



**Universidad
Zaragoza**

Proyecto Fin de Carrera

Construcción, caracterización y estudio de
aplicación de una bomba de bobina para
riego de una finca agrícola.

Autor

Juan José Pellicer Orte

Director

César González Cebollada

Escuela Politécnica Superior de Huesca

2014

ÍNDICE

1. OBJETIVOS	1
2. INTRODUCCIÓN	2
2.1 Presentación del proyecto.....	2
2.2 Reseña histórica.....	3
2.3 Componentes de una instalación con bomba de bobina.....	18
2.4 Componentes de una bomba de bobina	23
2.4.1. Componentes de una water-wheel.....	23
2.4.2. Componentes de una Sling-pump	25
2.5 Funcionamiento de la bomba de bobina	27
2.5.1 Principio básico de funcionamiento	27
2.5.2. Manómetro de tubo en U.....	29
2.5.3. Manómetro de balanza en anillo.....	31
2.5.4. Los tapones de aire en la bomba de bobina.....	34
2.5.5. Movimiento de los tapones de aire y agua.....	36
2.5.6. Spillback (Derrame hacía atrás del agua).....	38
2.5.7. Niveles desarrollados de agua en las bobinas.....	40
2.5.8. La tubería de impulsión.....	44
2.5.9. La descarga de la bomba.....	46
Blow-back.....	47
Air-lift.....	47
2.6 Bombas de bobina comerciales	48
Rife Hydraulic Engine.....	48
Biosling.....	49
ATIK.....	50
3. METODOLOGÍA	53
3.1 Construcción de la bomba de bobina	53
Primer prototipo.....	53
3.1.1. Tambor 1	53
3.1.2. Junta rotativa 1.....	54
3.1.3. Hélice 1.....	55
3.1.4. Bobina o tubería en espiral 1.....	56
3.1.5. Toma de entrada 1.....	58
3.1.6. Elemento de flotación 1	58

3.1.7. Tubería de suministro 1	59
Segundo prototipo	61
3.1.8. Tambor 2	61
3.1.9. Junta rotativa 2	61
3.1.10. Hélice 2	62
3.1.11. Bobina o tubería en espiral 2	63
3.1.12. Toma de entrada 2	64
3.1.13. Elemento de flotación 2	65
3.1.14. Tubería de suministro 2	66
3.2 Caracterización hidráulica de la bomba construida	67
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	74
4.1 Resultados experimentales.....	74
4.2 Resultados teóricos	77
4.3 Discusión.....	82
5. APLICACIÓN DE UNA BOMBA DE BOBINA A UNA FINCA AGRÍCOLA	86
5.1 Localización.....	86
5.2 Suministro de agua para la instalación	88
5.3 Lugar de descarga	89
5.4 Cálculo teórico	91
5.5 Estudio comparativo con una bomba convencional.....	93
5.5.1. Selección de la bomba convencional	93
5.5.2. Cálculo teórico de la bomba convencional.....	95
5.5.3. Bomba de bobina vs bomba de gasolina.....	97
6. CONCLUSIONES.....	101
ANEXO I	106
Procedimiento para la construcción del primer prototipo de bomba	106
Primera modificación del prototipo 1.....	115
Segunda modificación del prototipo 1	117
ANEXO II.....	122
Procedimiento de construcción del segundo prototipo	122
ANEXO III	132
BIBLIOGRAFÍA	138

1. OBJETIVOS

1. OBJETIVOS

Los objetivos del presente proyecto fin de carrera son los que a continuación se exponen:

- Revisión bibliográfica del “estado del arte” científico y tecnológico acerca de las bombas de bobina.

Indagar la historia que ha recorrido esta bomba, para observar su evolución, conocer las diferentes aportaciones por diferentes estudiosos, así como entender su funcionamiento.

- Construcción de una bomba de bobina.

Realizar un prototipo con la ayuda de la información recabada y del conocimiento de su funcionamiento, afrontando los pequeños retos que propone esta fabricación con la propia experiencia e ideas.

- Caracterización hidráulica de la bomba de bobina construida.

Llevar a prueba el prototipo en una corriente para hacerla funcionar en condiciones reales, y dar a conocer la magnitud de sus parámetros de funcionamiento.

- Estudio comparativo de aplicación al riego de una finca agrícola.

Cotejar costes con otros prototipos comerciales así como con otros convencionales, trasportándolos a una situación ficticia de riego.

2. INTRODUCCIÓN

2. INTRODUCCIÓN

2.1 Presentación del proyecto.

A continuación en estas páginas se va a hablar sobre una bomba sencilla pero a su vez ingeniosa. A esta bomba se le han dado muchos nombres durante el transcurso de la historia, es conocida en diferentes sitios y por diferentes estudiosos como bomba manométrica, bomba de espiral, bomba de bobina, bomba de barril, bomba hidrostática, etc. Esta bomba utiliza la energía cinética de una corriente de agua para mover su propia estructura haciéndola girar para captar el agua que va a ser bombeada a través de su espiral o bobina hacia un punto de impulsión.

Como proyectos antecesores a este, queremos fomentar el uso de bombas no convencionales accionadas con energías alternativas a la eléctrica y a la de combustibles fósiles, con la intención de reducir el impacto ambiental en la medida que se pueda, y permitir el bombeo en aquellas zonas donde estos recursos no son fáciles de conseguir pero sin embargo existe unos recursos naturales potenciales que pueden ser aprovechados, si se da con la manera correcta de hacerlo.

2.2 Reseña histórica

Para ser más precisos en la evolución histórica de esta bomba, tendríamos que situar su origen en una idea tan simple como eficaz que fue inventada hace más de 2000 años por el célebre físico e ingeniero Arquímedes. Este invento es conocido como "tornillo de Arquímedes" o "bomba de caracol de Arquímedes" el cual se basa en una simple espiral con su eje inclinado que al girar, tomaba agua desde un extremo y la elevaba hacia un canal de recogida a una cota superior de la superficie de entrada. Esta bomba (figura 1) como era de esperar era accionada por la acción animal o incluso de manera manual.



Figura 1: Tornillo de Arquímedes. Fuente extraído de <http://www.animatedsoftware.com>

Tras esta antigua aportación, la primera referencia que aparece en la bibliografía sobre la construcción de una bomba basada en la construida anteriormente por Arquímedes, data del año 1748, año en el que Andrew Wirtz un peltrero suizo, construyó un artilugio sencillo para proporcionar agua a una tintorería a las afueras de Zúrich. En éste enrollaba una tubería en espiral y conectaba su extremo interior a un tubo rígido que servía tanto de eje de giro como de tubería de descarga. Este prototipo fue ideado de manera que en cada revolución de la espiral, la toma recogía la mitad del volumen del bucle más externo. (Reese, et. al. 1819).

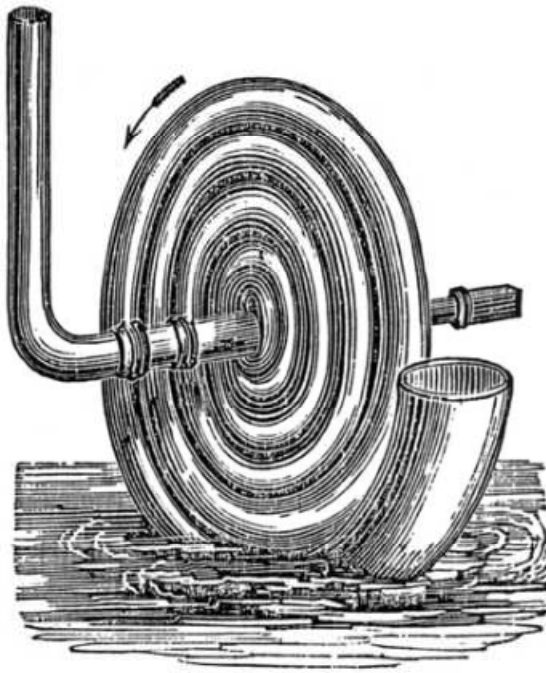


Figura 2: Histórica Bomba de Wirtz. Fuente: Ewbank, (1849) extraído de <http://lurkertech.com/water/pump/tailer/>

(Ewbank, 1849) señala la existencia de la construcción en 1784, de una máquina en Archangelsky (Rusia) la cual registro "un tonel de agua en un minuto a una altura de setenta y cuatro pies, a través de una tubería de setecientos sesenta pies de largo".

Estas dos bombas antiguas se fabricaron con materiales muy pesados como plomo, lo que las hacía muy pesadas y difíciles de accionar, debido a esto y al desarrollo de otras maneras de impulsión fueron olvidadas durante más de un siglo.

Existe una referencia en octubre de 1933 sobre un agricultor de California que construyó una adaptación de la bomba de espiral accionada por un molino de viento. Esta bombeaba el agua de un canal a una zanja, vertiendo a través del centro de la espiral.

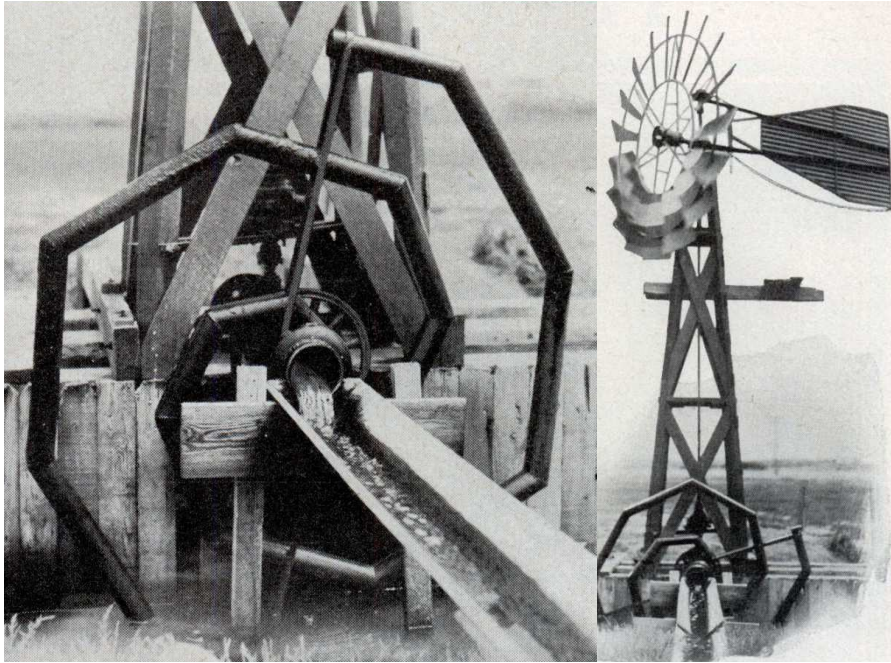


Figura 3: Bomba accionada por un molino de viento. Fuente: extraído de <http://blog.modernmechanix.com/chinese-windmill-waters-farm/>

Tras otro vacío en la historia, Alan E. Belcher en 1972 desconociendo la invención llevada a cabo por Wirtz, inventó una bomba similar, que aplicaba los mismos principios que la construida en 1748.

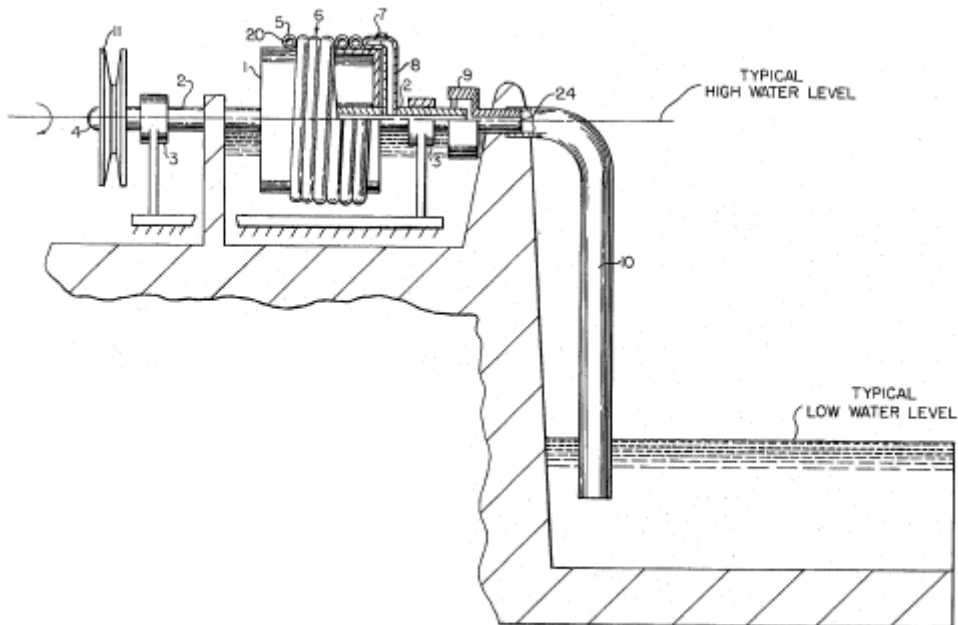


Figura 4: Patente de la bomba de A.Belcher. Fuente: patente US4228658

Este inventor redactó en 1973 un documento inédito distribuido a personas de su confianza, en el cual se describía el funcionamiento de la bomba hidrostática como era conocida en aquella época.

Este documento inspiró varios trabajos posteriores (Stuckey y Wilson, 1980) y (Ohlemutz, 1975)

En 1974, Belcher, con la ayuda del Dr. Alan Mayne, descubrió que el área de sección transversal de dos bobinas independientes de diferente diámetro podría ser igualado con precisión por una fórmula geométrica simple.

Belcher también persiguió teorías y suposiciones que apoyaban la presencia de un par el cual, en concordancia con las leyes de la física, tenía que ser producido por la altura de agua que se estaba bombeando. Por lo tanto Belcher trabajó en el desarrollo de ecuaciones matemáticas para predecir con precisión el par resultante para una altura y configuración conocida de la bobina y gracias a la aparición de un instrumento de medida de presión llamado **Manómetro de anillo de balanceo**, y más concretamente gracias a las ecuaciones asociadas con este, permitió finalmente a Belcher desarrollar esta demostración matemática, así como darle los medios para el cálculo del par en relación a la altura de descarga o presión.

El 18 de Mayo de 1979, el Dr. Peter R. Morgan también desde el desconocimiento de las invenciones anteriores de Wirtz y Belcher ideó una bomba muy semejante a la bomba original de Wirtz con materiales más modernos. Tras cerciorarse mientras cambiaba una instalación de gas de la capacidad de una manguera en espiral para expulsar un fluido al hacerla girar, decidió construir un pequeño prototipo de bomba en la Estación de Investigación Henderson (Zimbabue), que consistía en una pequeña noria de 2 m de diámetro a la que fijó una tubería de 20 m y 25mm de diámetro, consiguiendo levantar desde un pequeño canal hasta un depósito cercano 1,3 litros en cada revolución. Tras el éxito del prototipo a finales del mismo año se lanzó a construir una bomba mayor, la cual estaba formada por una noria de 4 metros de diámetro accionada con 16 paletas de 600 x 600 mm, a la que unió dos tubos de polietileno de 50 mm formando 3 espirales cada uno, los cuales recogían el agua en cada revolución. El agua pasaba por el interior de las espirales y se bombeaba a través del eje hueco de la noria a una tubería de impulsión. Esta bomba se montó sobre un canal del río Mazowe en Zimbabue y fue capaz de bombear 4752 litros de agua por hora a una altura igual a la del eje de la noria y 3697 litros/hora a una altura de 8 metros sobre el

nivel del agua, con una velocidad de giro de 4,2 Rev./min y 3,21 Rev./min respectivamente. Esta bomba se reemplazó por una réplica hecha con materiales más resistentes y sigue todavía funcionando. (Morgan, 1979).



Figura 5: Primer prototipo de la bomba de P. Morgan en Henderson. Fuente: Morgan, (1979), extraído de <http://lurkertech.com/water/pump/morgan/tripod/>



Figura 6: Bomba final de P. Morgan en Henderson. Fuente: Morgan, (1979), extraído de <http://lurkertech.com/water/pump/morgan/tripod/>

En 1978 Dibwe realizó un estudio experimental de la bomba, bajo el nombre de *hydrostatic pump*. Construyó la bomba con dos cojinetes de madera que mantenían el eje de tubería de acero sobre el que se montó la bobina. La bomba fue accionada a mano por una manivela sin engranajes. Se probaron diámetros de tubo de 21 y 28 mm, enrollándolo de 1 a 6 bobinas de 1,05 metros de diámetro. y además se estudiaron diferentes grados de inmersión de 25% a 45% (Weir, 2001). Llegaron a las siguientes conclusiones:

- La elevación máxima aumentaba a mayor número de bobinas y a menor velocidad de entrada.
- La disminución de la inmersión de la bobina producía elevaciones máximas más altas, pero por supuesto la columna de salida tenían una mayor proporción de aire que de agua.
- Se obtuvo una elevación máxima de aproximadamente 6 metros

En 1983 G.H. Mortimer y R. Annable siguiendo los pasos de Alan T. Stucky y Peter Morgan probaron teórica y experimentalmente este tipo de bomba accionada por la propia corriente de agua. Se componía de un tubo flexible de 25 mm de diámetro envuelto alrededor del interior de un tambor de 50 galones formando 26 bobinas. A diferencia de las anteriores se usaron paletas de accionamiento en forma de V soldadas sobre el tambor. Esta bomba se puso a prueba en un arroyo local y levantó el agua a una altura de 9,5 m a un caudal de 4 l/min, cuando la velocidad de la corriente fue de 0,8 m/s y consiguieron accionar la bomba con una velocidad mínima de 0,4 m/s. En este mismo documento hicieron un análisis matemático más complejo que el utilizado por A.E Belcher, que predecía satisfactoriamente el caudal descargado y la altura de presión obtenidos por este tipo de bombas en cada una de sus espirales.

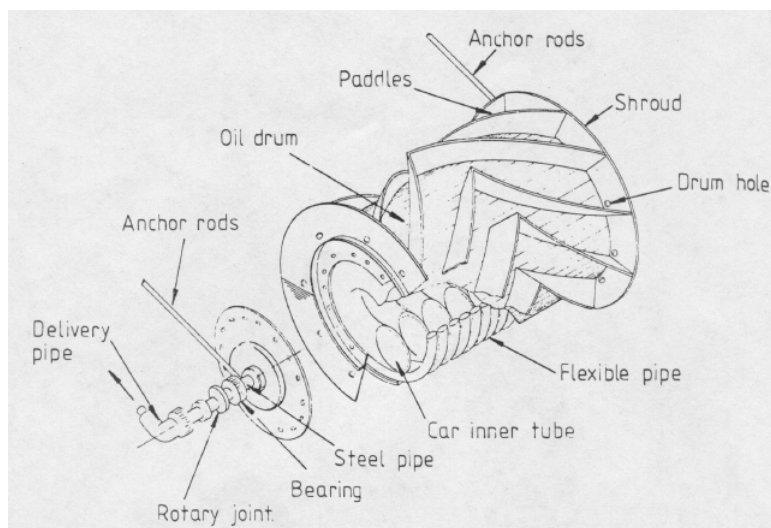


Figura 7: Diseño de la bomba construida por G.H. Mortimer y R. Annable. Fuente: Mortimer y Annable, (1984).

En un artículo de julio de 1985, en una publicación cuatrimestral titulada *Waterlines*, hubo un informe sobre el proyecto de la Danish Guide y Scout Association. Este describe el diseño y operación de una bomba hidrostática para bombear agua durante la estación seca desde Nilo a una granja en Rejaf cerca de Juba, en el sur de Sudán. La altura máxima de elevación fue aproximadamente de 7,5 m; la capacidad de la bomba varió con la velocidad de la corriente del río pero fue más eficientemente a 1,6 m/s y necesitó una profundidad mínima de 1 m de agua para operar. Fue capaz de bombear agua suficiente para regar 2 hectáreas con 7 mm de agua al día.



Figura 8: Diseño de la bomba de Danish Guide and Scout Association. Fuente: Revista *Waterlines*

Peter Tailer conservador del Museo Windfarm Martha's Vineyard en Massachusetts, escribió en 1986 una especie de guía acerca de la construcción y prueba de una recreación de la bomba de Wirtz. Esta versión de la bomba se hizo con materiales ligeros y baratos. Se realizaron tres grupos de pruebas, el primero para determinar la capacidad de la bomba a diferentes velocidades, el segundo grupo para determinar el efecto de diferentes tamaños de toma y el grupo final de las pruebas se llevaron a cabo para determinar la relación entre el tamaño y el número de bobinas con respecto a las alturas reales a las que se podría entregar agua. Además se determinó para esta bomba las condiciones límite para que ocurriera el fenómeno conocido como Blow-Back, el cual se explicará más adelante en el apartado de funcionamiento. La bomba consistía en una rueda de 6 pies de diámetro a la que se enrollaron las diferentes mangueras. (West y Tailer, 1986).

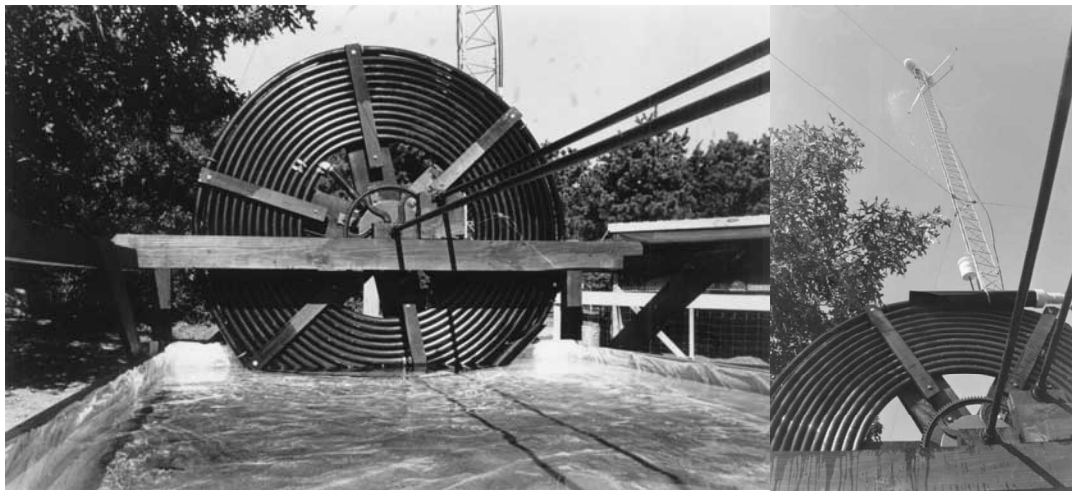


Figura 9: Bomba construida por P. Tailer en el Museo Windfarm Martha's Vineyard. Fuente: extraído de <http://lurkertech.com/water/pump/tailler/>

El 21 de abril de 1987 Per-Olof Karlsson patentó un nuevo estilo de la bomba de bobina, que se basaba en la construcción de un tambor tronco-cónico sobre el que se enrollaba una tubería en espiral formando la bobina y todo el conjunto era accionado por una hélice unida a la parte anterior del tambor, al lado opuesto de la toma de entrada de dicha bomba. Karlsson dio a conocer esta bomba bajo el nombre de Loop pump. Este tipo de bomba será la que se desarrollará en el presente proyecto así como la descripción de sus características.

profundidades superiores a 1 metro. La bomba proporcionó una salida constante de 6,8 l/min.(Griffin, 1997).

Ocho años más tarde en el departamento de ingeniería mecánica de la universidad de Alejandría, estudiaron el rendimiento de una bomba de bobina bajo la variación de parámetros de funcionamiento. Estos parámetros fueron la velocidad de rotación de la bomba, la proporción sumergida, y el número de bobinas (Kassab et al., 2005).

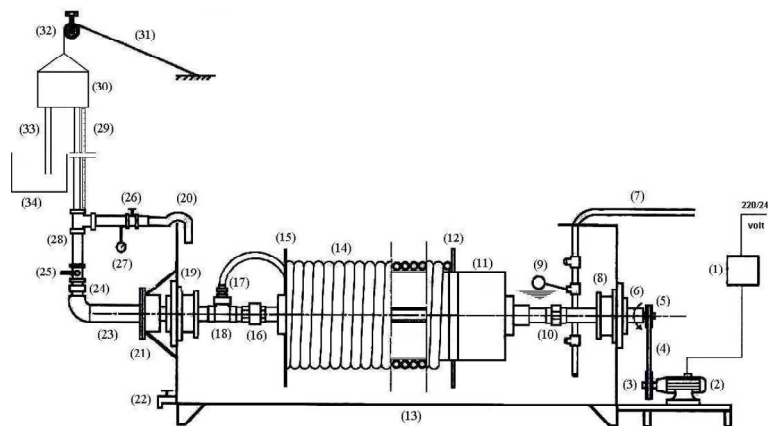


Figura 11: Esquema de la instalación de bomba experimentada por Kassab et al. Fuente: Kassab et al, (2005).

Posteriormente estos mismos autores en el año 2006 decidieron diseñar una bomba de bobina de múltiples capas y determinaron su rendimiento bajo condiciones de diseño variables. Ellos estudiaron los efectos del uso de múltiples capas de tubería enrollada, de las posiciones de entrada y salida de la bomba de múltiples capas, del diámetro interior de la manguera y del diámetro del tambor. Demostraron que se obtenían los mejores rendimientos para los casos de bomba de bobina de tres capas, al colocar la entrada de la bomba en el extremo superior y al aumentar el diámetro interior de la manguera en espiral y/o el diámetro exterior del tambor (Kassab et al., 2005).

