airlift de succión, se destaca por no poseer partes mecánicas movibles para transportar sustancias de un lado a otro, motivo por el cual, el sistema puede levantar sólidos disueltos en medios corrosivos y radioactivos, sin deteriorar el mecanismo de succión. Además, la simplicidad y fácil manufactura de un Airlift, es otra de las razones que lo vuelven útil para un amplio rango de usos, así como la reducción en los costos de mantenimiento y uso de energía que representa, en comparación a bombas industriales de succión, factores que hacen de esta herramienta una opción más favorable (Hanafizadeh, Raffiee y Saidi, 2013).

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Evaluar el funcionamiento de un prototipo de Airlift con diferentes tamaños de gránulos de arena

1.4.2 Objetivo Específico

- Diseñar el prototipo físico de Airlift
- Construir el prototipo diseñado
- Evaluar el sistema construido

2. Marco Teórico

2.1. Problemática del agua y efectos sobre la población

2.1.1. Global

La Organización Mundial de la Salud (OMS), estableció en 1993 en Génova, los estándares de calidad del agua para consumo humano en base a diferentes parámetros. A continuación, se muestra un resumen de los límites máximos permisibles de ciertas sustancias presentes en el agua.

Tabla 1.

Resumen sobre los estándares de calidad del agua establecidos por la OMS

Elemento/Sustancia	Directriz de la OMS en base a la salud
--------------------	--

Aluminio	0,2 mg/L
Cloro	250 mg/L
Hierro	0,5-50 mg/L
Benceno	10 µg/l
Tolueno	700 µg/l
DDT	0,2 µg/l
Molinato	6 µg/l

Adaptado de (OMS, 1993)

A lo largo de los años, la calidad del agua ha ido decayendo a nivel mundial a causa de fuentes naturales y antrópicas. En el caso de las fuentes naturales, son un tipo de contaminación muy dispersa que de manera general no provoca altos índices de contaminación, por ejemplo, el mercurio o el arsénico que existe en la corteza terrestre (UNESCO-WWAP, 2003). Sin embargo, existen eventos puntuales que pueden contaminar severamente aguas naturales, como una explosión volcánica.

Por otra parte, las fuentes de contaminación antrópicas si tienen un impacto severo en la calidad de las aguas naturales. De manera general, existen cuatro focos puntuales, que son: la industria (minería, química, construcción, energética, etc.), vertidos urbanos (actividades domésticas y comerciales), transporte (contaminación por quema de combustibles fósiles), y agricultura y ganadería (producción de vertidos de pesticidas, fertilizantes, y materia orgánica animal y vegetal).

La calidad del agua, independientemente de sus usos, como: recreacional, potable, producción de comida o para trabajos domésticos, tiene un impacto significativo en la salud de los seres humanos (World Health Organization (WHO), 2013). Lo vital que es este recurso para el día a día de las personas también ha traído consigo otro problema, el uso irresponsable de un recurso limitado. Estudios han demostrado que en el año 2025, más de la mitad de la población va a vivir en zonas con estrés hídrico (WHO, 2013).

La mayoría de actividades humanas, ya sean de tipo doméstico, industrial, recreativo o comercial, necesitan de agua para funcionar, por ende, producen agua contaminada. La cantidad producida de agua contaminada y la carga de contaminación que tiene, han sido dos factores que han tenido un crecimiento exponencial día a día (United Nations World Water Assessment Programme (WWAP), 2017). Se han detectado contaminantes como: metales pesados, hidrocarburos, microorganismos patógenos, fertilizantes, pesticidas, plásticos y químicos. Sobre todo en países altamente industrializados, la mayoría de sus aguas de desechos son vertidas directamente al ambiente sin un tratamiento adecuado. Esto causa impactos negativos en la calidad de los ecosistemas, productividad económica y salud pública.

Por otro lado, el agua contaminada generada funciona como mecanismo de transmisión de enfermedades, como: cólera, diarrea, fiebre tifoidea, disentería, poliomielitis y la infección del gusano de Guinea, causantes de la muerte de alrededor de 2.5 millones de personas en el año 2008 a nivel mundial (WHO, 2013). Además, en el año 2012, se estima que alrededor de 842,000 personas fallecieron en países de medianos y bajos ingresos económicos, a causa de: ingerir agua contaminada, contar con facilidades inadecuadas para lavarse las manos y tener servicios sanitarios deficientes (UNESCO, 2003).

En valores promedios, los países de primer mundo con altos ingresos económicos, tratan el 70% de sus aguas residuales municipales e industriales (WWAP, 2017). En comparación, con el 38% de tratamiento en los países con ingresos medios-altos y el 28% en los países con ingresos medios-bajos, dan algún tipo de tratamientos a sus aguas residuales. En los casos de los países de ingresos bajos, únicamente el 8% de sus aguas residuales generadas recibe tratamiento. Es decir, a nivel mundial solo el 20% de las aguas residuales generadas recibe el tratamiento adecuado, el otro 80% se vierte directamente al medio ambiente sin tratamiento (WWAP, 2017).

2.1.2. Ecuador

En el Ecuador, la Secretaría Nacional del Agua (SENAGUA) es la única entidad del estado encargada de la administración del recurso hídrico. Sin embargo, El Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), funciona como un apoyo para esta secretaría. Ya que es el instituto encargado de proveer de información básica que ayude a determinar la disponibilidad de agua superficial o subterránea. Dentro de las cuatro regiones que tiene el país, se pueden encontrar 10 demarcaciones hidrográficas, siendo la más grande la demarcación hidrográfica Guayas con una extensión de 43,181. 86 km² (CEPAL, 2011). En total el Ecuador cuenta con 740 unidades hidrográficas con una extensión total de 256,370.00 km².

El sector agrícola, representa un consumo de agua del 80%, seguido por el uso doméstico, 13%, y por último el sector industrial, 7% (CEPAL, 2011). Teniendo esto en cuenta, el país cuenta solamente con 421 plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR), esto quiere decir que el 38.14% de los Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales, no realiza ningún tipo de tratamiento a las aguas generadas en procesos domésticos, agrícolas o industriales (INEC, 2016). Este porcentaje mencionado anteriormente, representa el agua contaminada que se vierte directamente a fuentes naturales, como ríos, quebradas o el mar (INEC, 2016), lo cual afecta al desarrollo sostenible del país y produce desequilibrios en los ecosistemas. Además, otros factores también influyen en la calidad del agua del Ecuador, como: falta de cumplimientos en la norma, crecimiento de la población, crecimiento en la demanda de agua, falta de sanciones rigurosas, vertimiento directo de aguas residuales y agroquímicos y nutrientes encontrados en fuentes de agua (CEPAL, 2011).

2.1.3. Procesos de saneamiento de agua en el Ecuador

Existen varios procesos de saneamiento de agua en el Ecuador, incluso el país es uno de las 12 naciones a nivel mundial en medir indicadores de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) con respecto a agua limpia y saneamiento (INEC, 2017). En este estudio, donde se dividió la zona rural y zona urbana del país, se pudo constatar que en la zona urbana únicamente el 51.4% de la población toma de fuentes seguras de agua, es decir, sin la presencia de la bacteria E. Coli. Por otro lado, el 21.8% de la población ecuatoriana solo tiene acceso al agua como servicio básico y el 70.1% de los ecuatorianos tiene acceso a agua segura (INEC, 2017).

En el Ecuador, existe una estrategia nacional de agua potable y saneamiento, basada en dos pilares: la universalización del acceso a servicios de agua y saneamiento dignos; y el aseguramiento de la calidad y sostenibilidad de los servicios (SENAGUA, 2016). Cada pilar se encuentra dividido en tres ejes de actuación. El primer pilar se divide en tres acciones: financiación para la universalización del acceso, mejorar la capacidad de ejecución sectorial y el uso eficiente de los recursos de inversión. En cambio, el segundo pilar se divide en las siguientes actuaciones: mejorar la calidad de los servicios, mejora de la eficiencia y la sostenibilidad financiera de los prestadores y el fortalecimiento y armonización de la función rectora y de acompañamiento (SENAGUA, 2016).

Teniendo en cuenta estos pilares, en mayo del 2017, el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC), el Banco Mundial, Unicef y la Secretaría del agua, presentaron cifras sobre el saneamiento básico e instalaciones adecuadas para la higiene de los ecuatorianos. Donde se indicó que el 85.5% de la población (más de 14 millones de habitantes) tienen instalaciones de higiene adecuadas, es decir: lavamanos con agua y jabón dentro de sus viviendas (INEC, 2017). Con respecto al saneamiento del país, se demostró que el 85.9% de la población tiene un saneamiento básico, es decir que cuenta con: alcantarillado, excusado, pozo séptico o ciego y letrina con losa (INEC 2017).

2.2. PTAR y sus problemas

2.2.1. Tipos de tratamiento de aguas

Una PTAR puede abarcar distintas configuraciones de procesos, la misma que está en función de las características del agua que se desee tratar. En general, existen tratamientos convencionales que se clasifican en: preliminares, primarios, secundarios, y terciarios o avanzados (Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 1992), donde cada uno de ellos tiene su objetivo específico.

