

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos

Área de ingeniería térmica



PROYECTO FINAL DE CARRERA

**DISEÑO, MONTAJE Y ENSAYO DE UNA
BOMBA DE MECATE**

Autor: JAVIER TOBELLA ARREDONDO

Director: ULPIANO RUIZ-RIVAS HERNANDO

Ingeniería Técnica Industrial especialidad Mecánica

Marzo de 2011

Agradecimientos

En primer lugar les dedico este proyecto a mis padres por haberme dado la oportunidad y facilidades para poder formarme, aparte de todo su apoyo y ánimo. A mi hermana que tanta “presión” ha ejercido siempre para que realice las cosas correctamente. A todos mis compañeros y amigos por haberme ayudado con todo el “trabajo sucio” que este proyecto ha supuesto y a los que no han ayudado también, dándome su compañía y apoyo. A Ulpiano por haberme ofrecido la oportunidad de realizar este proyecto. A mis abuelos (los que están y los que no) que tanto lucharon para dar a su familia una vida digna. Y por último, y no por ello menos importante, a quien se quedó en el camino y me acompaña a donde vaya.

Javier Tobella Arredondo, Marzo de 2011

ÍNDICE

1	
1. INTRODUCCIÓN.	5

2	
2. SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA EN ZONAS RURALES. LA BOMBA DE MECATE.	8
2.1 NECESIDAD DE ABASTECIMIENTO.	8
2.2. BOMBAS MANUALES COMO MODO DE ABASTECIMIENTO. CONCEPTO VLOM.	10
2.3. TIPOS DE BOMBAS MANUALES.	11
2.3.1. BOMBAS DE PISTÓN.	11
2.3.1.1. BOMBAS DE SUCCIÓN.	11
2.3.1.2. BOMBAS DE ACCIÓN DIRECTA.	13
2.3.1.3. BOMBAS DE POZO PROFUNDO.	14
2.3.2. BOMBAS DE DIAFRAGMA.	16
2.3.2.1. BOMBA VERGNET.	17
2.3.2.2. BOMBA Abi-ASM.	19
2.3.3. BOMBAS DE CUBO Y CUERDA.	19
2.4. BOMBA DE MECATE.	20
2.4.1. BOMBA DE NICARAGUA.	22
2.4.2. BOMBA DE MADAGASCAR.	23

3	
3. COMPARATIVA DE LAS DIFERENTES ALTERNATIVAS. DETERMINACIÓN FINAL.	24
3.1. PROFUNDIDAD DE BOMBEO.	25
3.2. RUEDA.	26
3.3. COJINETES DE LA MANIVELA.	29
3.4. FRENO.	30
3.5. MANIVELA.	30
3.6. BASE-ESTRUCTURA.	30
3.7. PISTONES.	32
3.8. CAJA GUÍA.	32
3.9. ELEMENTOS RESTANTES.	34
3.10. TABLA RESUMEN.	35

4	
4. DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN ACTUAL. MONTAJE.	36
4.1. INSTALACIÓN COMPLETA.	36
4.2. BANCO DE ENSAYOS.	37
4.3. DEPÓSITO.	39
4.4. CAJA GUÍA.	40
4.5. CONDUCTO DE SUBIDA.	42
4.6. CONDUCTO DE BAJADA.	43
4.7. ESTRUCTURA SUPERIOR.	44
4.8. CUERDA.	45
4.9. PISTONES.	46

4.10. ANCLAJES.....	47
4.11. DETALLES DESTACABLES DEL MONTAJE.....	48
4.12. PRESUPUESTO.....	55

5

5. TÉCNICA DE MEDIDA.....	56
5.1. ELEMENTOS NECESARIOS.....	56
5.2. FORMA DE REALIZAR LAS MEDIDAS Y OBTENER DATOS.....	57
5.3. CONCEPTOS A TENER EN CUENTA.....	59

6

6. RESULTADOS.....	61
6.1. ESTUDIO DE LA FRECUENCIA τ	63
6.1.1. DETERMINACIÓN PRÁCTICA DE LA FRECUENCIA NATURAL.....	64
6.2. ALTURA DEL FRENTE DE AGUA H _{FA}	65
6.2.1. ESTABILIDAD DE LA ALTURA DEL FRENTE DE AGUA DEPENDIENDO DE LA POSICIÓN (Y) DENTRO DE LA TUBERÍA.....	65
6.2.2. RELACIÓN ENTRE LA ALTURA DEL FRENTE DE AGUA H _{FA} Y EL NIVEL DE AGUA ÚTIL H _E	68
6.2.3. EVOLUCIÓN DE H _{FA} CON RESPECTO A LA FRECUENCIA (τ) DE GIRO.....	70
6.3. ESTUDIO DE EL CAUDAL (Q) FRENTE A LA FRECUENCIA (τ).....	71
6.4. COMPARACIÓN DEL CAUDAL TEÓRICO CON EL CAUDAL EXPERIMENTAL.....	72
6.5. VELOCIDAD DE PÉRDIDAS.....	74
6.5.1. ESTABILIDAD EN V _p	75
6.6. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS SOBRE EL CAUDAL.....	76
6.7. TIEMPO NECESARIO PARA EXTRAER AGUA FRENTE A LA ALTURA DE BOMBEO.....	76
6.8. DETERMINACIÓN DEL PAR Y DE LA POTENCIA.....	77

7

7. NOMENCLATURA.....	81
----------------------	----

8

8. CONCLUSIONES.....	83
----------------------	----

9

9. BIBLIOGRAFÍA.....	84
----------------------	----

10

10.LISTADO DE ORGANIZACIONES INTERNACIONALES.....	86
---	----

11

11. ANEXOS.....	87
-----------------	----

1. INTRODUCCIÓN.

Este proyecto se enmarca dentro de la iniciativa de la Universidad Carlos III de Madrid para construir, en una primera etapa, un laboratorio de tecnologías apropiadas al abastecimiento de agua. Este laboratorio se ubica en un espacio habilitado para la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III e incluye un banco de ensayo de bombas manuales, un banco de ensayos para sistemas de bombeo alimentados con paneles fotovoltaicos y un banco de ensayos de sistemas de potabilización, incluyendo columnas de filtración.

En la segunda etapa se procede a la construcción de dichas bombas, en este proyecto se detalla el diseño, montaje y ensayo de una bomba de mecate.

La construcción de la bomba manual de mecate suponía un trabajo muy interesante para mí, ya que era la oportunidad de demostrar mis conocimientos adquiridos durante la carrera y aplicar mis conocimientos prácticos. Además de ser una iniciativa muy atractiva ya que el fin de esta instalación es mejorar la bomba para que se pueda implantar en zonas subdesarrolladas con un rendimiento óptimo.

Una vez adquiridos los materiales, se comenzó a construir la bomba, empezando por la estructura superior hasta que empezó a coger forma.

Uno de los problemas que surgieron a la hora de comenzar a construir fueron los pistones, por el tiempo que se requería para tener el molde. Por este motivo, se diseñaron unos pistones provisionales, que, aunque funcionaron satisfactoriamente, se degradaban muy rápido.

El 5 de Agosto de 2010 la bomba elevó agua por primera vez aunque con deficiencias bastante obvias, una de ellas era que extraía muy poco caudal pero, poco a poco, examinando los parámetros afectaban a este, se variaron hasta obtener la bomba actual.

Ahora es más robusta y conozco sus parámetros, variándolos a mi conveniencia dependiendo del parámetro que quiera observar.

En cuanto a la estructura de este proyecto, esta dividido en varias secciones. En el primer bloque, se describe en primer lugar, la necesidad de abastecimiento de agua y en segundo lugar se introducen las diferentes alternativas de bombas manuales que se han utilizado o se utilizan en la actualidad.

En el segundo bloque, se describe la bomba de mecate sobre la que se ha trabajado así como las dos alternativas en las que este proyecto se ha basado. Estas alternativas han sido la bomba de Madagascar y la bomba de Nicaragua, son muy parecidas a la que se ha construido.

Para el montaje de la bomba que nos ocupa, se han utilizado los componentes, a valoración personal, mejorarían el diseño de la nueva bomba.

A continuación, se detalla la instalación actual con medidas reales y sus características, al final de éste se describe el montaje de algunos elementos con una complicación del montaje elevada.

Una vez definidos todos los parámetros de la instalación se procede a su caracterización. Las alternativas a estudio (bombas de Madagascar y Nicaragua) tienen un funcionamiento óptimo pero hay parámetros fundamentales que no están definidos, como por ejemplo, el nivel de agua que ha de tener el pozo, el caudal de extracción

dependiendo de la frecuencia de giro de la rueda y de la altura de bombeo, etc. Es en este sentido cuando se atiende a la caracterización de la bomba, se han resuelto estas incógnitas en un estudio inicial. En posteriores proyectos se van a instalar procesos de control para que la caracterización que se pueda realizar sea más exacta y precisa.

En este apartado también se ha concluido que los valores teóricos y experimentales tienen un error pequeño.

Luego se incluye un apartado de nomenclatura donde se encuentran todos los parámetros que se han utilizado.

Finalmente se describe una pequeña conclusión de este trabajo.

En el bloque de anexos, se encuentran los planos de la instalación, reproducidos por el programa Solid Edge y parte de la bibliografía.

2. SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA EN ZONAS RURALES. LA BOMBA DE MECATE.

2.1.NECESIDAD DE ABASTECIMIENTO.

El abastecimiento de agua para uso doméstico es una de las necesidades básicas para la vida del ser humano. Tanto el acceso al agua potable como el saneamiento de las fuentes de abastecimiento condicionan la salud de millones de personas.

La OMS estima que las enfermedades diarreicas son responsables de 1,73 millones de muertes al año, y que un 3,7% de todas las enfermedades están directamente relacionadas con el consumo insuficiente de agua y las limitaciones higiénicas que esta escasez impone.

Otro grupo de enfermedades como el tracoma, el tifus, la malaria, afecciones de piel y ojos, etc. Están también provocadas por la existencia de hábitos de higiene insuficientes, o con el uso de aguas que no reúnen las condiciones sanitarias básicas.

A partir de las siguientes categorías: necesidad directa del consumo de agua, agua necesaria para la elaboración de comidas y agua necesaria para la higiene y

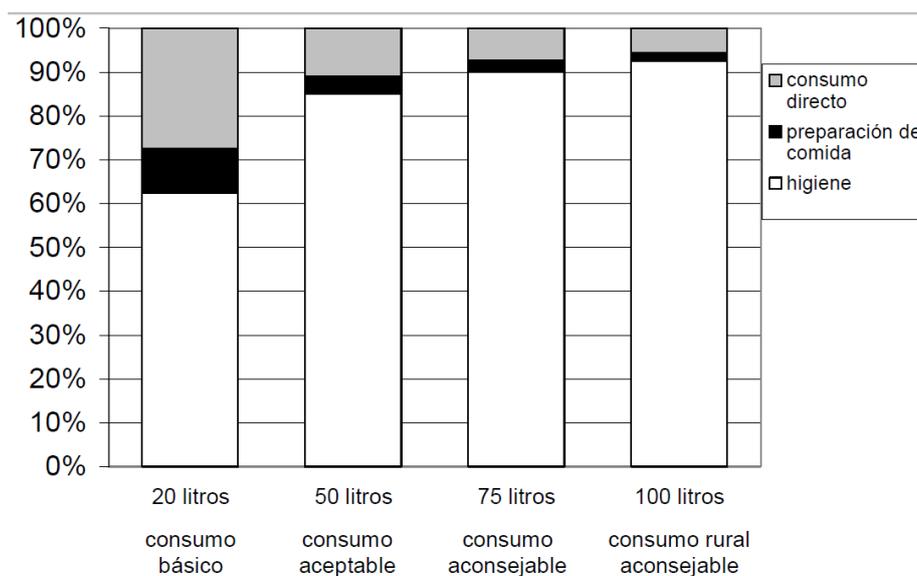
contrastando las cantidades respectivas con los informes estudiados y con los estándares reconocidos internacionalmente tanto por las naciones unidas, el banco mundial o la OMS se valoró como imprescindible el asegurar la accesibilidad del agua al menos a 50 litros por persona y día. De esta manera se puede garantizar que la salud no se verá afectada por la escasez de agua.

Este acceso se considerará asegurado siempre y cuando la fuente de abastecimiento este situada a menos de cinco minutos del domicilio de los consumidores.

Se analizó también que si esta cantidad no alcanzaba los 50 litros, es decir si la distancia al abastecimiento requería más de esos cinco minutos, era imprescindible que nunca estuviese por encima de la media hora, y de esta manera asegurar al menos 20 litros por persona y día de tal forma que aunque la salud no se encuentre completamente asegurada con respecto al consumo de agua al menos se garantice la supervivencia.

En la figura 2.1 se recoge dentro de estas distintas categorías de consumo que se ha valorado como básica de 20 litros, aceptable de 50 y aconsejable de 75, el porcentaje de agua que se emplea en higiene, el que se usa en la preparación de alimentos y el que es utilizado en el consumo directo.

Como se puede observar la cantidad de agua destinada a la higiene aumenta porcentualmente respecto al total del agua consumida cuando el abastecimiento garantizado aumenta, lo que nos permite comprobar la relación directa que existe entre la cantidad de agua disponible, la higiene y el aseguramiento de la salud que esta última implica.



**Figura 2.1: Porcentaje de agua empleada en la higiene, en la preparación de comidas y en el consumo directo para distintos abastecimientos de agua por persona y día.*

2.2.BOMBAS MANUALES COMO MODO DE ABASTECIMIENTO. CONCEPTO VL0M.

En la actualidad unos 1000 millones de personas según la SKAT fundamentan su abastecimiento de agua en el empleo de sistemas de bombeo manual. Esta realidad que marca la cotidianidad de gran parte de la población, sobre todo del mundo menos desarrollado, no es nueva. A lo largo de la historia de la humanidad el uso del bombeo manual ha sido muy importante, y se pretende plantear la trascendencia que puede llegar a tener la utilización y el desarrollo de los sistemas de bombeo manual en un futuro próximo.

Al igual que los sistemas convencionales de agua corriente, el mantenimiento y la reparación de las bombas de mano instaladas por las autoridades públicas casi siempre dependían de una acción central.

Generalmente, grupos de mecánicos calificados que se desplazaban en vehículos desde la sede de distrito abarcaban una extensa zona en que había cientos de bombas.

Este era un sistema irremediablemente ineficiente; a veces un grupo cubría grandes distancias en un camión que transportaba equipo elevador para levantar una bomba pesada que necesitaba una pieza de repuesto que costaba uno o dos dólares.

Habida cuenta de las distancias que debían recorrer, el tiempo que tardaban esos grupos en atender a los pedidos de reparación, incluso de poca monta, solía ser de varios meses. Una bomba resistente que rara vez se descomponía, pero que quedaba inutilizada durante meses cuando llegaba a descomponerse, proporcionaba un servicio menos fiable y menos eficaz en función de los costos que una bomba que se descomponía más a menudo, pero que se podía reparar rápidamente, en pocos días o pocas horas.

El concepto de funcionamiento y mantenimiento a nivel del poblado pasó a denominarse a nivel internacional diseño VL0M (Village-level operation and maintenance) y fue una importante contribución del proyecto de bombas de mano al establecimiento de un nuevo criterio aceptado respecto de los programas de abastecimiento de agua. Su inspiración era de carácter técnico: diseñar bombas y piezas de repuesto aptas para un mantenimiento descentralizado. Pero el avance conceptual principal era el de la participación de los usuarios en la adopción de decisiones relativas a los servicios, y en la administración de éstos. Posteriormente esta idea se extendió al modo de pensar acerca de los recursos hídricos en general. Si la propia comunidad ha de ser la principal responsable del mantenimiento y funcionamiento de sus bombas de

mano, tendría que participar desde el primer momento en el suministro de servicios. En primer lugar, tendría que querer tener bombas de mano, y elegir de entre sus miembros a “administradores” o “encargados” de las bombas, a los cuales habría que familiarizar con las bombas e informar acerca de las necesidades de mantenimiento.

De acuerdo al concepto de funcionamiento y mantenimiento a nivel del poblado VL0M, la comunidad debe reunir dinero para pagar la reparación y, en algunos casos, la reposición de las bombas; debe saber a quién contratar para manejar las bombas de mano y cuánto pagarles; también es necesario que disponga de piezas de repuesto y que tanto éstas como los servicios de reparación tengan precios que la comunidad estime accesibles.

Aunque aún se sigue trabajando intensamente en el desarrollo de las bombas manuales, esas labores se concentran en la mejora o modificación de las bombas que ya existen y no en la invención de bombas manuales nuevas.

Ya existen buenas bombas manuales para casi todas las aplicaciones, y todo esfuerzo por diseñar una nueva bomba manual para un proyecto o un país específico están desencaminados y resultan otros tantos ejemplos de despilfarro.