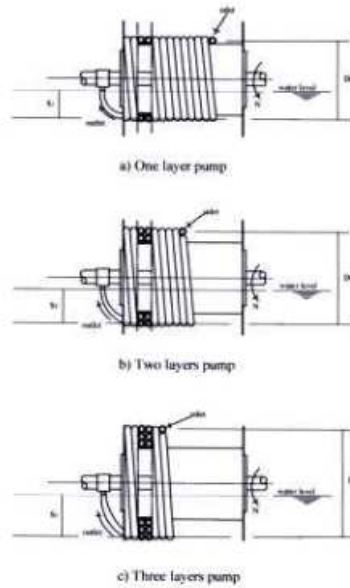


Figura 12: Esquema de la disposición de las multicapas experimentado por Kassab et al.

Fuente: Kassab et al, (2005).

Para completar aún más sus aportaciones, continuaron con sus estudios de la bomba centrándose en el análisis de nuevos parámetros que podían afectar al rendimiento de la bomba de bobina, como el efecto de la inclinación de línea central de la bomba, el efecto de la forma cónica del tambor, y el efecto de la orientación de la línea central de la bomba debido a las ondas de corriente en los ríos y lagos (Kassab et al., 2006).

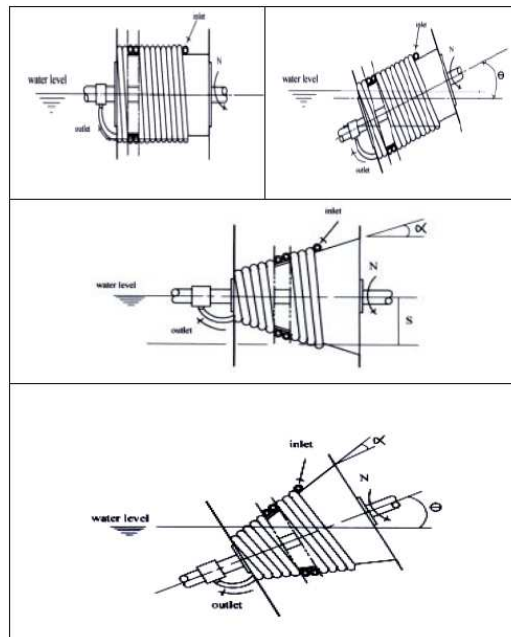


Figura 12: Esquema de la experimentación de inclinación de la bomba y forma cónica del tambor. Fuente: Kassab et al, (2006)

Durante actividad de un proyecto de desarrollo llevado a cabo por las ONG WUSC Y UNITIERRA en Malawi, con el objetivo de aumentar la capacidad de los agricultores para mejorar su acceso a los mercados, elevando así su nivel de ingresos, Peter Jacobs voluntario de la ONG UNITIERRA se encontró con el problema de las condiciones climáticas específicas del lugar en el cual, no había lluvia ni en la estación seca ni en la época de lluvias ya que se encuentra en una zona de sombra pluviométrica, pero sin embargo el río Shire llevaba agua durante todo el año. Con el fin permitir aprovechar esta agua para proporcionar agua de riego, aumentar la seguridad alimentaria, mejorar el acceso al agua para las comunidades y proporcionar oportunidades de agricultura rentable, se dedicó a buscar una solución eficaz y respetuosa con el medio ambiente. Peter Jacobs encontró esta solución en la construcción de una bomba de espiral. Su prototipo fue construido con materiales de la zona y gracias a la participación de los lugareños. Este prototipo se basaba en una rueda de un diámetro de 2 metros con 16 paletas de aluminio a la que se unieron 2 espirales de 50 metros de tubería HDPE de 40mm de diámetro exterior y cada una con una toma de entrada de tubería de PVC de 110 mm. Toda esta rueda se unió a una plataforma flotante construida con piezas de metal soldadas y 4 bidones de acero como elementos flotantes, tal como se muestra en la figura 13. La capacidad de bombeo estimada de este prototipo fue de aproximadamente un litro por segundo es decir de aproximadamente 80.000 litros por día. (Jacobs, 2007).



Figura 13 y 14: Bomba de espiral construida en Malawi. Fuente: Jacobs, (2007)

Otro caso similar al anterior se dio durante los años 2009-2010. Debido a la inaccesibilidad del suministro de agua para determinados residentes y a los diversos ataques por los cocodrilos al intentar acceder a esta agua a las orillas del río Zambezi (Zambia) y a la falta de recursos, un grupo de estudiantes de ingeniería de la Universidad de Seattle por petición de el párroco de Chirundu (Zambia), decidieron construir una bomba de bobina accionada por una rueda hidráulica, hecha con materiales de la zona. En total se construyeron 3 prototipos. El primer prototipo que se construyó (figura 15) consiguió bombear un caudal de 30 l/min a una altura de 12 m. Este duró poco, pues a los tres días del regreso de los ingenieros a Seattle los tornillos de la plataforma de flotación se perdieron provocando el fallo de la bomba. (Thompson et al., 2011).



Figura 15: Primer prototipo. Fuente: Thompson et al, (2011)

El segundo prototipo (figura 16) lo realizó el equipo de residentes de Chirundu que ayudó con el primer prototipo a los estudiantes. Estos le añadieron a las partes del primero pontones hidrodinámicos de acero. Este prototipo se rompió a la semana de funcionamiento, al partirse los pernos de unión de la rueda hidráulica con la plataforma de flotación. (Thompson et al. 2011).



Figura 17: Segundo prototipo. Fuente: Thompson et al, (2011)

El último prototipo y por fin válido (figura 18) se construyó con materiales más resistentes y con 12 bobinas de tubería de PVC de 1 pulgada a cada lado de la rueda, para aumentar el caudal descargado. Esta tercera versión consiguió bombear 36 l/min a un depósito de almacenamiento de 6500 l de capacidad a una altura de 10 m sobre el nivel del río. (Thompson et al., 2011).



Figura 18: Tercer Prototipo. Fuente: Thompson et al, (2011)

Otras aportaciones científicas a la historia de esta bomba:

Las investigaciones anteriores han generado el interés de algunos estudiantes en usar y estudiar este tipo de bombas en los trabajos fin de carrera de sus respectivas especialidades. Algunos de estos son.

Proyecto en el diseño y posterior rediseño de un sistema de bombeo usando bombas con energía alternativa para proveer de agua a una zona agropecuaria del municipio de Socorro en Colombia, (Sanmiguel. y Andrés, E. 2012) y (Camacho, y Torres, 2010).

Otro proyecto realizado en Malasia de revisión y construcción de la Sling-Pump para observar la viabilidad y eficacia de su aplicación en las áreas remotas de la costa este de la península de Malasia, donde el acceso a la red eléctrica es complicada (Ramli et al., 2013).

2.3 Componentes de una instalación con bomba de bobina

Una instalación de una bomba de bobina es muy simple, aunque puede variar su configuración ya que esta bomba puede ser accionada de diversas formas. A parte de la propia bomba, los componentes de este tipo de instalación son:

Manómetro: No es indispensable pero sirve como indicador a la salida de la bomba, para saber a qué altura se está bombeando (número 21 en la figura 24).

Válvula anti-retorno: Inmediatamente después de la bomba para evitar un flujo invertido (número 16 en la figura 24).

Junta rotativa: Uno de los componentes más importantes, es el que permite el giro de la bomba aislando el resto de la instalación. Consta de dos partes, una móvil unida al lado de la bomba y otra fija unida al otro lado de la instalación. Dependiendo de su lugar de instalación, puede considerarse también como un elemento de la propia bomba (número 17 en la figura 24).

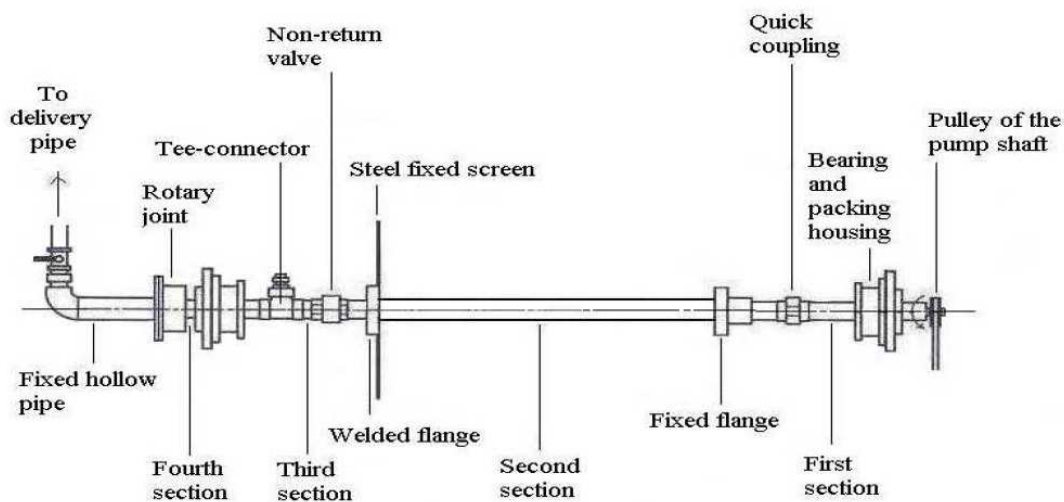


Figura 19: Detalle de una instalación y eje de la bomba de laboratorio: Fuente: Kassab et al., (2005)

Tubería de suministro: Unida a la parte fija de la unión rotativa, distribuye el agua a su destino (número 28 en la figura 24).

Válvula reguladora de presión: Es un componente importante cuando la instalación está conectada a elementos que pueden cerrarse, como es el ejemplo de un bebedero con válvula de flotador. En el caso en que la válvula de flotador no deje pasar el flujo, la presión se irá acumulando en la instalación ya que el bombeo de este tipo de bombas es continuo. Cuando se llega a cierta presión de consigna, esta válvula abrirá liberando agua y por tanto presión de vuelta a la corriente. Esta válvula se instala en la tubería de impulsión.



Figura 20: Vista de la válvula reguladora de presión en una Sling Pump. Fuente: Brown, (2006)

Anclaje: Esta parte de la instalación es la que mantiene a la bomba en la parte activa de la corriente y evita que la bomba se pierda aguas abajo ya que al ser accionada por esta, acabaría desplazándola lejos del punto de bombeo. Existen varios tipos de disposición o de anclaje.

Brazo: Desde una de las orillas del cauce. Se basa en un poste de un material resistente y de tamaño ajustable, unido fijamente a una orilla en un extremo y a la bomba en el otro, manteniendo en la posición correcta a la bomba. Este puede estar unido a la bomba mediante la unión rotatoria, o a la tubería de impulsión en el caso de que la bomba sea accionada por una rueda palas que no cuenta con elementos de flotación (figura 21). Mantiene vertical a este último tipo de bomba. En este caso es aconsejable que el brazo pivote sobre el punto fijo de la orilla y que este acompañado por un soporte de altura ajustable (figura 21), el cual permite que la bomba pueda amoldarse a las subidas y bajadas de nivel del cauce.

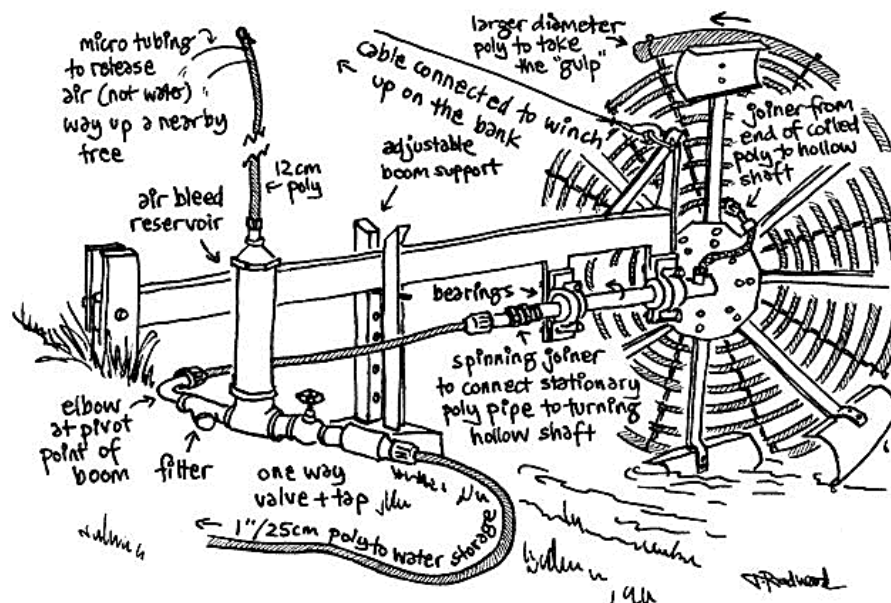


Figura 21: Esquema de una instalación de una Water-Wheel sin elementos de flotación.

Fuente: Extraído de <http://www.earthgarden.com.au/waterwheel.html>

En el caso de la Sling-Pump, y para el caso de una bomba de bobina accionada por una rueda de palas con elementos de flotación, este brazo se une a la bomba mediante una sierra o cuerda, sirviendo únicamente como elemento de retención (Figura 22).



Figura 22: Imagen de una sling-pump sujeta por brazo y sierra. Fuente: Brown, (2006)

Cuerda o cabo: Como su nombre indica se basa en la sujeción de la bomba mediante la unión con uno de estos elementos a cualquier estructura fija fuera de la corriente como puede ser un puente (figura 23), orilla, etc.



Figura 23: Imagen de una sling-pump sujeta por un cabo a un puente. Fuente: Brown, (2006)

Algunos de estos elementos podrían solo corresponderse a una instalación de pruebas de laboratorio, y ser omitidos en una instalación de la bomba en el lugar real de trabajo.

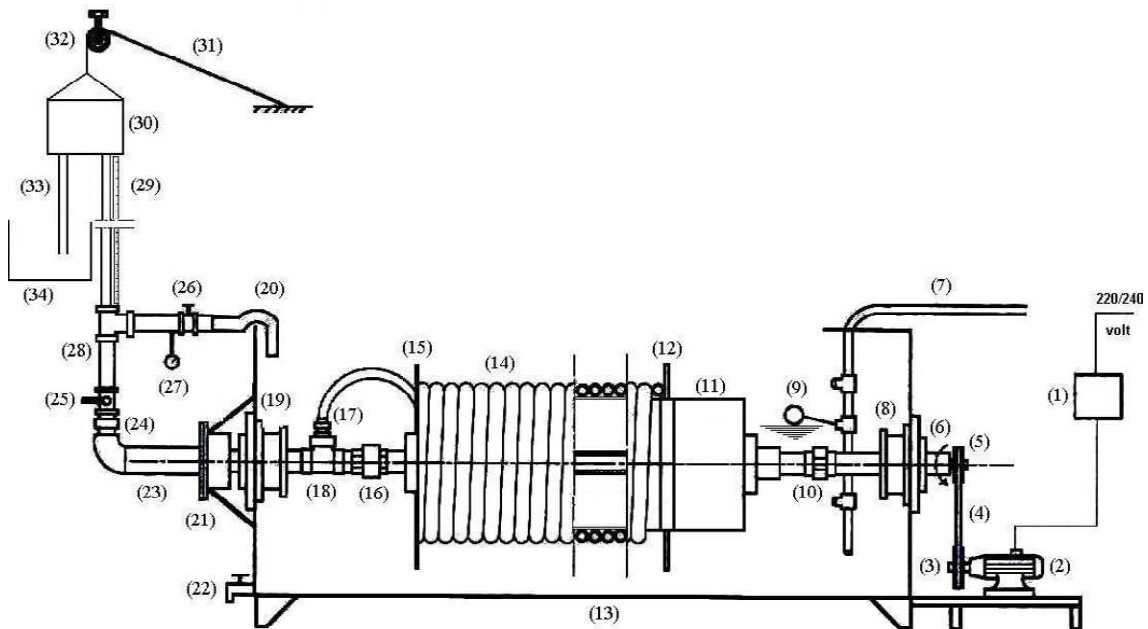


Figura 24: Esquema la instalación de una bomba de laboratorio. Fuente: Kassab et al., (2005)

Depósito: Elemento de recogida del agua que se bombea. Puede estar presente en la instalación o simplemente ser omitido si se bombea directamente a un punto de consumo u otros (número 30 en la figura 24).

Para una correcta instalación se requieren ciertas condiciones del entorno, entre ellas:

- Velocidad del flujo suficiente como para accionar la bomba
- Calado suficiente para poder sumergir la bomba a la profundidad deseada

Los valores numéricos de estas condiciones se pueden controlar o variar con el dimensionado de la bomba y su sistema de accionamiento, pero también en otros casos se puede controlar el calado y velocidad mediante el uso de elementos que contraigan el flujo. Esto es posible o es más viable en el caso del uso de la bomba en una estructura no natural como puede ser el caso de un canal o acequia.

2.4 Componentes de una bomba de bobina

Como hemos observado anteriormente en la existencia de diferentes resoluciones históricas para la fabricación de este tipo de bombas, podemos afirmar con cierta seguridad que la bomba de bobina puede dividirse en dos modelos generales, dependiendo de su elemento de accionamiento. Por lo tanto en base a este criterio los dos diseños generales son la Water-Wheel (accionada por una rueda hidráulica, noria o rueda de paletas) y la Sling-Pump o Loop-Pump (accionada por una hélice).

Estos dos modelos comparten algunos componentes pero difieren en otros y en el diseño en sí de todos estos.

2.4.1. Componentes de una water-wheel

Este modelo puede albergar a su vez otros dos dependiendo si el eje de giro es vertical u horizontal. A pesar de esto a continuación se ha centrado en la descripción de este segundo, debido a que es más utilizado y a la exclusiva existencia puntual del primero y su escasa información.

Para una rueda accionada desde el centro de la corriente de agua, sus componentes son (ver figura 25):

Rueda de palas o noria: Supone el cuerpo principal de este tipo bomba. Está compuesta por radios que salen del eje de giro a los cuales se les une a cada uno, un elemento a modo de pala o remo que será accionado por la fuerza del agua. Es la parte que sirve como motor para accionar la bomba. Las palas se colocan con su superficie de ataque perpendicular a la corriente.

Flotadores o dispositivo de flotación. Su función es mantener la bomba a flote y sumergida una profundidad específica para permitir que tome alternativamente agua y aire en cada revolución.

Tubería en espiral: Es elemento más importante, es el elemento donde se produce el bombeo o desplazamiento del agua. Consta de una tubería de cualquier material flexible, que se enrolla y está fijada de manera diferente alrededor de la estructura de la noria en función del diseño elegido. Su extremo inicial está abierto a la atmosfera

componiendo la toma de entrada de la bomba, y su extremo final está unido al eje de la bomba o a la tubería de impulsión mediante la junta rotatoria.

Toma de entrada: Puede ser simplemente una prolongación de la tubería de espiral o un acople especial de mayor diámetro para captar más cantidad de agua. La bomba puede constar de una o varias.

Eje de la bomba: El eje de la bomba debe permitir el giro del conjunto de las bobinas, pero además debe permitir el flujo de agua a través de él. A este se le une la junta rotatoria que posteriormente dará salida a la tubería de impulsión.

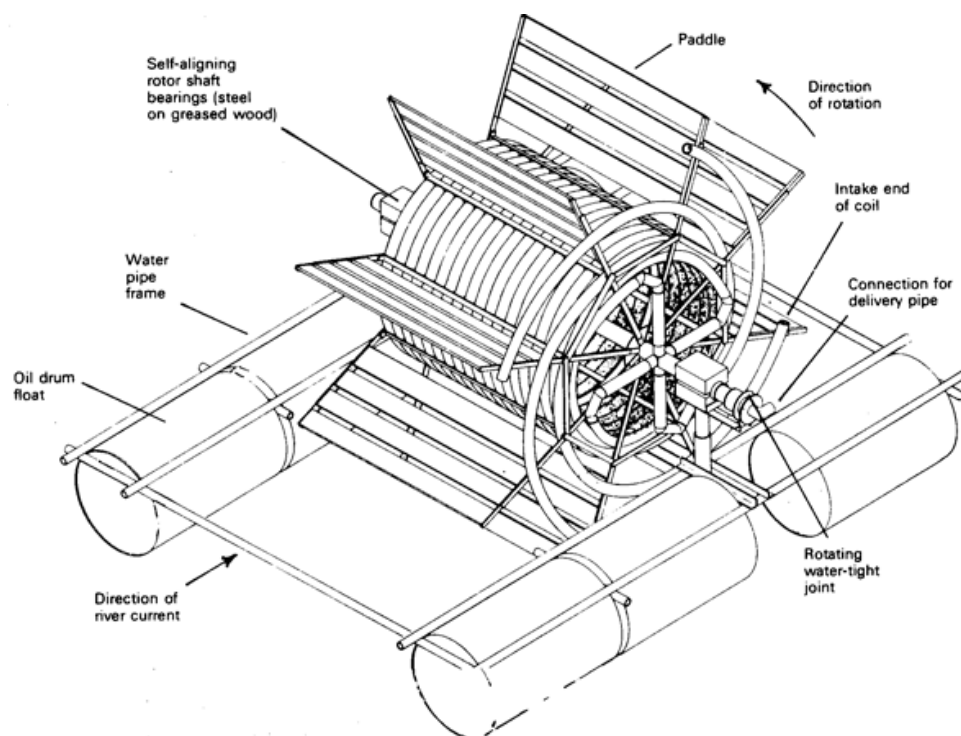


Figura 25: Esquema de una coil pump accionada por Water-Wheel. Fuente: FAO, extraído de <http://www.fao.org/docrep/010/ah810e/ah810e12.htm>

2.4.2. Componentes de una Sling-pump

Hélice: Elemento que transmite el movimiento de la corriente de agua a la bomba para accionarla (número 8 en la figura 26).

Tambor: Elemento de soporte y donde se une y enrolla la tubería en espiral permitiendo precisamente la generación de esta forma. En el caso de la Sling-Pump la forma más utilizada es la troncocónica aunque se podría también construir con forma cilíndrica.

Material de flotación. Su función es contrarrestar el peso de la bomba para mantenerla sumergida en un 50% aproximadamente (número 7 en la figura 26).

Toma de entrada: Al igual que la bomba anterior, puede ser simplemente una prolongación de la tubería de espiral o un acople especial de mayor diámetro. Esta bomba suele constar solo de una, aunque es una opción de diseño (número 2 en la figura 26).

Placa de entrada: Placa perforada que permite el paso del agua a la toma, pero que actúa de filtro frente a los posibles partículas suspendidas o flotantes que pudieran obturar la entrada de la bomba (ver figura 27).

Tubería en espiral: La tubería es el elemento donde se produce el bombeo o desplazamiento del agua. Consta de una tubería de cualquier material flexible, que se enrolla alrededor del interior del tambor y se orienta en su extremo final de manera perpendicular a la superficie de la cara más pequeña del tambor (número 3 en la figura 26).

Eje de la bomba: El eje de la bomba debe permitir el giro de todo el conjunto formado por bobina, hélice, tambor. En este caso no tiene como tal si no que gira sobre el propio eje de la hélice o sobre la junta rotatoria en función de donde se coloque esta última (número 5 en la figura 26).

Junta rotatoria: Es el elemento que permite aislar el giro de la bomba del resto de la instalación. Puede estar incluida dentro de la bomba o en el punto de la instalación siguiente a la bomba (número 4 en la figura 26).

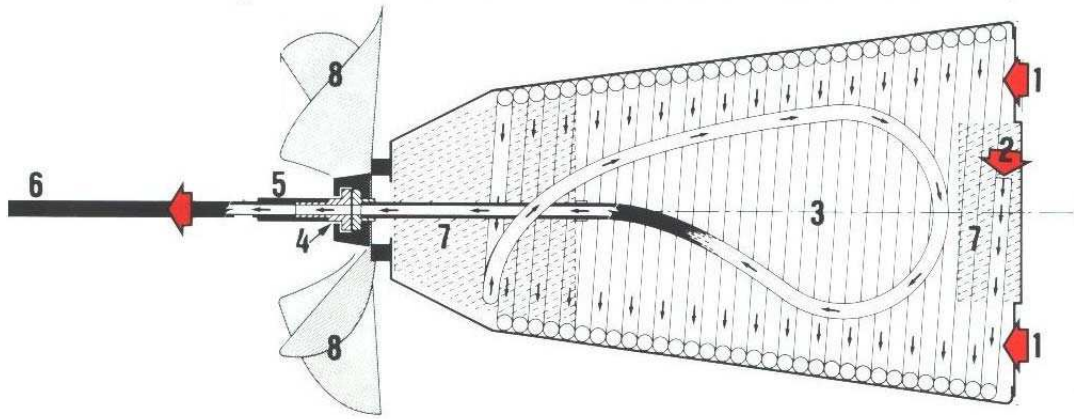


Figura 26: Dibujo esquemático de los componentes de la Sling-pump. Fuente: Brown, (2006)



Figura 27: Vista interior del tambor de la Sling-pump Fuente: Brown, (2006)

Las uniones de los diferentes elementos que componen tanto la instalación como cualquier tipo de las bombas vistas anteriormente son muy variables, dando por ello una multitud de posibilidades para su ejecución ya que estamos hablando de una tecnología que hasta la fecha no ha sido comercialmente importante y por tanto no tiene un proceso de fabricación ni mecanizado ni normalizado.

2.5 Funcionamiento de la bomba de bobina

A continuación se va a describir y explicar tanto el funcionamiento de la bomba, como los fenómenos particulares y específicos asociados a este.