En el caso del tratamiento preliminar, su objetivo es eliminar los sólidos gruesos y otros materiales grandes que se pueden encontrar en aguas sin procesar. En cambio, el tratamiento primario elimina sólidos inorgánicos y orgánicos sedimentables y material que pueda flotar, como espumas. En el caso del tratamiento secundario, es el encargado de eliminar compuestos orgánicos residuales o coloidales y sólidos suspendidos. Y, por último, el tratamiento terciario o avanzado, se emplea únicamente cuando se desea retirar algún contaminante en particular que no haya podido ser eliminado con el tratamiento secundario, por ejemplo: remoción de nitrógeno o fósforo, sólidos disueltos o metales pesados (FAO, 1992).

2.2.2. Problemas Comunes en una PTAR

Las plantas de tratamiento de aguas residuales, se han encontrado en constante evolución frente a los nuevos problemas ambientales que han aparecido en las últimas décadas. Por ejemplo, una PTAR puede presentar los siguientes problemas: infraestructura envejecida, desarrollo de nuevos métodos analíticos y procesos, control de olores y emisiones de compuestos orgánicos volátiles (COV's), modernización y mejora de los tratamientos, desbordamientos y

fuentes no puntuales de contaminación (Tchobanoglous, Burton, y Stensel, 1991).

Para este estudio, el problema más relevante de una planta de tratamiento se refiere a la modernización y mejora de los tratamientos. El agua residual no mantiene sus valores de contaminación constantes, además de los nuevos focos de contaminación, lo cual aumenta la inversión en la construcción y operación de una PTAR (Qasim, 1999).

Debido a esta problemática, es necesario implementar diseños operacionales y constructivos que mantengan los niveles de gasto de energía, mantenimiento y operativos, lo más bajos posibles, ya que, por lo general, la inversión proviene de fondos públicos (Tchobanoglous, et al., 1991). Siendo una solución al problema, la selección adecuada de equipos que se necesitan para la operación de la PTAR, teniendo en cuenta los montos de inversión de instalación, mantenimiento y eficiencia energética del mismo (Tchobanoglous, et al., 1991).

2.3. El sistema Airlift

2.3.1. Principios

Un sistema Airlift de bombeo, funciona con una entrada de inyección de aire (gas) en la parte inferior o casi en la base, de una tubería vertical (columna de succión). La cual se encuentra parcialmente sumergida en líquido o lodo (Mahrous, 2016). Las burbujas que se forman por la inyección de aire, se expanden, y forman una mezcla de dos o tres fases (líquido-gas; líquido-sólido-gas). La mezcla de estas fases en la columna de succión, va a tener una densidad promedio menor al líquido solo, en el cual se encuentra sumergida la tubería vertical (Lawniczak, Francois, Scrivener, Kastrinakis y Nychas 1999). Esta gradiente de densidad entre el líquido y la mezcla de dos o tres fases,

provoca una succión vertical (movida por el continuo movimiento vertical de las burbujas) hasta que sea expulsada por la salida de la tubería.

2.3.2. Usos

Un sistema Airlift de bombeo es utilizado como una herramienta para levantar líquidos o una mezcla de líquidos y sólidos a través de una tubería vertical que se encuentra parcialmente sumergida en un líquido. En la industria es utilizado en un amplio rango de situaciones. Una de ellas, es el transporte de sustancias químicas o tóxicas en las industrias químicas y lodos en las mineras o en plantas de tratamiento de aguas (Yoshinaga, 1996). Además, este sistema es utilizado para transportar líquidos corrosivos o incluso radiactivos, así como el bombeo de petróleo crudo (Awari, Ardhapurkar, Wakde y Bhuyar, 2004). Por otro lado, el sistema también puede ser utilizado para usos más comunes, por ejemplo, en la acuicultura para el bombeo, circulación, aireación de agua en estanques o lagunas (Wurts et al., 1994).

2.3.3. Ventajas

En comparación con otros sistemas de bombeo, una de las mayores ventajas del sistema Airlift es su simplicidad mecánica (Kassab, Kandil, Warda y Ahmed, 2007). Al no poseer partes mecánicas móviles, el sistema se abre a un amplio rango de usos, se reduce la necesidad de utilizar lubricantes y también los problemas de desgaste. Asimismo, el costo de operación y mantenimiento de esta clase de bombas es menor y su rentabilidad mayor al ser un sistema de fácil instalación, con poca inversión. Además, pueden ser utilizadas en superficies irregulares, donde bombas convencionales tendrían problemas en su funcionamiento o no entrarían (Kassab et al., 2007).

2.3.4. Desventajas

Una bomba Airlift puede presentar dos desventajas principales. La primera, es su baja capacidad de bombeo en grandes alturas, siendo comparada con un sistema de bombeo convencional (Taleb y Al-Jarrah, 2017). La segunda desventaja, es su baja eficiencia en especial en tuberías con baja altura sumergida. Tomando en cuenta la cantidad de aire que ingresa al sistema y la cantidad de agua que sale del sistema. Es decir, la cantidad de aire que se necesitar para que funcione el sistema, es mucho mayor al agua que se va a transportar (Ahmed y Badr, 2012).

3. Metodología

3.1 Diseño

Dentro del diseño del sistema de Airlift, se consideró los siguientes componentes: tanque de recolección, tanque de recirculación y sistema de succión.

Según bibliografía estudiada (Lawniczak, et al., 1999) (Kasab, et al., 2007) (Hanafizadeh, et al., 2013) (Clark, N y Dabolt, J, 1986) se determinó que las siguientes variables son las que mayor efecto tienen en la eficiencia del funcionamiento de un Airlift: radio sumergido, altura total de la tubería de succión y diámetro de tubería, las cuales fueron consideradas en el diseño del tanque de recolección y el sistema de succión.

3.1.1 Dimensionamiento

3.1.1.1 Tanque de recolección:

Para poder observar el funcionamiento del Airlift, se escogió como material de construcción, acrílico transparente de 9 mm de grosor, con el fin de que soporte la presión de la columna de agua. Las dimensiones establecidas fueron de 40x40

cm, y una altura de 150 cm. Además, se añadió un ángulo de 69° en la parte posterior que funcione como sedimentador de arena.

Debido al peso de la columna de agua, por la altura de 150 cm, se añadió un soporte metálico, en forma de ángulo con un ancho de 3 cm y con el mismo largo de la base y alto del tanque. La estructura metálica se instaló en la base y en las uniones del tanque de recolección. También, se levantó el tanque 10 cm, con la misma estructura metálica y se instaló una purga de 12.7 mm de diámetro, para descargar el agua del tanque con una manguera directa al sifón (Anexo 4).

3.1.1.2 Tanque de almacenamiento:

El tanque de recirculación, es donde se envía toda el agua que es succionada por el sistema Airlift. El material del tanque es de PVC, de forma circular, y tiene un volumen de 180 L. Al tanque se encuentra conectada una bomba de agua, con una potencia de 0.5 hp, con un caudal máximo (Q_{max}) de 35 L/min, que tiene como objetivo recircular el agua al tanque de recolección. A la salida de la bomba se encuentra conectado un flujometro para medir el caudal de agua que produce la bomba.

3.1.1.3 Sistema de succión:

El sistema de succión, se refiere netamente a la bomba Airlift. El sistema está formado por un tubo circular de PVC, con dimensiones de 2 m de largo (L1) y 75 mm de diámetro (d). También, está compuesta de un racor de plástico, como entrada de aire, con un diámetro de 1.27 cm (Anexo 3), a 5.5 cm (L2) de la base del tubo de succión. El aire comprimido viene de un compresor de aire, y la línea de transporte se encuentra conectada a un flujometro para medir el caudal de aire producido. La altura sumergida (L3), varía en cada prueba realizada. Además, cuenta con 6 ventanas de acrílico de 3 mm, intercaladas a lo largo del tubo para poder observar el movimiento del agua, aire y arena.

Al final del tubo de succión, se instaló: un codo de PVC de 90° de ingreso, una T de PVC conectada al codo con la salida superior hacia arriba, con el fin de sacar el aire ingresado, un codo de PVC de 90° de descarga y un tubo de PVC de 1 m, que conecte hasta el tanque de recirculación, como se detalla en la figura 1.

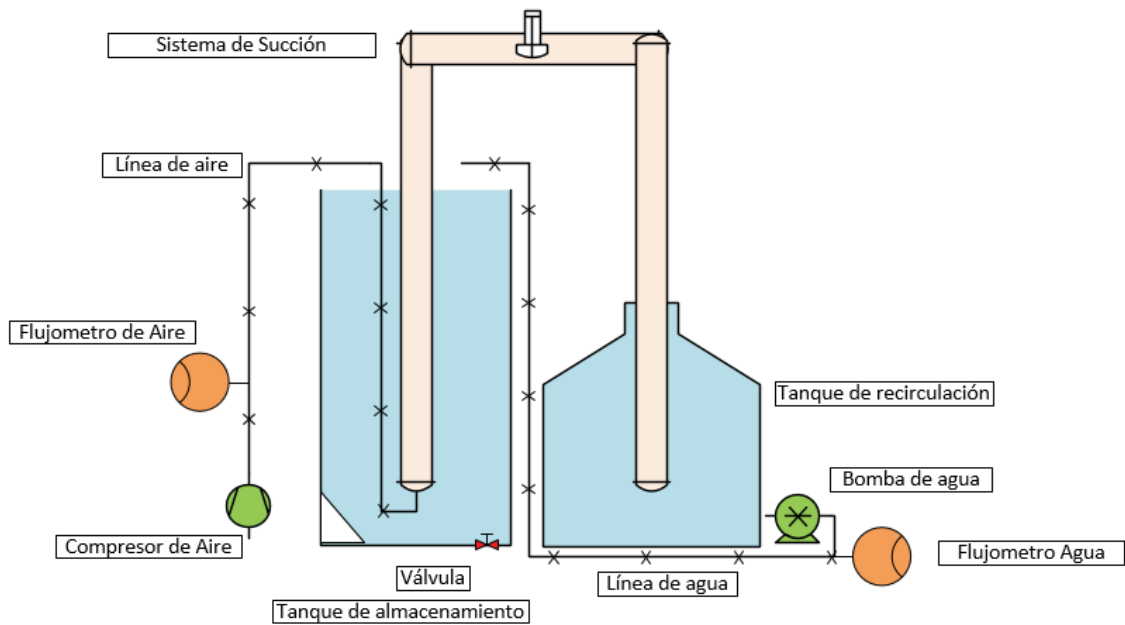


Figura 1. Configuración del sistema Airlift.