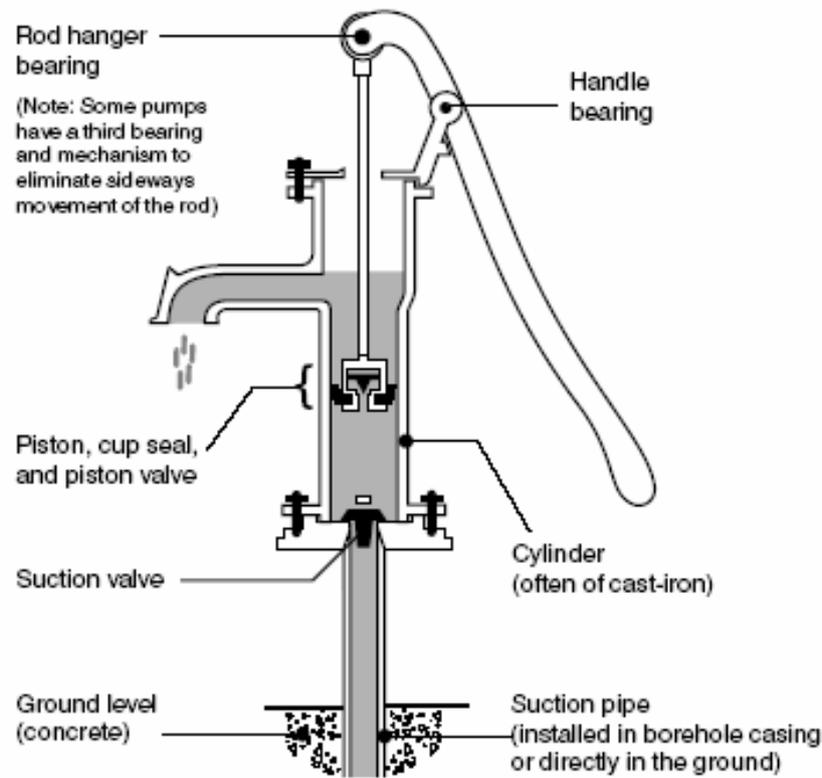
2.3.TIPOS DE BOMBAS MANUALES.

2.3.1. BOMBAS DE PISTÓN.

Se refiere a los sistemas de bombeo manual que emplean un sistema de pistón como elemento fundamental de su mecanismo de funcionamiento, son conocidos también como bombas recíprocas, bombas aspirantes o bombas de émbolo.

2.3.1.1.BOMBAS DE SUCCIÓN.

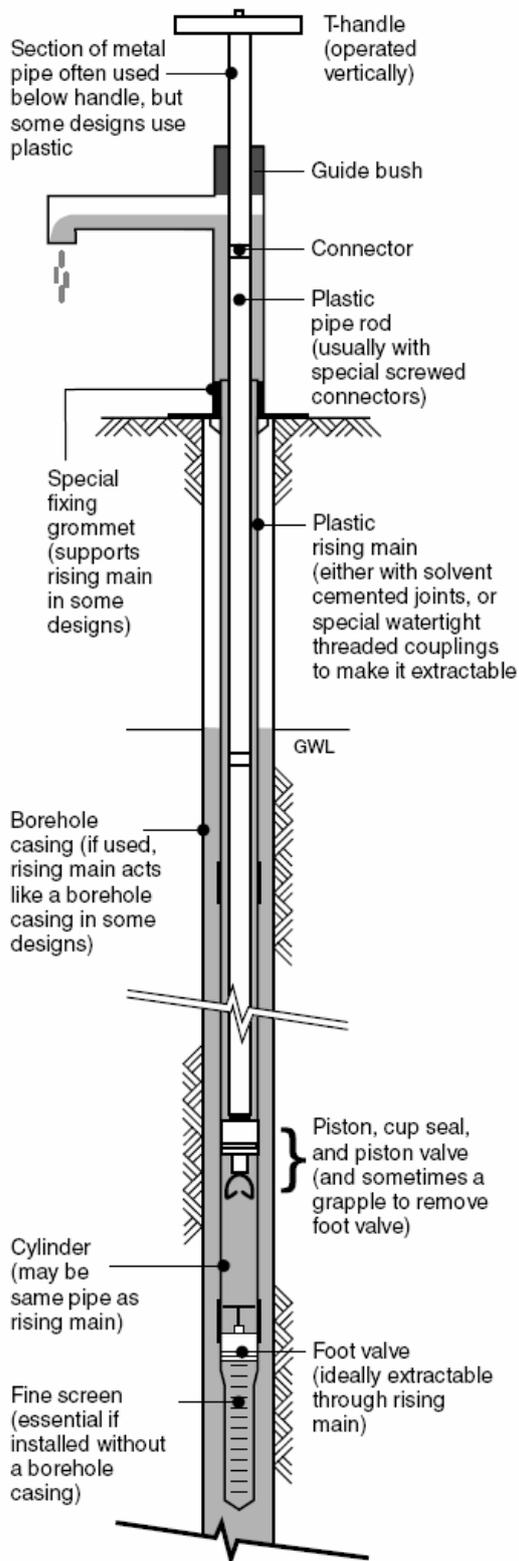
Estas bombas de pistón están caracterizadas por tener el mecanismo del émbolo dentro de la armadura superficial de la bomba, como se observa en la figura 2.2.



**Figura 2.2: bomba manual de succión.*

El pistón al elevarse provoca un vacío en la zona entre válvulas, generando una diferencia de presión respecto al pozo, que se encuentra a la presión atmosférica. Esta diferencia de presiones tendrá la capacidad de elevar agua que se encuentre por tanto a un máximo de profundidad limitado por la presión barométrica, de 10,4 metros al nivel del mar. Debido a las pérdidas mecánicas del sistema, se alcanzará una altura máxima de bombeo de unos 7 metros, reduciéndose esta en función de la altura sobre el nivel del mar a la que situemos la instalación, llegando a alcanzar apenas un par de metros de altura de bombeo si estamos a 4000 metros (Elson R.J. 1993). Además de esta limitación, la bomba de succión al encontrarse el pistón fuera del pozo, se vacía por gravedad con el desuso, por lo que ha de ser cebada antes de cada uso, con los riesgos de contaminación del pozo que esta recarga supone. No están diseñadas para soportar más de 50 usuarios al día. Estos condicionantes no evitan que sea la bomba más habitual en el mundo, debido al alto caudal que aporta y a la sencillez de reparación y desmontaje, al encontrarse todo el sistema fundamentalmente sobre la superficie.

2.3.1.2.BOMBAS DE ACCIÓN DIRECTA.



*Figura 2.3: bomba de acción directa.

Adecuadas para una altura de bombeo de entre los 10 y los 20 metros, están basadas en un mecanismo de manivela de accionamiento directo de tal forma que no se emplea ventaja mecánica alguna. Un esquema típico de una bomba de este tipo se recoge en la figura 2.3.

La elevación de la varilla que va hasta el pistón y de la columna de agua correspondiente se realiza directamente con la fuerza del usuario. Este sistema simplifica la tecnología y facilita el mantenimiento, así como la reparación de averías, acercándose de esta manera a los objetivos del diseño VLOM (Nampusuor R.2000).

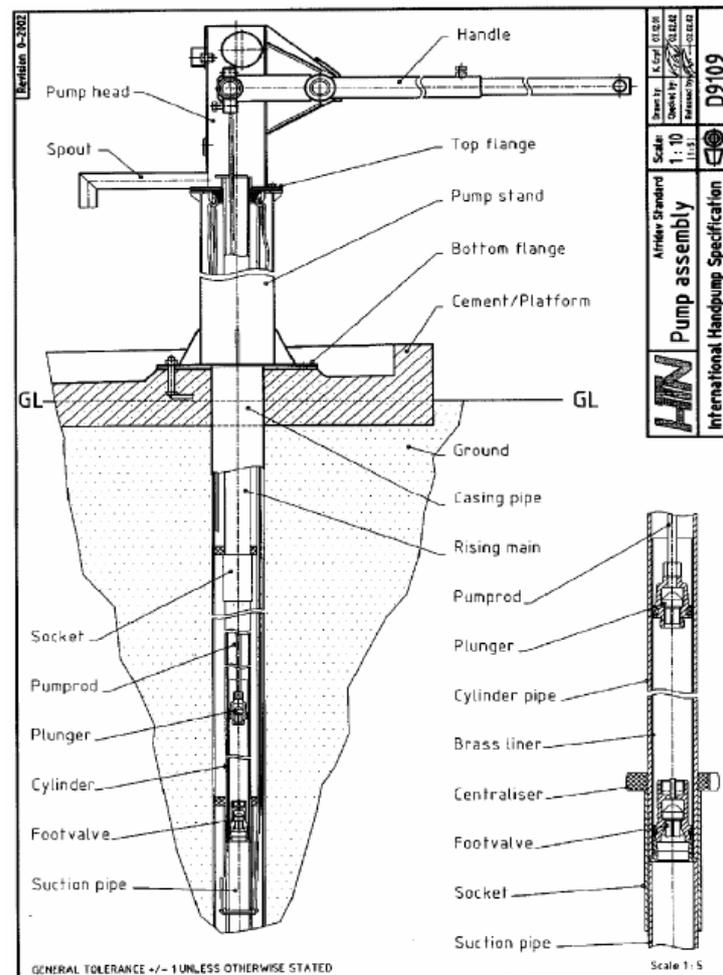
Debido a su diseño de accionamiento directo, esta bomba, a diferencia del resto de las de pistón, no cuenta con la ventaja mecánica que proporciona una palanca para multiplicar la fuerza aplicada. Por ello para exigir una menor fuerza desde el usuario que acciona el mecanismo, se introduce un diámetro del tubo de subida menor, que reduce el peso de la columna elevada. Además junto a esta reducción, la varilla que conecta la manivela con el pistón es hueca, de tal manera que su flotabilidad, facilite también la carrera de ascenso.

Estas dos medidas logran que en la carrera de subida, la fuerza exigida al usuario al subir la manivela, sea menor que la que ha de desarrollar en la bajada donde puede emplear su peso como ayuda. Para compensar el menor caudal extraído en su carrera ascendente al haber reducido el diámetro de la tubería de elevación, la bomba también retira agua por el surtidor en su carrera descendente, a diferencia del resto de equipos basados en el mecanismo de pistón que solo lo hacen en la ascendente. Para ello su diseño cuenta con una carrera de pistón hasta tres veces mayor que la habitual en el resto de bombas con esta tecnología. Junto a esto, los diámetros del tubo de subida y de la varilla son más parejos. De esta manera en su carrera descendente la columna se ve elevada por el volumen de agua que desaloja la varilla al introducirse en el tubo de subida, consiguiendo retirar agua. En el resto de bombas de pistón el menor diámetro de la varilla respecto al del tubo de elevación y la longitud de la carrera, muy inferior, impiden que el volumen desalojado por la varilla al introducirse en la tubería sea significativo. Los modelos más habituales que funcionan con este diseño son la bomba “Tara” desarrollada inicialmente en Bangladesh, la “Nira” de origen finlandés y la “Malda”.

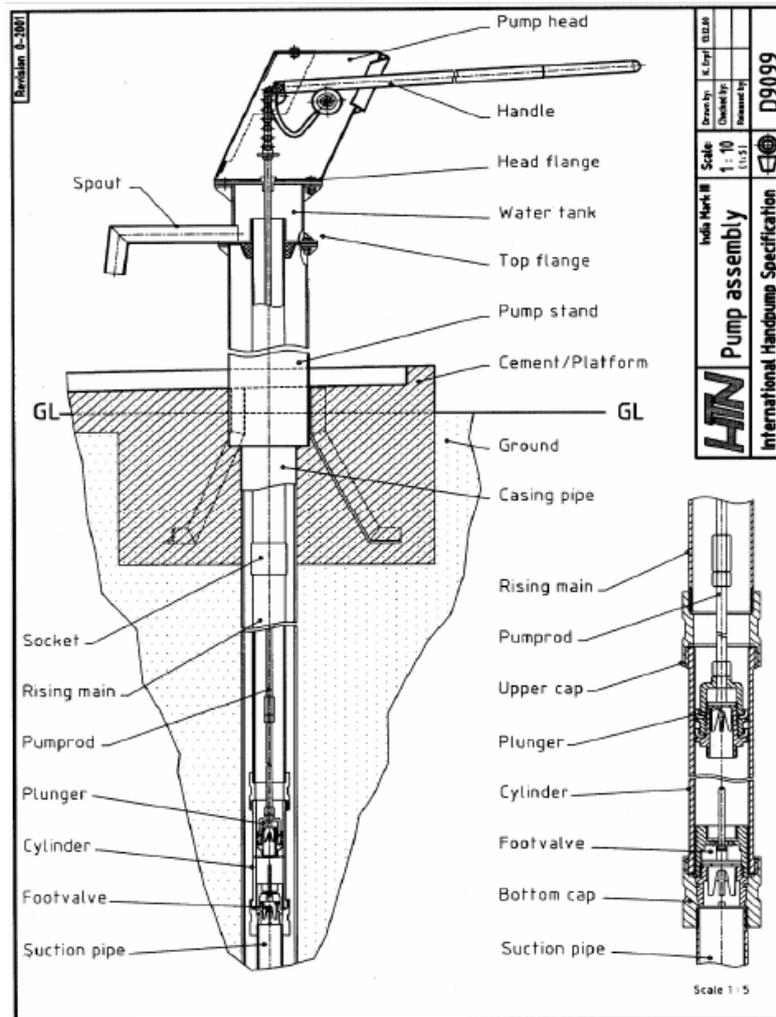
2.3.1.3.BOMBAS DE POZO PROFUNDO.

Están caracterizadas por su capacidad de bombeo de hasta 45 metros de profundidad, con caudales aceptables y para esfuerzos razonables, aunque algunos autores plantean su uso hasta los 60 metros o aún más, utilizando la fuerza conjunta de dos personas. Son bombas que pueden trabajar a cualquier profundidad presentando una capacidad de elevar agua mayor que las anteriores, pero debido a su alto coste respecto al resto, sólo se emplean para pozos profundos de más de 20 metros (Journey W. 1978). Al trabajar con elevadas alturas de bombeo, en estas bombas si es imprescindible el empleo de la ventaja mecánica de tal manera que la fuerza empleada por el usuario se vea multiplicada en la varilla del cilindro mediante la acción de la palanca, llegando incluso el diseño a introducir manivelas de dos asas que permitan aumentar esa fuerza imprescindible. En la figura 2.4 se muestra la bomba afridev. Este modelo junto al Indian Mark (figura 2.5) en sus distintos desarrollos II y III principalmente, son los que han alcanzado mayor implantación en todo el mundo.

Es una tecnología que, con el fin de reducir la fuerza necesaria en el bombeo, está fundamentada en una carrera de pistón larga en relación al resto, junto con un diámetro pequeño del cilindro, que facilita el mantenimiento, simplificando la adquisición de repuestos. Además fija un diámetro de 50 mm del cilindro con independencia de la profundidad de trabajo, variando la ventaja mecánica de la manivela para compensar las mayores fuerzas que son necesarias de introducir según se aumenta esa altura de bombeo, siendo de 3:1 desde los 12 a los 30 metros y de 4,5:1 a partir de los 30 metros. Presenta más condiciones que aseguren el mantenimiento por una comunidad, incluyendo una válvula de pie accesible desde la superficie y tramos de varillaje y de tubería de elevación desmontables sin herramientas (Martín-Loeches M. 2005). Tolera aguas agresivas y arenas abrasivas (Duncan, Colin 1996).



*Figura 2.4: bomba Afridev (Baumann E. and Keen 1994)



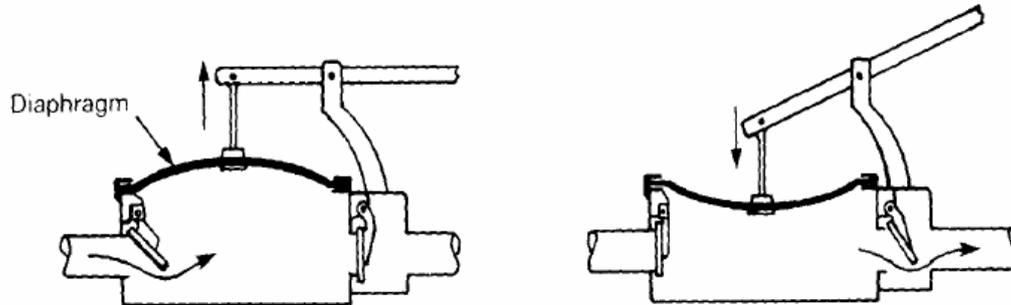
*Figura 2.5: bomba Indian Mark III (Baumann 2000)

2.3.2. BOMBAS DE DIAFRAGMA.

Otro tipo de bomba de desplazamiento positivo es la bomba de diafragma. Se estima que se comenzó a emplear a partir del año 1730, y su mecanismo se ha usado ampliamente en las bombas de combustible. Actualmente se emplea en varios tipos de bombas manuales.