2.5.1 Principio básico de funcionamiento

La bomba se introduce en la corriente de agua que va ser bombeada de tal manera que la tubería en espiral quede sumergida en un porcentaje buscado. La fuerza de la corriente mueve el elemento de accionamiento de la bomba, es decir mueve las palas de la noria o las alas de la hélice. Al girar el elemento de accionamiento, este a su vez transmite el giro a la estructura de la bomba a la cual está unida la tubería en espiral (tambor en la sling-pump o la propia noria en la water-wheel).

Este giro de la espiral provoca que su extremo abierto se sumerja en el agua y salga de ella en cada revolución.

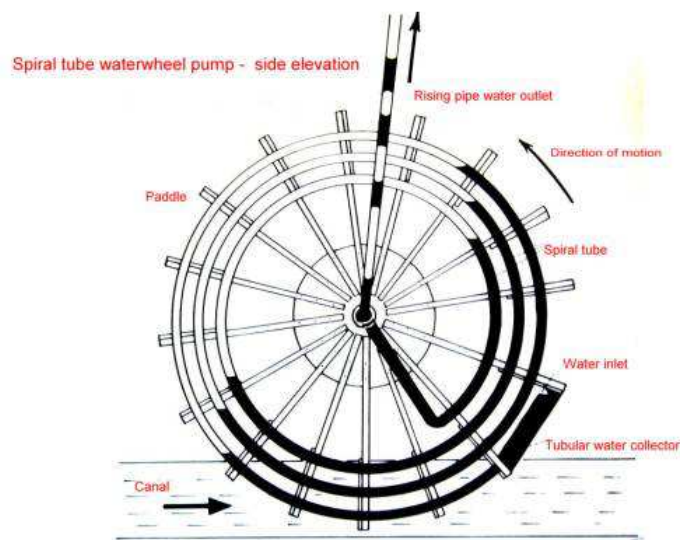


Figura 28: Diagrama de una whater-Wheel. Fuente: extraído de <http://lurkertech.com/water/pump/morgan/tripod/>

Durante la parte de cada revolución en que el extremo abierto del tubo en espiral está sumergido, el agua fluye al interior de dicho tubo en virtud de la carga hidrostática del agua. A medida que el extremo abierto emerge y se eleva por encima del nivel del agua, el agua que ha entrado en el serpentín a través del extremo abierto queda retenida dentro de este.

Por otra parte, como la tubería en espiral continúa girando, el agua retenida dentro de la tubería se moverá a lo largo de la misma en virtud de la acción de la forma de tornillo de dicho tubo y debido a que el agua retenida buscará el equilibrio hidrostático dentro de la mitad inferior de cada espiral de la tubería enrollada.

Paralelamente durante el tiempo en que el extremo abierto del tubo está por encima del nivel del agua, el aire se introduce en este también. De esta manera en cada vuelta o espiral de la bobina el agua quedará retenida en su parte inferior y el aire en su parte superior (observar disposición en figura 28) componiendo lo que conocemos como un manómetro de tubo en U.

Continuando la rotación, siempre que sea en la dirección correcta, se repite el proceso haciendo que un tapón de agua permanezca atrapado dentro de cada vuelta sucesiva del conducto helicoidal entre dos tapones de aire. Esto crea, en efecto, un sistema de manómetros de tubo en U conectados en serie capaces de oponerse a una presión o altura igual a la suma algebraica de las columnas hidrostáticas producidas por el desplazamiento del agua dentro de cada vuelta de la bobina.

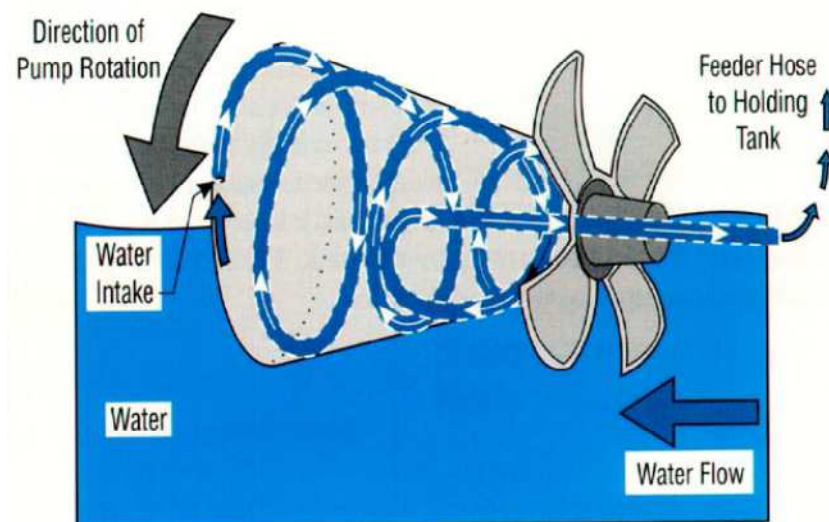


Figura 29: Esquema de una Sling Pump. Fuente: Prairie Agricultural Machinery Institute, (1995)

La rotación continua de la bobina hace que los tapones alternos de agua y aire avancen por las sucesivas vueltas y sean forzados desde la última vuelta de hélice al eje de rotación de la bomba, posteriormente a la tubería de descarga y de esta al depósito o lugar de elevación. En este punto (tubería de suministro), los segmentos

sucesivos de aire y agua ya no pueden actuar como manómetros de tubo en U, eliminándose su acción eficaz, pero cada vez que un manómetro efectivo se pierde a medida que avanza en la tubería de descarga, un nuevo manómetro se ha formado en la primera vuelta de la bobina helicoidal. Esta acción mantiene en existencia un número constante de manómetros de tubo en U.

Para entender de una manera sencilla el funcionamiento de esta bomba se tiene que recurrir al estudio de dos mecanismos o aparatos de medida de presión de fluidos, que se muestran en los dos siguientes apartados.

2.5.2. Manómetro de tubo en U

Un manómetro de tubo en U es un instrumento para medir la presión de un fluido, que requiere la participación de dos fluidos. Este manómetro se basa en un tubo con dos ramas (en forma de U, ver figura 30) una de ellas conectada a un primer fluido del que se quiere medir la presión y la otra en contacto o abierta a la atmosfera. El segundo fluido más denso que el que quiere ser medido, se introduce en el interior del tubo y sirve como elemento de sellado y a su vez de medida.

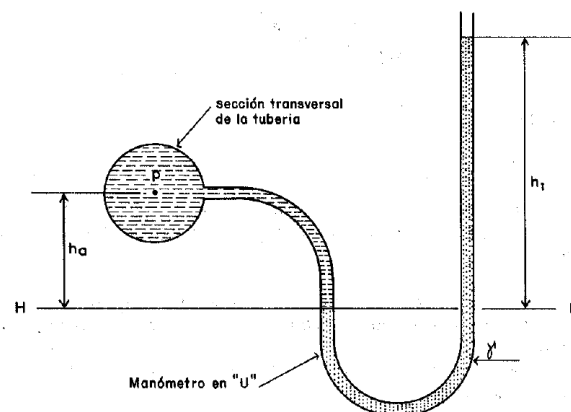


Figura 30: Manómetro de tubo en U. Fuente: extraído de <http://www.bvsde.paho.org/sde/ops-sde/bvsde.shtml>

El fluido de sellado en su estado de equilibrio se mantendrá al mismo nivel en ambas ramas del tubo en U, siempre que no se exista la aplicación de ninguna presión o una diferencia de presión entre el fluido a medir y la atmosfera. Cuando se aplica un presión al fluido a medir o existe cierta diferencia de presión con la atmosférica, el liquido de sellado se desplazará, creando una diferencia de cota o altura entre las dos superficies de dicho fluido en cada rama del manómetro. Esta diferencia es

proporcional a la presión aplicada o diferencia de presión y por tanto a la presión relativa del primer fluido. Este manómetro cumple la siguiente ecuación:

$$p = \gamma h \quad (1)$$

Donde γ es el peso específico del fluido y h la diferencia de alturas entre las superficies del fluido de sellado.

Se pueden conectar dos o más manómetros en serie generando una cascada de manómetros de tubos en U (figura 31).

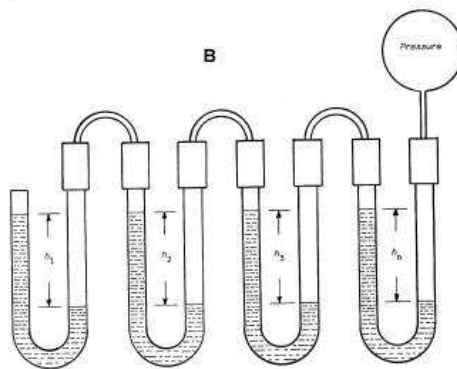


Figura 31: Manómetro de tubos en U en serie. Fuente: Belcher, (1990)

Como se ha explicado con anterioridad, una bomba de espiral se comporta en su forma más simple como una serie de manómetros en U conectados entre sí. La bobina o espiral desenrollada equivale a este tipo de manómetro (Mortimer y Annable, 1984) (figura 32).

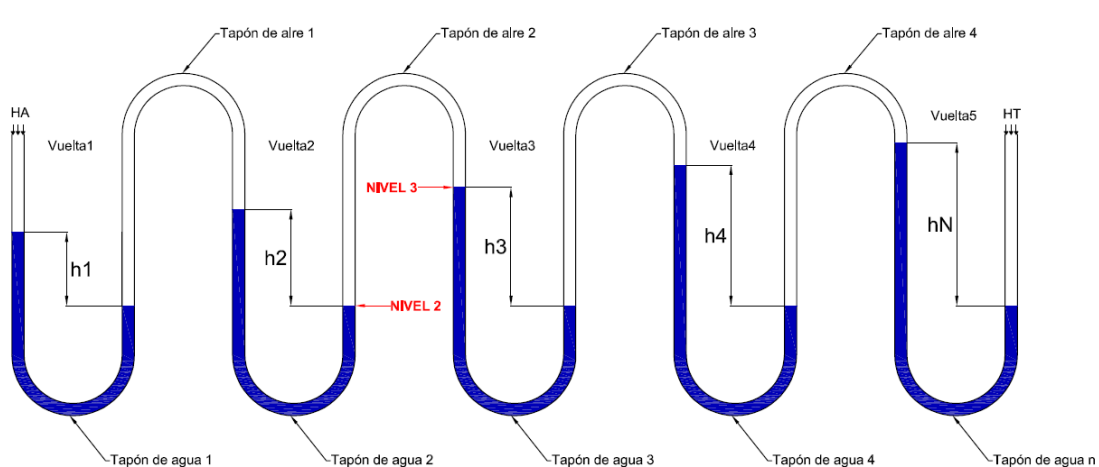


Figura 32: Esquema de la bobina desenrollada. Fuente propia

Por tanto atendiendo a la ecuación de este manómetro la cual nos dice que una presión aplicada a través del grupo de tubos en U será igual a la suma algebraica de las columnas hidrostáticas o alturas en cada uno de los tubos en U, multiplicado por el peso específico del fluido de sellado. La ecuación 1 se puede ampliar de la siguiente manera:

$$p = \gamma h_1 + \gamma h_2 + \gamma h_3 + \dots + \gamma h_n \quad (1)$$

Suponiendo que todos los líquidos de sellados son de la misma naturaleza y en nuestro caso concreto agua con la nomenclatura usada en la figura 32;

$$H_T - H_A = h_1 + h_2 + h_3 + \dots h_N \quad (2)$$

Donde H_T es la altura de presión absoluta en la salida, H_A es la altura atmosférica, N es el número de bobinas o bucles manométricos.

2.5.3. Manómetro de balanza en anillo

Este instrumento es una variante del manómetro de tubo en U pero transformando este último en un anillo partido. Este manómetro se hace pivotar en el centro de circunferencia del anillo permitiendo el giro de todo el conjunto en este punto (figura 33). Diametralmente opuesto a la partición este manómetro posee un peso de masa conocida. Al igual que en el manómetro en U, el tubo se llena parcialmente con un líquido de sellado.

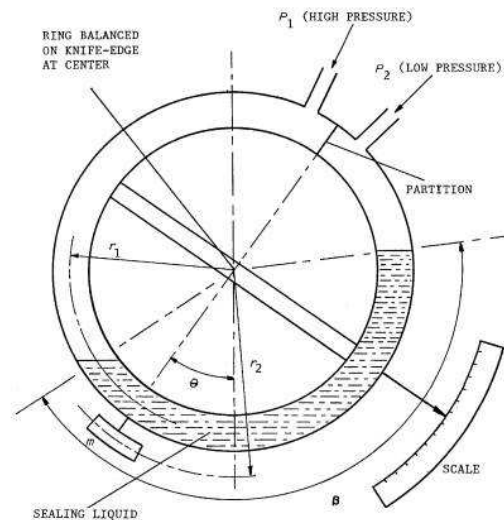


Figura 33: Manómetro de balanza de anillo: Fuente: Belcher, (1990)

Cuando se aplica una diferencia de presión a través del tubo anular, el líquido de sellado será desplazado lejos de la fuente de alta presión, al igual que en un manómetro de tubo en U. Sin embargo, la masa del líquido por el hecho de ser desplazado producirá un momento de giro, haciendo que el tubo anular gire sobre su centro. Este a su vez al girar, moverá el peso fuera de la línea vertical del pivote para producir un momento de giro opuesto, hasta que alcanzan un punto en el equilibrio ambos momentos. La presión aplicada entonces se convierte en una función del grado de rotación y se puede leer directamente de una escala adecuada.

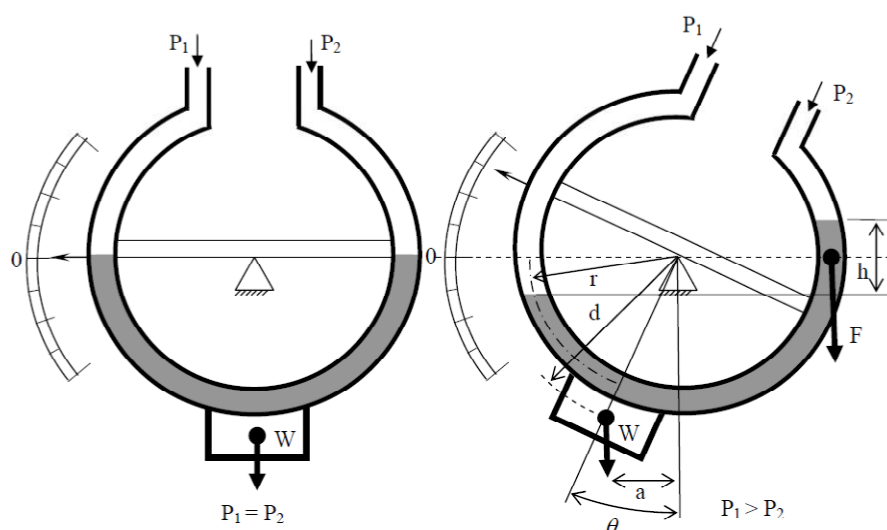


Figura 32: Detalle de funcionamiento de manómetro de balanza de anillo: Fuente: extraído de http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/djean/index_archivos/Instrumentacion.html

Según Belcher podemos transportar todo esto a nuestra bomba. Como el agua en cada vuelta se desplaza lejos de la fuente de presión, existe por lo tanto una masa de agua desplazada permanentemente a un lado del eje de rotación, produciendo un momento de giro bajo el efecto de la gravedad. En el caso de la bomba este momento de giro constituirá la carga mecánica de la bomba (Belcher, 1995).

Sabiendo esto, se pueden aplicar las ecuaciones asociadas a este aparato a nuestra bomba. Las cuales son:

$$\text{Momento rotatorio} = (p_1 - p_2) \cdot A \cdot r_1 \quad (3)$$

$$\text{Momento estabilizador} = mgr_2 \cdot \sin \theta \quad (4)$$

$$(p_1 - p_2) \cdot A \cdot r_1 = mgr_2 \cdot \sin \theta \quad (5)$$

$$p_1 - p_2 = \frac{mgr_2}{Ar_1} \times \sin \theta \quad (6)$$

Siendo en las ecuaciones anteriores p_1 la presión alta, p_2 la presión baja, A el área de la sección transversal del tubo, r_1 el radio medio del anillo, m la masa unida a la parte inferior del anillo, r_2 el radio del punto de aplicación de la masa, θ el ángulo de rotación, y g es la constante de aceleración de la gravedad (ver figura 31).

Usando las ecuaciones 1 y 4, para la resolución de par y la potencia. El par

$$T = F \cdot r \quad (7)$$

Sustituyendo la fuerza por el producto de la diferencia de presiones y el área interna de la tubería y volviendo a la ecuación 6, y considerando que r_1 sea igual a r_2 y el seno $\theta=1$, entonces esta ecuación puede simplificarse de la siguiente manera (Belcher, 1995):

$$(p_1 - p_2) = \frac{mg}{A} \quad (8)$$

$$(p_1 - p_2) \cdot A = mg \quad (9)$$

Por lo tanto, esto hace posible sustituir en la ecuación 3 los términos de peso específico y de distancia vertical h de la ecuación 1 y T se convierte entonces en el momento o par de rotación:

$$T = y h A r_1 \quad (10)$$

Y si N se representa en rpm y el par T en kg·m entonces la potencia en caballos resultante de la bomba según Alan Belcher es:

$$HP = \frac{2\pi \cdot NT}{4500} \quad (11)$$

Las bombas de bobina constan de varias vueltas de tubería. La situación se rige, en parte, por las ecuaciones 2 y 3, pero, además de las variaciones de altura, el área de sección transversal también puede cambiar en algunos casos en cada vuelta por motivos de diseño. Estos factores hacen que la validez de la ecuación 10 está restringido a una sola vuelta de la bobina, mientras que por otro lado la ecuación 11, puede resolver para múltiples vueltas, siempre que T represente la suma algebraica de los pares desarrollados en cada vuelta individual en el conjunto (Belcher, 1995).

A continuación se explica las conclusiones a la que llegaron (Mortimer y Annable, 1984) para explicar el comportamiento interno de los tapones de agua y aire, así como para poder calcular las alturas de presión desarrolladas dentro de las espirales.

2.5.4. Los tapones de aire en la bomba de bobina

Los tapones de aire entran en la bomba en cada revolución cuando la toma de entrada barre la zona sobre la superficie del agua provocando que este flujo sea intermitente. Estos tapones de aire se comprimen por la variación de la presión desde la toma de la bomba hasta la tubería de impulsión.

Observando en la figura 34, el tapón de aire 2 que está limitado por los dos niveles del agua llamados 2 y 3 antes de considerar los efectos de compresión. El aumento de la

presión de aire H_2 causará una contracción del tapón de aire y le seguirá un aumento en el nivel ya sea en 2 o 3.

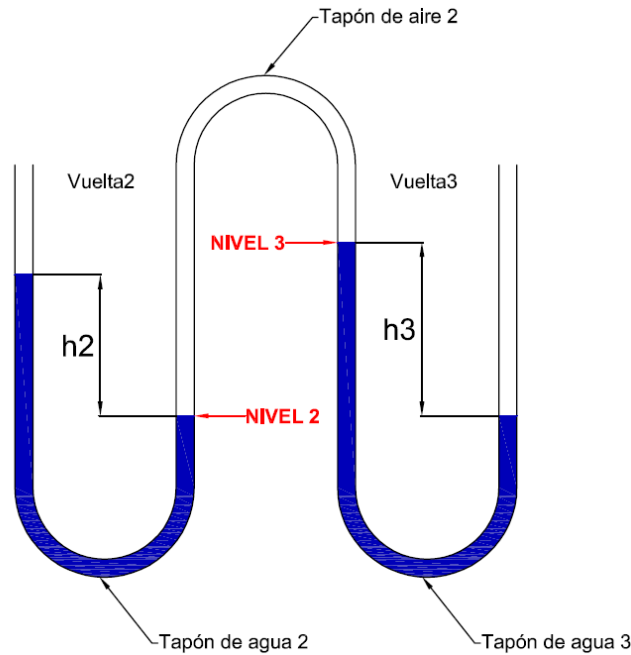


Figura 34: Detalle del tapón de aire 2. Fuente propia

Un aumento en el nivel 2 reduciría la diferencia de presión a través de la vuelta de la bobina, y si esto se aplica a todas las bobinas, la bomba no podría funcionar. Se asume por lo tanto un aumento en el nivel 3, para todas las vueltas de la bobina. Este aumento en la columna de agua por el aumento de la presión es la base de funcionamiento de la bomba.

Para los cálculos de las longitudes de los tapones de aire en la bomba Mortimer y Annable sugieren como válido que $P \cdot V^K = \text{constante}$, y también que el exponente $K=1.15$ donde P es la presión absoluta en el tapón de aire y V es el volumen del tapón.

$$P_1 \cdot V_1^{1.15} = P_1 \cdot V_1^{1.15} \quad (12)$$

Suponemos que la tubería en espiral es la misma durante toda la bomba y por tanto su diámetro es constante entonces:

$$H_A \cdot L_A^{1.15} = H_n \cdot L_{A.n}^{1.15} \quad (13)$$

$$LA - LA \cdot n = LA \cdot \left(1 - \left(\frac{H_A}{H_n}\right)^{0.87}\right) \quad (14)$$

2.5.5. Movimiento de los tapones de aire y agua

Un tapón de aire que se desplaza desde la entrada a lo largo de la tubería llegará a ser comprimido por el aumento gradual de presión hacia la salida, por lo que en cada punto de la tubería habrá una longitud diferente de tapón de aire asociado a este, esto hace que la altura de agua se incremente de manera gradual en cada vuelta.

Para los tapones de agua se puede asumir un argumento similar, pero con la diferencia de que la variación en la longitud del tapón está causada por el movimiento del agua de un tapón al siguiente (véase la apartado 2.5.6).

Para poder explicar el comportamiento de estos dos fluidos en el interior de la bomba, se considera la rotación de la bomba y se visualiza la bobina helicoidal como una tubería recta estacionaria con los tapones de aire y agua moviéndose a lo largo de ella. Esta disposición podemos verla en la figura 35, donde se muestra la posición de un conjunto de tapones en el tubo de la bobina, en el tiempo t_1 donde los números de los tapones W.2, A.2 etc. son sólo de identificación, mientras que las longitudes de tapón LW.1, LA.1, etc. están referidas a posiciones fijas en la tubería. (Mortimer y Annable 1984).

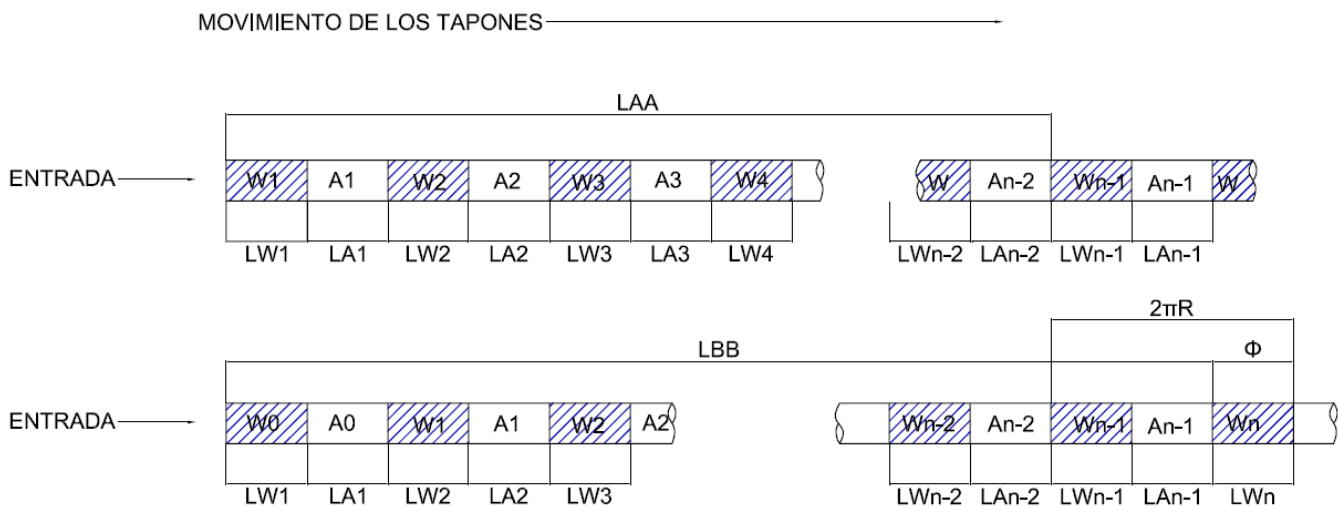


Figura 35: Movimiento de los tapones: Fuente: Mortimer y Annable, (1984)

Si observamos en la figura 35 la distancia desde la entrada de la tubería hasta el lado de entrada del tapón de agua **W_n**:

$$L_{AA} = LW.1 + LA.1 + LW.2 + LA.2 + \dots LW.n - 2 + LA.n - 2 \quad (15)$$

Esta situación se da cuando $t=t_1$.

Si exactamente transcurre una revolución de la bobina, es decir cuando el tiempo $t=t_1 + 60/N_s$, (siendo N_s la velocidad de giro de la bobina en rpm), la disposición de los tapones será como se muestra en la parte inferior de la figura 35, habiendo entrado exactamente un nuevo tapón de agua **W₀** y un nuevo tapón de aire **A₀**.

De la figura 35 se saca:

$$L_{BB} = LW.1 + LA.1 + LW.2 + LA.2 + \dots LW.n - 1 + LA.n - 1 \quad (16)$$

Se observa por lo tanto que L_{BB} es la distancia de la entrada a la tubería hasta el lado de entrada de **W_n**, en el instante $t=t_1 + 60/N_s$.