3.1.2 Modelo de AutoCAD

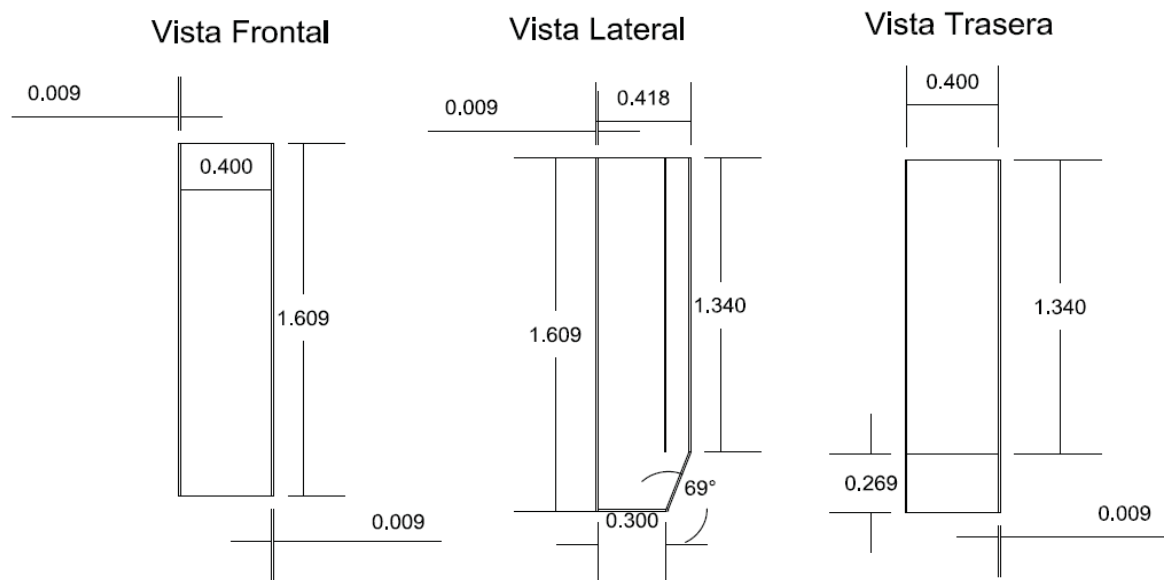


Figura 2. Corte frontal, lateral y posterior del tanque de recolección.

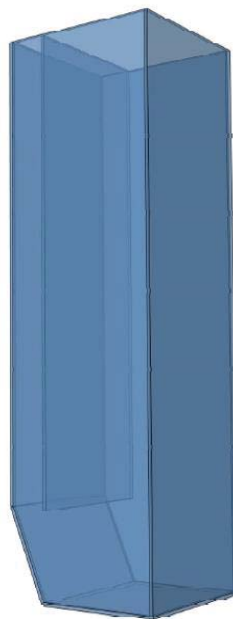


Figura 3. Modelo en 3D del tanque de recolección.

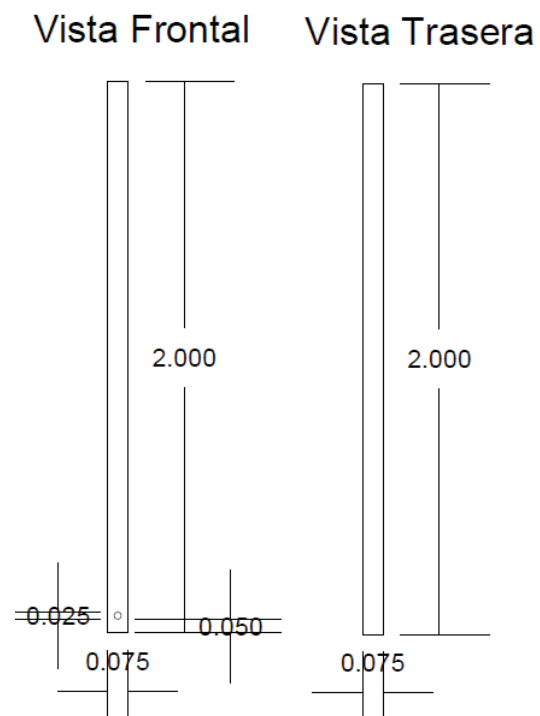


Figura 4. Corte frontal y posterior del tubo de succión.



Figura 5. Modelo 3D del tubo de succión del sistema Airlift.

3.2 Construcción

Para la construcción del tanque de recolección, se utilizó tornillos como junta estructural y para evitar fugas de agua, se utilizó Cloruro de Metileno, cemento plástico y silicón frío.

La estructura se la realizó con ángulos de 3 cm de metal soldado, con las mismas dimensiones del tanque. Además, se añadió abrazaderas del mismo material, instaladas a lo ancho del tanque a distintas alturas. El objetivo de las abrazaderas fue evitar el pandeo del acrílico por la presión del agua. El tanque construido se puede observar en la figura 6 y, en el Anexo 1 y Anexo 2, se puede observar el proceso de construcción.



Figura 6. Tanque de recolección, con estructura metálica y Airlift contruidos.

3.3 Evaluación

3.3.1 Pruebas Hidráulicas

Las pruebas hidráulicas, se realizaron como línea base para las pruebas de arena, es decir, levantar información preliminar del comportamiento del sistema. Estas pruebas consistieron en las siguientes secciones: cálculo de fugas hidráulicas (Q_f) del tanque y cálculo del caudal de agua (Q_w). El cálculo de Q_w del Airlift, se realizó a cinco alturas sumergidas en cm (80, 90, 100, 110 y 120), variando el caudal de aire de ingreso (Q_a) con cinco flujos distintos en LN/min (130, 160, 210, 250 y 300).

Tabla 2.

Diseño experimental propuesto

Diseño Experimental		
Altura (cm)	Q_a (LN/min)	Q_w (L/min)
80	130	-
	160	-
	210	-
	250	-
	300	-
90	130	-
	160	-
	210	-
	250	-
	300	-
100	130	-
	160	-
	210	-
	250	-
	300	-
110	130	-
	160	-
	210	-

	250	-
	300	-
	130	-
	160	-
120	210	-
	250	-
	300	-

Además, se calculó la velocidad de succión del agua (v_w), el radio sumergido (Y), la velocidad (v_g) y caudal de la mezcla (Q_g) (aire-agua), la pérdida de presión por fricción (D), la fracción de aire en la mezcla (ϵ), la densidad de la mezcla (ρ_g), la concentración de aire en el agua (C), y la tasa de levantamiento máximo, únicamente para las alturas que producen un caudal de agua igual a cero.

3.3.1.1 Cálculo Q_f

Para el cálculo de fugas hidráulicas del tanque, se llenó el tanque de agua a una altura inicial, y se empezó a tomar el tiempo con un cronómetro hasta que llegue a una altura final. Con los datos obtenidos se procedió a calcular el volumen del tanque, desde la altura inicial hasta la altura final y se dividió para el tiempo transcurrido, para obtener un caudal de fugas (ecuación 1).

$$Q_f = \frac{\Delta H \times W \times L}{t}$$

(Ecuación 1)

Donde:

Q_f = Caudal de fugas de agua del tanque (m^3/s)

ΔH = Variación de altura (Altura inicial - Altura final) (m)

W = Ancho del tanque (m)

L = Largo del tanque (m)

t = Tiempo transcurrido entre la variación de altura de agua (s)

3.3.1.2 Cálculo de Q_w

El cálculo de Q_w del Airlift se lo realizó a distintas alturas sumergidas y con distintos caudales de aire. Para esto se llenó el tanque a las siguientes alturas (cm): 60, 70, 80, 90, 100, 110 y 120. Y cada altura se probó con los siguientes caudales de aire (LN/min): 130, 160, 210, 250 y 300. Se terminó, tomando el tiempo que transcurre el agua en bajar 10 cm de la altura indicada, con cada uno de los cinco caudales probados (ecuación 2).

$$Q_w = \frac{\Delta H \times W \times L}{t}$$

(Ecuación 2)

Donde:

Q_w = Caudal de agua del Airlift (m^3/s)

ΔH = Variación de altura (Altura inicial - Altura final) (m)

W = Ancho del tanque (m)

L = Largo del tanque (m)

t = Tiempo transcurrido entre la variación de altura de agua (s)