Esta bomba está fundamentada en el movimiento de una membrana elástica en contacto con un volumen provisto de dos válvulas antirretorno tal y como se muestra en la figura 2.6. Al elevarse esta membrana o diafragma el agua es absorbida a través de la válvula de entrada a la izquierda, a continuación, como se observa en la parte derecha de la figura, se acciona el diafragma en sentido opuesto, forzando al comprimir el

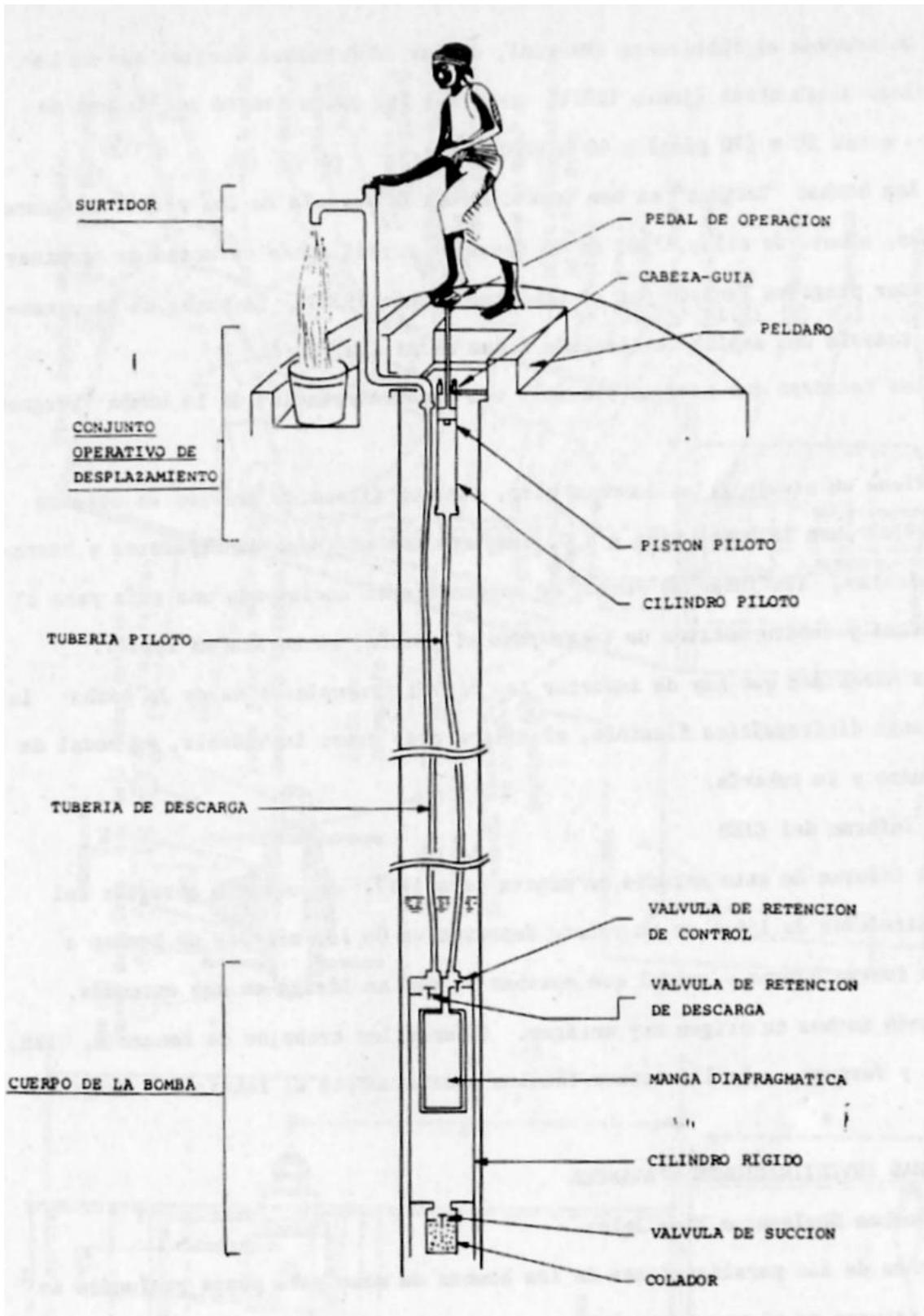
espacio interior el cierre de la válvula izquierda y la apertura de la que se sitúa a la derecha que permitirá la salida del agua.



**Figura 2.6: mecanismo de una bomba de diafragma.*

2.3.2.1.BOMBA VERGNET.

Es una bomba manual de diafragma, se acciona mediante un pedal y un pistón asociado a él, como se recoge en la figura 2.6. El diafragma se sitúa dentro de un cilindro rígido en el interior del pozo de tal manera que su estiramiento y contracción provocará el bombeo desde el cilindro a la superficie. Al pisar el usuario el pedal, el pistón en su bajada rellena la membrana estirando sus paredes flexibles e incrementando así la presión dentro del cilindro rígido. Esta presión obliga al cierre de la válvula inferior de succión y abre la de descarga facilitando que el agua suba a la superficie a través de la tubería de descarga. A continuación el usuario retirará la presión sobre el pedal, con lo que se contrae la membrana elástica, reduciendo la presión dentro del cilindro rígido y provocando de esa manera el cierre de la válvula de descarga y abriendo la de succión que permitirá la entrada de agua desde el pozo al cilindro rígido. Esta bomba además de todas las características comentadas cuenta respecto a las instalaciones de bombeo manual basadas en el mecanismo de pistón con la ventaja de ser accionada con el pie con lo que se podrá emplear una mayor fuerza, y desarrollar una potencia superior. Además puede ser extraída completamente del pozo fácilmente, de manera manual.



**Figura 2.7: bomba Vergnet.*

2.3.2.2.BOMBA Abi-ASM.

Estas bombas son una combinación de la anterior, la Vergnet y los mecanismos de acción de las bombas de pistón. Los sistemas fundamentados en el empleo de una palanca son preferidos por los usuarios a los que utilizan un pedal, aunque el esfuerzo requerido sea mayor. Así pues el funcionamiento de esta bomba es exactamente igual al de la anterior, la única diferencia reside en la estructura superficial del equipo que presenta las características que describimos para las bombas de pistón. A través de la palanca se elevará una varilla que accionará el pistón que rellena y vacía el diafragma como ya detallamos para la bomba Vergnet.

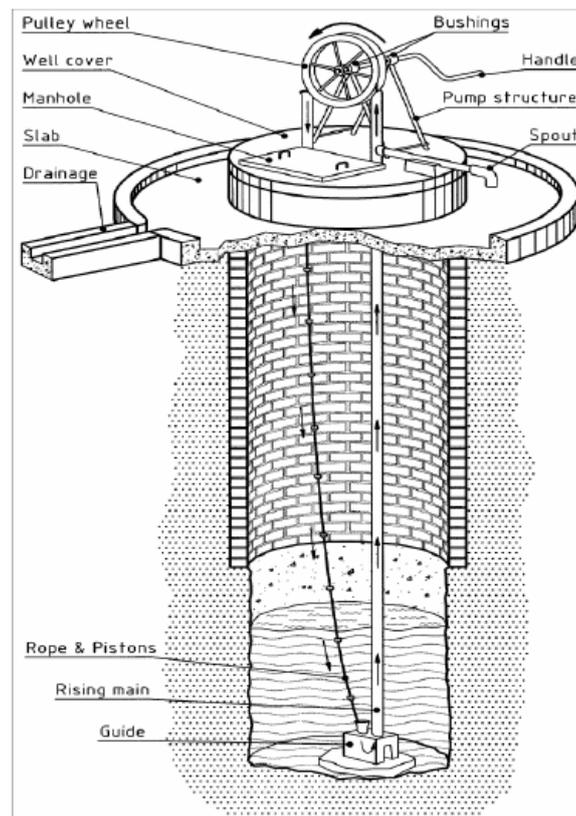
2.3.3. BOMBAS DE CUBO Y CUERDA.

Este sistema de bombeo basado en un cubo vacío o una bolsa que se baja a un pozo mediante una cuerda, elevándolo lleno de agua posteriormente es uno de los sistemas más antiguos de la humanidad en el abastecimiento de agua. Aún así el difícil acceso a tecnologías de amplios grupos de población, las grandes diferencias que existen en el planeta en cuanto a desarrollo se refiere y la escasez de agua predominante, hacen que este sistema siga de máxima actualidad, siendo en muchas zonas de África uno de los más empleados.

La instalación es de mantenimiento sencillo, utilizando materiales y herramientas accesibles para cualquier comunidad. Las reparaciones más habituales consisten en el recambio del cubo, la cuerda o la rueda elevadora. Las cuerdas de nylon pueden llegar a durar dos años, mientras las de sogas apenas lo harán por unos meses. En ocasiones cada usuario empleará su cubo y cuerda. Aunque es muy frecuente, es una instalación que implica muchos riesgos de contaminación del agua del pozo, debido al contacto del cubo con los usuarios y con la tierra exterior aunque cada vez más a menudo, la parte superior del pozo se encuentre protegida. Además la profundidad de bombeo es limitada ya que apenas es comparable al resto de sistemas de bombeo manual más allá de los diez metros, si queremos asegurar un caudal razonable para pozos comunales.

2.4.BOMBA DE MECATE.

Esta bomba que se puede observar en la figura 2.8, está basada en la elevación de agua a través del empleo de un sistema de polea que actúa directamente sobre unos pistones en una dirección que conduce el agua por medio de un tubo vertical parcialmente sumergido, por el que mecánicamente se eleva el agua retenida entre los pistones hasta el surtidor. La cuerda asciende por este tubo de subida, pasa por la polea motriz y baja libre hasta la fuente de agua. En la parte inferior se coloca una guía que facilita la entrada de la soga. Al accionar la polea motriz los pistones que ascienden por dentro de la tubería comienzan a empujar la columna de agua hacia arriba y a succionar por debajo.



**Figura 2.8: bomba de mecate.*

La bomba de mecate, que se ha desarrollado fundamentalmente en Nicaragua, ha generado un gran interés debido a su bajo costo, su alto rendimiento, su durabilidad y sus reducidas necesidades de mantenimiento. La bomba se basa en un diseño milenario de bomba de cuerda que ha sido renovado a lo largo de las últimas décadas. Adecuada

para ser usada a nivel comunitario o familiar, la bomba tiene un funcionamiento similar al de otras bombas más caras, como por ejemplo la Afridev y la India Mark II, a profundidades de aguas subterráneas de hasta 50 metros (Alberts H. 2000).

Uno de los puntos claves para la rápida difusión de la bomba de mecate en Nicaragua y en los países que la han ido adoptando ha sido su bajo costo, sumado a su confiabilidad y al poco mantenimiento que necesita. Un estudio realizado por el Banco Mundial en 1995 concluyó que el costo anual de mantenimiento de la bomba de mecate nunca superaba los \$10. En comparación, el costo de mantenimiento anual de las bombas en la India (predominantemente las bombas India Mark II) están en el rango de \$59 a \$107. El costo de instalación de la bomba de mecate también es significativamente menor que el de las bombas Afridev o India Mark II.

El precio de adquisición de la bomba de mecate medio ronda los \$150 variando en función de la profundidad y el país de adquisición. En cambio para la Afridev el precio no sería menor a \$175. Estos cálculos se hacen siempre que se presuponga una producción a nivel local ya que la importación y explotación de bombas manuales aumente considerablemente los costes.

A día de hoy son muchos los países en desarrollo, que han adoptado el concepto de diseño de la bomba de mecate originario de Nicaragua y como consecuencia son múltiples las adaptaciones que ha sufrido la bomba según la aplicación y el país donde se ha fabricado.

En colaboración de la SKAT, el gobierno de Madagascar adopto y desarrollo el concepto de la bomba de mecate produciéndose las primeras especificaciones técnicas detalladas de la bomba. Hay que tener en cuenta que estas especificaciones están adaptadas a la problemática y capacidad tecnológica de Madagascar.

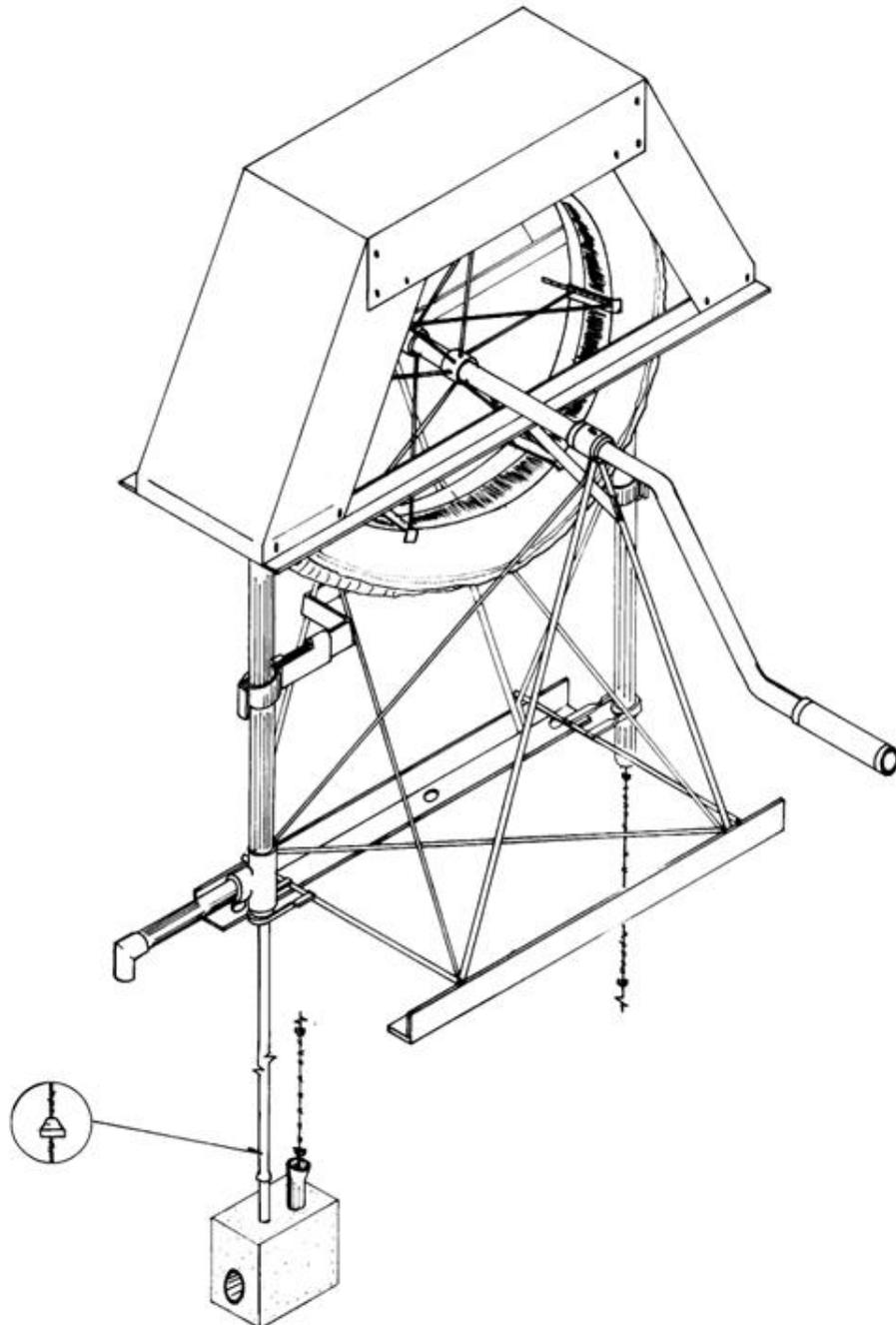
En general puede decirse que la bomba de mecate es una tecnología muy competitiva respecto a las bombas de pistón convencionales. Su coste de adquisición, mantenimiento son bajos y los requerimientos tecnológicos para su fabricación mínimos. La SKAT identifica como principal problemática de la bomba mecate su diseño poco robusto lo cual la descartan para su empleo en comunidades de más de 70 usuarios.

Es intención del trabajo que se está realizando en la Universidad el desarrollo tecnológico completo de una bomba de mecate analizando críticamente desde un enfoque de tecnología apropiada y de acuerdo a los conceptos VLOM todos los componentes y procesos de fabricación implicados en la bomba de mecate.

En los puntos 2.4.1 y 2.4.2 se representan las bombas de Nicaragua y Madagascar para realizar una comparativa en capítulos siguientes y elegir la instalación óptima para la Universidad Carlos III.