Si se restan las dos distancias $L_{BB} - L_{AA}$ dará la distancia recorrida por **W_n** en una revolución de la bomba desde la posición fija de la tubería **LW_{n-1}** a **LW_n**, y si no se produce ninguna compresión de aire adicional en cualquiera de los tapones de aire durante la revolución entonces $L_{BB} - L_{AA} = 2\pi R$, donde R es el radio de la bobina helicoidal.

Considerando ϕ_n como el movimiento relativo del tapón **W_n** con respecto a la entrada, el cual es causado por la compresión adicional de todos los tapones de aire siguientes durante el movimiento del tapón **W_n** desde la posición en la tubería donde la longitud es **LW_{n-1}** a la posición donde su longitud es **LW_n** entonces

$$L_{BB} - L_{AA} = 2\pi R - \phi_n \quad (17)$$

Aunque sabemos que $2\pi R$ es la distancia generada por un tapón de agua y aire que acaban de entrar a la bomba que depende también del porcentaje sumergido de la bomba y que todavía no ha sufrido el fenómeno de compresión

$$2\pi R = LW1 + LA1 \quad (18)$$

Sustituyendo las ecuaciones (15), (16) y (18) en la ecuación (17) se puede calcular el movimiento relativo

$$\phi_n = LW1 - LW.n - 1 + LA1 - LA.n - 1 \quad (19)$$

Si todos los tapones de agua son de la misma longitud (suponiendo incompresibilidad del agua y que no hay derrames de un tapón de agua a otro) entonces la ecuación anterior se convertirá en

$$\phi_n = LA1 - LA.n - 1 \quad (20)$$

Será lo que se ha comprimido un tapón de aire en su trayecto de **LA1** a **LWA.n-1**

Si se llama Δ_n al movimiento relativo del tapón de agua **W.n** respecto de la entrada de la tubería, causado por la compresión de los siguientes tapones de aire durante el movimiento de **W.n** desde la entrada de la bomba a la posición en la que la longitud es **LW.n** entonces

$$\Delta_n = \phi_2 + \phi_3 + \dots \phi_n \quad (21)$$

ϕ_1 no existe puesto que **LW0** no existe o es cero. Sustituyendo la ecuación (19) en (20) y ajustando

$$\Delta_{n+1} = \Delta_n + LA - LA.n \quad (22)$$

Se denominan δ_n y δ_{n+1} a los ángulos delimitados en el centro de la bobina por Δ_n y Δ_{n+1} , respectivamente (véase en la figura 38) entonces con la ayuda de la ecuación 14

$$\delta_{n+1} = \delta_n \frac{(L_A - L_{A.n})}{R} = \delta_n + \frac{L_A}{R} \left(1 - \left(\frac{H_A}{H_n} \right)^{0.87} \right) \quad (23)$$

2.5.6. Spillback (Derrame hacía atrás del agua)

A medida que el tapón de agua W.n se mueve a lo largo de la bobina helicoidal, la compresión acumulada de todos los tapones de aire siguientes hace que el extremo de entrada del tapón de agua (**el nivel 2 comentado en la figura 34**) se eleve hasta

que alcanza la corona de la bobina (figura 36). Cualquier otra compresión adicional de los tapones de aire hace que el agua del tapón W_n se derrame a través de A_{n-1} en W_{n-1} (ver figura 35).

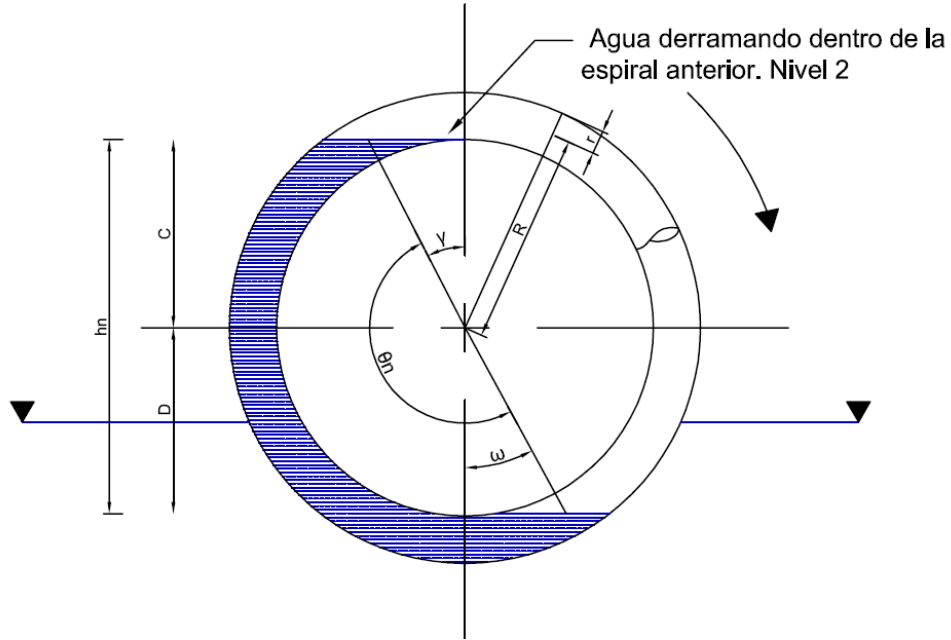


Figura 36: Esquema de nivel del agua en el estado de derramamiento: Fuente: Mortimer y Annable, (1984)

Si la bomba se encuentra en la situación ilustrada en la figura 36, en la cual el agua se vertiendo hacia atrás de W_{n+1} a W_n y a su vez W_n se está derramando en W_{n-1} , entonces los lados de entrada de los tapones W_n y W_{n+1} ambos estarán en el nivel de coronación de la bobina, nivel 2 como se muestra en la figura 36.

Si conforme W_n se mueve desde una posición en la que su longitud es $L_{W,n-1}$ a una posición donde su longitud es $L_{W,n}$, y se está derramando, entonces el movimiento relativo del lado de entrada de este tapón respecto de la entrada será cero, es decir $\phi_n = 0$, pudiendo modificarse la ecuación (19) en:

$$L_{W,n} = L_{W,n} + (L_A - L_{A,n}) \quad (24)$$

Despejando y sustituyendo $L_{A,n}$ de la ecuación (14) obtenemos

$$L_{W,n} = L_{W,1} + L_A \left(1 - \left(\frac{H_A}{H_n} \right)^{0,87} \right) \quad (25)$$

2.5.7. Niveles desarrollados de agua en las bobinas

La presión desarrollada o altura ganada a través del tapón W.n en una vuelta de la bobina que no esté derramando, se muestra como h_n en la figura 37. Es la diferencia de altura entre los extremos de este tapón de agua.

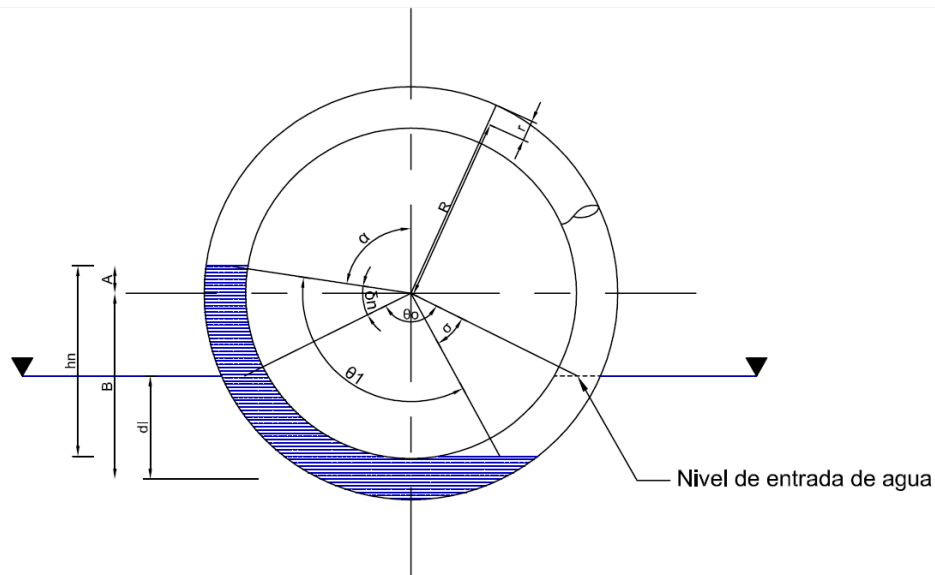


Figura 37: Nivel del agua desarrollado en cada espiral. Fuente: Mortimer y Annable, (1984)

La presión $h_n = A + B$. Distancias que se pueden obtener con la ayuda de las formulas del arco circular en radianes.

$$A = R \times \cos \alpha$$

$$\alpha = \pi(\text{rad}) - \frac{\theta_0}{2} - \delta_n$$

Donde θ_0 es el ángulo generado por el tapón de agua, justo después de que haya entrado en la bomba (figura 38) y en teoría.

$$\theta_0 = \frac{L_{w.1}}{R} = 2 \cdot \cos^{-1} \frac{(R - d_I)}{R} \quad (26)$$

Como se supone que la longitud del tapón de agua es igual a cuando entra, el ángulo generado por sus dos extremos también $\theta_0 = \theta_1$ ver figura 38:

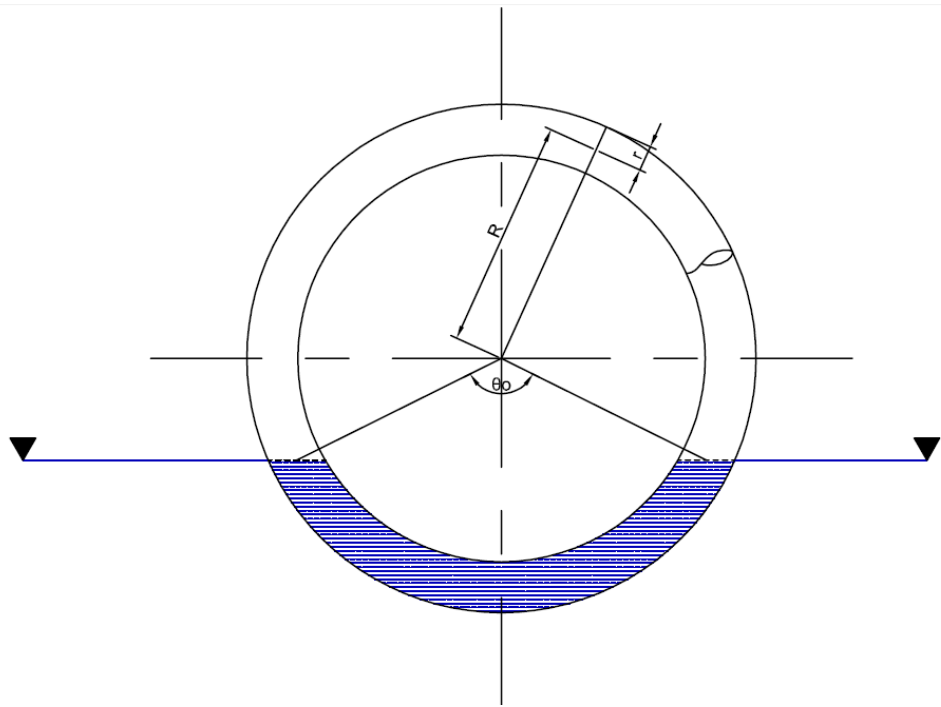


Figura 38: Esquema de la entrada de una bomba. Fuente: Mortimer y Annable, (1984)

Por tanto

$$\alpha = \pi(\text{rad}) - \frac{\theta_1}{2} - \delta_n$$

$$B = R \times \cos\beta$$

$$\beta = \frac{\theta_0}{2} - \sigma$$

Como se ha supuesto antes, al mantenerse la misma longitud el tapón de agua, el arco delimitado por el ángulo δ_n debido al movimiento de dicho tapón con respecto a la entrada causada por la compresión de los tapones de aire, tendrá que ser igual al arco delimitado por σ entre la superficie de entrada y el otro extremo del tapón.

Por tanto $\sigma = \delta_n$ y $\theta_0 = \theta_1$ y entonces:

$$\beta = \frac{\theta_1}{2} - \delta_n$$

Por tanto agrupando y sustituyendo los términos, la altura o presión desarrollada entre los dos extremos de un tapón de agua es:

$$h_n = R \left[\cos \left(\pi - \frac{\theta_1}{2} - \delta_n \right) + \cos \left(\frac{\theta_1}{2} - \delta_n \right) \right] \quad (27)$$

En la ecuación (27) δ_n puede calcularse a partir de la ecuación (28)

Para el otro caso en el que un tapón de agua se está vertiendo hacia atrás, la parte superior del nivel del agua estará cerca de la corona de la tubería. Las fuerzas viscosas ayudarán a "tirar" el agua sobre la corona en el tapón anterior, aunque se supone que el nivel máximo de agua es como se muestra en la figura 36.

De la observación de la figura 36 el derramamiento justo empieza a ocurrir cuando el movimiento de dicho tapón con respecto a la entrada causada por la compresión de los tapones de aire es:

$$\delta_n = \pi(\text{rad}) - \gamma - \frac{\theta_1}{2} \quad (28)$$

Donde

$$\gamma = \cos^{-1} \frac{(R-r)}{R} \quad (29)$$

Por lo tanto el límite para no verter en una bobina anterior es

$$\delta_n < \pi(\text{rad}) - \gamma - \frac{\theta_1}{2} \quad (30)$$

La presión o altura desarrollada a través de un tapón de agua derramándose es $h_n = C + D$, según la figura 36. Por tanto

$$C = R \cos \gamma$$

$$D = R \cos \omega$$

$$\omega = \theta_n + \gamma - \pi(\text{rad})$$

Se agrupan los términos:

$$h_n = R[\cos \gamma + \cos(\gamma + \theta_n - \pi(\text{rad}))] \quad (31)$$

Donde

$$\theta_n = \frac{LW.n}{R} \quad (32)$$

Y $LW.n$ se puede calcular de la ecuación 25

Las ecuaciones (27) y (31) se pueden utilizar para calcular las diferencias de altura a través de todas las bobinas de la bomba, excepto una, en concreto la de los tapones de agua inmediatamente después del primer tapón derramado nombrado como $W.s$. Aquí $W.s$ ha ganado agua por vertido hacia atrás pero no pierde ninguna ya que este no se está derramando. Un tapón en esta situación particular, sólo durará una revolución de la bomba.

La longitud de $W.s$ es

$$LW.s = LW1 + R\left(\frac{\theta_1}{2} + \delta_{s+1} - (\pi - \gamma)\right) \quad (33)$$

Donde δ_{s+1} es la rotación total del primer tapón derramado y

$$R\left(\frac{\theta_1}{2} + \delta_{s+1} - (\pi - \gamma)\right) \quad (34)$$

Es la longitud del agua derramando en $W.s$ hasta el momento en que ocurre δ_{s+1} .

La diferencia de presión a través de $W.s$ es

$$h_s = R\left[\cos\left(\pi - \frac{\theta_1}{2} - \delta_s\right) + \cos\left(\delta_s + \frac{\theta_1}{2} - \theta_s\right)\right] \quad (35)$$

Donde $\theta_s = LW.s/R$ y δ_s es la rotación angular total de $W.s$

Resumiendo, las diferencias de nivel en bobinas sucesivas son calculadas utilizando la ecuación (27) hasta que se produce el spillback (delimitado por la relación 30). Entonces el cálculo de las diferencias de nivel de agua se hace utilizando la ecuación (31) y las diferencia de nivel a través del último tapón W_s entonces, se vuelve a calcular utilizando la ecuación (35).

2.5.8. La tubería de impulsión

El conocimiento del comportamiento de los tapones de aire y agua en la tubería de impulsión se lleva a cabo mejor mediante el análisis de las posiciones de los tapones a intervalos de tiempo regulares para una revolución de la bomba (Mortimer y Annable, 1984).

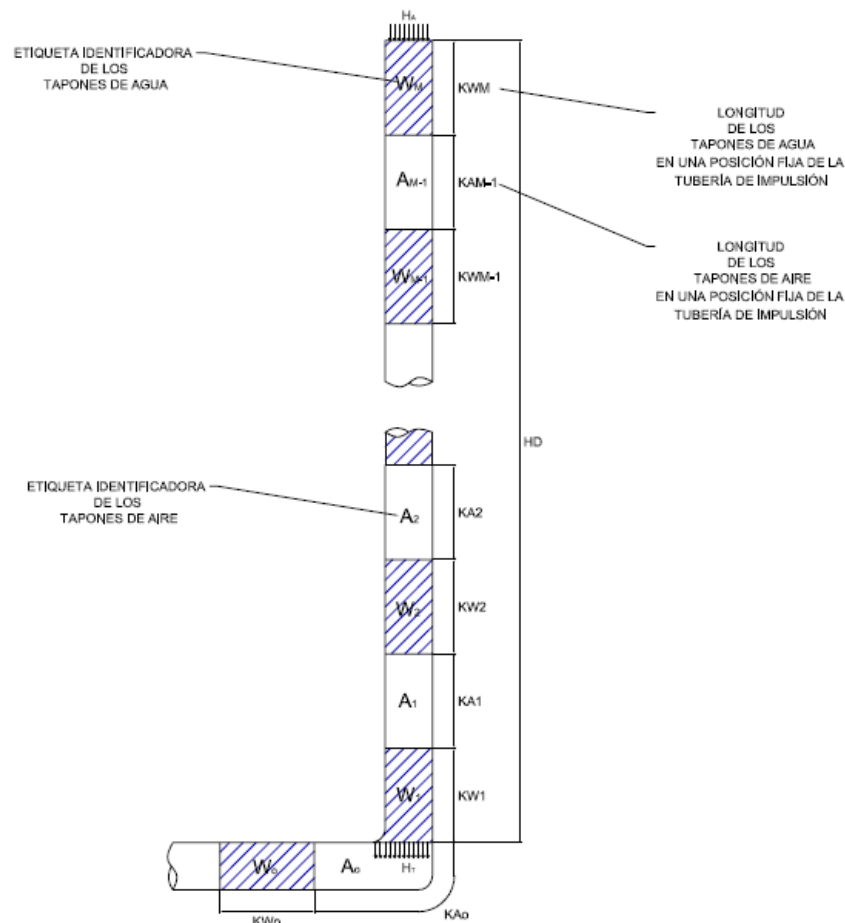


Figura 39:Esquema de la tubería de descarga. Fuente: Mortimer y Annable, (1984)

La figura 39 muestra la posición de los tapones de aire y agua en un tubo de impulsión vertical en un momento particular.

La altura de presión absoluta en la parte inferior de la tubería de suministro HT viene dada por

$$H_T = K_{W.1} + K_{W.2} + K_{W.3} + \dots K_{W.M} + H_A \quad (36)$$

Si H_D es la altura del extremo de la tubería de suministro por encima del eje de la bomba entonces

$$H_D = K_{W.1} + K_{A.1} + K_{W.2} + K_{A.2} + \dots K_{A.M-1} + K_{W.M} \quad (37)$$

En estas dos ecuaciones M es el número de tapones de agua en el tubo de distribución. Esto varía con el tiempo y depende de las longitudes de los tapones de aire y de agua en relación con la longitud de la tubería de impulsión.

Un efecto peculiar que sucede con este tipo de flujo de dos fases es que un tapón de aire que se mueve por la tubería se elevará a través del tapón de agua por encima de él, haciendo que el agua caiga desde un tapón superior a uno inferior.

La velocidad relativa entre el tapón de aire y el de agua se representa por V_a que se supone que es constante a lo largo del tubo de distribución. En la figura 39 los tapones de agua del $W.1$ al $WM-1$ perderán más agua a medida que la adquieren. Es decir pierden lo todo lo que ganan.

$$K_{W.1} = K_{W.2} = K_{W.3} \dots = K_{W.M-1} \quad (38)$$

Si $W.o$ tapón no pierde agua a medida que se mueve de su posición $K_{W.o}$ a la posición del tapón $W.1$ entonces

$$K_{W.1} = K_{W.o} + V_a \cdot t_p \quad (39)$$

Donde t_p es el tiempo necesario para que los tapones $A.o$ y $W.o$ entren en la tubería de impulsión. Si esto ocurre en una revolución de la bomba entonces $t_p = 60/N_s$ donde N_s es la velocidad de rotación en revoluciones por minuto y t_p es en segundos.

Por continuidad $K_{W.o} = L_{W.1}$ por lo tanto utilizando las ecuaciones (38) y (39) se pueden calcular las longitudes de los tapones del $K_{W.1}$ al $K_{W.M-1}$, lo que deja la longitud de $K_{W.M}$ desconocida.

En la figura 39 el tapón WM-1 estará perdiendo agua a medida que se desplaza hacia arriba a la salida y la alcanzará una vez que el tapón de aire AM-1 alcanza la salida de manera que

$$K_{W.M} = K_{W.M-1} - V_a \cdot t_q \quad (40)$$

Donde t_q es el tiempo necesario para que el todo último tapón de aire AM-1 abandone la tubería de impulsión y $t_q = 60/N_s (LA/2\pi R)$.

La longitud del tapón de agua que sale del tubo de suministro por revolución es igual a LW.1.

Si los tapones de aire han mantenido el mismo peso constante a través de la bomba, entonces la longitud de cualquier tapón de aire (A_n) está dada por la ecuación (14) donde $H_n = K_{W,n} + K_{W,n-1} + K_{W,n-2} + \dots + K_{W.M} + H_A$. Para la posición mostrada en la figura 39 se pueden calcular las longitudes de todos los tapones de aire y agua, por lo tanto H_T se puede encontrar a partir de la ecuación (36).

Tras una pequeña fracción de tiempo, todos los tapones han ascendido y parte del WM se habrá derramado fuera de la tubería. H_T habrá cambiado ahora, por lo que el número de las longitudes de todos los tapones tiene que volver a calcularse empezando desde la parte superior de la tubería de suministro.

2.5.9. La descarga de la bomba

Según (Mortimer y Annable, 1984) el caudal de bombeo para una bomba de bobina debe ser teóricamente

$$Q_p = N_s \pi r^2 \cdot L_{W.1} \quad (41)$$

Donde r es el radio interno de la tubería que conforma la bobina y $L_{W.1}$ es la longitud del tapón de agua absorbido a la entrada de la bomba.

Sin pérdidas dinámicas a la entrada, $L_{W.1} = \theta_1 \cdot R_1$ donde θ_1 se sabe a partir de la ecuación (26), sin embargo, en la realidad $L_{W.1}$ se define mejor como

$$L_{W.1} = \theta_1 R \pm \text{cambio en la longitud}$$

Lógicamente este cambio en la longitud debe ser una reducción debido a las pérdidas dinámicas en la entrada.

Blow-back

Blow-back es un fenómeno en el que el agua y el aire surgen hacia atrás a través de la toma saliendo de la bomba. Este se produce cuando la presión de la bomba es superior a las presiones acumuladas de las bobinas. Esta presión de blow-back es a la que se produce este fenómeno, siendo esta diferente en función de la configuración y diseño y condiciones de la bomba.

Air-lift

Este fenómeno ocurre cuando el aire, que se ha comprimido conforme avanzaba hacia la salida de la bomba, se expande a medida que sube la tubería de suministro, produciendo un efecto de elevación en el agua. Se basa en el mismo principio que usa la bomba para crear columnas de agua dentro de sus bobinas. Este efecto hace que la altura real que alcanza el agua a la salida la tubería de suministro sea mayor que la que indicaría un manómetro instalado en el sistema.

2.6 Bombas de bobina comerciales

De la bomba de bobina actualmente solo se conoce una versión comercial llamada Sling-Pump distribuida y fabricada por dos empresas. Para el caso de una bomba de bobina accionada por una rueda hidráulica, no existe como tal una versión comercial.

Rife Hydraulic Engine

<http://www.riferam.com/>

Nanticoke, Estados Unidos



Rife se funda en 1884 y desde ese año dedica sus esfuerzos a conseguir poder bombear agua sin necesidad de electricidad ni combustible.

Es una empresa de gestión familiar que comercializa y venden arietes hidráulicos, Sling-pump y otros productos para el bombeo.

Disponen de varios prototipos de bombas Slingpump :

Model	RP-100	RP-300	RP-200
Weight	35 lbs.	75 lbs.	75 lbs.
Hose I.D.	12mm	12mm	16mm
Hose O.D.	16mm	16mm	20mm
Hose Cost Per 500ft Coils	\$0.39/ft	\$0.39/ft	\$.49/ft
Hose Cut To Length Cost	\$0.50/ft	\$0.50/ft	\$0.63/ft
Pumping Head	26'	82'	49'
Required Depth	1'	1 ½'	1 ½'
Volume @ 2 ft./sec	832 gpd.	1056 gpd.	1585 gpd.
Volume @1.5 ft./sec	554 gpd.	660 gpd.	1056 gpd.
Dimensions	21" D x 34"L	25" D x 54"L	25" D x 54"L
Price	\$410	\$629	\$629

Biosling

<http://biosling.se/>

Jukkasjärvi, Suecia



Biosling es una empresa sueca que fue fundada en 2010 como rama de una empresa principal llamada JMT. La empresa JMT es una compañía familiar cuyos propietarios son Per-Olof Karlsson (inventor de la Loop pump) y su familia.