3.3.1.3 Cálculo de v_w

El cálculo de velocidad del agua, se realizó con la ecuación de continuidad:

$$v_w = \frac{Q_w}{A}$$

(Ecuación 3)

Donde:

v_w = Velocidad de succión del agua (m/s)

A = Área de la tubería de succión (m^2)

Q_w = Caudal de agua del Airlift (m^3/s)

3.3.1.4 Cálculo de los radios sumergidos

El cálculo de radio sumergido, se refiere a la longitud de tubería que se encuentra sumergida en agua, para la longitud total de la tubería (Hanafizadeh, 2011) definida por la siguiente ecuación 4.

$$Y = \frac{L3}{L1}$$

(Ecuación 4)

Donde:

Y = Radio sumergido

$L3$ = Longitud sumergida (m)

$L1$ = Longitud tubería vertical (m)

3.3.1.5 Cálculo de la pérdida de presión por fricción

La ecuación para el cálculo de pérdida de presión por fricción se la tomó de Clark, et al. (1986).

$$D = \frac{4 \times p_w \times f \times v_w^2}{2d}$$

(Ecuación 5)

Donde:

D = Pérdida de presión por fricción por unidad de longitud (Pa/m)

p_w = Densidad del agua (kg/m^3)

f = Factor de Moody

v_w = Velocidad de succión del agua (m^2/s)

d = Diámetro de tubería (m)

3.3.1.6 Cálculo de la fracción de aire

$$\varepsilon = \frac{Qa'}{Co (Qw' + Qa') + V'ts}$$

(Ecuación 6) (Reinemann, Parlange y Timmons, 1989)

Donde:

ε = Fracción de aire en la mezcla de dos fases

Qa' = Caudal adimensional de aire

Qw' = Caudal adimensional de agua

Co = Coeficiente del perfil de velocidad del líquido/slug

$V'ts$ = Velocidad adimensional del levantamiento de burbujas en agua sin movimiento

3.3.1.7 Cálculo del Caudal de aire adimensional

$$Qa' = \frac{Qa}{A(gd)^{1/2}}$$

(Ecuación 7) (Reinemann, et al., 1989)

Donde:

Qa' = Caudal adimensional de aire

Qa = Caudal de aire (m^3/s)

A = Área de tubería (m^2)

d = Diámetro de tubería (m^2)

3.3.1.8 Cálculo del caudal de agua adimensional

$$Qw' = \frac{Qw}{A(gd)^{1/2}}$$

(Ecuación 8) (Reinemann, et al., 1989)

Donde:

Qw' = Caudal adimensional de agua

Qw = Caudal de agua (m^3/s)

A = Área de tubería (m^2)

d = Diámetro de tubería (m)

3.3.1.9 Cálculo de la velocidad adimensional del levantamiento de burbujas en agua sin movimiento

$$V'ts = 0.352 \times (1 - 3.18 \times \epsilon - 14.77 \times \epsilon^2)$$

(Ecuación 9) (Reinemann, et al., 1989)

Donde:

$V'ts$ = Velocidad adimensional del levantamiento de burbujas en agua sin movimiento

ϵ = Número de tensión superficial (m^3/s)

3.3.1.10 Número de tensión superficial

$$\epsilon = \frac{\vartheta}{p_w g d^2}$$

(Ecuación 10) (Reinemann, et al., 1989)

Donde:

ϑ = tensión superficial del agua ($\frac{N}{m}$)

ρ_w = Densidad del agua (kg/m^3)

d = Diámetro de tubería (m^2)

3.3.1.11 Cálculo de Caudal de Mezcla

$$Qg = Qa + Qw$$

(Ecuación 11) (Aigner y Bollrich, 2015)

Donde:

Qg = Caudal de mezcla (m^3/s)

Qw = Caudal de agua (m^3/s)

Qa = Caudal de aire (m^3/s)

3.3.1.12 Velocidad de la mezcla

$$vg = \frac{Qg}{A}$$

(Ecuación 12) (Aigner y Bollrich, 2015)

Donde:

vg = Velocidad de la mezcla (m/s)

Qg = Caudal de mezcla (m^3/s)

A = Área de la tubería de succión (m^2)

3.3.1.13 Densidad de la mezcla

$$\rho_g = \rho_w \times \left(1 - \varepsilon \times \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_w} \right) \right)$$

(Ecuación 13) (Aigner y Bollrich, 2015)

Donde:

ρ_g = Densidad de la mezcla (Kg/m^3)

ρ_w = Densidad del agua (Kg/m^3)

ρ_a = Densidad del aire (Kg/m^3)

ε = Fracción de aire

3.3.1.14 Cálculo de tasa de levantamiento máximo con $Q_w=0$

El cálculo de la tasa de levantamiento máximo, se realizó para las alturas sumergidas que no produjeron un caudal de descarga por no poder levantar el agua 2 m. Teniendo en cuenta que la medición de Q_w , se realizó únicamente para las alturas que levantaron el líquido 2 m.

$$\frac{h_0}{H} = \frac{1}{\frac{v_b}{v_a} - 1}$$

(Ecuación 14) (Aigner y Bollrich, 2015)

Donde:

h_0/H = Tasa de levantamiento máximo de agua

h_0 = Altura sobre el nivel del agua (m)

H = Altura del nivel del agua (m)

V_b = Velocidad de burbujas (m/s)

V_a = Velocidad del aire (m/s)

3.3.1.15 Eficiencia Airlift

$$n = \frac{Q_{w'}}{C_o \times (Q_{a'} + Q_{w'}) + V'_{ts} - Q_{a'}}$$

(Ecuación 15) (Reinemann, et al., 1989)

Donde:

$Q_{a'}$ = Caudal adimensional de aire

$Q_{w'}$ = Caudal adimensional de agua

V'_{ts} = Velocidad adimensional del levantamiento de burbujas en agua sin movimiento

C_o = Coeficiente del perfil de velocidad del líquido/slug

3.3.2 Pruebas de Arena

Para seleccionar tres diámetros distintos de arena, se procedió a realizar el tamizado siguiendo el Método de Ensayo Normalizado para determinar el Análisis Granulométrico de los Áridos Finos y Gruesos (ASTM C 136-01). Los diámetros (mm) seleccionados para el estudio se encuentran en la tabla 3.

Tabla 3.

Diámetros de arena seleccionados para el estudio.

Diámetros de Arena	
No.	mm
1	0.038 - 0.053
2	0.3 - 0.5
3	0.5 - 0.6
4	> 0.6

Las pruebas de arena, se realizaron utilizando las alturas sumergidas y los caudales de aire que produjeron un caudal de agua por un levantamiento del líquido de 2 m en las pruebas hidráulicas.

Para cada una de las alturas y caudales de aire seleccionados, se realizó la evaluación con tres diferentes diámetros de arena, que fueron tamizados previamente. Después, se determinó si el Airlift tiene la capacidad de succionar o no la arena, mediante una inspección visual en el fondo del tanque, que fue limpiado antes de empezar cada una de las experimentaciones.

4. Resultados

4.1 Pruebas Hidráulicas

Para la determinación de los resultados de las pruebas hidráulicas, se establecieron una serie de constantes de características físicas con respecto al agua, aire y dimensiones del tubo. La tabla 4 presenta un resumen. La determinación de la velocidad de burbujas (V_{ts}), se estableció como 0.3 (Aigner y Bollrich, 2015) y el valor de Co , se determinó como 1.2, ya que el número del Reynolds del sistema es mayor a 8000 (Reinemann, et al., 1989).

Tabla 4.

Valores constantes de características del agua, aire y dimensiones del tubo.

Constantes	
ρ_w (kg/m ³)	998,68
ρ_a (kg/m ³)	1,2
A (m ²)	0,044
d (m)	0,075
V'ts	0,35
Co	1,2
ϑ (N/m)	0,073

Para la determinación de Q_w , primero se procedió a realizar el cálculo de Q_f del tanque para poder corregir los resultados. El resultado de Q_f se encuentra presentado en la tabla 5.

Tabla 5.

Resultado de Q_f .

Cálculo Q_f			
ΔH	Volumen	Tiempo	Q_f
M	L	s	L/s
0,005	0,8	104	0,0077

Los resultados de las pruebas hidráulicas, se encuentra resumidos en la figura 6. Donde se puede observar una relación directamente proporcional entre las tres variables estudiadas. Detallando que, a mayor caudal de aire y mayor altura sumergida, el caudal de agua producido será mayor, esta experimentación fue similar a la realizada por Clark, et al., (1986). Además en la misma experimentación, se encontró el punto de eficiencia máxima en la descarga de agua mientras el caudal de aire incrementa hasta un punto determinado, donde a caudales de aire mayores al encontrado, el caudal de agua producido comienza a decrecer.