2.4.1. BOMBA DE NICARAGUA.

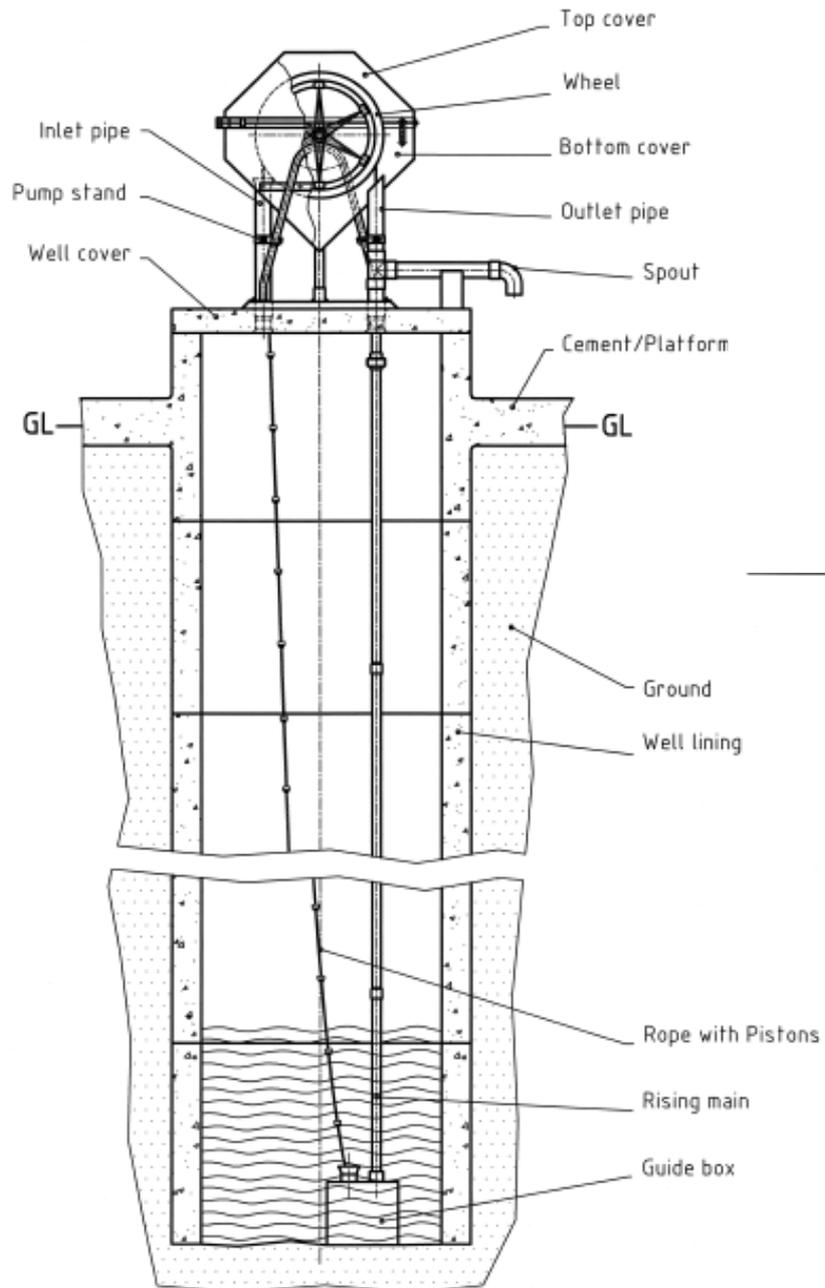
En la figura 2.9 se muestra la bomba de Nicaragua, una de las dos alternativas de montaje.



**Figura 2.9: bomba de Nicaragua. Technology transfer division, 1997*

2.4.2. BOMBA DE MADAGASCAR.

En la figura 2.10 se muestra la bomba de mecate de Madagascar.



**Figura 2.10: bomba de Madagascar. Alexis Randianasolo and Karl Erpf,2004.*

3. COMPARATIVA DE LAS DIFERENTES ALTERNATIVAS. DETERMINACIÓN FINAL.

En este apartado se pretende comparar las características y elementos más susceptibles a estudio y decidir cuál se va a instalar, las dos opciones a comparar son la bomba de Nicaragua y la de Madagascar anteriormente representadas. El objetivo de esta instalación es que sea lo más parecida posible a la que usaría en la realidad.

3.1.PROFUNDIDAD DE BOMBEO.

- Bomba de Nicaragua.

		Profundidad (metros)			
Componente	Unidades	0-11	11-19	19-29	29-40
Diámetro del pistón	Pulgadas	1	3/4	1/2	1/2
Longitud de la cuerda	Metros	27	43	63	85
Diámetro de la cuerda	Pulgadas	1/8	1/8	1/8	1/4
Cantidad de pistones	Unidad	26	42	62	84

**Tabla 3.1: medidas y número de los componentes de la bomba en relación con la profundidad de bombeo (de “Extra-strong rope pump manual of technical drawings. Technology Transfer Division “)*

- Bomba de Madagascar.

Esta bomba tiene una capacidad de bombeo de 1 a 30 metros.

- Valoración final.

La única diferencia en la profundidad de bombeo es el diámetro de la tubería y el diámetro y número de pistones. Inicialmente se va a instalar un tubo de PVC de 27,2 milímetros de diámetro interior y los pistones con un diámetro de 26,5 milímetros. Estos parámetros se pueden variar para estudiar la capacidad de bombeo y conocer al detalle las características de la bomba de mecate.

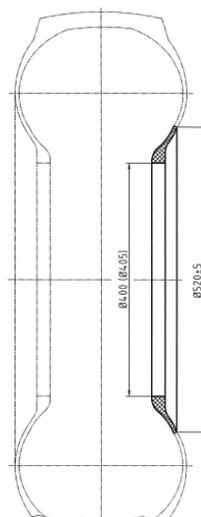
3.2.RUEDA.

Ambas ruedas son de muy similar construcción, bastante compleja ya que se necesita un banco de trabajo para centrarla (mostrado en la figura 3.1) Las dos se construyen con la cubierta de una rueda de camión, un tubo de acero, pletinas para doblar y varillas para hacer los radios.



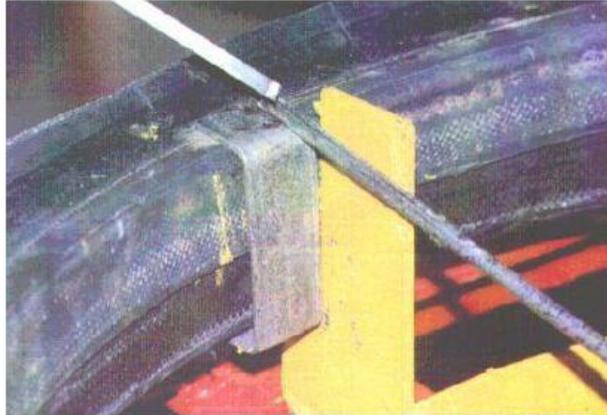
**Figura 3.1: banco de ensayo y montaje de rueda (de “ Photographic Presentation of the Rope Pump Production Process. Technology Transfer Division “)*

La cubierta de camión se corta de la forma indicada en la figura 3.2.



**Figura 3.2: corte de la cubierta de rueda de camión (de “ Photographic Presentation of the Rope Pump Production Process. Technology Transfer Division “)*

Después se unen ambos trozos de goma con las pletinas (observado en la 3.3)



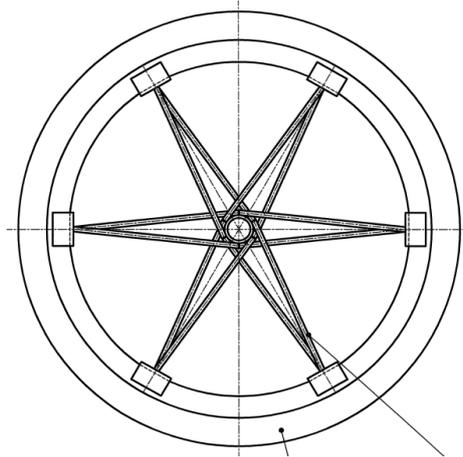
**Figura 3.3 . (de “ Photographic Presentation of the Rope Pump Production Process. Technology Transfer Division “)*

Y, por último se sueldan las varillas y el tubo de acero con las pletinas, de la siguiente manera, indicado en la figura 3.4.

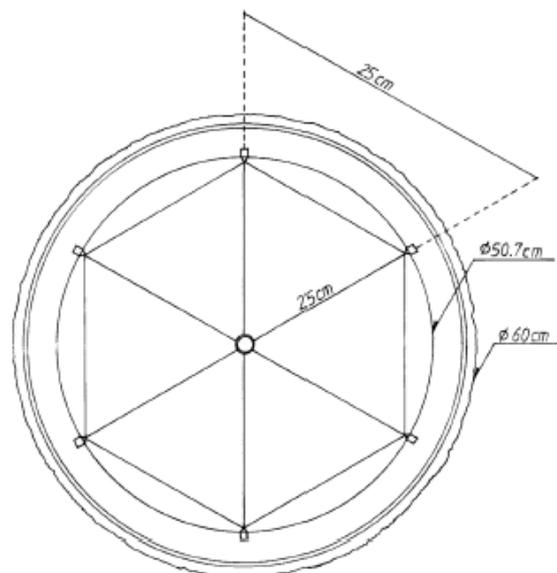


**Figura 3.4: rueda terminada con soldaduras (de “ Photographic Presentation of the Rope Pump Production Process. Technology Transfer Division “)*

A continuación en las figuras 3.5 y 3.6 se muestran los planos de las ruedas de Madagascar y Nicaragua, observándose las pocas diferencias entre ellas.



**Figura 3.5: Rueda Madagascar (de “A.Randrianasolo and Karl Erpf”)*



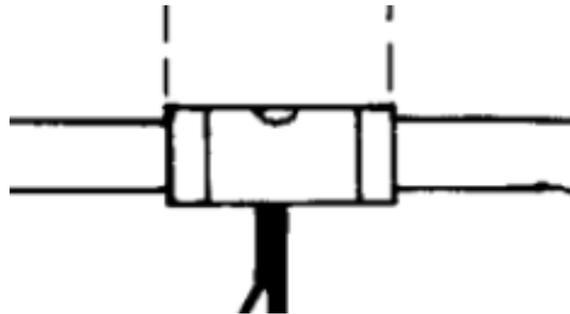
**Figura 3.6: rueda Nicaragua. (de “Extra-strong rope pump manual of technical drawings. Technology Transfer Division “)*

Después de analizar los dos tipos de rueda y ver lo complicada que es su construcción a parte de la necesidad de poseer un banco de trabajo específico se ha decidido adquirir una rueda en el mercado, con características similares y adaptarla a la instalación con las modificaciones pertinentes.

3.3.COJINETES DE LA MANIVELA.

- Bomba de Nicaragua.

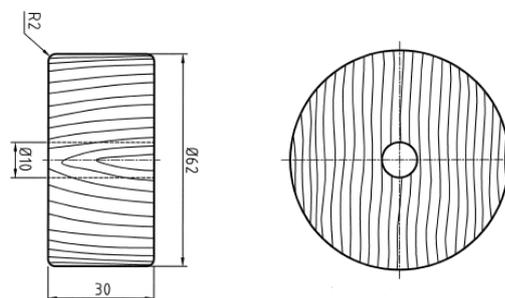
En este diseño el eje de la rueda no tiene rodamientos ni material para disminuir la fricción, está insertado en un “cojinete” de hierro y en el giro friccionan metal-metal, mostrado en la figura 3.7. El diámetro interno del cojinete mide 28,5mm.



**Figura 3.7: cojinete con el eje de la manivela introducido (de “Extra-strong rope pump manual of technical drawings. Technology Transfer Division “)*

- Bomba de Madagascar:

En esta bomba se mecaniza un cojinete con madera, será más eficaz que la bomba de Nicaragua pero durará menos aunque la sustitución de esta pieza pueda ser realizada por cualquiera.



**Figura 3.8: cotas del cojinete de madera (de “A.Randrianasolo and Karl Erpf”)*

- Valoración final.

Con esta instalación se pretende realizar una construcción lo más parecida posible a la real y que su mantenimiento sea mínimo y pueda ser realizado por cualquiera (concepto VLOM) Por tanto se decide instalar un cojinete de madera con las cotas pertinentes dependiendo del resto de elementos a instalar.

3.4.FRENO.

El freno de la bomba consiste en un freno anti retorno, es un mecanismo muy simple en ambas bombas. A priori se decide no instalarlo ya que al ser la altura de bombeo pequeña en nuestra instalación, la manivela retorna con poca fuerza al parar la bomba.

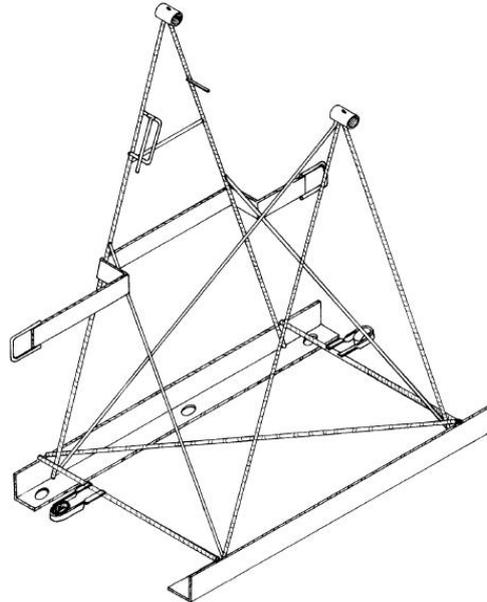
3.5.MANIVELA.

Este elemento no es complejo en ninguno de los dos diseños, solo habría que adaptarla al tipo de rueda que nosotros instalemos, por si es distinta a la de los planos. Es un elemento simple y no necesita mucho análisis. Se decide instalar la manivela con las cotas de la bomba de Madagascar, pero como la rueda va a ser distinta habrá que adaptarla para obtener la misma fuerza-par.

3.6. BASE-ESTRUCTURA.

- Bomba de Nicaragua.

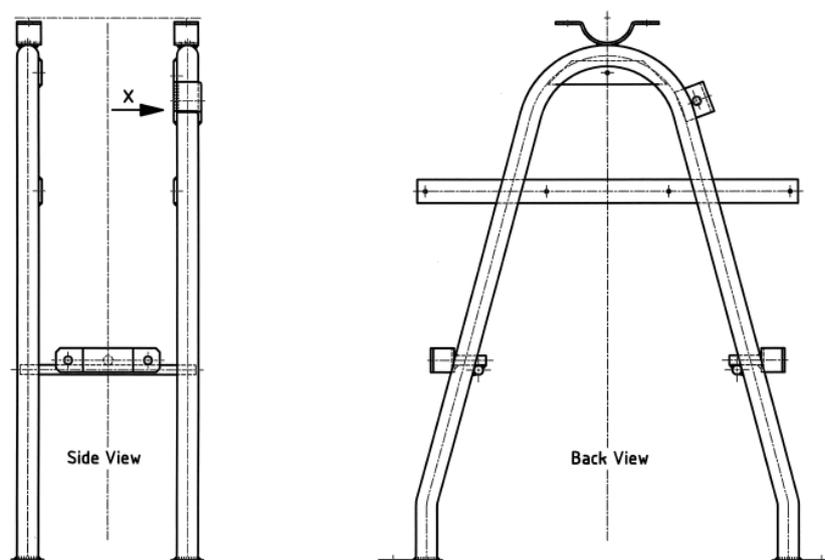
Estructura metálica. En esta estructura van amarrados los tubos por piezas metálicas también. Estructura muy robusta pero bastante compleja de realizar, aparte de necesitar muchas soldaduras. Los tubos quedan bien amarrados en la estructura.



**Figura 3.9: estructura de la bomba de Nicaragua (de “ Photographic Presentation of the Rope Pump Production Process. Technology Transfer Division “)*

- Bomba de Madagascar.

Estructura metálica, menos robusta que la de Nicaragua pero mucho más sencilla de realizar, aparte de llevar menos soldaduras. La mayor ventaja respecto a la de Nicaragua es que se aprovecha de la base de cemento del suelo para agarrar los tubos y no necesita elementos de sujeción para estos en la estructura. Mostrada en la figura 3.10.



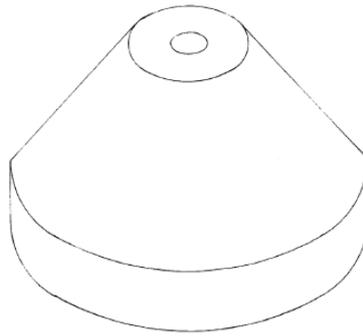
**Figura 3.10: estructura bomba de Madagascar (de “A.Randrianasolo and Karl Erpf”)*

- Valoración final.