Biosling trabaja con la comercialización de formas de energía y con productos respetuosos con el medio ambiente. Tienen tres líneas de productos:

- Biosling: Pequeñas instalaciones de biogás
- Slypen: Bombas que bombean los aceites y contaminantes de la superficie de agua en los suministros de agua, lagos ríos, etc.
- Slingumpen: (Slingpump)

Disponen de los siguientes modelos de SlingPump:

Model type:	1-16	2-16	306	410
Diameter	520	620	300	400
Length(mm)	840	1 360	1 300	1 600
Weight (kg)	9	20	15	22
Tube/hose diameter (mm)	16	16	20	20
Necessary water depth (cm)	30	40	30	40
Pressure height (m)	8	25	6	10
Capacity (0,50 m/s)	2 100 l/day	2 500 l/day	-	-
Capacity (0,65 m/s)	3 150 l/day	4 000 l/day	7 500 l/day	11 700 l/day
Capacity (1,5 m/s)	10 000 l/day	10 000 l/day	15 700 l/day	15 700 l/day



En este caso no es una empresa, sino una organización de Kirguistán que desde el año 2000 ha trabajado con las comunidades locales para el desarrollo de varias soluciones tecnológicas apropiadas y económicas para diferentes demandas, como es el caso por ejemplo de la necesidad de bombear agua para el suministro de las granjas. Esta organización facilita y ayuda en la fabricación de bombas accionadas por ruedas hidráulicas para las zonas desfavorecidas. En su actividad piden información sobre las condiciones hidráulicas del lugar donde se desea bombear para aconsejar las dimensiones de la bomba y tipo de instalación.



3.METODOLOGÍA

3. METODOLOGÍA

Las ventajas de la fabricación de este tipo de bombas reside en su facilidad, bajo coste y la versatilidad en la utilización de diferentes materiales.

Para la construcción y caracterización hidráulica de la bomba se va a tener en consideración recomendaciones de resultados de otros estudios anteriores consultados en la bibliografía, formulas desarrolladas por otros estudiosos, criterios propios y disponibilidad de materiales en la zona.

No existen actualmente guiones a seguir para la fabricación de este tipo de bombas de manera casera, por ello la fabricación se realizará paso a paso en función de los materiales disponibles en el entorno y en función de la necesidad de resolución de los problemas que plantea el propio proceso. Además no se cuenta con un lugar habilitado para su fabricación por tanto se elaborará usando herramientas corrientes.

Existen sling-pumps comerciales cuyas medidas son elevadas, véase por ejemplo en los dos catálogos de estas bombas en el apartado anterior. En este proyecto se han construido dos pequeños prototipos diferentes que por motivos de medios serán de un tamaño más discreto, lo que conlleva posiblemente a una menor dimensión en los parámetros de servicio de la bomba, como caudal, altura, etc.

3.1 Construcción de la bomba de bobina

Primer prototipo

A continuación se describen la resolución de las diferentes partes de la bomba.

3.1.1. Tambor 1

El tambor es el elemento que permite dar la forma de espiral a la tubería además de servirle de soporte.

Los tambores comerciales suelen tener unos diámetros elevados para bombear en ríos. Estos tambores pueden ser fabricados fácilmente si se cuenta con un pequeño taller con suficientes herramientas.

En el caso de nuestra bomba, existe una falta de disponibilidad o acceso a un taller, lo que dificulta la fabricación de este elemento y por lo tanto se tiene que optar por la búsqueda y utilización de cualquier elemento u objeto con forma cónica. Se elige en el primer prototipo esta forma en vez de una cilíndrica en base a los resultados de Kassab et al., 2006 sobre el efecto de la forma cónica en el rendimiento de la bomba. Los resultados de este estudio sugieren que el caudal de la bomba aumenta mientras que el ángulo del cono de la superficie del tambor aumenta para todos velocidades de rotación y además es mayor que el obtenido en el caso de un bomba de tambor cilíndrico para todas las velocidades de rotación (Kassab et al., 2006).

En este proyecto por motivos ya anteriormente mencionados se optará por la construcción de un pequeño prototipo. La solución que se adoptará para el tambor de la bomba será el uso de un cono de señalización de polietileno de 50 cm, con un radio en la base de 25 cm.



Figura 40:Tambor del prototipo 1. Fuente propia

3.1.2. Junta rotativa 1

La junta es la parte de la instalación de la bomba que permite el giro de nuestra bomba pero a su vez lo aísla del resto de la instalación. Debe permitir el giro de una parte y ser totalmente estanco para evitar pérdidas de presión.

Este elemento de la instalación se realizará mediante unión giratoria en giro loco de rosca macho-hembra 1/2"-3/4" al que se le unirá por un lado un manguito M-H de reducción 3/4"-1/2" y una unión mixta de rosca 1/2"-16 mm. Por el otro lado el giro loco se unirá a un manguito de latón H-H 3/4"-1/2" que sirve de unión con la hélice.



Figura 41: Junta rotatoria unida a hélice. Fuente propia

Este elemento une el cuerpo principal de la bomba a la tubería de impulsión.

3.1.3. Hélice 1

La hélice es el elemento que acciona la bomba, transformando la energía cinética de la corriente en energía mecánica que provoca el giro de la bomba. La elección de la hélice es un paso importante debido a que nos puede proporcionar mayor o menor velocidad de giro con una misma velocidad de corriente.

A pesar de lo anterior, debido a la dificultad y falta de medios para fabricar una hélice propia con las medidas y características adecuadas, se optará por la adquisición de una. La hélice conseguida (ver figura 42 y detalle en Anexo I), tiene las siguientes características:

- Diámetro de la hélice: 7 1/4 pulgadas (18,415 cm)
- Paso de la Hélice: 6 1/2 pulgadas (16,51 cm)

- Sentido de giro de la hélice: R.H (sentido horario) Este dato sería en el caso desde el punto de vista de la entrada de la bomba. Esto nos definirá el sentido de enrollamiento de la tubería que conforma la bobina de la bomba.
- Número de alas-hojas: 3



Figura 42: Hélice del prototipo 1. Fuente propia

3.1.4. Bobina o tubería en espiral 1

Es la parte donde se va a generar el efecto del bombeo al formarse una serie de manómetros en U. Para poder generar esta bobina se requiere un enrollamiento de la tubería en espiral siguiendo la forma troncocónica del tambor.

El tambor de la bomba disponible tiene un diámetro pequeño y por tanto los diámetros de las espirales tienen que ser pequeños por obligación. Esto lleva a una dificultad añadida en la selección del material de la tubería.

Los materiales actuales usados en la fabricación de las tuberías de suministro de agua, son materiales demasiado "rígidos" para permitir este enrollamiento. Existen materiales a los que se pueden dar la forma en espiral pero siempre y cuando sean diámetros grandes, en el caso contrario, estas tuberías se doblan reduciendo su sección y por tanto dificultando el paso del fluido.

Para poder esquivar este problema, se seleccionará una tubería de espiro-gas de 9 mm de diámetro. Esta tubería está fabricada en una extrusión de compuestos vinílicos que permiten una flexibilidad extra, que hace posible la formación de las vueltas más pequeñas de la espiral.



Figura 43: Tubería de espiral del prototipo 1. Fuente propia

Para poder bombear se requiere que esta tubería mantenga su forma de espiral dentro del tambor troncocónico. Para ello se usaran grapas para conductos, que se unirán atornilladas a la cara interior del tambor con tornillos de rosca métrica ranurados 4x10 mm, tuerca 4 mm y arandelas de goma/metal 16 mm.



Figura 44: Elementos de unión de la tubería en espiral. Fuente propia

3.1.5. Toma de entrada 1

La toma de entrada es la parte por donde el agua accede al interior de la bomba. Este elemento debe ser capaz de captar la mayor cantidad de agua posible y además evitar que cualquier residuo que contenga el agua entre dentro de la tubería obstruyendo esta última.

La solución que se adoptará para este fin, es un cono para aumentar el volumen captado, con una malla para evitar residuos.

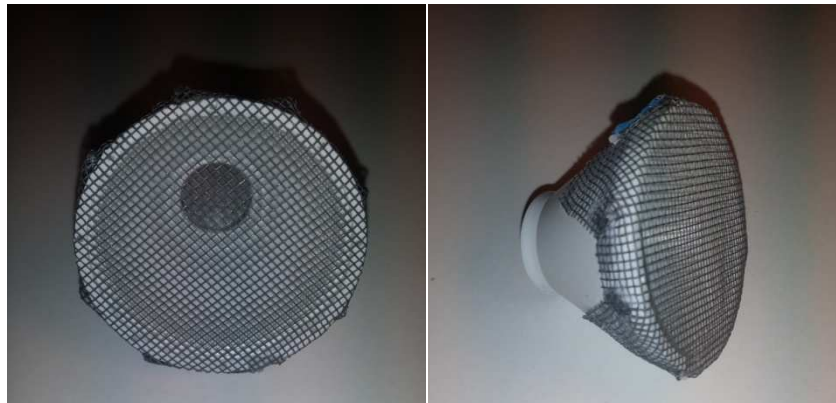


Figura 45: Cono toma de entrada. Fuente propia

Este cono estará unido a la tubería helicoidal mediante una unión mixta de rosca 3/4" a 16mm.

3.1.6. Elemento de flotación 1

Permite que la bomba se sumerja parcialmente haciendo que le sea posible tomar aire, elemento indispensable para que se genere la acción de bombeo en este tipo de bombas.

Se pretendía aplicar cualquier material con una densidad muy inferior a la del agua en determinados puntos de la bomba, pero la solución final que se adoptará será la utilización de una cámara de aire unida al extremo mayor de la bomba.



Figura 46: Cámara de aire. Fuente propia

Se optará por esto debido a que estos elementos permiten la regulación de cantidad del aire interno y por tanto regular el mayor o menor porcentaje de bomba sumergida.

3.1.7. Tubería de suministro 1

La tubería de suministro o bombeo lleva el fluido al lugar de servicio.

Se solucionará esta parte de la instalación con manguera transparente de 15 mm de diámetro con el fin de poder observar el flujo peculiar de dos fases que genera este tipo de bombas. En la utilización real en una instalación por motivos de protección del sol sería aconsejable el uso de una tubería opaca.

Se usarán longitudes diferentes de esta tubería en función de la altura a bombear.



Figura 47: Tubería de descarga del primer prototipo. Fuente propia

Este prototipo se prueba en varias ocasiones lo que genera la necesidad de hacer modificaciones. Estas modificaciones se describen en el anexo I del presente proyecto. El prototipo adquiere el siguiente aspecto final:

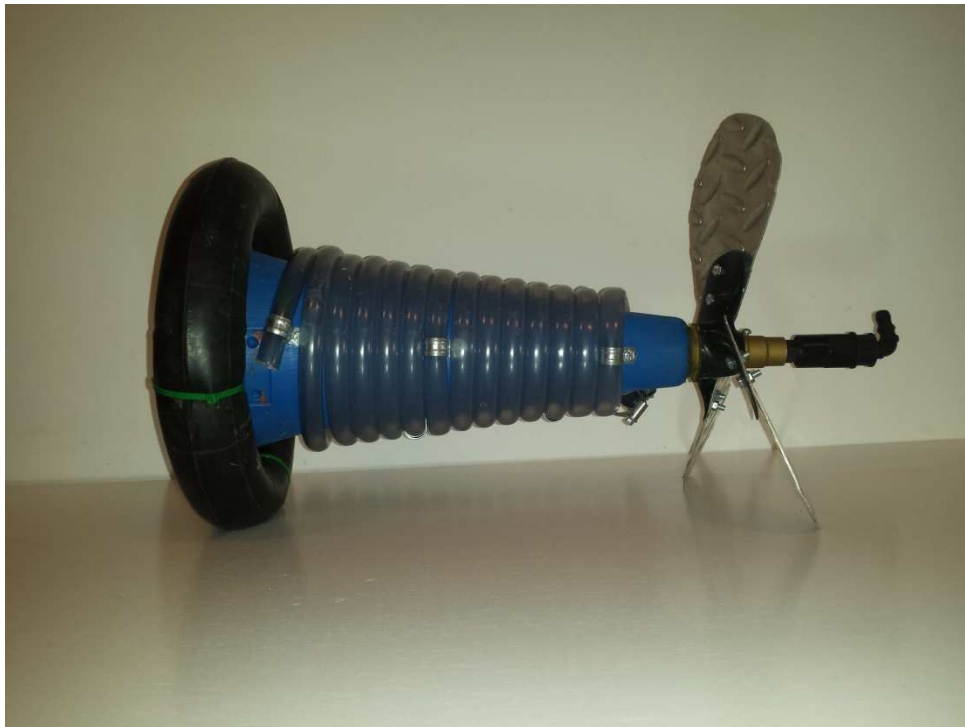


Figura 48: Prototipo 1: Fuente propia

Segundo prototipo

3.1.8. Tambor 2

En este caso se optará por el uso de la forma cilíndrica para comparar los resultados de las dos formas a pesar de que los tamaños entre ambas no son iguales. El tamaño de este prototipo será mayor pero mantiene la esencia de un tamaño pequeño respecto de la mayoría de los modelos comerciales.

La solución que se adoptará para el tambor de la bomba será el uso de un bidón de plástico de 20 l de capacidad, con unas dimensiones de 280x460mm.



Figura 49: Tambor del prototipo 2. Fuente propia

3.1.9. Junta rotativa 2

Esta parte cumple la misma función que en el anterior prototipo. La solución que se adoptará comparte similitud con la bomba anterior, una unión giratoria de giro loco rosca macho-hembra 1/2"-3/4" al que se le unirán por un lado un manguito de reducción de PE mixto de rosca M-H, 3/4"-1/2" , seguido un enlace mixto rosca macho

1/2"-16mm y por el otro lado un manguito de reducción de latón de unión roscada H-H 1/2"-1/2".

La diferencia entre los dos prototipos reside en que esta junta rotativa no irá unida a la hélice, si no que se unirá directamente a tambor mediante el roscado del manguito de latón H-H a otro manguito de reducción de latón M-H 3/4"-1/2" situado al otro lado de la parte trasera del bidón. A este último manguito se le roscará un enlace mixto macho 1/2"-16mm donde se unirá la tubería en espiral.



Figura 50: Junta rotatoria entera. Fuente propia

3.1.10. Hélice 2

En este caso la hélice no se adquiere directamente si no que se diseñará y construirá. Las palas se fabricaran en aluminio para evitar la oxidación y se unirán al tambor mediante unos tacos de madera para reducir el peso (anexo II).



Figura 51: Hélice del prototipo 2. Fuente propia

El sentido de giro de la hélice se establecerá en el sentido anti-horario observando la hélice desde la parte en que se enfrenta al movimiento del agua. Este sentido se regulará mediante los tacos de madera.

De esta hélice de fabricación propia solo se puede conocer los siguientes datos:

- Diámetro de la hélice: Aproximadamente 10-53/64 "(27,5cm)
- Sentido de giro de la hélice: R.H (sentido horario, vista desde la entrada de la bomba).
- Número de alas-hojas: 3

3.1.11. Bobina o tubería en espiral 2

Para este segundo prototipo no existe la problemática de un diámetro pequeño de tambor. El enrollamiento de la tubería en espiral seguirá en este caso una forma cilíndrica lo que permitirá usar una tubería de diámetro mayor. Se optará por una tubería o manguera transparente de 15 mm.



Figura 52: Tubería en espiral del prototipo 2. Fuente propia

Para mantener la forma de espiral dentro del tambor se usaran como en el prototipo troncocónico, grapas de 18 mm para conductos atornilladas a la cara interior del tambor pero con tornillos de rosca métrica 6x20 mm, tuerca 6 mm y arandelas de goma/metal 16 mm.



Figura 53: Elementos de fijación de la tubería en espiral. Fuente propia

3.1.12. Toma de entrada 2

No se ha optará por usar ninguna ampliación que cumpla la función de toma de entrada. La toma de entrada para este prototipo será la propia abertura del extremo de la manguera.



Figura 54: Toma de entrada. Fuente propia

3.1.13. Elemento de flotación 2

Como se han mencionado en el prototipo anterior esta parte de la bomba hace que la bomba se sumerja parcialmente.

En este caso se utilizarán dos cámaras de aire, una en la parte inferior del tambor debido a que la parte de la hélice tendrá una masa elevada que podría provocar que las aspas o alas rocen con el fondo del canal frenando la bomba. La otra se colocará en el otro extremo del tambor para que la bomba tome aire.



Figura 55: Cámaras de aire. Fuente propia

3.1.14. Tubería de suministro 2

Se solucionará esta parte de la instalación con manguera transparente de 15 mm de diámetro igual que el de la bobina. La longitud que se usará dependerá del lugar y tipo de instalación. Esta tubería se unirá a la bomba mediante un codo de unión 16 mm unido a dos trozos de tubería unidos entre sí por una manguito recto de 16 mm. Esta solución se adoptará para evitar que la tubería contacte con las hélice mientras giran.



Figura 56: Tubería de descarga. Fuente propia

El prototipo acabado se muestra en la siguiente figura:



Figura 57: Prototipo 2. Fuente propia

3.2 Caracterización hidráulica de la bomba construida

3.2.1. Lugar de ensayo e instalación de la bomba de bobina

Para el ensayo se requiere unas determinadas características del flujo donde se va a introducir la bomba. Estas son:

Profundidad : Aproximadamente mayor o igual a 0,44 m para ambos prototipos

Velocidad del cauce: en el ensayo se tienen que medir el funcionamiento de la bomba en varias velocidad por lo tanto se necesita un lugar donde se pueda variar este parámetro. El límite de la velocidad necesaria para hacer girar a ambas bombas es desconocido.

De acuerdo a estas características se ha buscado el lugar que más se acople a estas necesidades. Debido a la dificultad que supone encontrar un lugar en el que se pueda modificar la velocidad del flujo, se opta por realizar ensayos en diferentes lugares donde la velocidad sea distinta.

Los lugares donde se realizan los ensayos son los siguientes:

Acequia de Magallon fiel



Figura 58: Localización del primer punto de medida. Fuente propia



Figura 59: Foto lugar de medida en la acequia de Magallon-Fiel. Fuente propia

Diferentes lugares a lo largo de la acequia que evacua la Alberca de Cortés en Huesca

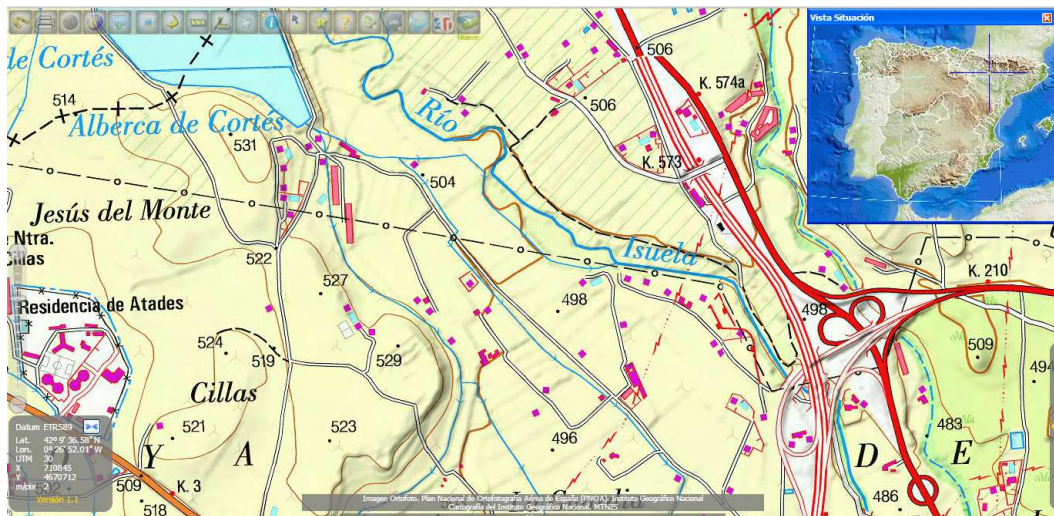


Figura 60: Localización del segundo punto de medida. Fuente propia



Figura 61: Foto lugar de medida en la acequia de la Alberca de Cortés. Fuente propia

Sujeción de la bomba

Para evitar que la bomba sea llevada por la corriente es necesario atarla algún elemento. En esta la instalación de la bomba se atará a un listón de madera de 3,2 x 3,2 cm mediante una cuerda.



Figura 62: Foto del elemento de unión de la bomba. Fuente propia

Este listón se fijará a ambos lados del cauce mediante unas varillas roscadas de 5mm clavadas en la tierra y con tuercas de 5mm.



Figura 63:Detalle de la fijación del listón de madera. Fuente propia

Deposito de medida.

El depósito de medida es el lugar donde se va a bombear el agua. La capacidad del depósito es de 4 litros.



Figura 64: Depósito de descarga. Fuente propia

Lo que se recoja en este pequeño deposito se trasvasará a un jarra milimetrada para obtener una medida más exacta.



Figura 65: Jarra de medida. Fuente propia

Tubería de descarga

Se basa en una manguera transparente de 15 mm de diámetro. La longitud de este elemento se variará en función de la altura a la que se bombee. Esta tubería se sostendrá a la altura indicada gracias a una pica de madera de 2,5m. A esta pica se roscaran hembrillas cerradas a la altura de bombeo y se le atará una brida de plástico donde se sujetará la manguera de descarga.



Figura 66: Foto de elemento de fijación de la tubería de descarga. Fuente propia

3.2.2. Procedimiento de toma de datos

1. Se instala el listón de madera a una distancia adecuada al lugar donde va a colocarse la bomba, fijándolo fuertemente al terreno.
2. Se ata la bomba al listón y se sujeta la tubería de descarga a la altura a medir en la brida de la pica de madera.
3. Se comprueba que la zona de la toma quede sumergida aproximadamente por la mitad del tambor, en caso contrario se hincha o deshinchas la cámara de aire hasta conseguir este fin. Lo mismo con la cámara interna del tambor pero en este caso se manipula hasta conseguir que las hélices no toquen el fondo del cauce.
4. Se deja durante un tiempo que la bomba funcione para que adquiera cierta estabilidad y homogeneidad.
5. Se mide la velocidad de giro de la bomba cronometrando el tiempo que tarda en dar 30 vueltas. Se hacen 3 repeticiones para obtener la media.
6. Se establece la velocidad del cauce mediante el método de elemento flotante. En este método se consigue medir la velocidad superficial, no se trata de la velocidad media se toma como válida al carecer de otros medios de medida. Para ello se mide la mayor distancia posible (dependiendo del lugar) a lo largo del cauce en un tramo lo más rectilíneo posible, se arroja un elemento flotante en el centro del flujo (palo, cañas etc.), y se cronometra el tiempo que tarda en recorrer la distancia. Se hacen de 3 a 4 repeticiones.
7. A continuación se mide el caudal de la bomba recogiendo el agua levantada durante 30s. Se trasvasa en una jarra milimetrada. Se hacen 4 repeticiones para cada altura.
8. Se apuntan los datos.

4.RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Resultados experimentales

Se han descartado los resultados del prototipo 1 puesto que no llegaron a una magnitud mínimamente reseñable a pesar de las dos modificaciones que se le hicieron. Sin embargo el prototipo 2 fue un éxito en cuanto a funcionamiento y toma de datos.

De este prototipo se recogieron los siguientes datos:

En la acequia Magallon-Fiel

La velocidad del cauce fue de 0,423 m/s. La bomba giró 30 revoluciones en 130,17 s. Los datos de agua recogida fueron

Altura (m)	t (s)	Volumen (l)	Caudal (l/h)
0,30	29,9	0,6	77,54
0,50	30,14	0,64	76,15
1,00	29,92	0,51	61,17
1,30	30,03	0,41	49,45

Para otra velocidad de cauce 0,682 m/s. La bomba giró 30 revoluciones en 56,93 s. Los datos recogidos:

Altura (m)	t (s)	Volumen (l)	Caudal (l/h)
0,3	29,95	1,15	138,25
0,5	29,98	1,10	132,10
1	29,78	0,94	114,11
1,3	29,97	0,91	108,87

En la acequia de la alberca de Cortes

Para una velocidad del agua 1,08 m/s, la bomba giró 30 revoluciones en 30,86 s y bombeo:

Altura (m)	t (s)	Volumen (l)	Caudal (l/h)
0,5	30,40	1,99	236,2
0,9	30,39	1,94	230,0
1,1	30,13	1,84	219,6
1,5	30,65	1,77	207,5
1,9	30,39	1,64	194,3

Efecto de la altura sobre el caudal

El binomio altura de bombeo-caudal es la relación más importante en todas las bombas, es en esencia la que define la caracterización hidráulica. La altura influye en la dimensión del segundo parámetro. Se modificaron las diferentes alturas elevando a diferentes cotas la tubería de descarga, cuatro puntos en la acequia de Magallon-Fiel y hasta cinco cotas en la medida en la acequia de la alberca de cortes.

Vemos la curva Altura-Caudal para las tres velocidades de cauce.