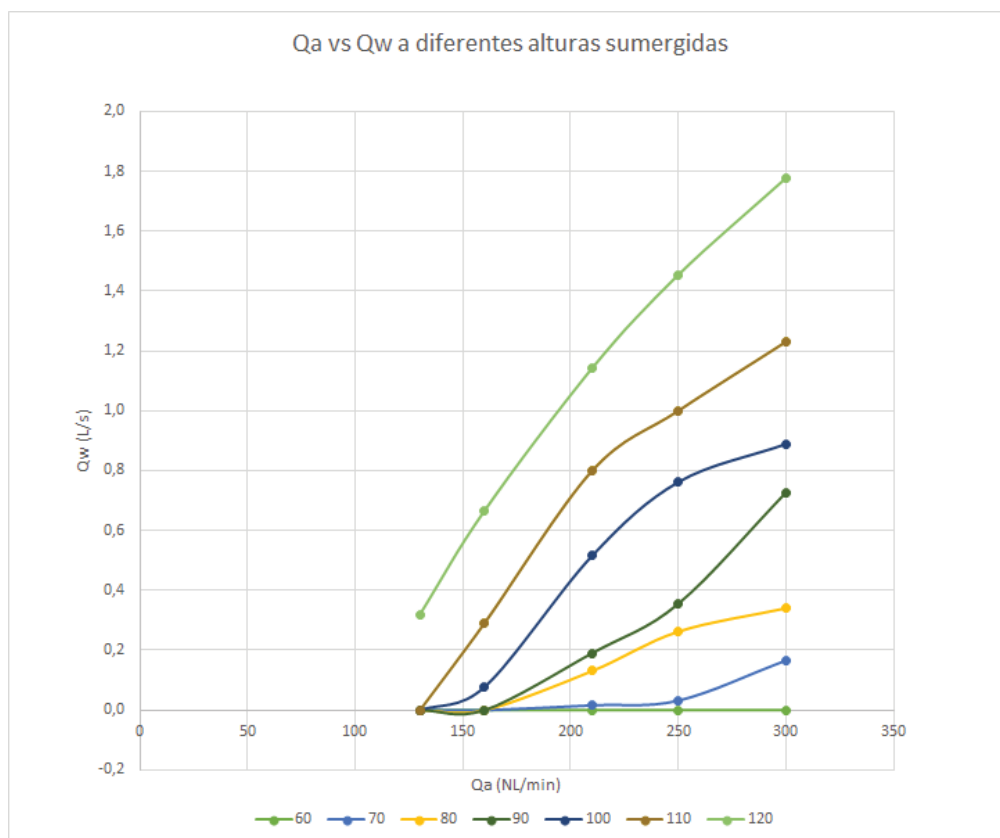


Figura 6. Caudal de agua vs Caudal de aire a 7 alturas sumergidas diferentes.

Sin embargo, existen algunas excepciones como los resultados observados a una altura de 60 cm (radio sumergido 0.3), que a pesar del aumento de Q_a , no se produce un caudal de agua. Esto se debe a que el líquido no logra subir 200 cm para poder realizar la medición. En comparación a lo estudiado por Lawniczak et al., (1999), donde se investiga la eficiencia de un Airlift a radios sumergidos entre 0.2 a 0.6 y con tuberías de succión cortas, de 100 cm, se demuestra que al mismo radio (0.3) se produce un caudal de agua (m^3/h) de 0.1 con un flujo de aire (m^3N/h) de 5, siendo este el menor resultado posible que se puede tener a dicha altura sumergida.

Por otro lado, también se observó que el caudal de aire de 130 LN/min, no produce un levantamiento del agua de 200 cm si la altura no es mayor a 120 cm, como se puede observar en la figura 6, donde Q_w es cero en las alturas 60, 70,

80, 90, 100 y 110 con flujos de aire de 130. Este argumento fue confirmado por Taleb y Al-Jarrah (2017), quienes mencionan que el flujo de aire mínimo que se necesita para generar una descarga de agua disminuye conforme el radio sumergido aumenta. En este caso, si el radio sumergido es mayor al calculado en 120 cm, el aire que se va a necesitar para generar una descarga va a ser menor a 130 LN/min.

Como se puede observar en la figura 7, existe también una relación directamente proporcional entre el aumento de la velocidad de agua, con el aumento del caudal del aire. Esto se debe a que, a mayor caudal de aire, el agua podrá llegar a alturas mayores y, a su vez, la velocidad a la que se produce la descarga de agua va a aumentar (Awari et al., 2004). Por esta razón, se puede observar en la tabla 6, que la velocidad mayor para cada radio sumergido se registra siempre en el caudal de 300 LN/min de aire.

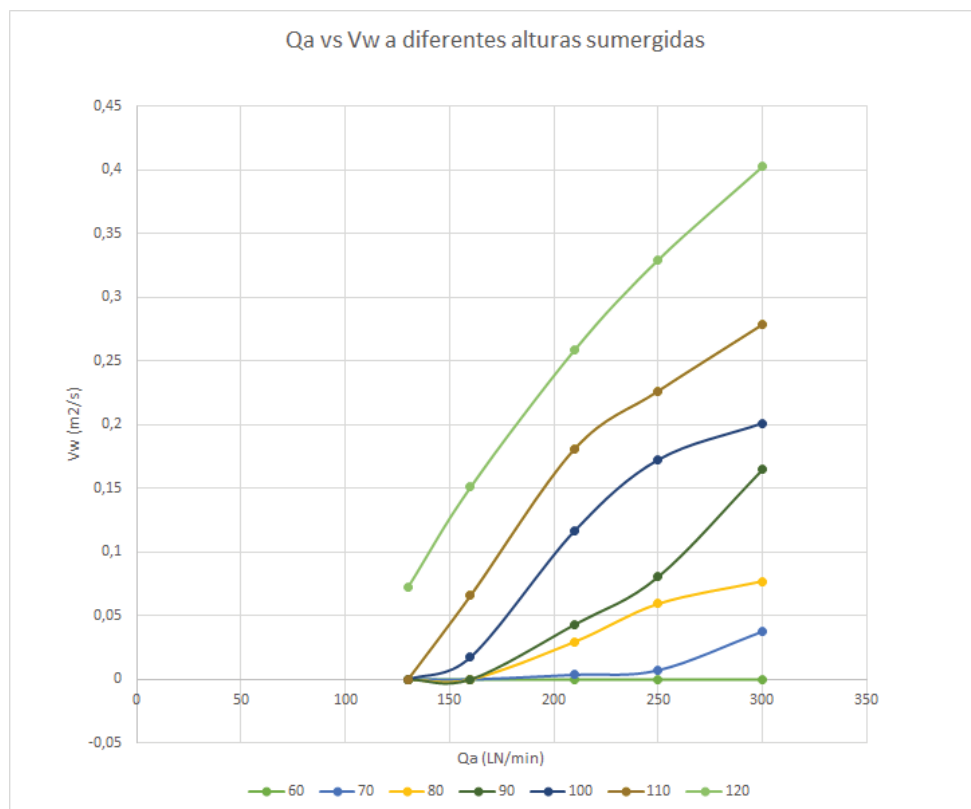


Figura 7. Velocidad del agua vs Caudal de aire a diferentes alturas sumergidas.

En la tabla 6, se puede observar los resultados de los cálculos (ecuación 4) de radio sumergido para cada altura sumergida.

Tabla 6.

Radio sumergidos estudiados.

L1	L3	Y
cm	cm	-
200	60	0,3
	70	0,35
	80	0,4
	90	0,45
	100	0,5
	110	0,55
	120	0,6

En la tabla 7 se puede observar los resultados de los cálculos de las pérdidas de presión por fricción (ecuación 5), correspondientes a cada velocidad de agua

generada en los distintos radios sumergidos. Se puede observar, como la pérdida de presión por fricción aumenta conforme aumenta la velocidad del agua, el radio sumergido y el caudal de aire. Sin embargo, como se pueden observar en la tabla 7, las pérdidas por presión son muy bajas, incluso a las velocidades mayores. Por esta razón, para el diseño y funcionamiento de un prototipo físico de Airlift, las pérdidas por fricción no deben ser consideradas (Clark, et al., 1987).

Tabla 7.

Pérdida de presión por fricción (D) para cada radio sumergido con su caudal de aire correspondiente.

Y	Qa	vw	D
	LN/min	m/s	Pa/m
	210	0,004	0,01
0,35	250	0,007	0,05
	300	0,038	1,36
	210	0,030	0,84
0,4	250	0,059	3,38
	300	0,077	5,70
	210	0,043	1,78
0,45	250	0,081	6,22
	300	0,165	26,01
	160	0,017	0,29
0,5	210	0,117	13,10

Y	Qa	vw	D
	LN/min	m/s	Pa/m
	250	0,173	28,54
	300	0,201	38,85
	160	0,066	4,16
	210	0,181	31,47
0,55	250	0,226	49,17
	300	0,279	74,48
	130	0,072	5,04
	160	0,151	21,85
0,6	210	0,259	64,22
	250	0,329	104,03
	300	0,403	155,41

Para el cálculo de velocidad de la mezcla (agua- aire) y la velocidad del aire dentro de la bomba Airlift, se utilizó la ecuación 12 (Aigner y Bollrich, 2015). Los resultados se encuentran resumidos en la figura 8; y están separados en las distintas alturas sumergidas estudiadas.

Se puede observar una relación lineal, entre el aumento en la velocidad del aire, y el aumento de velocidad de la mezcla dentro del tubo de succión. Los resultados observados para la altura sumergida de 1.2 m, son los más uniformes.

Esto se debe a que, a dicha altura, el caudal de aire inyectado produjo el caudal de agua con los valores más altos y sin caudales mínimos en 0. De igual forma, la mayor velocidad de mezcla (0.154 m/s) se puede observar a una velocidad de aire de 0.114 m/s.