Después de analizar los dos tipos de estructura se va a instalar una estructura alternativa ya que la bomba no va a estar a la intemperie y la estructura no se va a estudiar, por tanto nos vale con que cumpla su función de sujeción. Además va a estar anclada a un suelo metálico donde se van a poder anclar los tubos también sin necesidad de anclajes complementarios.

3.7.PISTONES.

Sin grandes diferencias entre los pistones de las dos bombas, habría que ver en detalle cuales son los que mejor funcionan, a priori se fabricarían pistones en forma de cono y luego se estudiarían diferentes alternativas. Para fabricarlos se deben realizar unos moldes de aluminio y PVC fundido.

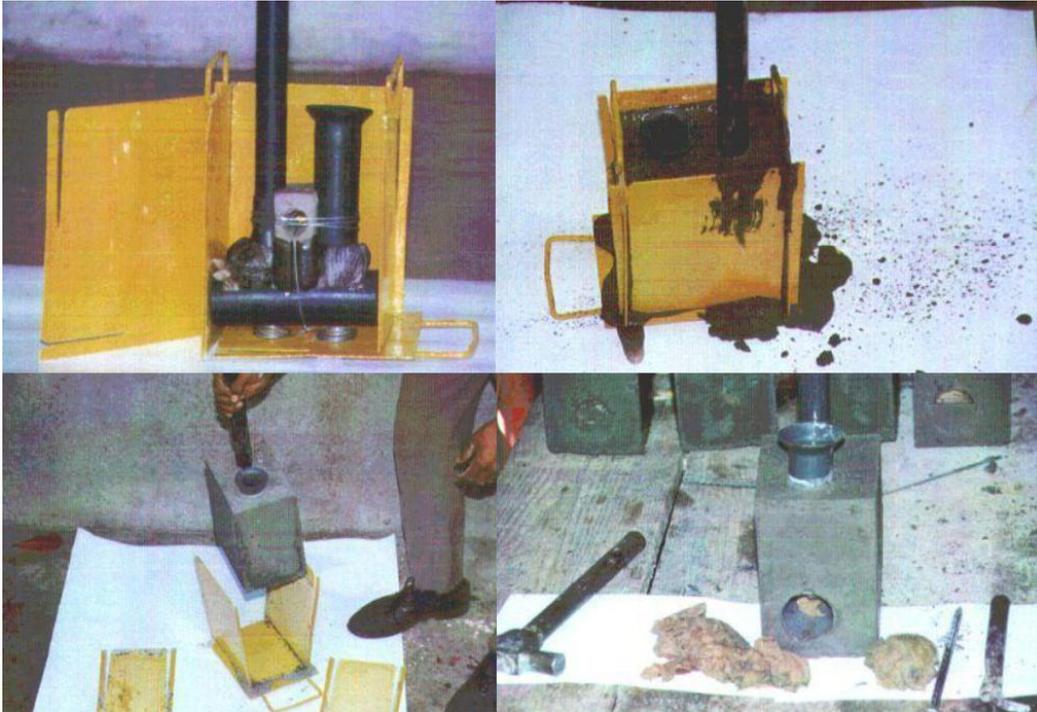


**Figura 3.11: Pistón simple.*

3.8.CAJA GUÍA.

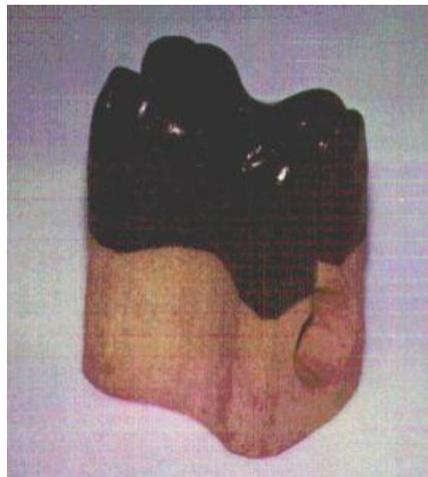
- Bomba de Nicaragua.

Se realiza uniendo los distintos elementos e introduciéndolos en una caja estanca, una vez dentro se llena de cemento y cuando está seco se extrae la caja estanca y la caja guía ya estará terminada (figura 3.12).



**Figura 3.12: fases de la construcción de la caja guía. (de “ Photographic Presentation of the Rope Pump Production Process. Technology Transfer Division “)*

En la bomba de Nicaragua usa una pieza cerámica para servir de pasador para la cuerda-pistones (figura 3.13)



**Figura 3.13: pasador hecho de cerámica. (de “ Photographic Presentation of the Rope Pump Production Process. Technology Transfer Division “)*

- Bomba de Madagascar.

La construcción es básicamente la misma que la de la bomba de Nicaragua, la única diferencia son las medidas y que en vez de una pieza cerámica como pasador usa una botella de agua de 80 milímetros de diámetro.

- Valoración final.

Parece más óptima la botella ya que deslizará mejor y durará más tiempo. Por tanto se va a usar el diseño de la bomba de Madagascar y sus cotas, solo que en vez de cemento como elemento estructural se van a utilizar láminas de PVC de 15 milímetros de espesor.

3.9.ELEMENTOS RESTANTES.

El resto de elementos como los tubos, las carcasas, etc. Será conveniente adaptarlos a esta instalación ya que no parece posible seguir al detalle los planos ya que no tenemos las mismas condiciones.

3.10. TABLA RESUMEN.

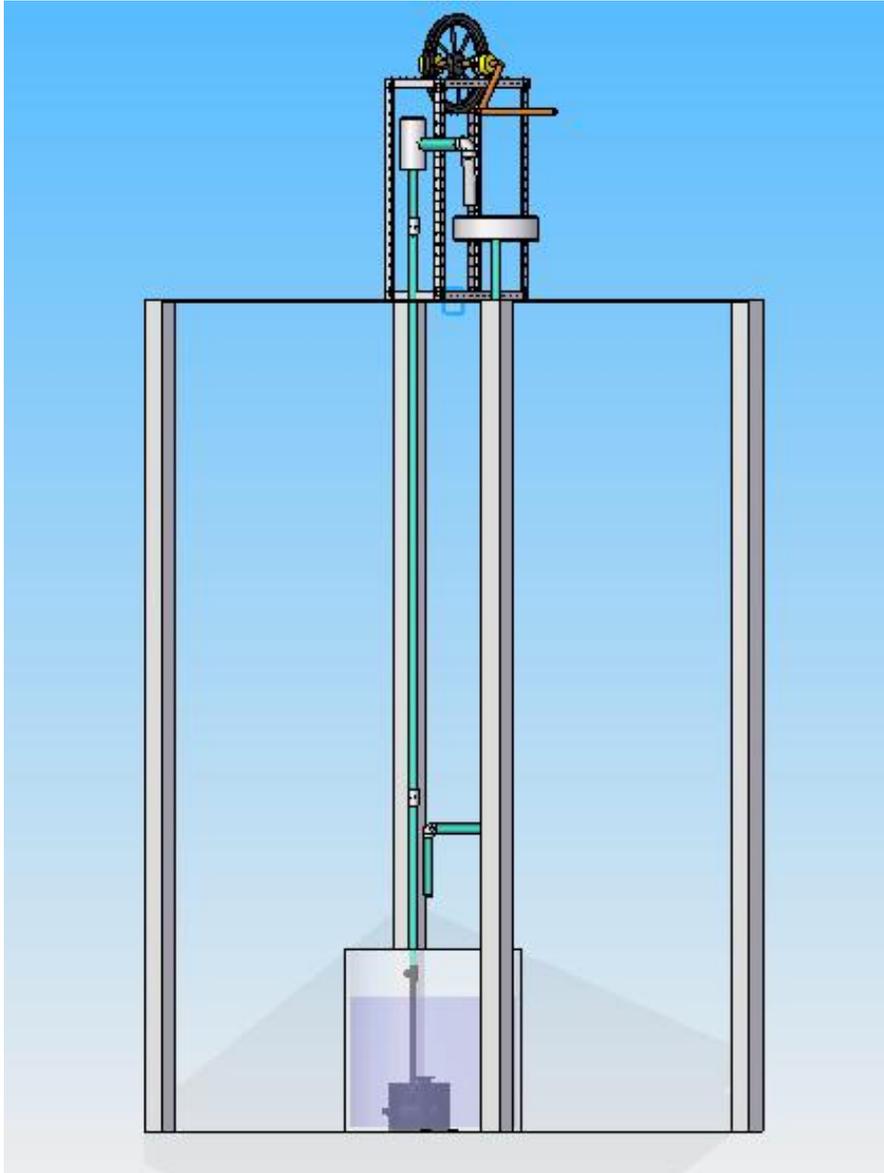
CONCEPTO	BOMBA NICARAGUA	BOMBA MADAGASCAR	EVALUACIÓN FINAL
PROFUNDIDAD DE BOMBEO	Hasta 40 metros.	Hasta 30 metros.	Probar diámetro del tubo de subida y diseños de pistones de ambas bombas y encontrar el óptimo.
RUEDA	Diseño muy similar		Adquisición de rueda alternativa.
COJINETES DE LA MANIVELA	Metálicos	De madera.	A priori, se instalarán cojinetes de madera.
FRENO			No es necesario en nuestra instalación.
MANIVELA	Solo varían en las medidas.		Se realiza manivela en cobre soldado con estaño con las medidas de la bomba de Madagascar.
ESTRUCTURA	Metálica. Muy robusta.	Metálica. Menos resistente.	Se construirá una estructura alternativa acorde con nuestras necesidades.
PISTONES.	No se aprecian diferencias.		Inicialmente se realiza un diseño simple, se podrá cambiar para ver el funcionamiento.
CAJA GUÍA	Pieza guía de material cerámico.	La pieza guía es una botella de cristal.	Se realizará la caja guía usando de guía la botella de cristal.
RESTO DE ELEMENTOS			El resto de elementos no son susceptibles a estudio por tanto se instalarán según convenga.

**Tabla 3.2: resumen.*

4. DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN ACTUAL. MONTAJE.

4.1.INSTALACIÓN COMPLETA.

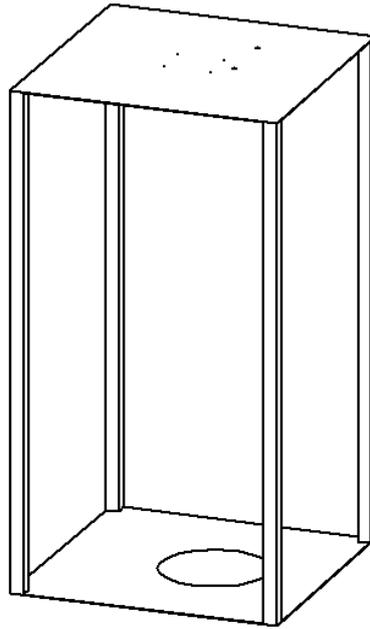
En la figura 4.1 se puede observar la instalación completa y en puntos posteriores se van a describir los diferentes elementos por separado.



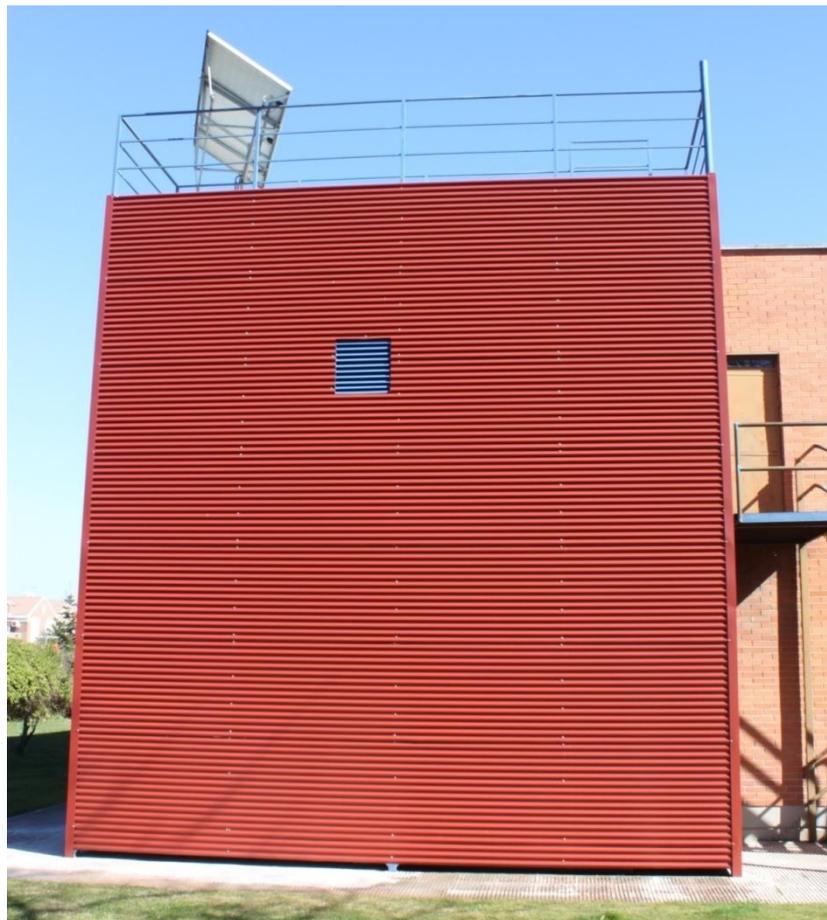
**Figura 4.1: representación de la instalación completa.*

4.2.BANCO DE ENSAYOS.

El lugar donde se va a situar la bomba de mecate es una estructura metálica. En el piso inferior se sitúa el depósito de donde se va a extraer el agua y en el piso superior de 3,8 metros de altura se encuentra la estructura superior y es a donde va a parar el agua.



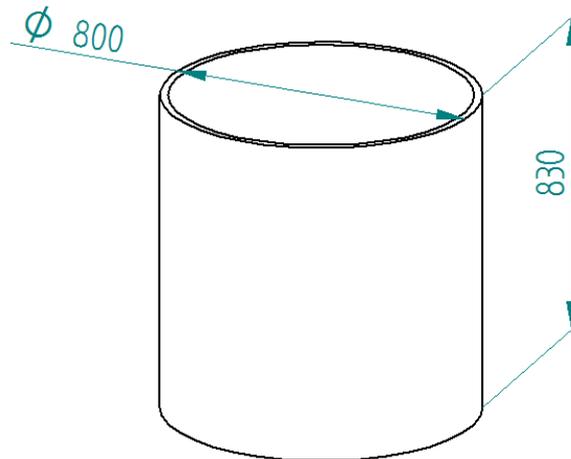
**Figura 4.2: representación de la zona de trabajo.*



**Figura 4.3: banco de ensayos real desde el exterior.*

4.3.DEPÓSITO.

El depósito de agua está situado en la parte inferior, es circular y sus dimensiones están representadas en la figura 4.4.



**Figura 4.4: depósito de agua la instalación.*

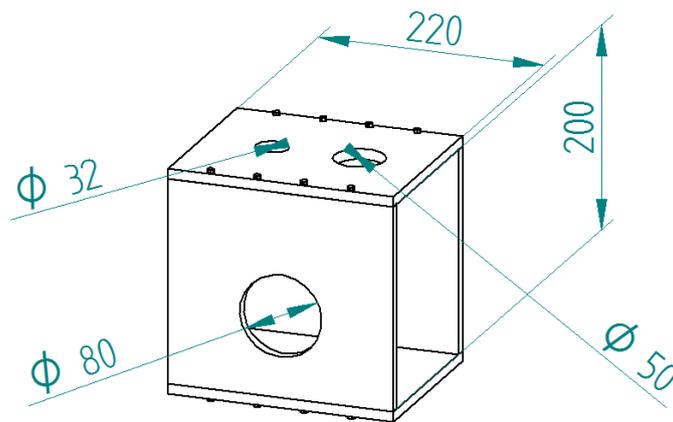


**Figura 4.5: fotografía del depósito.*

4.4.CAJA GUÍA.

La caja guía es una pieza imprescindible ya que es la encargada de que la cuerda deslice cuando está debajo del agua y la dirige al conducto de aspiración. Consta de varias partes:

- Caja: mostrada en la figura 4.6 es la encargada de sujetar los elementos que permiten deslizar y dirigir la cuerda, está construida con planchas de PVC de 1,5 mm de espesor.



**Figura 4.6: caja guía sin elementos.*

- Tubo de aspiración: mostrado en la figura 4.7. Es el comienzo del tubo de subida, tiene en su entrada un ensanchamiento para que los pistones al subir puedan penetrar bien en el tubo. Tiene un diámetro exterior de 32 milímetros, diámetro interior de 27,2 milímetros y una longitud de 500 milímetros.