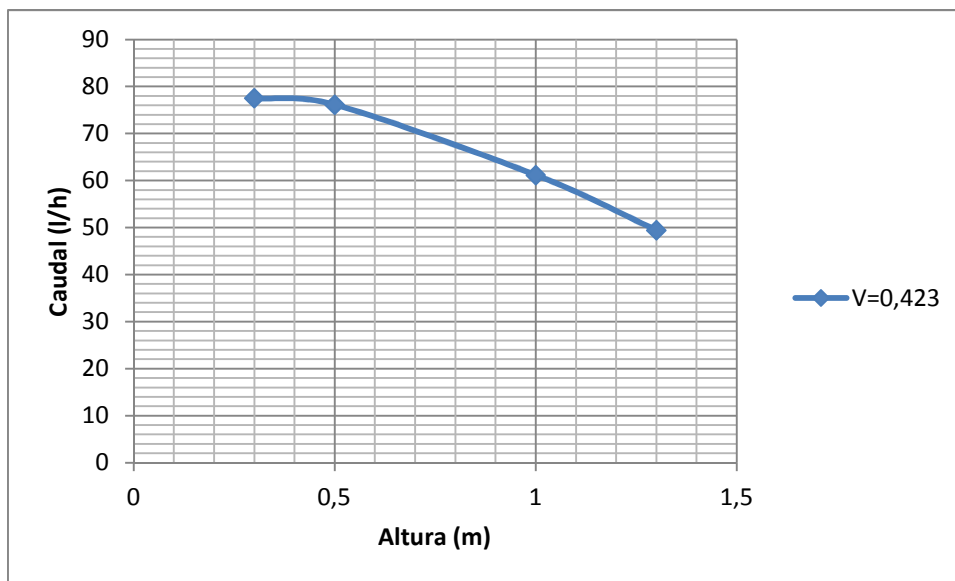


Figura 67: Relación Caudal-Altura de bombeo para una $v=0,423$. Fuente propia

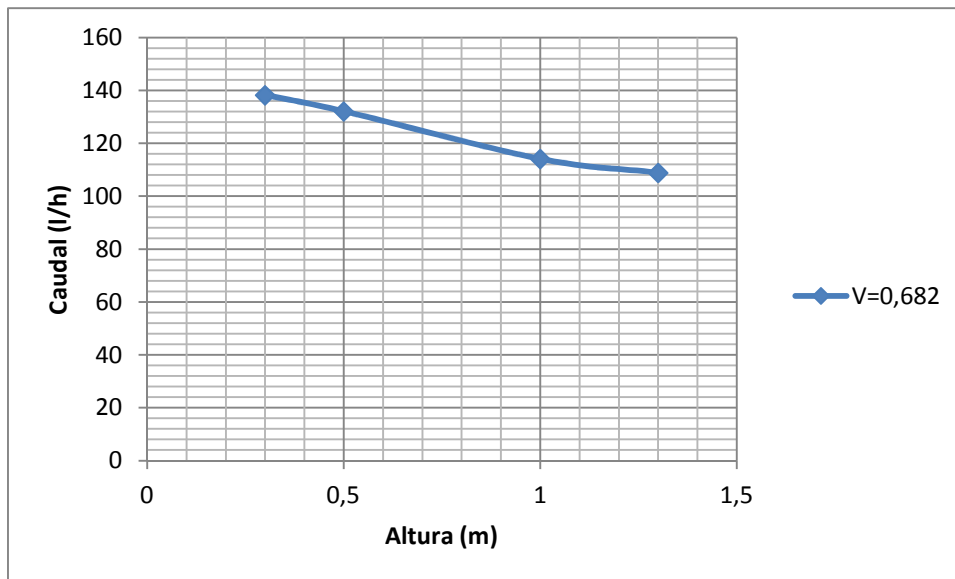


Figura 68: Relación Caudal-Altura de bombeo para una $v=0,682$. Fuente propia

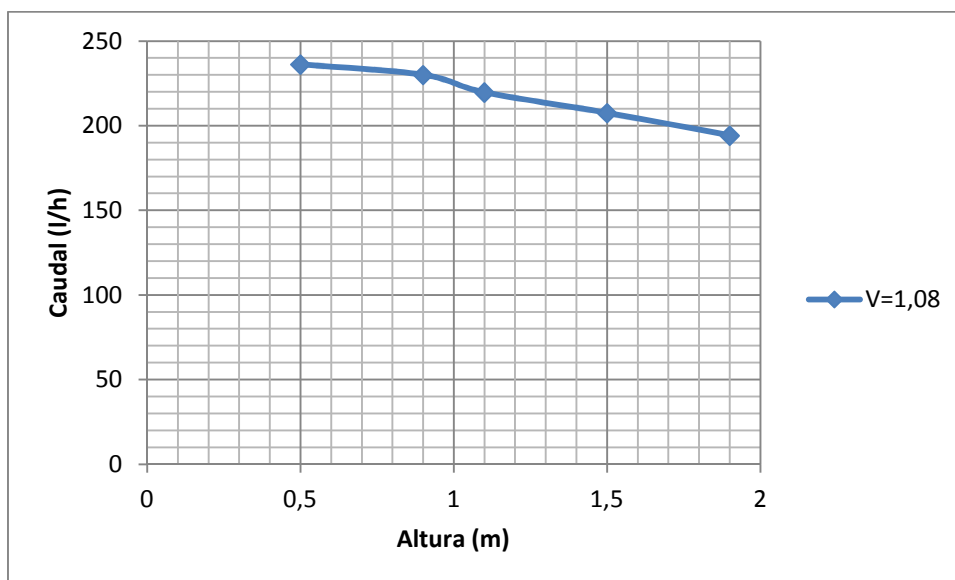


Figura 69: Relación Caudal-Altura de bombeo para una $v=1,08$. Fuente propia

Efecto de la velocidad sobre la velocidad de revolución

A continuación se muestra en la gráfica la velocidad del agua que llevaba el cauce en relación con la velocidad de giro de la bomba.

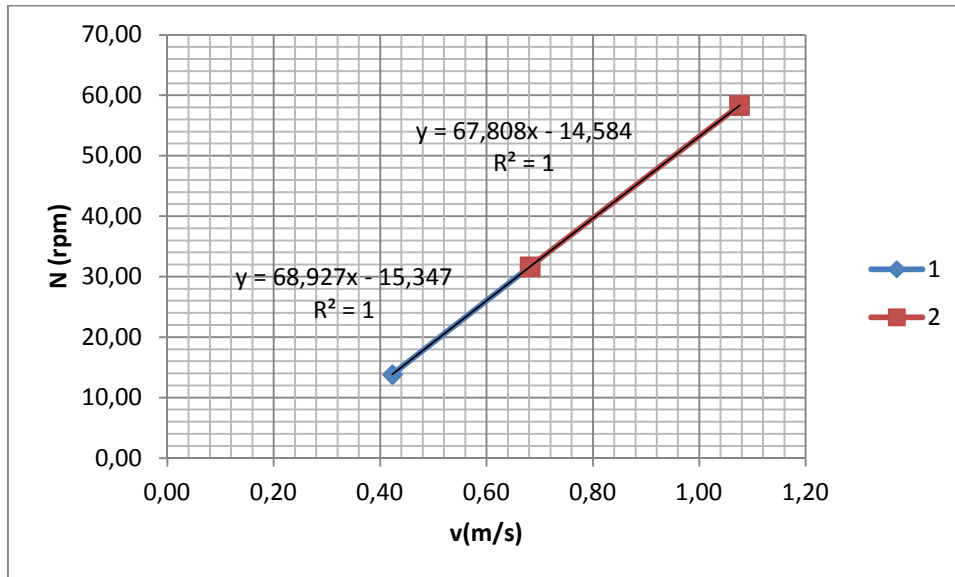


Figura 70: Relación V(velocidad del cauce)-N(Velocidad de revolución de la bomba). Fuente propia

4.2 Resultados teóricos

Se calcula a continuación de manera teórica el caudal bombeado y la altura a la que bombea. Para ello se usan las fórmulas desarrolladas por Mortimer y Annable en 1984, que ya han sido descritas en el apartado 2 del presente proyecto.

Para obtener el caudal usaremos la formula:

$$Q_p = N_s \pi r^2 \cdot L_{W.1}$$

Los datos que se necesitan son la velocidad de giro de la bomba, la sección interna de la tubería en espiral y la longitud del arco de tubería que permanece sumergida. Los dos últimos datos son fijos para toda velocidad de revolución y además el primero de estos dos es conocido ya que $r=0,0075$ m al ser una manguera de 15mm de diámetro. Se calcula la longitud del arco con la fórmula:

$$L_{W.1} = \theta \cdot R$$

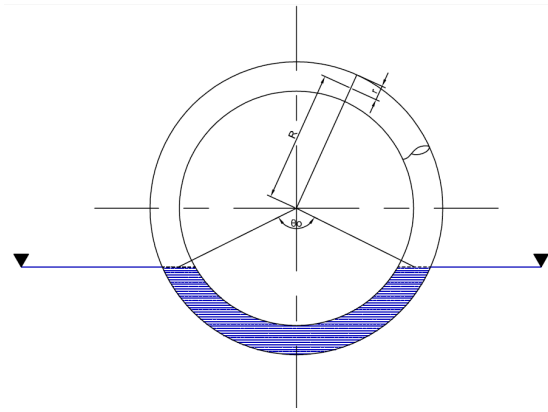


Figura 71: Detalle del ángulo θ . Fuente: Mortimer y Annable, (1984)

Se supone que la bomba está sumergida al 50%, por tanto $\theta=180^\circ=\pi$ **rad**. El radio de la bomba R como se muestra en la figura anterior también conocido siendo $R=0,1325$ m.

$$LW.1 = 3,1416 \cdot 0,1325 = 0,416 \text{ m}$$

Se calcula el caudal para cada velocidad de cauce.

— **$V=0,423$**

$$Q_p = 13,83 \text{ rpm} \cdot 3,1416 \cdot 0,0075 \text{ m}^2 \cdot 0,416 \text{ m} = 0,00101 \frac{\text{m}^3}{\text{min}}$$

$$Q_p = 0,00101 \frac{\text{m}^3}{\text{min}} \cdot \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ h}} \cdot \frac{1000 \text{ l}}{1 \text{ m}^3} = 61,00 \frac{\text{l}}{\text{h}}$$

— **$V=0,682$**

$$Q_p = 31,67 \text{ rpm} \cdot 3,1416 \cdot 0,0075 \text{ m}^2 \cdot 0,416 \text{ m} = 0,00233 \frac{\text{m}^3}{\text{min}}$$

$$Q_p = 0,00233 \frac{\text{m}^3}{\text{min}} \cdot \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ h}} \cdot \frac{1000 \text{ l}}{1 \text{ m}^3} = 139,76 \frac{\text{l}}{\text{h}}$$

— **V=1,08**

$$Q_p = 58,35 \text{ rpm} \cdot 3,1416 \cdot 0,0075 \text{ m}^2 \cdot 0,416 \text{ m} = 0,00429 \frac{\text{m}^3}{\text{min}}$$

$$Q_p = 0,00429 \frac{\text{m}^3}{\text{min}} \cdot \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ h}} \cdot \frac{1000 \text{ l}}{1 \text{ m}^3} = 257,52 \frac{\text{l}}{\text{h}}$$

Para determinar la altura teórica de la bomba se necesitaría saber las alturas desarrolladas en cada vuelta de la espiral y multiplicarlas por el número de espiras.

Para determinar la altura desarrollada en las espiras se recurren a las fórmulas 25, 27, 28, 29, 31 y 32 mencionadas en el presente proyecto (Mortimer y Annable, 1984).

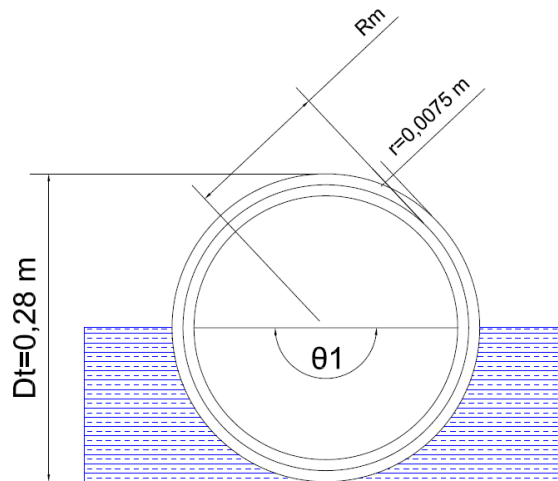


Figura 72: Detalle de bomba sumergida al 50%. Fuente propia

La altura desarrollada en una vuelta de la espiral en la que el agua no está derramando sigue la razón de la ecuación 27:

$$h_n = R \times \left[\cos \left(\pi - \frac{\theta_1}{2} - \delta_n \right) + \cos \left(\frac{\theta_1}{2} - \delta_n \right) \right]$$

Se necesita calcular θ_n mediante la ecuación 32

$$\theta_n = \frac{LW.n}{R}$$

Para poder aplicar esta necesitamos conocer $LW.n$ mediante la fórmula 25 desarrollada por Annable, Mortimer

$$L_{W.n} = L_{W.1} + L_A \left(1 - \left(\frac{H_A}{H_n} \right)^{0.87} \right)$$

Siendo:

$LA.1=2\pi R-LW.1$ (fórmula 18), la longitud del tapón de aire barrido por la toma de entrada que al suponer un porcentaje del 50% de bomba sumergida $LA.1=LW.1$, por tanto

$$LA.1 = 0,416 \text{ m}$$

H_A la presión atmosférica en la entrada, que se considera a una altura de 488 msnm (Huesca) de 95691,33 Pascales y de 480 msnm de 95590.01 Pa (Tarazona).

H_n la presión absoluta en la salida, se considera que se va a bombear a 2 metros de altura por tanto es la suma de la presión atmosférica + altura a la que se bombea.

La diferencia de cota media entre las dos localidades es de 8m lo que hace que la diferencia del ratio (H_A/H_T) que aparece en la ecuación 18 entre las dos sea depreciable por lo tanto se opera solo con los datos de una ubicación en dicha ecuación.

Operando todas las ecuaciones:

Ecuación 25:

$$L_{W.n} = 0,416 + 0,416 \left(1 - \left(\frac{95691,33}{115308,949} \right)^{0.87} \right) = 0,479 \text{ m}$$

$$\theta_n = \frac{0,479 \text{ m}}{0,1325 \text{ m}} = 3,612 \text{ rad}$$

Ecuación 31

$$h'_n = 0,1325 \times [\cos 0,338 + \cos(0,338 + 3,612 - 3,1416)]$$

$$h'_n = 0,216 \text{ m}$$

La altura de columna de agua desarrollada en cada vuelta de la espiral es:

$$h_T = 0,265 + 0,216 = 0,481 \text{ m}$$

La altura neta que puede levantar la bomba en estas condiciones se calcula multiplicando la altura desarrollada en cada vuelta por el número de estas. Siendo la bomba capaz de levantar una altura neta:

$$H_T = N \times h_T = 13 \times 0,481 = 6,25 \text{ m}$$

4.3 Discusión

Observando únicamente los datos experimentales:

Se puede afirmar que los puntos altura-caudal han seguido una distribución esperada en una caracterización hidráulica.

Conforme se aumenta la velocidad de giro aumenta el caudal suministrado para una misma altura. La mayor altura máxima alcanzada se dio para la velocidad de giro máxima lo que posiblemente se explique con el porcentaje sumergido ya que en este caso recibió mayor empuje del agua lo que provocaba que estuviera menos sumergida haciendo que entrara más cantidad de elemento bombeador(aire) y posiblemente también en menor medida a que la fuerza centrífuga haya podido ejercer cierta ayuda al bombeo, aunque esto último pueda ser descartable.

Respecto a la velocidad de rotación de la bomba existe una relación directamente proporcional con la velocidad del cauce lo que es algo lógico y esperado. También se observa que la pendiente de la recta de la gráfica $V(\text{m/s})$ - $N(\text{rpm})$ disminuye, lo que se traduce en que el incremento de la velocidad de rotación afectada por el cauce va decreciendo ya que a mayor velocidad las fuerzas de rozamiento son mayores.

Comparando los datos experimentales con los datos teóricos

A la hora de comparar los caudales tenemos en cuenta que las formulas teóricas para calcularlo se aplican independientemente de la altura de bombeo, por lo que se asume que estas dan el caudal a una altura de 0 m, es decir a la misma altura de la bomba.

Una vez considerado esto se observa que la bomba superó al caudal teórico para la altura mínima estudiada de 0,3m a la velocidad mínima y ocurrió lo inverso para las otras 2 velocidades. Una explicación que pondría en claro esta relación es que la velocidad fue tan lenta que permitió a la bomba sumergirse un poco más provocando que el trayecto de la toma de entrada dentro del agua fuera superior a la mitad lo que provocaría la entrada de más agua que si estuviera sumergida al 50%. A pesar de esto la diferencia entre los caudales teóricos sorprendentemente no es muy acusada y podemos justificarla debido a que al ser una bomba de fabricación casera el diseño hidrodinámico no es muy exacto y preciso lo que provocaba que el giro de esta fuera irregular.

Respecto a la altura bombeada, las fórmulas dan la máxima que podría dar la bomba independientemente de la velocidad del cauce pero si dependiente del % de bomba sumergido. En este caso la altura máxima teórica triplica la máxima conseguida realmente. Este fenómeno o fallo se podría explicar hasta cierta magnitud por la pérdida de carga a través de los diferentes manguitos y elementos singulares que la mayoría de ellos solo existen en esta bomba de fabricación casera, y del tramo de salida.

5. APLICACIÓN DE UNA BOMBA DE BOBINA A UNA FINCA AGRÍCOLA

5. APLICACIÓN DE UNA BOMBA DE BOBINA A UNA FINCA AGRÍCOLA

Como último punto del proyecto se quiere llevar a cabo un estudio ficticio comparativo entre la bomba tratada en este documento, una versión comercial de esta y una bomba convencional de gasoil o gasolina. El estudio se va a realizar en una ubicación real que cumpla los parámetros y requisitos necesarios para la instalación de la bomba y en cuanto a los datos desconocidos se establecerán según criterio propio.

5.1 Localización

Para el lugar de estudio se ha buscado la ubicación de una parcela real en las cercanías de la ciudad de Huesca por ser una zona rica en acequias.



Figura 74: Mapa de la hoya de Huesca. Fuente: SIGPAC

La parcela seleccionada es la 117 del Polígono 3, localizada en el pequeño municipio de Quicena situado a 3,2 km de la capital oscense. Esta parcela está ubicada en el paraje La Pardina y se accede al norte de esta por la Travesía Castillo de Montearagón.

En el momento en que fue visitada la parcela se encontró con restos de cosecha de cereal de invierno. Cerca de la parcela a una cota inferior existe una fuente de agua pero no se encontró ningún sistema de riego. La parcela según los datos del SIGPAC tiene un índice de regadío igual a 0, lo que significa que es explotada en régimen de secano y tiene una superficie de 3,944 ha catalogadas como terreno arable.



Figura 75: Vista aérea de la parcela de estudio. Fuente SIGPAC

En el estudio se sigue el planteamiento realizado en un proyecto final de carrera de esta misma escuela, en el que se propone una variación del cultivo sustituyendo al cereal por una plantación de almendros y se considerará que el tipo de instalación de riego será un sistema de riego localizado con el fin de poder establecer la técnica de riego deficitario. (Ortega, 2013).



Figura 76: Foto de la parcela. Fuente propia

Esto significa que las plantas no son regadas para abastecer su necesidades hídricas en su totalidad si no que solo se les suministra agua en los momentos críticos de su ciclo anual. Se va a suponer en este estudio que se necesita unos 1000 m³ de agua por hectárea y año para obtener una cosecha aceptable en función del agua aportada (Ortega, 2013).

5.2 Suministro de agua para la instalación

La fuente de agua que abastecerá la instalación proviene de una acequia que sale del río Flumen.

En nuestra localización avanza siguiendo la trayectoria del borde sur de la parcela (trayectoria marcada con puntos en la figura 77). La acequia está situada a una cota inferior a la parcela, con una diferencia entre ellas de aproximadamente 1,3m-1,8m dependiendo del sitio.



Figura 77: Vista aérea y detalle de la localización de la acequia. Fuente propia

La velocidad mínima que circula por esta es de 0,61 m/s y el calado mínimo es de 45 cm. Estos parámetros se midieron in situ y se han estimado como mínimos al haber hablado con habitantes de la zona cercana a la acequia que afirmaban que esta suele llevar más velocidad y calado. Esto haría posible la instalación del prototipo 2 diseñado en este proyecto.



Figura 78: Fuente de suministro de agua. Fuente propia

5.3 Lugar de descarga

Se bombeará en el punto más alto de la parcela, donde se ubicará un deposito o balsa de agua para aprovechar la pendiente del campo a la hora de regar. Tal y como muestra la siguiente figura (figura 79) el punto más alto de la parcela está situado en su borde este, con una cota de 485 m marcado en la figura en azul y el punto más bajo en la esquina suroeste con una cota de 479 m marcado en naranja.

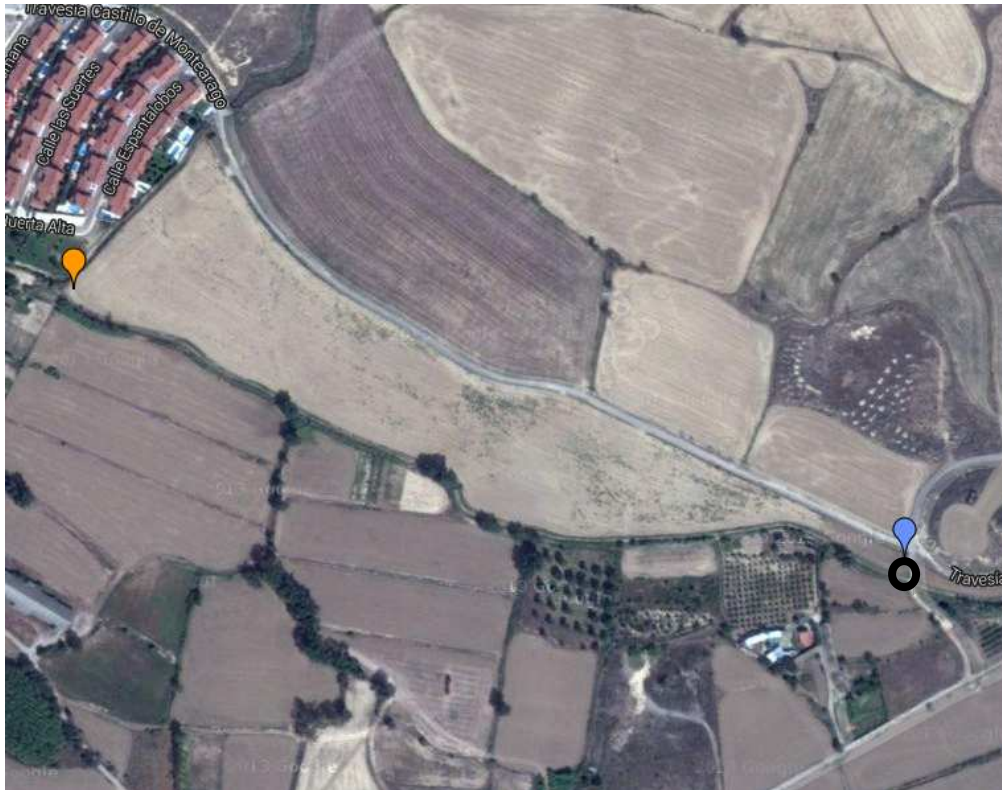


Figura 79: Señalización del lugar de bombeo y de la cota máxima y mínima de la parcela.
Fuente propia

El lugar donde se va realizar el bombeo desde la acequia se puede observar marcado en la figura anterior con un círculo, en la zona de mayor cota y es donde iría el depósito.



Figura 80: Lugar de bombeo. Fuente propia

El punto de descarga se sitúa aproximadamente a 1,30 m sobre el nivel de la superficie del agua de la acequia.

5.4 Cálculo teórico

Una vez que se tiene la localización y las condiciones previas adecuadas se realiza el cálculo del caudal que suministraría nuestra bomba y el modelo comercial. Se usa la caracterización hidráulica del prototipo 2 realizada en el apartado anterior.

Al desconocer todo el rango de velocidades del flujo que se pueden dar a lo largo del tiempo en la acequia cercana a la parcela, se calcula el caudal suministrado por la bomba a 1,3 m para las tres velocidades a las que ha sido caracterizada y se realiza la media.

En las dos primeras velocidades se sabe el caudal real que suministra a 1,3m siendo:

$$V = 0,423 \frac{\text{m}}{\text{s}} \rightarrow Q = 49,45 \frac{\text{l}}{\text{h}}$$

$$V = 0,682 \frac{\text{m}}{\text{s}} \rightarrow Q = 108,87 \frac{\text{l}}{\text{h}}$$

En el caso de la $V=1,08 \text{ m/s}$ no se conoce el caudal real ya que la medida no se tomó a esa altura. Para calcularlo se usa la fórmula de la línea de tendencia de las curva de caracterización. Por tanto:

$$y = -5,9192x^2 - 16,819x + 247$$

$$y = -5,9192 \times 1,3^2 - 16,819 \times 1,3 + 247$$

$$y = 215,13 \frac{\text{l}}{\text{h}}$$

La media de los caudales:

$$\text{Caudal medio} = \frac{49,45 + 108,87 + 215,13}{3} = 124,48 \frac{l}{h}$$

$$124,48 \frac{l}{h} \times \frac{1m^3}{1000l} \times \frac{24h}{1día} \times \frac{365 \text{ días}}{1 \text{ año}} = 1090,47 \frac{m^3}{año}$$

Las necesidades hídricas anuales de la plantación de almendros en nuestra parcela son:

$$1000 \frac{m^3}{ha \cdot año} \times 3,944 \text{ ha} = 3944 \frac{m^3}{año}$$

Como se puede ver a simple vista el volumen anual aportado por una bomba sería insuficiente y por consiguiente se calcula el número de bombas necesarias.