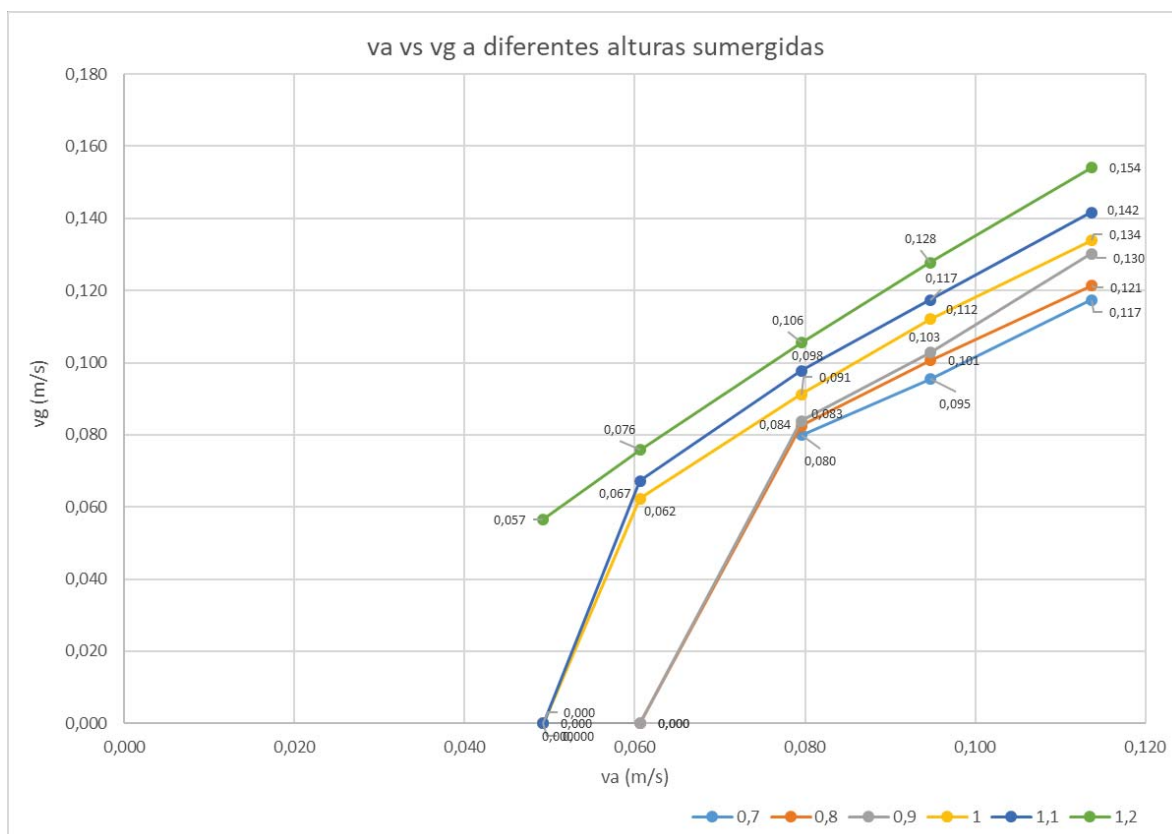


Figura 8. Velocidad de la mezcla vs velocidad del aire a diferentes alturas sumergidas

Para las alturas sumergidas que no registraron caudales, por no tener la capacidad de elevar el agua 2 m, se procedió a aplicar la ecuación 14, para el cálculo de h_0 para las alturas de 20, 30, 40, 50 y 60 cm. Los resultados se encuentran resumidos en la tabla 8.

Tabla 8.

Elevación máxima de agua (h_0) a distintas alturas sumergidas (H) y con distintos caudales de aire (Q_a).

Q_a LN/min	h₀/H -	L₃ m	h₀ m
130	0,16	0,2	0,03
160	0,21		0,04
210	0,29		0,06
250	0,37		0,07
300	0,48		0,10
130	0,16		0,3
160	0,21	0,06	
210	0,29	0,09	
250	0,37	0,11	
300	0,48	0,14	
130	0,16	0,4	
160	0,21		0,08
210	0,29		0,12
250	0,37		0,15
300	0,48		0,19
130	0,16		0,5
160	0,21	0,10	
210	0,29	0,15	
250	0,37	0,19	
300	0,48	0,24	
130	0,16	0,6	
160	0,21		0,13
210	0,29		0,18
250	0,37		0,22
300	0,48		0,29

En la tabla 8, se encuentran los resultados para el caso donde $Q_w = 0$, es decir, únicamente para alturas sumergidas menores a 0.6 m. El mejor resultado para h_0 , se puede observar a una altura sumergida de 60 cm, donde con un Q_a de 300 LN/min, que tiene una tasa de levantamiento máximo de agua de 0.48, el levantamiento es de alrededor de 30 cm sobre el nivel del agua. Por otro lado, se puede observar como a alturas sumergidas mínimas, como la de 20 cm, el levantamiento máximo es de 10 cm.

Para el cálculo de eficiencia del Airlift, se utilizó la ecuación 15. Los resultados se encuentran detallados en la figura 9. Para la altura sumergida de 60 cm, al igual que en la producción de Q_w , los resultados fueron igual a 0. Además, se pudo observar que la eficiencia con una Q_a de 130 LN/min para la mayoría de alturas sumergidas es igual a 0%, menos para la altura de 120 cm, que registro una eficiencia del 15%.

Se puede observar un aumento en la eficiencia, conforme aumenta la altura sumergida y el caudal de aire inyectado (Taleb y Al-Jarrah, 2017). A partir de los 100 cm de altura sumergida, los resultados de eficiencia son mayores, en comparación a las altura de 70, 80 y 90 cm. Como se puede observar en la figura 9, la mayor eficiencia a la que llega el sistema es del 40%, y la altura sumergida que presentó la mejor eficiencia conforme aumentó el caudal de aire, fue la de 120 cm.

Otro de los detalles que se pueden observar en la figura 9, es como el valor de la eficiencia del sistema no llega al 50%, sin embargo, este valor es una de las características propias del sistema Airlift Pump (Taleb y Al-Jarrah, 2017). Estudios realizados por Hanafizadeh et al. (2013), muestran la eficiencia del sistema con diferentes diámetros y alturas sumergidas. Para todos los resultados analizados, se determinó que la eficiencia del sistema Airlift aumenta conforme aumenta el diámetro de tubería. Esto se debe a que el aumento pospone la transición del flujo de slug. Además, se muestran resultados similares a los presentados en este trabajo, donde conforme aumenta la altura sumergida y el flujo de aire, también aumenta la eficiencia del sistema (Hanafizadeh et al., 2013).

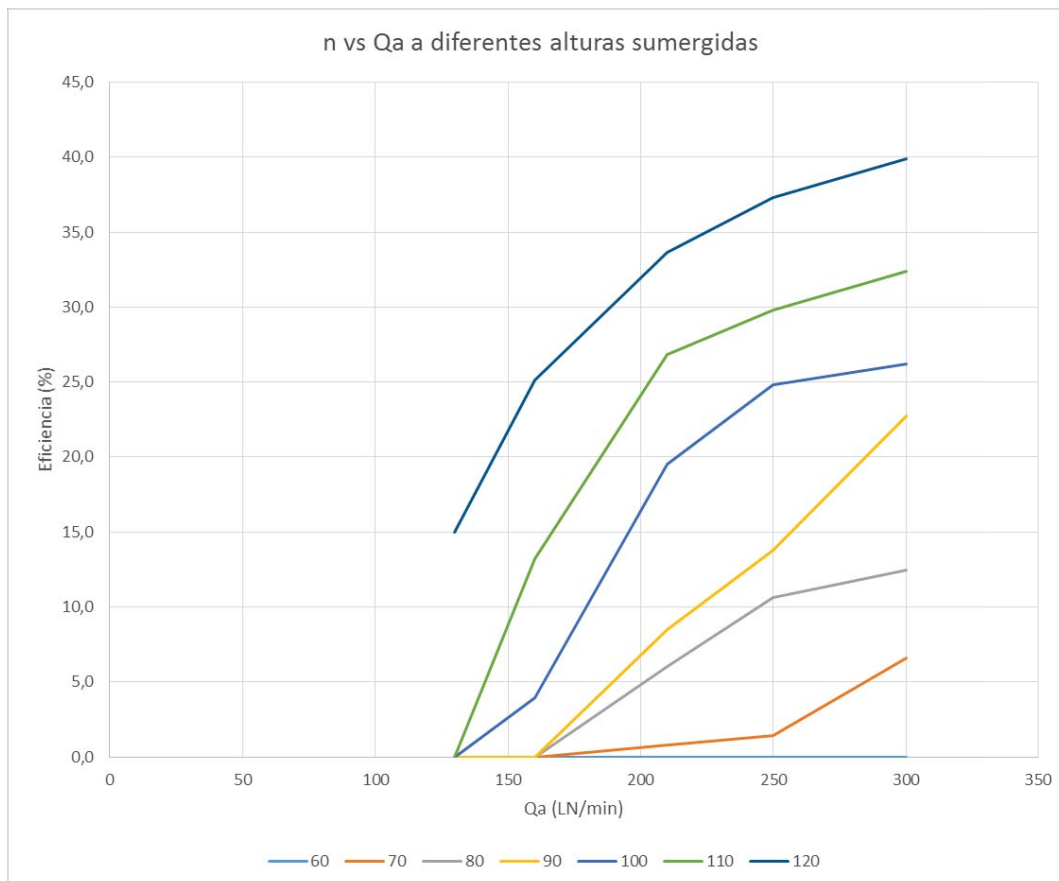


Figura 9. Eficiencia vs Caudal de aire a 7 alturas sumergidas (cm) diferentes.