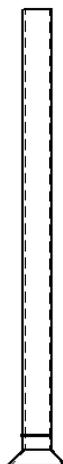
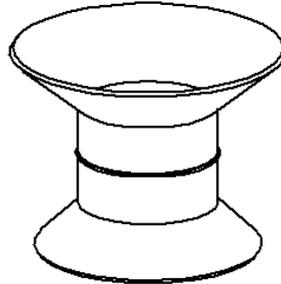


Figura 4.7: tubo de aspiración.

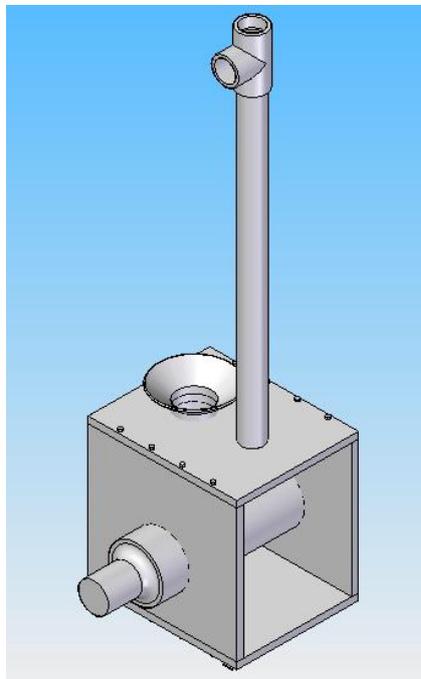
- Tubo guía: mostrado en la figura 4.8. Consiste en un tubo de 500 milímetros de diámetro por el que la cuerda pasa con holgura y sin engancharse.



**Figura 4.8: Tubo guía.*

- Botella guía: consiste en una botella de cristal de 80 milímetros de diámetro situada transversalmente por la que desliza la cuerda con los pistones que actúa de modo polea. La botella está llena de arena para incrementar el peso de la caja guía para evitar al máximo el movimiento.

En la figura 4.9 se representa la caja guía con todas sus partes incluidas.

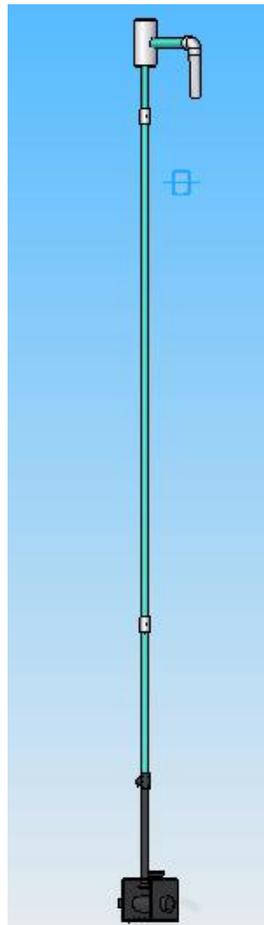


**Figura 4.9: Caja guía con todas sus partes incluidas.*

4.5.CONDUCTO DE SUBIDA.

Por este conducto deslizan los pistones hasta que llegan a la parte superior donde el agua sale, consta de diferentes partes:

- Tubo de subida transparente: consiste en un tubo de PVC transparente. Mide 2,6 metros de longitud. Comienza en la salida del tubo de aspiración de la caja guía y termina en el piso superior a la salida del agua.
- Ensanchamiento: es un ensanchamiento de 104 milímetros de diámetro para que el agua pueda salir de la tubería transparente sin rebosar.
- Tubo de salida del ensanchamiento: tubo de 50 milímetros de diámetro que sale del ensanchamiento hacia la bajada del agua. Hay dos tramos conectados por un codo como se puede observar en la figura 4.10.
- Accesorios: empalme y codos para unir los diferentes tramos.



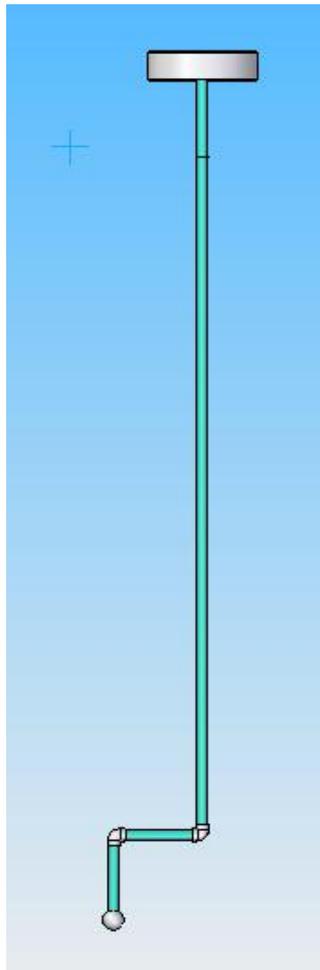
**Figura 4.10: conducto de subida de la bomba.*

4.6.CONDUCTO DE BAJADA.

Al montar la bomba de mecate se ha observado un problema muy obvio, el caudal de agua extraído del depósito por la bomba es superior al caudal que el conducto de bajada era capaz de drenar porque el caudalímetro instalado en la parte inferior lo impedía. Por tanto se procede a instalar un barreño acumulador para facilitar las medidas del volumen extraído, el conducto de bajada consta de las siguientes partes:

- Barreño acumulador: con un diámetro de 374 milímetros de diámetro interior y 97 milímetros de altura.
- Conducto de bajada: consiste en un tubo de 32 milímetros de diámetro exterior, 27,2 milímetros de diámetro interior y 2,7 metros de longitud.
- Contador de agua: consiste en un contador de agua volumétrico.
- Accesorios y tubos pequeños: los necesarios para conectar todas las partes.

En la figura 4.11 se representa este tramo en su totalidad.



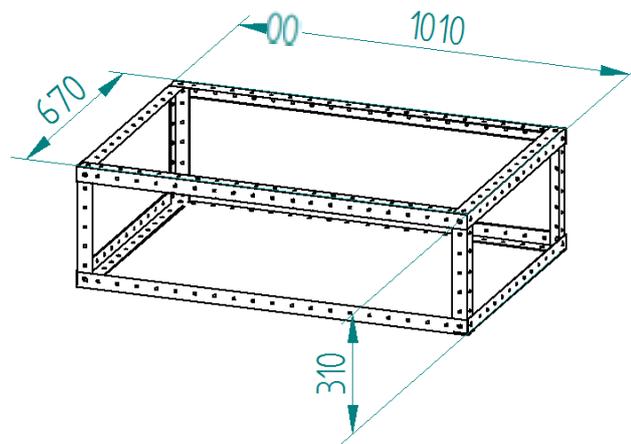
**Figura 4.11: conducto de bajada.*

4.7. ESTRUCTURA SUPERIOR.

Con estructura superior se quiere referir a la parte que sostiene tanto la rueda, como los cojinetes, es la que permite el movimiento de la cuerda con la manivela. Consta de las siguientes partes diferenciadas:

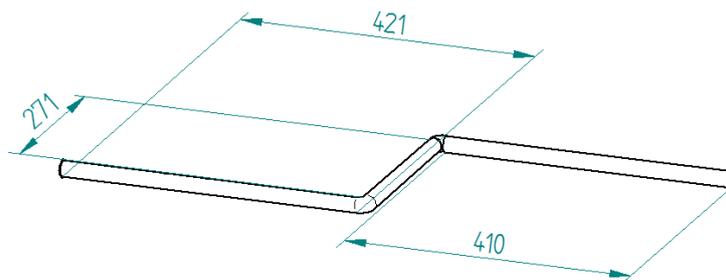
- Estructura portante: consiste en 12 barras angulares de 30 milímetros de anchura.

En la figura 4.12 se pueden apreciar las dimensiones.



**Figura 4.12: cotas de la estructura portante.*

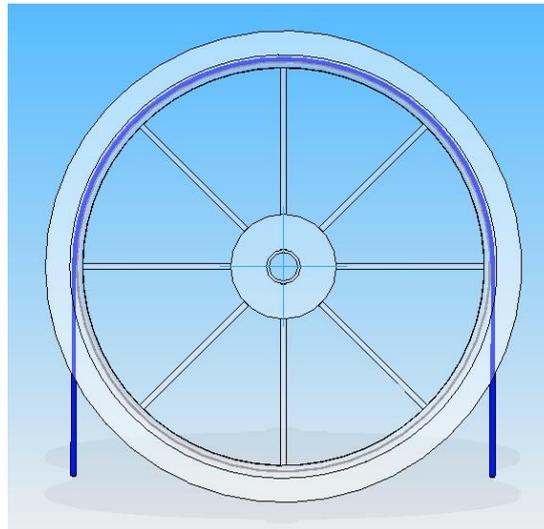
- Abrazaderas: son las encargadas de sujetar los cojinetes, tienen un diámetro de 80mm y una anchura de 20 milímetros.
- Cojinetes: se trata de cojinetes de madera de pino, de 80 milímetros de diámetro con un agujero pasante de 22 milímetros de diámetro. Con una longitud de 80 milímetros.
- Manivela: está realizada en tubo de cobre de 22 milímetros de diámetro interior y sus cotas están indicadas en la figura 4.13.



**Figura 4.13: cotas de la manivela.*

- Rueda: mostrada en la figura 4.14 es una rueda de ciclomotor de diámetro 194,5 milímetros, tiene un recubrimiento de goma, de 1,5 milímetros de espesor. Por tanto el radio de la rueda se determina como:

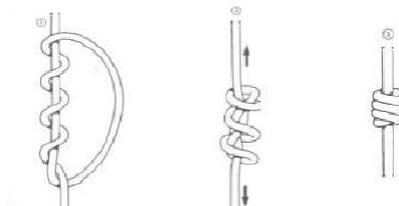
$$R = R_{rueda} + \text{Espesor}_{goma} + \text{Radio}_{cuerda} = 194,5 + 1,5 + 2 \\ = 198\text{mm} \quad [4.1]$$



**Figura 4.14: Simulación de la rueda.*

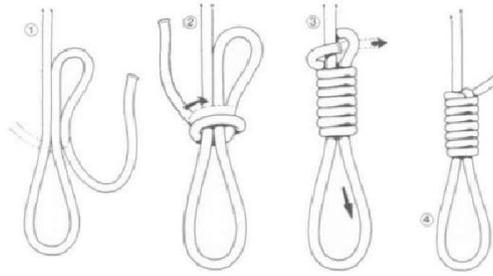
4.8.CUERDA.

La cuerda instalada actualmente es de material poliamida, de 4 milímetros de espesor. Es destacable la manera de atar los nudos entre pistones, son nudos del tipo “medio nudo múltiple” (mostrado en la figura 4.15)



**Figura 4.15: medio nudo múltiple.*

Otro nudo que es digno de mención es el nudo corredizo modo ahorcado mostrado en la figura 4.16, estos nudos atan dos ganchos de forma “S” para unir los extremos de la cuerda, mostrado en la figura 4.17.



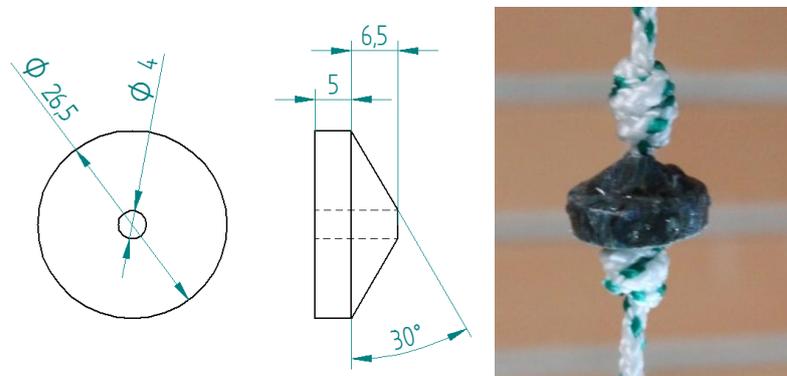
**Figura 4.16: nudo corredizo tipo ahorcado.*



**Figura 4.17: ganchos de tipo "S" uniendo los extremos de la cuerda.*

4.9.PISTONES.

Los pistones están realizados con PVC fundido y modelados por medio de un molde de aluminio. Sus cotas se representan en la figura 4.18. Los pistones están situados a 1 metro de distancia.



**Figura 4.18: Cotas de los pistones. Fotografía de pistón.*

4.10. ANCLAJES.

Nada más instalar la bomba y probar su funcionamiento se podía apreciar su falta de robustez y la movilidad de varias de sus piezas, en concreto y el problema más destacable era la flexión y desplazamiento vertical del tubo de subida. El desplazamiento vertical se ha solucionado instalando unas abrazaderas de modo de “tope”. Para eliminar la flexión del tubo se han instalado abrazaderas con varillas roscadas entre el tubo de subida y de bajada en dos zonas equidistantes de las tuberías (representada en la figura 4.19) y una guía anclada a un punto fijo (representada en la figura 4.20)



**Figura 4.19: argollas con varilla roscada.*



**Figura 4.20: guía anclada a un punto fijo y a los dos tubos.*

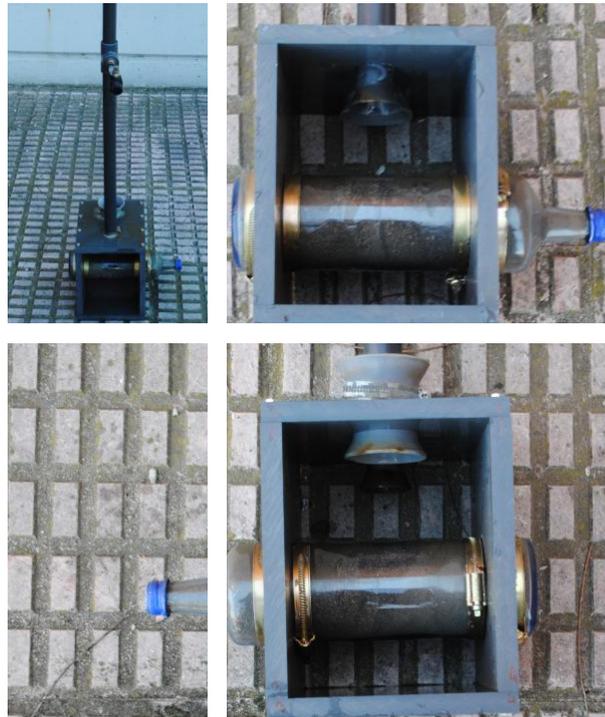
4.11. DETALLES DESTACABLES DEL MONTAJE.

A) CAJA GUÍA.

Como se ha mencionado anteriormente la caja guía está construida con planchas de PVC de 15 milímetros de espesor. El tubo de entrada es un tubo de PVC de 50 milímetros de diámetro, usando un soplete para calentar los extremos y un molde en forma de cono se obtiene un tubo de tipo doble embudo.

El tubo de salida es un tubo de PVC de 32 milímetros de diámetro, se ha utilizado el mismo método para conseguir un extremo en forma de embudo. El último elemento es una botella de cristal de 80 milímetros de diámetro.

Para mecanizar el PVC se ha utilizado una caladora y una taladradora. El resultado está representado en la figura 4.21.

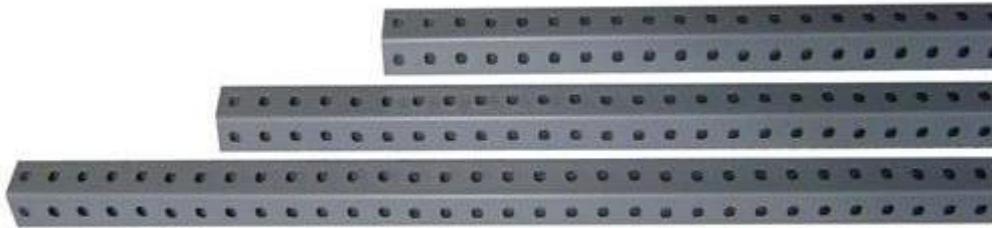


**Figura 4.21: fotografías de la caja guía.*

B) ESTRUCTURA SUPERIOR COMPLETA.

- ESTRUCTURA PORTANTE.

Se ha decidido fabricar la estructura de arriba con perfiles ranurados de 38x38mm (mostrados en la FIGURA 4.22) facilitando así el acople de los distintos elementos.



**Figura 4.22: perfiles ranurados de 38x38mm*

Para la unión de los perfiles se ha utilizado tornillos con tuerca de la medida M6. El resultado es un prisma rectangular con 1 metro de altura, 670 milímetros de anchura y 310 milímetros de profundidad.

- COJINETES.

Los cojinetes se realizan en madera de pino, con un tronco seco de sección constante. Se ha seguido el siguiente procedimiento:

1. En primer lugar se cortan los cojinetes a la medida de 80 milímetros, obteniendo un cilindro de madera.
2. Se devasta la superficie exterior para dejar la sección lo más constante posible hasta obtener un diámetro de 80 milímetros.
3. Una vez hecho esto se hace un agujero concéntrico de 22 milímetros de diámetro en cada cojinete, ya que es el diámetro de la manivela.