El número de bombas que se requieren es:

$$N^{\circ} = \frac{3944}{1090,47} = 3,61 \cong 4 \text{ bombas}$$

Para la bomba comercial, se escoge una de la casa Biosling en concreto el modelo 306 cuyas características técnica se describen en la siguiente figura:

Model type:	306
Diameter	300
Length(mm)	1 300
Weight (kg)	15
Tube/hose diameter (mm)	20
Necessary water depth (cm)	30
Pressure height (m)	6
Capacity (0,50 m/s)	-
Capacity (0,65 m/s)	7 500 l/day
Capacity (1,5 m/s)	15 700 l/day

Se elige este modelo porque cumple los requisitos en cuanto a calado necesario y velocidad de la acequia y además porque es el modelo que más se asemeja a las dimensiones del prototipo 2. Se desconoce la caracterización hidráulica que sigue dicha bomba y los caudales que proporciona aparecen para una misma altura de 6 m a tres velocidades diferentes. Por ello para estimar el caudal que nos proporcionaría se cogen los datos aportados en la figura anterior y se procede de la misma manera que con el prototipo 2.

Bomba comercial:

$$Q_{\text{medio}} = \frac{7500 + 15700}{2} = 11600 \frac{\text{l}}{\text{día}}$$

$$11600 \frac{\text{l}}{\text{día}} \times \frac{365 \text{ días}}{1 \text{ año}} \times \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ l}} = 4234 \frac{\text{m}^3}{\text{año}}$$

Se necesitan de esta bomba

$$N^{\circ} = \frac{3944}{4234} = 0,93 \cong 1 \text{ bomba}$$

Resumiendo se requieren 4 bombas en el caso del prototipo 2 que se pondrían a lo largo de la acequia cerca del punto de suministro y tan solo 1 para el caso de bomba de bobina comercial.

5.5 Estudio comparativo con una bomba convencional

Se va realizar el estudio comparando tres modelos, el fabricado en este proyecto, uno comercial y una bomba convencional de gasolina.

5.5.1. Selección de la bomba convencional

Se busca una motobomba teniendo en cuenta las necesidades hídricas, la altura a bombear y la magnitud de las otras bombas para intentar que la comparación sea justa. Se escoge una motobomba de gasolina de 2 tiempos de la marca Campeón modelo AT-25 de 0,95 CV de potencia.



Figura 81: Bomba convencional seleccionada. Fuente: extraída de www.campeon.es

Las características técnicas suministradas por el fabricante se exponen en la siguiente figura (figura 82).

Modelo	Modèle	Modelo	AT-25	AT-25 KIT
Código	Code	Código	3100	3100K
			26	26
			0,95	0,95
	máx (l/h)		6.600	6.600
	máx (m)		32	32
	ASP. máx (m)		8	8
			1"	1"
			25	25
	(h)		1	1
	LWA dB(A)		110	110
			358x263x323	358x263x323 + 380x290x190
	Kg		5,5	9,5
			✓	✓
			NO	5 m
			NO	12 m
			✓	✓
	P.V.P. €			

Altura / Caudal	Hauteur/Débit	Altura/ Caudal
	(m)	AT-25
	litros/hora	6.200
	litros/hora	5.400
	litros/hora	5.000
	litros/hora	4.000
	litros/hora	2.700
	litros/hora	1.000

Figura 82: Datos técnicos de la bomba. Fuente: extraída de www.campeon.es

5.5.2. Cálculo teórico de la bomba convencional

Con los datos del fabricante se elabora la grafica Altura-caudal

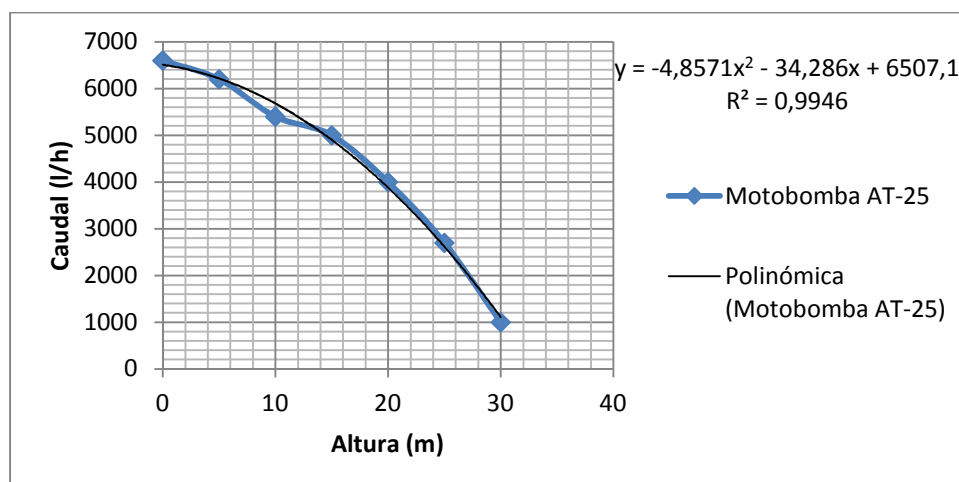


Figura 83: Gráfica de caracterización hidráulica de la bomba convencional. Fuente propia

Como la altura a la que se desea bombear es menor a los datos aportados por el fabricante y este último no proporciona una gráfica, se recurre a sustituir la altura a bombear en la fórmula de la línea de tendencia de la curva Altura-Caudal.

$$y = -4,8571x^2 - 34,286x + 6507,1$$

$$y = -4,8571 \times 1,3^2 - 34,286 \times 1,3 + 6507,1$$

$$y = 6454,32 \frac{\text{l}}{\text{h}} \times \frac{24\text{h}}{1 \text{ día}} \times \frac{365 \text{ días}}{1 \text{ año}} \times \frac{1\text{m}^3}{1000\text{l}} = \mathbf{56539,84 \frac{\text{m}^3}{\text{año}}}$$

Si comparamos la curva real con la línea de tendencia se comete un pequeño error del 1,4%, lo que se considera como aceptable.

La bomba cumple sobradamente con el volumen anual necesario. El siguiente paso es saber el consumo en gasolina de la bomba, para ello se debe calcular el tiempo necesario en bombear el caudal necesario.

$$\frac{3944 \frac{\text{m}^3}{\text{año}}}{6,454 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}} = \mathbf{611,063 \frac{\text{h}}{\text{año}}}$$

Número de horas son muy inferiores a las totales de un año por tanto también cumple. Con este datos se procede a estimar el consumo de combustible.

Al no contar con el dato de consumo de gasolina en la ficha técnica del fabricante de este modelo, se recurre a establecer una relación entre potencia y el consumo de gasolina (Ortega,2013).

$$\text{potencia} = \frac{\text{trabajo}}{\text{tiempo}}$$

$$1 \text{ CV} \cong 735,49 \text{ w} = 735,49 \frac{\text{J}}{\text{s}}$$

$$0,95 \text{ CV} \longrightarrow 698,71 \text{ w} = 698,71 \frac{\text{J}}{\text{s}}$$

Un litro de gasolina proporciona en su combustión:

$$1 \text{ l}_{\text{gasolina}} \longrightarrow 34,78 \cdot 10^6 \text{ J}$$

$$\frac{34,78 \cdot 10^6 \frac{\text{J}}{\text{l}}}{698,71 \frac{\text{J}}{\text{s}}} = 49777,447 \frac{\text{s}}{\text{l gasolina}}$$

$$49777,447 \frac{\text{s}}{\text{l gasolina}} = 13,82 \frac{\text{h}}{\text{l gasolina}}$$

Con estas operaciones afirmamos en un principio que 1 litro de gasolina proporciona energía durante 13,82 horas.

$$\frac{611,06 \frac{\text{horas}}{\text{año}}}{13,82 \frac{\text{h}}{\text{l gasolina}}} = 44,19 \frac{\text{l gasolina}}{\text{año}}$$

En cuanto al precio de la gasolina se toma de una estación de servicio Cepsa a día 8 de Julio de 2014, ascendiendo a 1,439 €/litro de gasolina sin plomo 95:

$$44,19 \frac{\text{l gasolina}}{\text{año}} \cdot 1,439 \frac{\text{€}}{\text{l gasolina}} = 63,59 \text{ €/año}$$

5.5.3. Bomba de bobina vs bomba de gasolina

Prototipo 2

El precio de esta bomba se ha calculado mediante la suma del coste de todas sus componentes, estando descrito en el anexo III de este proyecto. El precio del prototipo asciende a 69,29 €.

Se estima un coste de mantenimiento mínimo del 2% del valor de adquisición ya que en este tipo de bombas el mantenimiento es mínimo. Aun así este porcentaje es mayor a su homónima comercial ya que al ser de fabricación casera posiblemente el mantenimiento de alguna pieza o material sea ligeramente superior.

Bomba Biosling, modelo 306

El precio de la bomba se obtiene directamente de la casa comercial y asciende a 5188 coronas suecas o lo que es lo mismo 538,33€.

En cuanto al mantenimiento se supone inferior al del prototipo 2 ya que está fabricada con materiales específicos para este uso, y por tanto se estima un coste de mantenimiento del 1% del valor de adquisición.

Bomba convencional Campeón, modelo AT-25

Según el fabricante esta bomba tiene un precio de 179,30€.

El coste de mantenimiento se estima en la misma magnitud que la bomba biosling en un 1% del valor de adquisición.

A esta bomba además se le suma el coste asociado al consumo de gasolina durante su funcionamiento que como se ha calculado anteriormente asciende a 63,59€/año.

Se calculan los costes acumulados durante los años para todas las bombas y se enfrentan entre ellas en el siguiente gráfico.

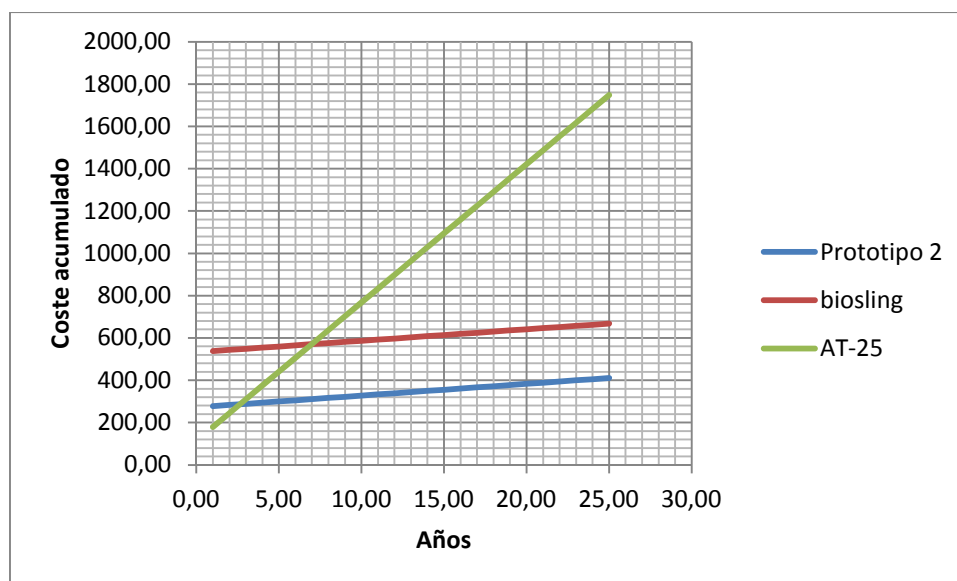


Figura 84: Gráfica comparativa del coste acumulado entre las tres bombas del estudio. Fuente propia

Como se puede observar en la gráfica anterior una instalación con bombeo mediante una energía alternativa a los combustibles fósiles requiere una inversión inicial más elevada. Esto se compensa durante la sucesión de los años en los que el coste del uso de la gasolina dirige un elevado incremento del coste acumulado en el bombeo

convencional hasta tal punto de superar a los dos prototipos de bomba de bobina, en el año 3 para el prototipo 2 y el año 7 para el modelo 306 de biosling. Una bomba de bobina tiene un mantenimiento muy somero en comparación con otro tipo de bombas y además no cuenta con el coste de combustible lo que hace que la pendiente de las rectas del coste acumulado en ambas bombas(prototipo 2 y biosling) sea muy suave.

6. CONCLUSIONES

6. CONCLUSIONES

Finalmente al analizar todo lo escrito y comentado en este documento nos lleva a sacar ciertas conclusiones. Éstas son las siguientes:

Existe muy poca información a nivel teórico y de cálculo sobre el funcionamiento. Es necesario frente a esto que se desarrollen fórmulas más precisas que puedan predecir con exactitud el caudal a diferentes alturas.

La construcción de un prototipo de bomba casero es relativamente sencilla y tiene un coste muy bajo y en nuestro caso el prototipo 2 ha sido un éxito. Con unos pocos medios más se podría haber fabricado un modelo con un funcionamiento muy eficiente.

La bomba troncocónica no obtuvo buenos resultados principalmente por su tamaño, lo que nos lleva a la conclusión de que existe unas dimensiones mínimas para que la magnitud de los parámetros de servicio de esta bomba sean apreciables.

De acuerdo con lo estudiado aquí, la aplicación de un bombeo con esta bomba a una explotación agrícola es posible y conlleva un menor coste fijo siempre y cuando sea un sistema de riego deficitario.

El uso de esta bomba actualmente abarca solo al terreno académico y bombeos en las zonas de países en vías de desarrollo, así como en el caso de personas con una elevada sensibilidad ambiental en países desarrollados. Sería interesante potenciar la investigación en la mejora de las prestaciones para poder implantarse en los sistemas de riego como una primera elección o como opción de riego de apoyo.

ANEXOS

ANEXO I

Procedimiento para la construcción del primer prototipo de bomba

ANEXO I

Procedimiento para la construcción del primer prototipo de bomba

Las bombas que se han construido y descrito en este documento se han elaborado mediante elementos sencillos tanto de fontanería como utensilios que podrían ser fácilmente accesibles en cualquier ferretería o tienda de bricolaje.

Los diferentes componentes se adquieren progresivamente y paso a paso en función de las necesidades que requiere el diseño.

Para la construcción de la bomba no se ha podido contar con un taller, así que se ha tenido que buscar un sitio adecuado.

El primer paso recomendable es la elección o construcción del tambor ya que es el elemento de cuyas dimensiones dependerá las prestaciones de la bomba.

En este caso se ha optado primero por la adquisición de un hélice debido a la dificultad de conseguir una, y posteriormente la elección y montaje del resto de los elementos que encajen con los antecesores. La hélice de la que se dispone es una hélice de fueraborda pequeña de diámetro 7-1/4 " y paso 6-1/2 ".

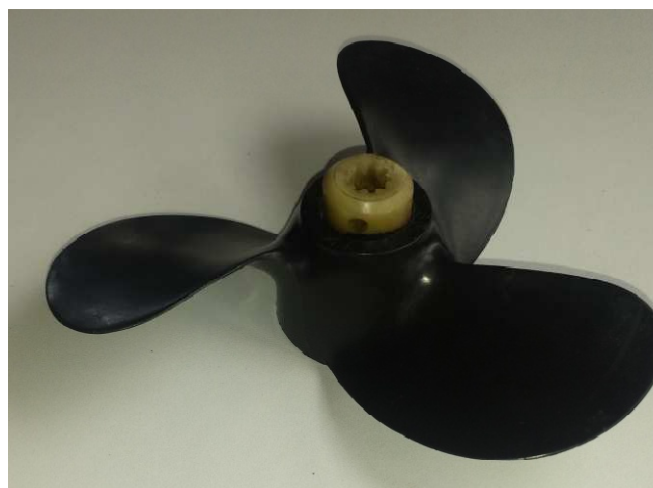


Figura 85: Hélice comprada para el prototipo 1. Fuente propia

Con las dimensiones de la hélice se busca un elemento para construir el tambor que pueda adaptarse a estas medidas para unirlos a ella.

El tambor se realiza usando como base un cono de señalización. Este cono tiene la forma idónea para nuestra bomba, pero se debe adaptar y modelizar.

El cono que se adquiere tiene una base negra de goma innecesaria para nuestro diseño, por lo que se elimina dejando solo la parte troncocónica de este. Esta parte se va a unir mediante cola de contacto a la hélice en el espacio entre el núcleo y la parte exterior de esta última.

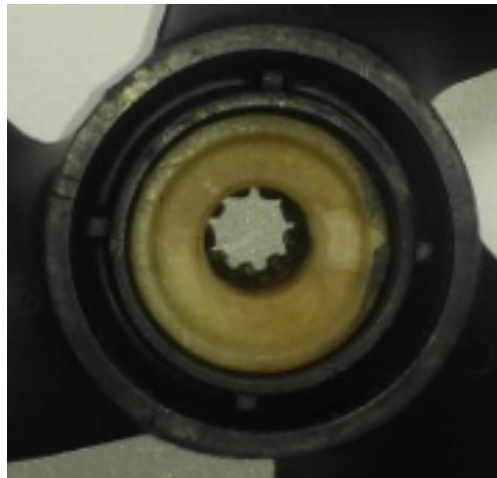


Figura 86: Núcleo de la hélice. Fuente propia

Para ello se recorta con una sierra la parte superior del cono hasta tener un diámetro igual al del núcleo de la hélice. Con el cúter se recorta para igualar la superficie de corte.



Figura 87: Adaptando el tamaño del cono al de la hélice. Fuente propia

Aunque no es un requisito necesario, se ha optado por lijar y pintar toda la superficie del cono por motivos estéticos.

Antes de unir la hélice con el cono se tiene que unir y enrollar la tubería de espiral a la cara interna de este último. Antes de esto se introduce un enlace mixto que hará de toma de entrada en la manguera de espirogas. Este enlace al ser de mayor diámetro amplía la sección de la toma, y para poder unirlo con la manguera se requiere un calentamiento de ésta para su dilatación.



Figura 88: Unión de la tubería en espiral con una unión mixta. Fuente propia

La bobina se enrolla desde el extremo inferior del cono hacia la salida donde estará la hélice, en la zona más estrecha del cono. El sentido de enrollamiento se hace teniendo en cuenta el sentido de giro de la hélice. Como su sentido es el anti-horario observándola desde su parte posterior donde el agua incide sobre ella, la tubería de espirogas se enrolla en ese mismo sentido para que los movimientos de ambos elementos sean anti horarios y por tanto la toma de entrada entre en el agua por su extremo abierto "barriéndola".



Figura 89: Enrollado de la tubería en espiral. Fuente propia

La tubería de espirogas se une mediante grapas metálicas de 15mm a la superficie interna del cono. Esta unión se hace cada 3 vueltas de espiral para permitir una fijación más o menos estable evitando así que la tubería deshaga su forma de espiral o escurra en el interior. Se atornilla con tornillos de 4x10 mm, tuerca 4 mm y arandelas de goma/metal 16 mm para que se adapten mejor a la superficie curva.

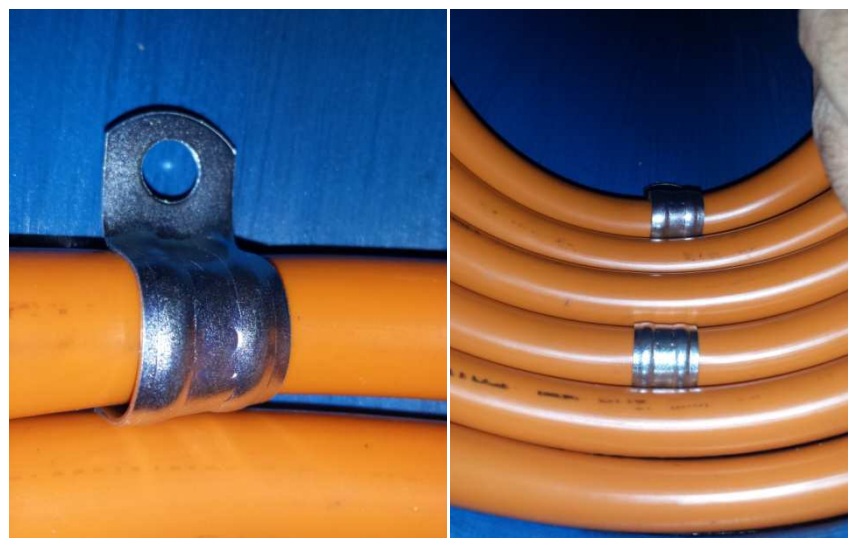


Figura 90: Detalle de la fijación de la tubería en espiral al tambor. Fuente propia

Una vez enrollada y fija, se pasa la manguera por el orificio central de la hélice, para ello se amplía este orificio con la ayuda de un taladro hasta que la manguera puede introducirse y alcanza los dos orificios que tiene la hélice a ambos lados dejándolos libres ya que serán el punto de unión con la junta rotativa, la cual se describe más adelante.



Figura 91: Detalle del paso de la tubería en espiral a través del núcleo de la hélice. Fuente propia

El siguiente paso es la construcción de la junta rotatoria. Su fabricación no tiene un patrón establecido ya que no es una bomba muy comercializada y por tanto su procedimiento puede variar de la fabricación de una bomba a otra, en función de los materiales a los que se tenga acceso.

En el caso de esta bomba se ha podido conseguir y adaptar diferentes elementos de fontanería.

La primera pieza que se usa es un manguito de reducción de latón hembra-hembra 3/4"-1/2". Esta pieza se usa para unir la hélice con la junta rotatoria.

Para ello primero se adapta la rosca de 3/4" del manguito al diámetro del saliente de la hélice, limando la superficie del manguito. Con la ayuda de un taladro se ajusta hasta un diámetro de 25mm.



Figura 92: Adaptación del manguito al tamaño de la hélice. Fuente propia

Posteriormente se hacen 2 orificios diametralmente opuestos en el manguito que coincidan con los dos orificios de la hélice (nombrados anteriormente), y con el mismo diámetro de 5mm. Estos agujeros se hacen usando un taladro con una broca especial para metal.

Para mantener firme la unión se utiliza un tornillo de cabeza hexagonal de rosca parcial de 5X50mm a modo de pasante a través de los 4 agujeros (2 hélice y 2 manguito), y se aprieta con 3 tuercas de 5mm. Esto obstruye ligeramente el flujo pero permite una unión solida que aguante la tracción generada al contrarrestar el empuje de la corriente.



Figura 93: Detalle de la unión del manguito a la hélice. Fuente propia

A este manguito se le une mediante roscado la parte principal de esta unión rotatoria y por tanto en la que recae la función. Esta parte principal es una unión de giro loco rosca macho-hembra 1/2"-3/4". Uno de sus extremos gira locamente respecto del otro aislando así el movimiento de un extremo del otro.

Por el otro extremo del giro loco se enrosca un manguito de reducción macho-hembra de 3/4"-1/2" como elemento de transición.

Posteriormente en el otro extremo de este manguito en la rosca hembra, se añade un enlace mixto rosca macho 1/2"-16mm, esto permite la unión de la junta a la tubería de suministro.



Figura 94: Junta rotatoria totalmente montada. Fuente propia

La unión del enlace mixto con la tubería de suministro se asegura con una brida metálica. El paso siguiente que afecta a la unión giratoria es el atado de la bomba a un punto fijo en la orilla de la corriente donde va a trabajar la bomba.

Cuando la unión de la hélice ya esta lista, entonces se impregna de cola de contacto tanto la superficie del cono como el espacio interior de la hélice y se unen ambos.



Figura 95: Pegado de la hélice al tambor. Fuente propia

Por otra parte, al enlace mixto de la toma de entrada se rosca un cono para aumentar el agua barrida por esta. A este cono se le pega con cola una malla mosquitera para que sirva de filtro frente a las partículas que puedan estar en la corriente.



Figura 96: Colocación de la malla en el cono de admisión. Fuente propia

La bomba después de estos pasos se podría dar casi como finalizada a falta del elemento de flotación.

Se realiza una primera prueba de flotabilidad de la bomba sin ningún elemento de flotación. La prueba indica que en este caso es necesario la instalación de algún elemento o material de flotación a la bomba, ya que a pesar de estar fabricada por elementos plásticos esta se sumerge completamente.

Se instala una cámara de aire de 3,5-8 cm en el extremo superior de la bomba. Para poder colocarla se taladra el tambor con el diámetro de la boquilla en una zona donde no hay tubería.



Figura 97: Colocación de la cámara de aire. Fuente propia

Y se une la cámara al tambor por medio de bridas de nylon de 7,2x350mm.



Figura 98: Fijación de la cámara de aire. Fuente propia

Primera modificación del prototipo 1

Después de diversas pruebas el primer prototipo tiene que ser modificado puesto que no cumplían con las prestaciones mínimas de funcionamiento.

La bomba no giraba debido a que la hélice era demasiado pequeña. Esta hélice se modifica para que sea capaz de hacer girar al tambor, para ello se debe modificar el radio de esta haciéndolo igual o superior al radio mayor del tambor troncocónico. Para este fin se hacen unas extensiones en metal de las palas de las hélices.

Primero se crea una plantilla con la forma de la pala y se dibuja sobre la chapa metálica



Figura 99: Dibujo del diseño de la ampliación de la pala. Fuente propia

Se recorta con una sierra de calar



Figura 100: Recortado de las extensiones. Fuente propia

Se realizan dos orificios por extensión y dos por pala coincidentes uno a uno.



Figura 101: Agujereado de los puntos de unión de las extensiones. Fuente propia

Se unen las "extensiones" a sus respectivas palas mediante tornillos de 6x15mm y tuerca de 6 mm.



Figura 102: Montaje final de la primera modificación. Fuente propia

Segunda modificación del prototipo 1

Después de la modificación de la hélice la bomba fue probada con diferentes velocidades. Los datos máximos de caudal y altura fueron de 0,5 m y 9 l/h, lo que no se podía considerar por ser excesivamente bajos. Para mejorar estos datos se cambia la manguera de espirogas de 9mm por otra transparente de mayor diámetro (15mm) enrollada esta vez por la parte exterior del cono y unida a este último al igual que con la anterior manguera con grapas metálicas pero de 18 mm y tonillos de 6x20mm, arandelas de metal/goma 16 mm y tuercas de 6mm.