4.2 Pruebas de Arena

Los resultados de las pruebas de arena, se detallan en la figura 10 hasta la figura 14, cada una representan los resultados visuales en la inspección de arena para los cinco diferentes caudales de aire estudiados. En el primer caso ($Q_a=130$), se realizó la medición únicamente para la altura de 120 cm, ya que fue la única altura que produjo un caudal de agua en las pruebas hidráulicas. En cuanto a las pruebas de arena, el resultado fue negativo, ya que a dicha altura no se produjo la succión de ninguna de las cuatro granulometrías de arena estudiadas.

Qa (LN/min) = 130					
Altura (cm)	80				
	90				
	100				
	110				
	120				
		1	2	3	4
Diámetro Arena					

Leyenda	
SI SUCCIONA	
NO SUCCIONA	
NO APLICA	

Figura 10. Determinación de succión de cuatro distintas arenas a cinco alturas sumergidas diferentes con una caudal de aire de 130 LN/min.

Para el caso dos ($Q_a=160$) se puede observar, que cuando el agua se encuentra a 110 cm, el Airlift solo tiene la capacidad de succionar la arena más ligera que fue estudiada. En cambio, para la altura de 120 cm, el Airlift pudo succionar hasta la granulometría número dos. Para el resto de alturas, en este caso, no se realizaron mediciones debido a que en las pruebas hidráulicas no se produjo un caudal de agua.

Qa (LN/min) = 160					
Altura (cm)	80				
	90				
	100				
	110				
	120				
		1	2	3	4
Diámetro Arena					

Leyenda	
SI SUCCIONA	
NO SUCCIONA	
NO APLICA	

Figura 11. Determinación de succión de cuatro distintas arenas a cinco alturas sumergidas diferentes con una caudal de aire de 160 LN/min.

Para el caso tres ($Q_a=210$), se determinó el mismo límite en cuanto a la granulometría que puede succionar el Airlift evidenciado en el caso 2. La diferencia fue que, para el caudal de 210, se evidenció una succión de granulometría 1 y 2, para las alturas de 100, 110 y 120 cm, que no fueron observados en el caso dos. Para la altura de 90, todos los resultados fueron negativos.

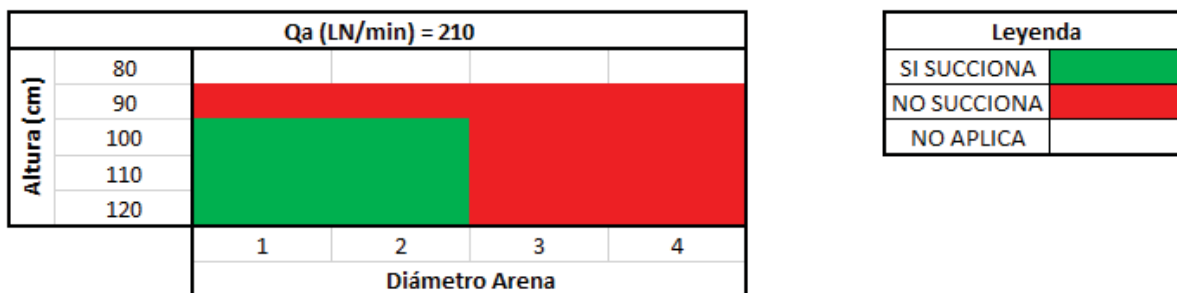


Figura 12. Determinación de succión de cuatro distintas arenas a cinco alturas sumergidas diferentes con una caudal de aire de 210 LN/min.

Para el caso cuatro ($Q_a=250$), el límite de granulometría que puede succionar el Airlift subió a la arena número tres, únicamente a una altura de 120 cm. Para el resto de alturas se evidencio el mismo límite encontrado en el caso tres y dos. Sin embargo, con este caudal de aire estudiado, se presenció también resultados positivos en la succión de la granulometría 1 y 2 a una altura de 90 cm, situación que no se había podido observar para caudales de aire menores.

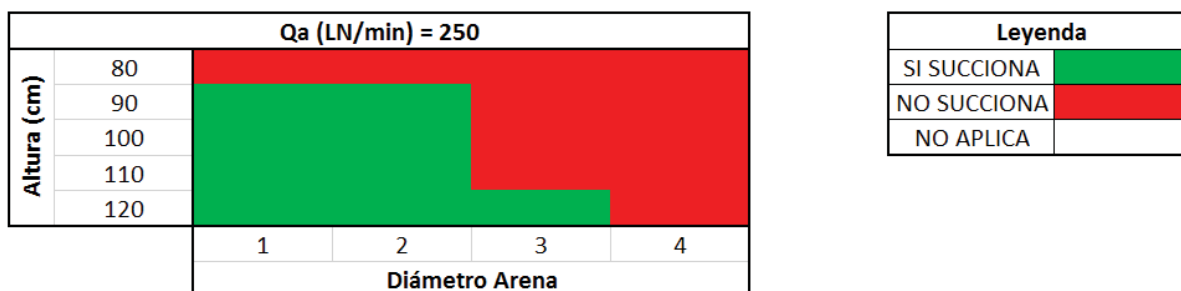


Figura 13. Determinación de succión de cuatro distintas arenas a cinco alturas sumergidas diferentes con una caudal de aire de 250 LN/min.

En el caso cinco ($Q_a=300$), se observaron resultados muy similares a los encontrados con una caudal de 250. La única diferencia observada, fue el cambio del límite de granulometría succionada en la altura de 110 cm. Como

muestra la figura 13, que, a este caudal estudiado, la altura de 110, tiene la misma capacidad que la altura de 120, succionando la arena número tres.

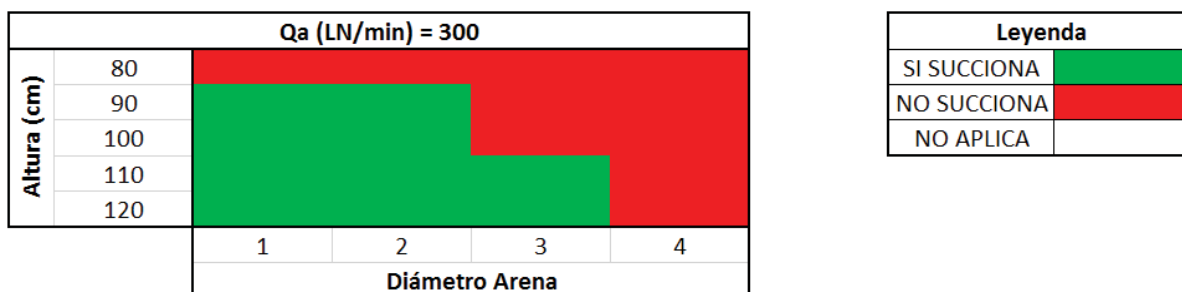


Figura 14. Determinación de succión de cuatro distintas arenas a cinco alturas sumergidas diferentes con una caudal de aire de 300 LN/min.

Como se observó en los resultados mostrados en la figura 10 hasta la figura 14, a menor caudal de aire y menor altura sumergida, la succión de arena también es menor. Esto se debe al cambio del patrón de flujos dentro de la tubería, desde un flujo de slug hacia un flujo anular, lo cual provoca un aumento en la pérdida de momentum (Dong, 2015). Además, trabajar a bajos radios sumergidos, en este caso, menores a 0.5, puede ocasionar un decrecimiento en la mezcla de aire, agua y arena debido a la creación de flujos indeseables, como: el flujo de burbujas o el flujo anular.

También, la baja eficiencia en la succión de arena a bajos radios sumergidos se ocasiona por la producción de turbulencias mayores dentro de la tubería de succión. Esta turbulencia es formada por el impacto de las partículas sólidas que genera una inhibición gradual en la coalescencia de burbujas pequeñas con la presión decreciente en la entrada de aire, disminuyendo así la formación de burbujas grandes (HU Dong, 2015).

5. Conclusiones y Recomendaciones

5.1 Conclusiones

Se concluyó que la variable de diseño de mayor importancia es la altura o radio sumergido. Como se observó en este estudio, a mayor radio sumergido la bomba Airlift genera más caudal de agua y también produce un levantamiento de agua mayor, incluso con caudales de aire pequeños (130 LN/min).

Para la construcción de una bomba Airlift de succión, con un diámetro de 75 mm, se concluyó que no tiene la capacidad de succionar arenas con un diámetro mayor a 0.6 mm a ninguno de los cinco caudales de aire estudiados (130, 160, 210, 250 y 300 LN/min).

El radio sumergido que presentó mayor eficiencia fue el de 0.6, con un valor del 40%. En cuanto a la evaluación de succión de arena, el radio sumergido de 0.6 con un caudal de aire de 300 LN/min, tiene la capacidad de succionar arenas entre 0.038 a 0.6 mm.