Los cojinetes se han unido a la estructura mediante unas abrazaderas de 90 milímetros de diámetro.

- MANIVELA.

Se opta por realizarla en tubo de cobre de 22 milímetros de diámetro exterior, y codos de cobre realizando la soldadura con estaño.

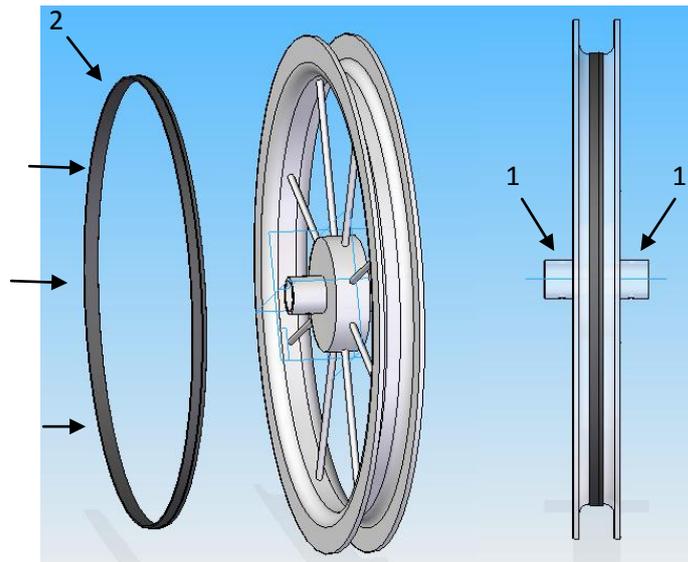


**Figura 4.23: manivela.*

- RUEDA.

Como rueda se ha utilizado una llanta delantera de aluminio de un ciclomotor tipo “vespino NLX” del año 1991”. Se ha seguido el siguiente procedimiento:

- Se desmonta la rueda; en este paso se incluye el desmontaje tanto de la cubierta como de la cámara y se le extrae el freno de tambor.
- Ahora hay que adaptarla a las necesidades de la bomba;
 - La llanta tiene dos agujeros no pasantes en cada centro de la rueda de 32 milímetros de diámetro. En esos agujeros se insertan y se pegan dos cortes de tubo de 32 milímetros de diámetro con un agujero pasante cada uno, para anclar la manivela a la rueda (indicados en la figura 4.24 con el número 1)
 - Se recorta la cámara de aire (señalada con el número 2 en la figura 4.24) y se pega a toda la superficie circundante de la llanta con cola de contacto.



*Figura 4.24

- Después se recorta la cubierta de la forma indicada en la figura 4.25 obteniendo dos anillos que se pegan también con cola de contacto a ambos lados de la llanta por la parte interior (figura 4.26).



*Figura 4.25.

- Al ser una rueda usada la superficie se encuentra dañada. Lo que se hace con esta superficie es lijarla y pintarla. Para el lijado se ha utilizado una lija de agua de grano 400 y para pintarla se ha usado pintura para metal color negro mate. Se ha pintado por medio de un compresor con pistola de pintura, diluida anteriormente con disolvente acrílico. El resultado es el siguiente mostrado en la figura 4.26.



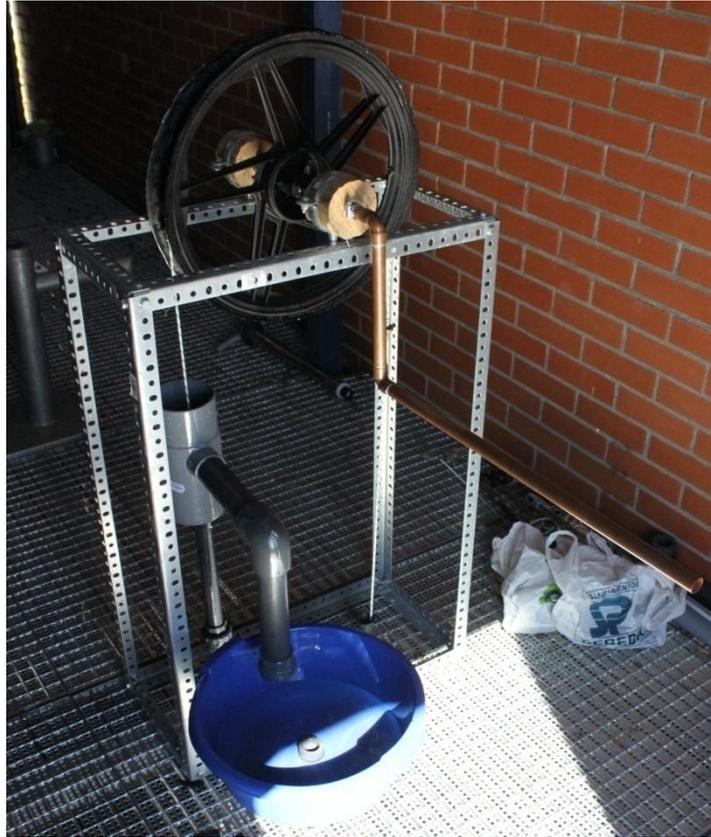
**Figura 4.26*

- RESULTADO.

Después de unir los distintos elementos se obtiene el siguiente resultado:



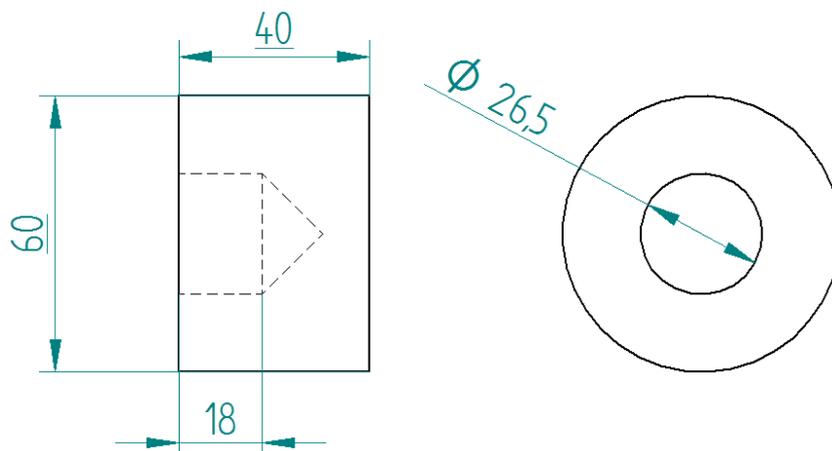
**Figura 4.27.*



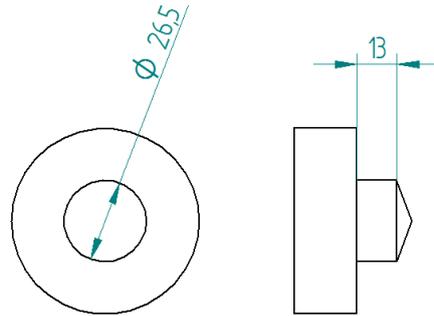
*Figura 4.28.

C) PISTONES.

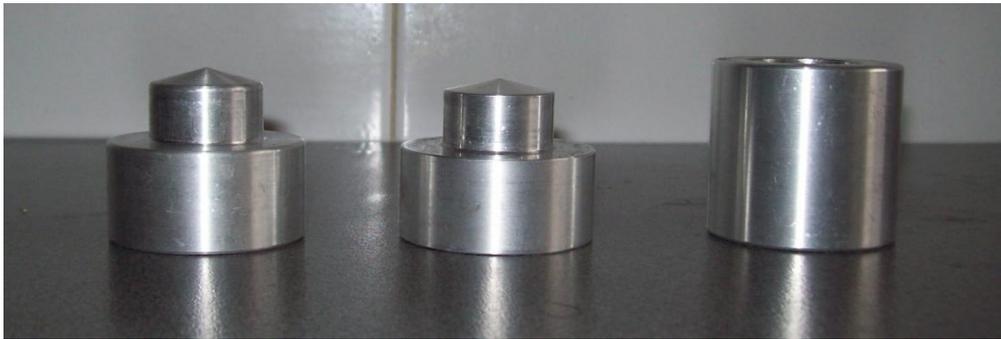
Para realizar los pistones se ha mecanizado un redondo de aluminio para conseguir un molde, con las cotas representadas en las figura 4.29 y 4.30.



*Figura 4.29: cotas de hembra del molde.



**Figura4.30: cotas del macho del molde.*



**Figura 4.31: fotografías del molde.*

Una vez que el molde está fabricado, los pistones se hacen con PVC fundido, el PVC se ha extraído de tapones de botella, calentándolos y vertiendo el contenido fundido en el molde. Una vez enfriado se extrae obteniendo el pistón en bruto. Al pistón se le realiza un agujero pasante de 4 milímetros de diámetro con una broca y posteriormente se procede a lijarlo para dejar la superficie sin imperfecciones.

D) RESTO DE ELEMENTOS.

El resto de elementos (tubos, codos, empalmes roscados...) se han cortado utilizando una sierra y se han unido con pegamento de PVC o uniones atornilladas con argollas.

La forma de unión y el resultado final incluyendo fotografías se encuentran en el siguiente apartado “DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN”.

4.12. PRESUPUESTO.

PARTE	CONCEPTO	PRECIO (€)
Caja guía	Botella	0
	Láminas de PVC	7,75
	Abrazaderas	1,5
Conducto de bajada	Barreño redondo	3,49
	Contador picoflux	17,92
Estructura superior	6 Abrazadera isofónica	1,41
	Broca pala D=22	2,45
	Perfil ranurado 38*38	20
	Rueda	20
	Tubo de Cobre y Accesorios	10
Resto de conductos, elementos de sujeción	Unión tres piezas 50´	2,19
	2 Codo presión 32´	0,75
	2 Manguito presión 32´	0,68
	Manguito unión	0,94
	Tubo PVP 50´	1,8
	Boquilla	4,07
	Tapón presión 40´	0,37
	Tapa reducida doble 32´	0,75
	Codo presión 50´	0,68
	2 Varilla roscada 6	0,82
	Junta plana	0,12
	Manguito presión 32´	0,34
	Terminal rosca macho 32´	0,37
	Junta cónica	0,12
	Abrazadera	2,09
	Tubo PVP Transparente 32´ 2,5m	12,23
	Cola de contacto	4,45
	Pegamento PVC	1,13
	Tubos	10
	Tornillos	3,35
TOTAL		131,77

**Tabla 4.1: presupuesto.*

5. TÉCNICA DE MEDIDA.

En el apartado 6 se van a incluir resultados obtenidos de la bomba de mecate para caracterizarla, estos datos obtenidos se han tomado con diferentes elementos y de diferentes formas, en este punto se detalla.

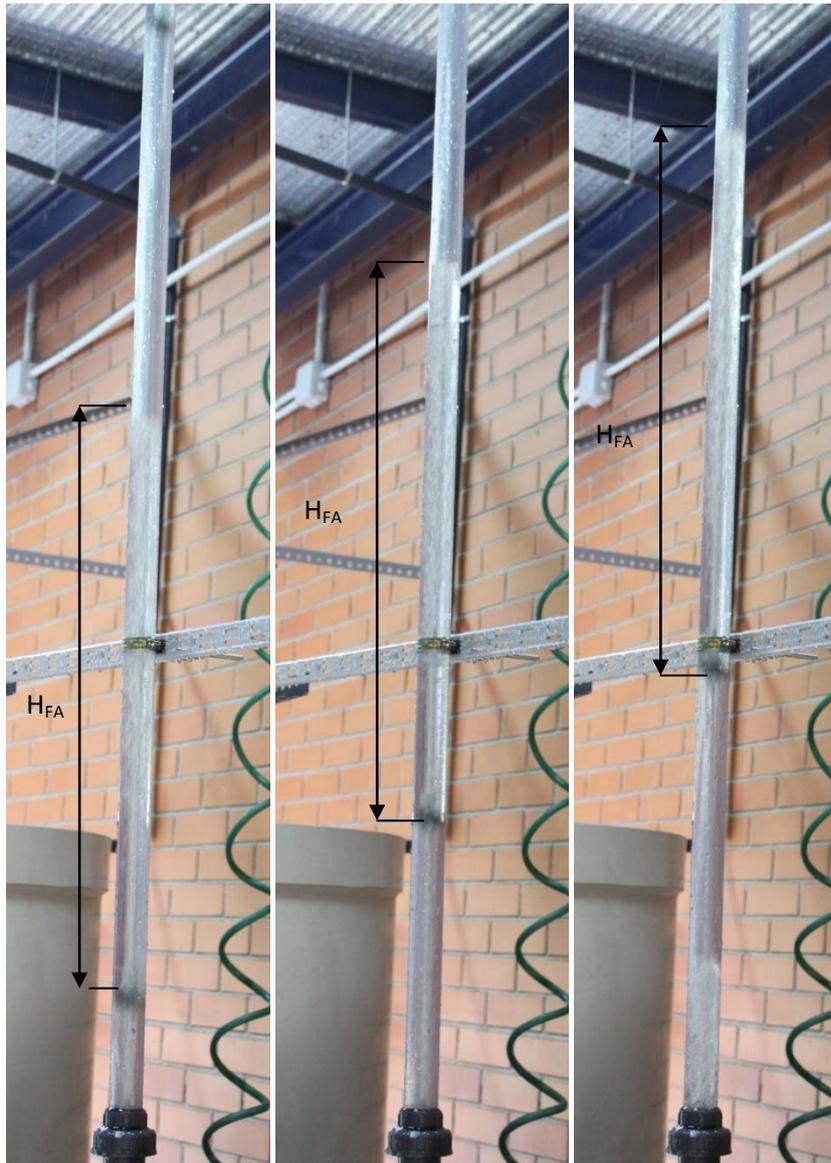
5.1.ELEMENTOS NECESARIOS.

- Cámara de video: se han ido alternando dos cámaras con función de video: Kodak EasyShare C813 y Canon Eos 500 D.
- Cámara de fotografías: para realizarlas se han utilizado tres cámaras, Kodak EasyShare C813, Canon Eos 500 D y Nikon D3000.
- Metrónomo: con la ayuda de un ordenador portátil con altavoces y el programa “Metronome 4.0”
- Caudalímetro: se ha utilizado un contador volumétrico de la marca “picoflux” con una precisión de decilitros.
- Cuerda con peso: se le ha puesto a una cuerda de 1,5 metros aproximadamente un peso en la parte inferior para realizar medidas.
- Recipiente: recipiente con posibilidad de contener agua y acoplarse a la cuerda.

5.2.FORMA DE REALIZAR LAS MEDIDAS Y OBTENER DATOS.

En este punto se explica el procedimiento que se ha seguido en el apartado de resultados, indicando el punto al que se refiere.

- Apartado 6.1.1: Determinación de la frecuencia natural: se ha grabado a una persona durante 5 minutos girando la manivela. Nada más empezar a bombear, se ha puesto en funcionamiento el metrónomo a una frecuencia alta (aproximadamente 1,2 Hercios) y luego se ha parado el metrónomo pero no el bombeo, de esta forma se empieza a bombear con 1.2 Hercios pero luego se puede ver la evolución de la frecuencia ya que va cayendo según pasa el tiempo. Este procedimiento se ha realizado 4 veces. Se analiza el video y se mide la frecuencia cada 30 segundos. Con cada video, se ha hallado la media de todos los datos de frecuencia obtenidos y se ha pintado una gráfica.
- Apartado 6.2.1: Para la determinación experimental de que el frente de agua se mantiene constante en su ascensión se ha utilizado la cámara Canon Eos 500 D realizando fotografías consecutivas a una velocidad de tres por segundo desde el mismo punto. Después se han analizado y se ha visto como la cantidad de agua que portaba no cambia. En la figura 5.1 aparecen tres fotografías tomadas de forma consecutiva donde se puede apreciar que H_{FA} no varía.



**Figura 5.1: H_{FA} en tres instantes de tiempo consecutivos.*

Lo que se puede observar es que la columna de agua transporta burbujas de aire. Mientras la bomba esté funcionando solo hay una pequeña zona en la parte superior en la que se pueden apreciar burbujas de aire, pero al pararla para tomar fotografías y medidas (que no corresponden a este apartado) y pasar el agua de una columna a otra sin movimiento ascendente se empiezan a expandir por todo al hueco entre pistones, lo que dificulta la determinación de H_{FA} , que se ha medido sin tomar en cuenta el volumen de aire, es decir hasta el final de la columna como si no llevara burbujas.