Figura 103: Nueva disposición de la tubería en espiral. Fuente propia

Esta manguera se une mediante una unión recta de 16 mm a un fragmento de tubería de espirogas que se usa para atravesar el orificio central del núcleo de la hélice. Esta unión con la manguera de espirogas se hace calentándola con agua hirviendo.



Figura 104: Detalle de la unión de la manguera de 16mm con la de 9 mm. Fuente propia

En esta modificación el manguito de latón H-H se une a la hélice mediante cola y un par de tornillos pequeños de 5x10mm en los orificios de la hélice (mencionados anteriormente en la construcción de la bomba), sustituyendo al tornillo pasante de 5x50mm dejando así paso a la manguera de espirogas en su totalidad a través de el agujero central de la hélice (figura 105).



Figura 105: Detalle de la modificación del paso de la tubería en espiral a través del núcleo de la hélice . Fuente propia

El otro extremo de esta manguera de espirogas se introduce a presión en el orificio menor del giro loco (figura 106). Se hace principalmente para evitar las posibles fugas de aire a través de los orificios de la hélice cuando estaba el tornillo pasante.



Figura 106: Unión de la tubería en espiral con el giro loco. Fuente propia

Como último paso, con el fin de reducir la pérdida de carga singular, se sustituye el manguito reductor 3/4"-1/2" y la unión mixta 1/2-16mm por una unión directamente al giro loco de un codo de 90° de unión mixta 3/4-16mm del que saldrá la tubería de descarga.



Figura 107: Manguito de latón con giro loco y con codo de 3/4-16mm. Fuente propia

ANEXO II

Procedimiento de construcción del segundo prototipo

ANEXO II

Procedimiento de construcción del segundo prototipo

El primer paso es la adquisición de un bidón de forma cilíndrica que cumpla la función de tambor. En nuestro caso se compra un bidón de 20 l cuyo radio es de 0,28m.

Este bidón se trabaja hasta transformarlo en el tambor de la bomba. Para ello se elimina la parte superior con un cúter.

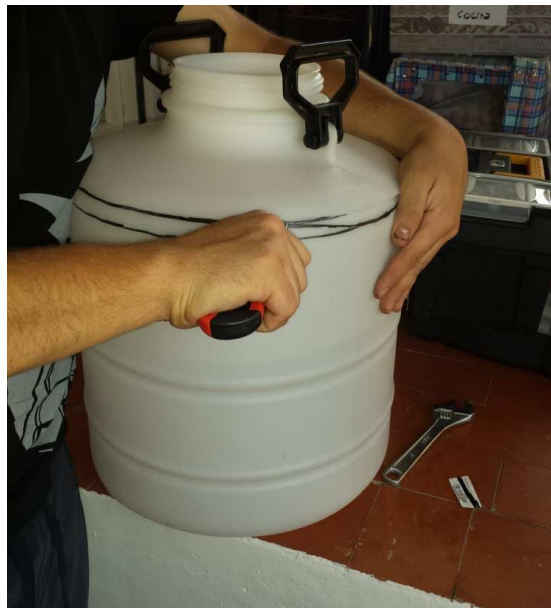


Figura 108: Adaptación del bidón a tambor. Fuente propia

Posteriormente se busca el centro de la cara inferior del bidón y se realiza un orificio de diámetro 3/4" igual al manguito macho-hembra que se colocará con la junta rotatoria.



Figura 109: Colocación del manguito M-H 3/4"-1/2" en el tambor. Fuente propia

Se dibujan las líneas donde van a ir las tres palas de la hélice, con la ayuda de un cartabón haciendo que el arco entre cada línea sea de 120° .



Figura 110: Dibujo de la localización de las palas de la hélice. Fuente propia

En la base del tambor se coloca una chapa metálica de 15x15 cm. Esta chapa se coloca para dar rigidez a la base del tambor y para que todo el conjunto de hélice y junta rotativa este unido a este elemento en vez de al plástico.



Figura 111: Colocación de la chapa metálica de 15x15 cm. Fuente propia

A esta chapa se le hace un orificio igual y coincidente al realizado en la base del bidón. El manguito macho-hembra de $3/4''-1/2''$ se coloca en la parte interna del tambor y se une al manguito hembra-macho $3/4''-1/2''$ colocado en la parte externa del tambor quedando todo bien unido.



Figura 112: Modo de unión del tambor con junta rotatoria. Fuente propia

La siguiente etapa es la construcción de la hélice, esta se realiza siguiendo los siguientes pasos:

Se cortan 5 fragmentos de 8,5 cm un listón de madera de 3,5 x 3,5cm. Dos de ellos se cortan con la ayuda de una caladora en triángulos rectángulos.



Figura 113: Cuñas de madera. Fuente propia

Se sacan un total de 3 triángulos, en cada uno de ellos ira apoyada una pala de la hélice. Estos además irán apoyados a cada uno de los tres fragmentos de listón de madera previamente cortados.



Figura 114: Disposición de los tacos con las cuñas. Fuente propia

Estos dos elementos se atornillan entre ellos con dos tirafondos de cabeza plana de 50 mm. Y se les realizan dos orificios de 6 mm centrados que se usarán para unir a estos dos a la pala y todo este último conjunto al tambor.



Figura 115. Unión de los tacos con las cuñas. Fuente propia

A toda esta pieza se le aplica un producto protector contra el agua para evitar en alguna medida que el poro de la madera absorba agua y se desquebraje.



Figura 116: Barnizado protector de las cuñas. Fuente propia

Por otra parte se realizan las palas de la hélice. Para ello se usa como material aluminio para evitar la oxidación. Se cortan las palas de una plancha de aluminio con la ayuda de una sierra caladora. En este caso las palas se cortan en forma rectangular con unas dimensiones de 24,5 x 14 cm para asegurar que sobrepasan en longitud a la del tambor, facilitando que el momento generado sea el necesario para mover todo el tambor.

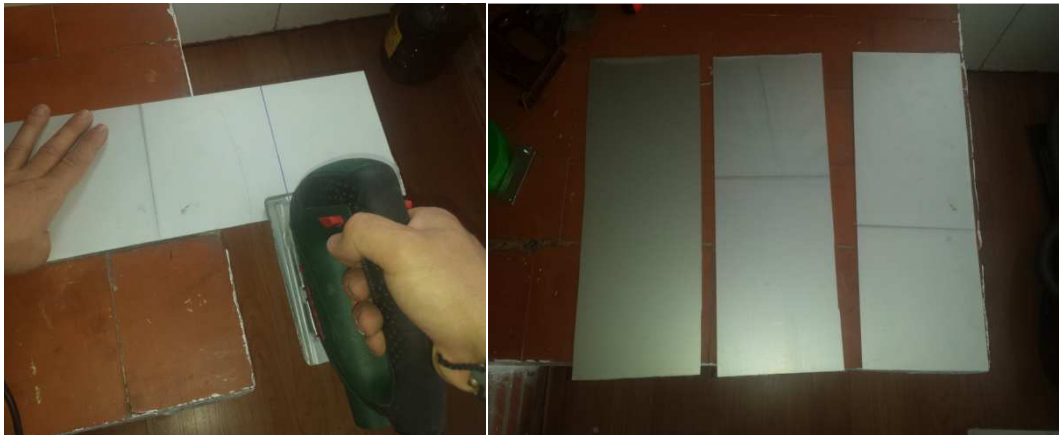


Figura 117: Recortado de las palas de la hélice. Fuente propia

Una vez hechas las palas se realizan unos orificios en el tambor coincidentes con los hechos en los tacos de madera y que atraviesen el plástico del bidón y la chapa metálica que se ha colocado debajo. Este procedimiento se hace para cada taco de madera.



Figura 118: Unión de las cuñas al tambor. Fuente propia

Posteriormente se unen chapa metálica-tambor-taco de madera-pala de hélice mediante dos tornillos de 6x80 mm, dos arandelas de goma-metal de 16mm y dos

tuerkas de 6 mm. La orientación de las cuñas de madera es importante porque define el sentido de giro. En este caso se orienta de manera que el sentido de giro sea anti-horario, esto evita que los elementos roscados se desenrosquen.



Figura 119: Unión de las palas al conjunto de la bomba. Fuente propia

Una vez montada las hélices se rosca en su totalidad la junta rotatoria y la toma de salida.

La junta rotatoria de 1/2"-3/4" se rosca al manguito de latón que está unido al tambor. Seguido de esta junta se rosca un manguito de reducción de 3/4"-1/2" seguido de un enlace mixto con rosca 1/2"-16mm.



Figura 120: Montaje de la junta rotatoria. Fuente propia

A este último enlace se añade un tramo de manguera transparente de 15mm de 7cm de longitud unido a otro tramo del mismo material de 6cm mediante un manguito de 16mm. Al último tramo de manguera se le acopla un codo de 90° y 16 mm que dará en su otro extremo a la tubería de descarga siendo también esta de manguera transparente de 15mm. Todos los elementos se aseguran mediante bridas metálicas.



Figura 121: Montaje de la extensión

Para la bobina se usa una manguera transparente de 15 mm y como en el primer prototipo se enrolla y se fija mediante grapas metálicas de 18 mm tornillo de 6x20mm y arandela metálica de 16mm. Esta manguera se enrolla siguiendo el sentido anti-horario y se usan 11 metros formando 13 vueltas de espiral de 0,1325 m de radio.



Figura 122: Detalle de la unión de la tubería de 15 mm al tambor. Fuente propia

Como último paso se colocan dos cámaras de aire. Una pequeña de 10" en la parte interior del tambor para que la parte de la hélice y de la junta que son pesadas no se hundan totalmente. Se une con bridas al tambor.



Figura 123: Fijación de la cámara de 10 ". Fuente propia

Y la otra cámara de 12" en la parte exterior de la entrada del tambor para que la bomba pueda tomar aire. También se ata con bridas para mantenerla recta.



Figura 124: Fijación de la cámara de 12 ". Fuente propia

ANEXO III

Presupuesto

ANEXO III

En este anexo se detalla el coste total de los materiales utilizados en la construcción de los dos prototipos.

Presupuesto prototipo 1

	DESCRIPCIÓN					CANTIDA D	PRECIO	IMPOR TE
1	m	Manguera trasparente						
		m. Manguera trasparente de 15 mm diámetro interno						
						11,00	1,20	13,20
2	u	Grapas metálicas						
		Ud. Grapas de metal de 18 mm de diámetro para fijar cables.						
						13,00	0,07	0,91
3	u	Tornillo 6x20mm						
		Ud. Tornillo rosca métrica DIN-933 cabeza hexagonal en acero cincado M6, 6x20 mm						
						13,00	0,10	1,30
4	u	Arandela goma/metal						
		Ud. Arandela mixta de goma/metal 16 mm exterior						
						19,00	0,18	3,42
5	u	Tuerca 6mm						
		Ud. Tuerca hexagonal inox.A2. Din. 934, M6. (6mm)						
						19,00	0,05	0,95
6	u	Brida nylon						
		Ud. Brida de nylon 7.2x350mm. Dimensiones de apertura: 2,8 mm diámetro min, 98mm diámetro máx.						
						5,00	0,09	0,45
7	u	Abrazadera metálica sin fin						
		Ud. Abrazadera metálica si fin para mangueras sin fin, 16-20mm						
						5,00	0,50	2,50
8	m²	Chapa de acero						
		m ² . Chapa de acero de 3 mm de espesor						
						0,02	119,80	2,70
9	m²	Chapa de aluminio						
		m ² . Chapa de aluminio de 2,5mm de espesor						
						0,10	11,87	1,19

10	u	Enlace macho recto 1/2"-16mm						
		Ud. Enlace mixto rosca macho 1/2" -16 mm				2,00	0,23	0,46
11	u	Reducción hexagonal latón H-M						
		Ud. Reducción hexagonal de latón hembra-macho, 1/2"-3/4".				1,00	1,58	1,58
12	u	Maguito latón H-M						
		Ud. Manguito reductor de latón hembra-macho, 3/4"-1/2".				1,00	2,06	2,06
13	u	Maguito latón H-H						
		Ud. Manguito de latón hembra-hembra, 1/2".				1,00	2,28	2,28
14	u	Unión giro loco M-H						
		Ud. Unión reductora giro loco macho-hembra, 1/2"-3/4".				1,00	3,23	3,23
15	u	Manguito reducción M-H, 3/4-1/2						
		Ud. Manguito de reducción de polipropileno M-H de rosca 3/4"-1/2"				1,00	0,96	0,96
16	u	Codo unión polietileno						
		Ud. Codo de unión de 90º, 16mm				1,00	0,60	0,60
17	m	Listón de madera						
		m. Listón de madera de 3,5x3,5cm.				0,26	1,40	0,36
18	u	Tornillo 6x80						
		Ud. Tornillo rosca métrica DIN-84 cabeza avellanada y ranurada de acero cincado, 6x80 mm				6,00	0,50	3,00
19	u	Cámara vedrestein carretilla						
		Ud. Cámara de aire para carretilla 260x85mm.				1,00	9,07	9,07
20	u	Cámara de aire						
		Ud. Cámara de aire de 12".				1,00	2,99	2,99

21	u	bidón 20l			
		Ud. Bidón para agua de 20 l de capacidad.			
			1,00	13,80	13,80
22	u	Enlace recto 16mm			
		Ud. Enlace recto 16 mm			
			1,00	0,60	0,60
COSTE TOTAL DE LA BOMBA.....					67,60

Presupuesto prototipo 2

		DESCRIPCIÓN	CANTIDA D	PRECIO	IMPOR TE
1	m	Manguera transparente			
		m. Manguera transparente de 15 mm diámetro interno			
			7,00	1,20	8,40
2	u	Grapas metálicas			
		Ud. Grapas de metal de 18 mm de diámetro para fijar cables.			
			8,00	0,07	0,56
3	u	Tornillo 6x20mm			
		Ud. Tornillo rosca métrica DIN-933 cabeza hexagonal en acero cincado M6, 6x20 mm			
			14,00	0,10	1,40
4	u	Arandela goma/metal			
		Ud. Arandela mixta de goma/metal 16 mm exterior			
			8,00	0,18	1,44
5	u	Tuerca 6mm			
		Ud. Tuerca hexagonal inox.A2. Din. 934, M6. (6mm)			
			14,00	0,05	0,70
6	u	Brida nylon			
		Ud. Brida de nylon 7.2x350mm. Dimensiones de apertura: 2,8 mm diámetro min, 98mm diámetro máx.			
			3,00	0,09	0,27
7	u	Enlace recto 16mm			
		Ud. Enlace recto 16 mm			
			1,00	0,60	0,60
8	u	Cono señalización			

		Ud. Cono de señalización de polietileno de 50 cm de altura con base de caucho sintético.			
			1,00	8,50	8,50
9	u	Hélice 7-1/4", 6-1/2"			
		Ud. Hélice de plástico de motor fueraborda, diámetro 7 1/4" y paso 6 1/2".			
			1,00	30,00	30,00
10	u	Maguito latón H-H			
		Ud. Manguito reductor de latón hembra-hembra, 3/4-1/2.			
			1,00	1,27	1,27
11	u	Unión giro loco M-H			
		Ud. Unión reductora giro loco macho-hembra, 1/2"-3/4".			
			1,00	3,23	3,23
12	u	Codo macho unión mixta 3/4-16 mm			
		Ud. Codo de 90º polipropileno de unión mixta 3/4"-16 mm			
			1,00	0,28	0,28
13	u	Cámara Trayal 3.5-8			
		Ud. Cámara de aire para carretilla de 3.5 -8 cm de diámetro.			
			1,00	6,05	6,05
14	u	Abrazadera metálica sin fin			
		Ud. Abrazadera metálica si fin para mangueras sin fin, 16-20mm			
			3,00	0,50	1,50
15	u	Codo unión polietileno			
		Ud. Codo de unión de 90º, 16mm			
			1,00	0,60	0,60
16	m²	Chapa de acero			
		m ² . Chapa de acero de 3 mm de espesor			
			0,04	119,80	4,49
COSTE TOTAL DE LA BOMBA.....					69,29

BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA

Abdel Basier, E.I. (2005). *Coil Pump Design and Performance*. M. Sc. Thesis, Faculty of Engineering, Alexandria University, Egypt.

Belcher, A.E. (1990). *The Rotary Scroll Collector*. The Northern Engineers. The School of Engineering University of Alaska Fairbanks. Vol. 22. No. 1. pp 27-34.

Belcher, A.E. (1995). *Recovery of Revenues Lost to Fish Passage*. Proceedings Waterpower '95, American Society of Civil Engineers, New York, Vol. 3, pp 1956-1965.

Brown, L. (2006). Using Stream Energy to Pump Livestock Water. Ministry of Agriculture and Lands Order, Resource Management Branch. Columbia. No. 590, pp. 305-308.

Camacho, Gómez O., Torres, Ducón E.L. (2010). *Sistema de bombeo con energía alternativa para la vereda naranjal bajo municipio de socorro*. Director: Jabid Quiroga. Trabajo de Grado. Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Bucaramanga.

Dibwe, M. (1978). *The Design, Construction and Testing of a Stream-Driven Hydrostatic Coil Pump*. 3rd year Student Special Project. University of Dar es Salaam, Department of Agricultural Engineering, Morogoro, Tanzania.

Ewbank, T. (1849), *A Description and Historical Account of Hydraulic and Other Machines for Raising Water*. New York City, pp 2000-2001.

Griffin, T. (1997). *Barrel Pump*. Report, Sustainable Technology for Water Livestock Project, Holland.

Jacobs. P. (2007). *Spiral Pump Using Water Current of Shire River at Zalewa*, Malawi

Karlsson, Per-Olof. *An automatic water pump*. JTM Produkt, AB, Jukkasjarvi, Sweden.

Kassab, S.Z., Abdelnaby, A.A., Abdelbasier, E.I. (2005). *Coil Pump Performance under variable Operating Conditions*. Proceedings of 9th International Water Technology, IWTC9, Sharm Elsheikh, Egypt, Vol. 2, pp. 655-672.

Kassab, S.Z., Abdelnaby, A.A., Abdelbasier, E.I. (2006). *Performance of Multi-layer Coil Pump*. Proceedings of 10th International Water Technology, IWTC10, Alexandria, Egypt, Vol. 2, pp. 431-445.

Kassab, S.Z., Abdelnaby, A.A., Abdelbasier, E.I. (2006). *Performance of Conical Coil Pump*. Proceedings of 6th International Conference of Role of Engineering Towards a Better Environment, RETBE, Alexandria, Egypt, pp. 1-15.

Kulasinghe, A.W.S. (1994). *Water pumping technologies-NERD experience*. 20th WEDC Conference. Colombo, Sri Lanka, pp. 1-4.

M. Reimer, (1985). *The steam-driven coil pump*. Waterlines, Vol. 4, No. 1 , pp. 20-22.

M.I. Ramli., M.F. Basar., N.H.A. Razik. (2013). *Natural Energy Water Pump: Revisit the Water Sling Pump*. International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE). Volume 3, No. 2.

Morgan, P. (1984). *A Spiral Tube Water Wheel Pump*. Blair Research Bulletin of Zimbabwe's Ministry of Health.

Morgan, Peter R., (1979). *A New Water Pump: Spiral Tube*. The Zimbabwe Rhodesia Science News, Vol. 13, No. 18, pp. 179-180.

Mortimer, G.H., Annable, R., (1984). *The Coil Pump - Theory and Practice*. J. Hydraulic Research, Vol. 22, No. 1, pp. 9-22.

Ohlemutz, Rudolf, E. (1975). *The Hydrostatic Pump and Other waterlifting Devices in the Context of the Intermediate Technology Approach*. Dissertation. University of California, Berkley.

Ortega, Nebra, J. (2013). *Construcción, caracterización hidráulica y estudio de aplicación de una bomba de ariete para riego de una finca agrícola*. Director César González. Proyecto fin de carrera. Universidad de Zaragoza, Escuela Politécnica Superior de Huesca. España

Ramli, M.I., Basar, M.F., Razik, N.H.A. (2013). *Natural Energy Water Pump: Revisit the Water Sling Pump*. International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE). Vol. 3, No. 2.

Rees, A., et. al., *The Cyclopaedia*, Vol. XXXIII (Text), Vol. V (Plates), First American Edition, 1819 - 1820, Boston Public Library (Special Collection).

Rife Products, 1987 "Helical intake coil pump: Sling pump", Rife Hydraulic Engine Mfg. Co., nanticoke.

Sanmiguel, Jaime, J.C., Andrés Machuca., E. (2012). *Rediseño del Sistema de Bombeo con Energía No-Convencional (Bomba de Rueda)*. Director: Jabid Quiroga. Trabajo de Grado. Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Bucaramanga.

Stuckey, Alan, T., Wilson, E.M. (1980). *The stream-powered manometric pump*. Proceedings of the Institute of Civil Engineers Conference on Appropriate Technology in Civil Engineering. London. pp. 105-108.

Terán, Echeverría, M.A. (2012). *Diseño y Construcción de un Banco de Pruebas para Bombas de Espiral*. Director: Francisco Terneus. Proyecto de Grado. Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica. Escuela Politécnica del Ejercito. Ecuador.

Thompson, P.L., Milonova, S., Reha, M., Mased, F., Tromble, I. (2011). *Coil Pump Design for a Community Fountain in Zambia*. International Journal for Service Learning in Engineering. Vol. 6, No. 1, pp. 33-45.

Weir, A. (2001). *Hydrostatic Coil Pump ,a possible pump design for 3rd world use*. Report, University of Sokoine, Morogoro, Tanzania.

West. J., Tailer. P. (1986). *The spiral pump-a high lift slow turning pump*. Paper, Windfarm Museum, Vineyard Haven, Massachusetts.

Prairie Agricultural Machinery Institute. *The stockman's guide to range livestock watering from surface water source*. Canada: Portage la Prairie, 1995.

SITIOS WEB

- <http://biosling.se/en/products/the-sling-pump/>. (revisada en febrero 2014)
- <http://blog.modernmechanix.com/chinese-windmill-waters-farm/>. (revisada en febrero 2014)
- <http://es.slideshare.net/jfrugel/equivalencia-altitudpresion>. (revisada en mayo 2014)
- <http://lurkertech.com/water/pump/belcher/fish/>. (revisada en marzo 2014)
- <http://lurkertech.com/water/pump/morgan/tripod/>. (revisada en marzo 2014)
- <http://lurkertech.com/water/pump/tailler/>. (revisada en marzo 2014)
- <http://sigpac.magrama.es/fega/h5visor/>. (revisada en junio 2014)
- http://www.animatedsoftware.com/elearning/All%20About%20Pumps/glossary/aap_glossary.html. (revisada en marzo 2014)
- <http://www.articnova.se/>. (revisada en abril 2014)
- <http://www.earthgarden.com.au/waterwheel.html>. (revisada en abril 2014)
- <http://www.fao.org/docrep/010/ah810e/ah810e06.htm>. (revisada en abril 2014)
- <http://www.fao.org/docrep/010/ah810e/ah810e12.htm>. (revisada en marzo 2014)
- <http://www.omafra.gov.on.ca/english/engineer/facts/04-027.htm>. (revisada en marzo 2014)
- <http://www.riferam.com/river/>. (revisada en marzo 2014)
- <http://www.wildwaterpower.com/>. (revisada en marzo 2014)
- <http://www.youtube.com/watch?feature=endscreen&v=8oCt-EHQQvs&NR=1>. (revisada en marzo 2014)
- <http://www.youtube.com/watch?NR=1&v=seNswRYkZdE&feature=fvwp>. (revisada en marzo 2014)

- <http://www.youtube.com/watch?v=FG18tDWLxk0&NR=1&feature=endscreen>.
(revisada en marzo 2014)
- <http://www.youtube.com/watch?v=LbklIccv2CI>. (revisada en junio 2014)
- <http://www.youtube.com/watch?v=mN9iLNHGOYL>. (revisada en junio 2014)
- <http://www24.brinkster.com/alexweir/coilpump/default.htm>. (revisada en junio 2014)
- www.campeon.es. (revisada en junio 2014)

DOCUMENTOS DE INTERNET

- <http://lurkertech.com/water/pump/mortimer/mortimer.pdf>. (revisada en marzo 2014)
- <http://www.agf.gov.bc.ca/resmgmt/publist/500Series/590305-5.pdf>. (revisada en febrero 2014)
- <http://www.al.gov.bc.ca/resmgmt/publist/500Series/590305-2.pdf>. (revisada en febrero 2014)
- [http://www1.agric.gov.ab.ca/\\$department/deptdocs.nsf/ba3468a2a8681f69872569d60073fde1/42131e74693dcd01872572df00629626/\\$FILE/wpower.pdf](http://www1.agric.gov.ab.ca/$department/deptdocs.nsf/ba3468a2a8681f69872569d60073fde1/42131e74693dcd01872572df00629626/$FILE/wpower.pdf).
(revisada en febrero 2014)
- <https://docs.google.com/document/d/1JelRZfnxmUbKbB9dnyAOPxIObS646k1AFjXLMiaqZg4/edit?pli=1>. (revisada en febrero 2014)
- http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/djean/index_archivos/Instrumentacion.html. (revisada en abril 2014)
- <http://www.bvsde.paho.org/sde/ops-sde/bvsde.shtml>. (revisada en mayo 2014)