El caudal de aire que presentó la mejor capacidad de producción de caudal de agua y succión de arena, fue el caudal de 300 LN/min. Para las alturas de 70, 80, 90, 100, 110 y 120 cm, el mayor caudal de agua que se produjo para cada altura fue con el caudal de 300 LN/min (Figura 6). En el caso de las pruebas de arena, se observó que este caudal de aire, tiene la capacidad de ampliar los límites de succión. Para los resultados observados a una altura de 110 cm, comparando la succión con el caudal de 250 LN/min y 300 LN/min. Se observó que el caudal de 300 LN/min, tiene la capacidad de succionar arenas hasta 0.6 mm, mientras que con el caudal de 250 LN/min el límite de succión son arenas no mayores a 0.5 mm (Figura 13 y 14).

5.2 Recomendaciones

Para la construcción de un tanque de agua de acrílico, se recomienda utilizar Cloruro de Metileno como pegamento para evitar fugas de agua, junto con una estructura metálica para evitar que el acrílico ceda y se empiecen a generar pérdidas de agua. Además, el sistema de succión también debería ser de acrílico para poder observar completamente lo que ocurre al momento de la succión y realizar con mayor precisión las mediciones.

Para continuar con este tema en estudio, se puede variar el diámetro del tubo de succión utilizado y el diseño de la entrada de aire, ya que son variables que también influyen en la eficiencia del bombeo. De esta forma se podría evaluar la eficiencia en la succión de arena con diferentes diámetros de tubo de succión y diseños de la inyección de aire. Además, en estudios posteriores se puede realizar mediciones directas en cuanto a la velocidad y tamaño de burbuja que se producen con diferentes caudales de aire y cómo estos influyen en el bombeo de agua y de agua con arena.

REFERENCIAS

- Ahmed, W. H., & Badr, H. M. (2012). *Dual-injection airlift pumps: An enhanced performance. Particulate Science and Technology*, 30(6), 497–516. doi.org/10.1080/02726351.2011.604396
- Aigner, D., & Bollrich, G. (2015). *Handbuch der Hydraulik: Wasserbau und Wasserwirtschaft* (1st ed.). Berlin: Beuth Verlag.
- American International Society for Testing and Materials. (2001). Método de Ensayo Normalizado para determinar el Análisis Granulométrico de los Áridos Finos y Gruesos (C 136-38 T, Vol. 14.02). Washington: Anuario de Normas ASTM. Recuperado el 31 de octubre de 2018 de <https://conred.gob.gt/site/normas/NRD3/NTG41010h1.pdf>
- Awari, G. K., Ardhapurkar, P. M., Wakde, D. G., & Bhuyar, L. B. (2004). *Performance analysis of air-lift pump design. Mechanical Engineering Science, 218 Part C*, 1155–1161. Recuperado el 31 de octubre de 2018 de <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.843.2554&rep=rep1&type=pdf>
- CEPAL. (2011). Diagnóstico de la estadísticas del agua en Ecuador. Diagnóstico de La Información Estadística Del Agua, 81. Recuperado el 4 de agosto de 2018 de <http://aplicaciones.senagua.gob.ec/servicios/descargas/archivos/download/Diagnostico de las Estadísticas del Agua Producto IIIc 2012-2.pdf>
- Clark, N. N., & Dabolt, R. (1986). *A General Design Equation for Air Lift Pumps Operating in Slug Flow. AIChE*, 32(1), 56–64. <https://doi.org/10.1002/aic.690320107>
- Dong, H. U. (2015). *Modeling and Analysis of Airlift System Operating in Three-Phase Flow* *. Chinese Ocean Engineering Society, 29(1), 121–132. <https://doi.org/10.1007/s13344-015-0009-z>
- d'Orbcastel, E. R., Blancheton, J. P., & Aubin, J. (2009). *Towards environmentally sustainable aquaculture: Comparison between two trout farming systems using Life Cycle Assessment. Aquacultural Engineering*, 40(3), 113–119. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2008.12.002>
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. (1992). *Wastewater treatment and use in agriculture. In FAO irrigation and*

drainage paper 47. Rome. Recuperado el 28 de Agosto de 2018 de <http://www.fao.org/docrep/t0551e/t0551e00.htm#Contents>

- Hanafizadeh, P., Raffiee, A. H., & Saidi, M. H. (2013). *Experimental investigation of air lift pumping system*, (1996), 1–9. Recuperado el 23 de mayo de 2018 de https://www.researchgate.net/publication/253241389_Experimental_Investigation_of_Air_Lift_Pumping_system
- INEC. (2017). Ecuador, pionero en medición de ODS de Agua, Saneamiento e Higiene. Recuperado el 23 de mayo de 2018 de <http://www.ecuadorencifras.gob.ec/ecuador-pionero-en-medicion-de-ods-de-agua-saneamiento-e-higiene/>
- INEC. (2016). Estadística De Información Ambiental Económica En Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales 2015 (Agua Y Alcantarillado), 2015, 1–34. Recuperado el 23 de mayo de 2018 de http://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Encuestas_Ambientales/Municipios_2015/Documento_Tecnico-Gestion_de_Agua_y_Alcantarillado_2015.pdf%0Ahttp://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Encuestas_Ambientales/Municipios_2015/Presentac
- Jafarinejad, S. (2017). *Cost estimation and economical evaluation of three configurations of activated sludge process for a wastewater treatment plant (WWTP) using simulation*. *Applied Water Science*, 7(5), 2513–2521. <https://doi.org/10.1007/s13201-016-0446-8>
- Kassab, S. Z., Kandil, H. A., Warda, H. A., & Ahmed, W. H. (2007). *Experimental and analytical investigations of airlift pumps operating in three-phase flow*, 131, 273–281. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2006.12.009>
- Lawniczak, F., Francois, P., Scrivener, O., Kastrinakis, E. G., & Nychas, S. G. (1999). *The efficiency of short airlift pumps operating at low submergence ratios*. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 77(1), 3–10. <https://doi.org/10.1002/cjce.5450770103>
- Organización Mundial de la Salud. (1993). Estándares europeos de la calidad del agua potable. Recuperado el 15 de mayo de 2018 de <https://www.lenntech.es/estandares-calidad-agua-oms.htm>
- Mahrous, A. (2016). *Airlift Pump with a Gradually Enlarged Segment in the Riser Tube*, 135(March 2013), 1–5. <https://doi.org/10.1115/1.4023296>

- Qasim, S. R. (1999). *Wastewater Treatment Plants. Planning, design and operation* (Second). Boca Raton: CRC. 10.1201/9780203734209
- Reinemann, D. J., Parlange, J. Y., & Timmons, M. B. (1989). *Theory of small-diameter airlift pumps*. *Int. J. Multiphase Flow*, 16(1), 113–112. 10.1016/0301-9322(90)90042-H
- SENAGUA. (2016). Estrategia Nacional de Agua Potable y Saneamiento. Secretaría Nacional Del Agua, 80. Recuperado el 2 de julio de 2018 de <https://www.agua.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2016/07/REVISTA-SENAGUA.compressed.pdf>
- Taleb, F. S. A., & Al-Jarrah, J. A. (2017). *Experimental Study of an Air Lift Pump*. *Engineering, Technology and Applied Science Research*, 7(3), 1676–1680. Recuperado el 14 de Julio de 2018 de <https://etasr.com/index.php/ETASR/article/view/1207>
- Tchobanoglous, G., Burton, F., & Stensel, H. D. (1991). *Wastewater engineering: An Overview. Wastewater Engineering Treatment and Reuse*, 1–24. [https://doi.org/10.1016/0309-1708\(80\)90067-6](https://doi.org/10.1016/0309-1708(80)90067-6)
- UNESCO-WWAP. (2003). Agua para todos, agua para la vida. *United Nations*, 36. Recuperado el 13 de julio de 2018 de <http://www.un.org/esa/sustdev/sdissues/water/WWDR-spanish-129556s.pdf>
- World Health Organization (WHO). (2013). *Water Quality and Health Strategy*. Recuperado el 2 de julio de 2018 de http://www.who.int/water_sanitation_health/publications/2013/water_quality_strategy/en/
- World Health Organization (WHO)/ UNICEF. (2017). *Joint Monitoring Programme for Water Supply, Sanitation and Hygiene*. Ecuador. Recuperado el 20 de febrero del 2018 de <https://www.who.int/mediacentre/news/releases/2017/launch-version-report-jmp-water-sanitation-hygiene.pdf>
- World Water Council. (2006). Water Problems in Latin America. *World Water Council 4th Water Forum*, 3. Recuperado el 29 de junio de 2018 de http://www.worldwatercouncil.org/fileadmin/wwc/News/newsletter/synthesis_is_righttowater_4wwf.pdf
- Wurts, W. a, Mcneill, S. G., & Overhults, D. G. (1994). *Performance and design characteristics of airlift pumps for field applications*. *World Aquaculture*,

25(December), 51–55. Recuperado el 16 de Agosto de 2018 de https://www.researchgate.net/publication/306960735_Performance_and_design_characteristics_of_airlift_pumps_for_field_applications

WWAP (United Nations World Water Assessment Programme). (2017). *The United Nations World Water Development Report 2017. Wastewater: The Untapped Resource, 200*. Recuperado el 24 de mayo de 2018 de <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

ANEXOS

Anexo 1. Proceso de ensamble del tanque de acrílico.



Anexo 2. Estructura metálica ensamblada.



Anexo 3. Racor de ½ pulgada para la inyección de aire.



Anexo 4. Purga instalada en el tanque de acrílico.



Anexo 5. Arena tamizada en los cuatro tamaños de estudio.