- Apartado 6.2.2: Para la determinación de la altura del frente de agua se han utilizado fotografías y videos. El método de análisis de estos ha sido simple: se

han tomado siempre desde el mismo punto, enfocando al tubo de PVC transparente. Como la distancia entre pistón y pistón es de 1 metro se ha hallado el número de pixeles que equivalen a un metro en la fotografía obteniendo una relación en [metros/pixeles]. Una vez hallada esa relación solo había que ver el número de pixeles que mide el parámetro y multiplicarlo por la relación anterior obteniendo el resultado en metros.

El nivel de agua que contiene el depósito se ha hallado con la cuerda con peso. Se sumerge la cuerda hasta que el peso toca el fondo, se marca el tramo en la cuerda y luego se extrae y se mide el tramo marcado.

- Apartado 6.2.4: Para hallar la altura del frente de agua frente a la frecuencia se ha utilizado el metrónomo para fijar τ y las imágenes para determinar la altura del frente de agua de la misma forma descrita anteriormente.

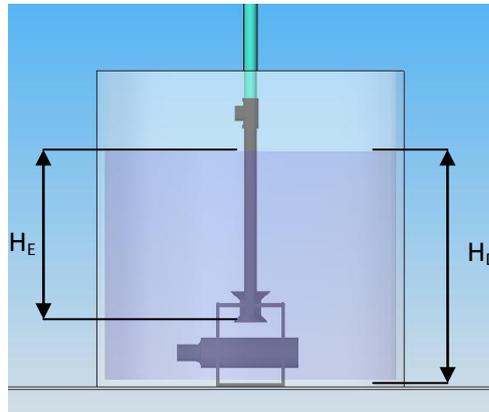
- Apartado 6.3: El caudal se ha medido con el contador “picoflux”. Para hallar la frecuencia se ha utilizado un video, donde se ha contado el número de vueltas y el tiempo. La frecuencia a priori era constante pero indeterminada. Se ha calculado el caudal para 4 niveles de depósito diferentes, para cada nivel de depósito se ha medido el caudal frente a la frecuencia (variando ésta, para ver la evolución). Esto se ha repetido 4 veces obteniendo muchos valores de los que se ha hallado la media y luego se ha dibujado una gráfica.

- Apartado 6.5.1: Para la determinación de la estabilidad de la velocidad de pérdidas se ha grabado cómo evoluciona el frente de agua cuando se para la bomba, se ha medido el tiempo que tarda en vaciarse obteniéndose así los datos de velocidad. Se han realizado cuatro medidas distintas para cada frente de agua y se han representado sus medias.

5.3.CONCEPTOS A TENER EN CUENTA.

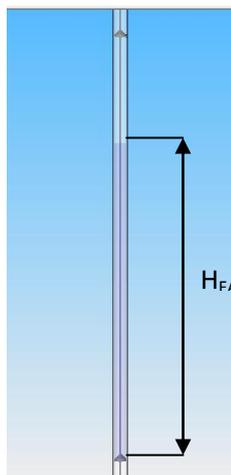
En este punto se van a detallar las variables que necesiten de una explicación para su comprensión a tener en cuenta en el apartado de resultados. El resto de las variables se van a ir exponiendo según sea necesario y en el capítulo 7 “nomenclatura” se encuentra una tabla resumen de todas ellas.

- H_B : Altura de bombeo (4,31 metros)
- H_D : Nivel del depósito (indicado en la figura 5.2)
- H_E : Nivel de agua en el depósito útil (indicado en la figura 5.2)



**Figura 5.2: Nivel de agua en el depósito (H_D) y nivel de agua útil en el depósito (H_E)*

- H_{FA} : Altura del frente de agua (indicado en la figura 5.3): los pistones se encuentran a una distancia de 1 metro, la altura del frente de agua es el nivel de agua que hay entre pistón y pistón.



**Figura 5.3: Altura del frente de agua H_{FA} .*

- H_p : distancia entre pistones (1 metro)
- L : Longitud del tubo de subida (4,2 metros)

6. RESULTADOS.

Una vez realizado el montaje completo de la bomba, se van a determinar los parámetros de funcionamiento de esta. El parámetro de funcionamiento más importante es el caudal de extracción (Q).

El caudal de extracción se puede calcular de manera teórica:

$$Q = V_S * (A_T - A_c) * \Phi \quad [6.1]$$

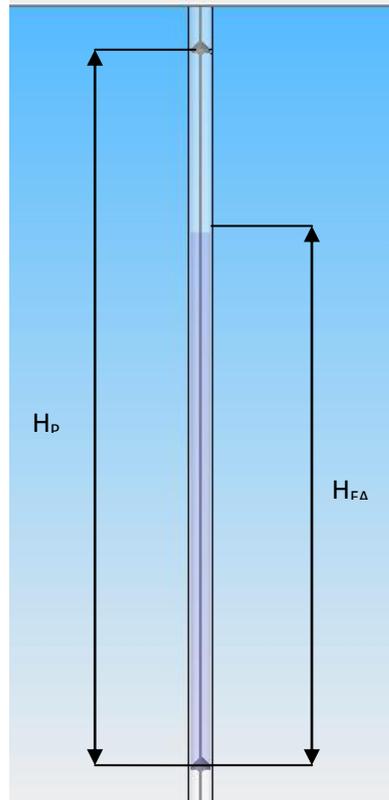
$$V_S = \omega * R \quad [6.2]$$

$$\omega = 2 * \pi * \tau \quad [6.3]$$

Donde:

- A_c : área de la cuerda.
- A_T : área transversal del tubo de subida.
- Q: caudal de extracción.
- R: radio de la rueda
- V_S : velocidad de subida de los pistones.
- τ : frecuencia de giro.
- ω : velocidad de giro de la rueda.
- Φ : factor de corrección.

Para el factor de corrección se han utilizado los parámetros indicados en la figura 6.1. Ya que la columna de agua puede no ir llena y el volumen que ocupa el pistón no ocupa el agua.



**Figura 6.1.*

$$\Phi = \frac{(H_{FA} * A_T - V_{pistón})}{H_p * A_T} \quad [6.4]$$

Donde:

- H_{FA} : altura del frente de agua.
- H_p : distancia entre pistones (1 metro)
- $V_{pistón}$: volumen del pistón.

En el caso general, H_{FA} depende, entre otras cosas, del nivel de agua del depósito. Así, los parámetros libres en la ecuación 6.7 son la frecuencia (τ) y la altura del frente de agua (H_{FA}). Después esta aclaración, este apartado de resultados se va a centrar en estudiar la influencia y comportamiento de la frecuencia de giro (τ), la altura del frente de agua (H_{FA}) y, una vez definidas las características de ambos, se va a

determinar el caudal de extracción (Q) de manera práctica. Por último se va a calcular el caudal de extracción de manera teórica para comparar resultados.

6.1. ESTUDIO DE LA FRECUENCIA τ .

La frecuencia con la que gira la rueda depende de la persona que esté bombeando y de sus capacidades físicas. En este apartado se va a estudiar la frecuencia natural de bombeo, dentro de unos rangos, ya que depende del tipo de persona que la esté utilizando. La frecuencia depende de los siguientes parámetros:

$$\tau = f(t, R, F) \quad [6.5]$$

Siendo:

- τ : frecuencia natural de giro.
- t: tiempo de bombeo.
- R: radio de la rueda.
- F: fuerza aplicada en la rueda necesaria para mover el conjunto.

Donde:

$$F = f(H_{FA}, F_R) \quad [6.6]$$

Siendo:

- H_{FA} : altura del frente de agua.
- F_R : fuerza de rozamiento entre los distintos elementos de la bomba.

El parámetro R es de diseño y permanece invariable pero F_R puede cambiar al sustituir, por ejemplo, los pistones o al desgaste sufrido por el uso, aunque se toma como invariable al realizar todas las medidas con los mismos pistones y al no apreciarse desgaste mientras se realizaba la caracterización. La frecuencia natural se va a hallar partiendo de los parámetros variables, es decir:

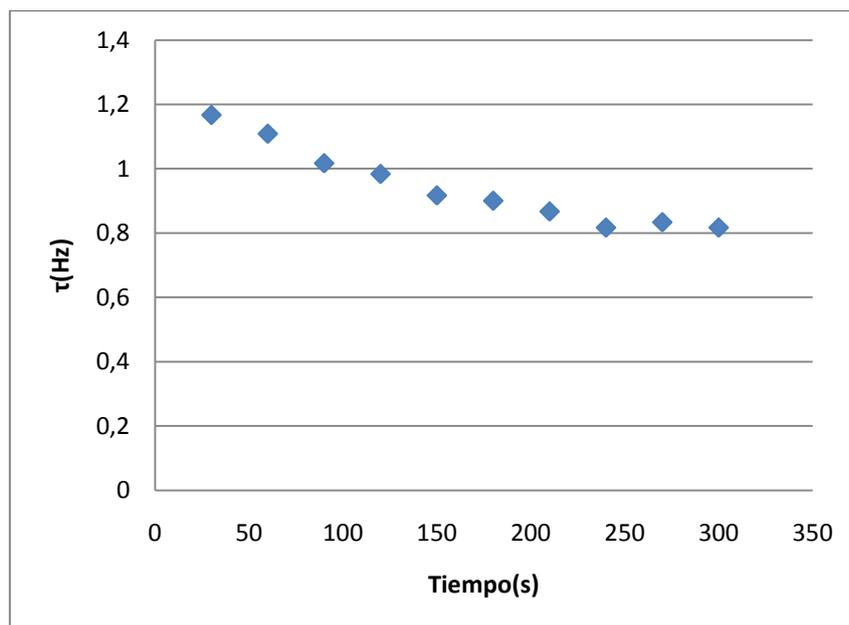
$$\tau = f(t, H_{FA}) \quad [6.7]$$

6.1.1. DETERMINACIÓN PRÁCTICA DE LA FRECUENCIA NATURAL.

La frecuencia natural es a la que gira la rueda en un tiempo de bombeo elevado, si el tiempo de bombeo es pequeño, la frecuencia de giro que aplica la persona puede ser elevada, pero cuando el tiempo es mayor, la persona tiende a disminuir esa frecuencia hasta hallar un valor estable, en este apartado se pretende hallar esa frecuencia natural para la cual una persona podría estar bombeando un tiempo indefinido.

La frecuencia natural de giro se determina por medio de una gráfica (figura 6.1) donde se incluyen los datos tomados. Solo se ha estudiado para un hombre adulto de una edad comprendida entre 20-30 años y de complexión normal. Es importante determinar el tipo de persona con la que se ha realizado ya que la frecuencia natural variará bastante de una persona a otra.

En la figura 6.2 se representan los datos hallados, donde se aprecia la tendencia natural de los datos a una línea exponencial negativa.



**Figura 6.2: Representación de la frecuencia de giro (τ) frente al tiempo de bombeo(t).*

Como se puede observar, al inicio del bombeo se gira con mayor frecuencia mientras que transcurrido un tiempo esa frecuencia va disminuyendo hasta que se obtiene una frecuencia casi estable, que es alrededor de 0,8 Hercios.

$$\tau_{NATURAL} \simeq (0,8)Hz$$

De ahora en adelante y siempre que sea necesaria, la frecuencia a tener en cuenta va a ser esta.

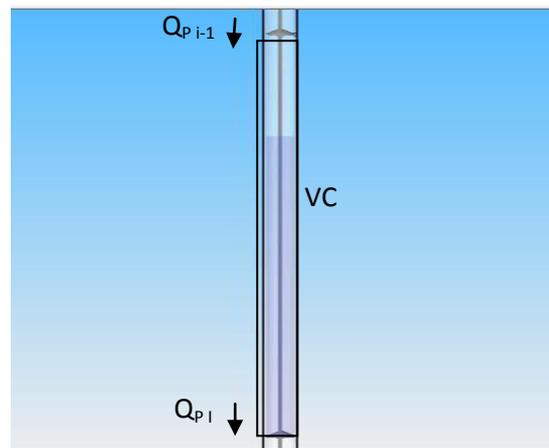
6.2. ALTURA DEL FRENTE DE AGUA H_{FA} .

En este punto se va a analizar la evolución y dependencia de la altura del frente de agua con el resto de los parámetros de la bomba.

6.2.1. ESTABILIDAD DE LA ALTURA DEL FRENTE DE AGUA DEPENDIENDO DE LA POSICIÓN (Y) DENTRO DE LA TUBERÍA.

En este apartado se pretende estudiar la variación de H_{FA} a lo largo de todo el recorrido de la tubería. Cada columna de agua tiene un caudal de pérdidas (Q_P) que va cediendo agua a la columna inmediatamente inferior, de esta forma cada columna de agua recibe un caudal de la columna superior y cede otro caudal a la columna inferior.

La estabilidad se va a explicar de manera teórica, tomando como volumen de control el volumen entre dos pistones, mostrado en la figura 6.3.



*Figura 6.3: representación de las variables.

Se obtiene que:

$$\frac{dM_{VC}}{dt} = m_{i-1} - m_i \quad [6.8]$$

Como la densidad del agua permanece constante:

$$A_T * \frac{dH_I}{dt} = Q_{PI} - Q_{PI+1} \quad [6.9]$$

Siendo:

- A_T : área transversal del tubo.
- H_i : altura del frente de agua.
- M : masa de agua en el volumen de control.
- m_i : gasto másico de pérdidas.
- QP_i : caudal de pérdidas

a) Primer pistón que sube con agua.

Al poner en funcionamiento la bomba es el primer pistón que experimenta $H_{FA} \neq 0$. A este pistón se le llama 1, al superior que no transporta agua se le llama 0. H y Q llevan el subíndice de cada pistón.

$$Q_{P0}(H_0) = 0 \quad [6.10]$$

$$A_T * \frac{dH_1}{dt} = Q_{P1}(H_1) \quad [6.11]$$

Donde Q_{P0} es el caudal de pérdidas de la columna inmediatamente superior, como esta columna no lleva agua, el valor es nulo.

b) Segundo pistón que sube con agua. Este pistón es el número 2.

$$A_T * \frac{dH_2}{dt} = Q_{P2}(H_2) - Q_{P1}(H_1) \quad [6.12]$$

Como H_2 es mayor que H_1 , Q_{P2} es mayor que Q_{P1} . Esto significa que H_2 va a disminuir más lentamente que H_1 . Aunque esto suceda, H_2 no va a ser estable hasta el punto de salida de agua de la bomba porque pierde más caudal del que recibe.

c) Pistón número n.

Cada caudal de pérdidas se parece cada vez más al anterior hasta que la diferencia es despreciable.

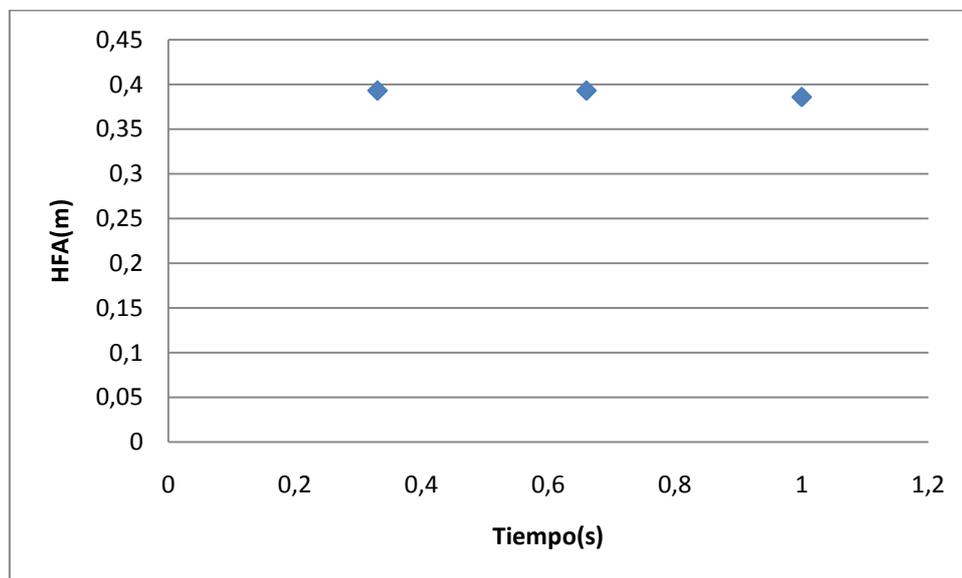
$$Q_i \sim Q_{i+1} \quad [6.13]$$

$$A_T * \frac{dH_n}{dt} \sim 0 \quad [6.14]$$

Con esta explicación teórica se concluye que pasado un cierto tiempo de bombeo todas las columnas de agua suben con el mismo H_{FA} , ya que el caudal que se cede es igual o prácticamente igual que el caudal que se recibe de la columna superior. El sistema es estacionario después de un tiempo de arranque.

Por este motivo, todas las medidas indicadas en este documento están tomadas cuando el sistema se encuentra estable, es decir, cuando todas las columnas llevan fluido después de un tiempo de empezar a bombear.

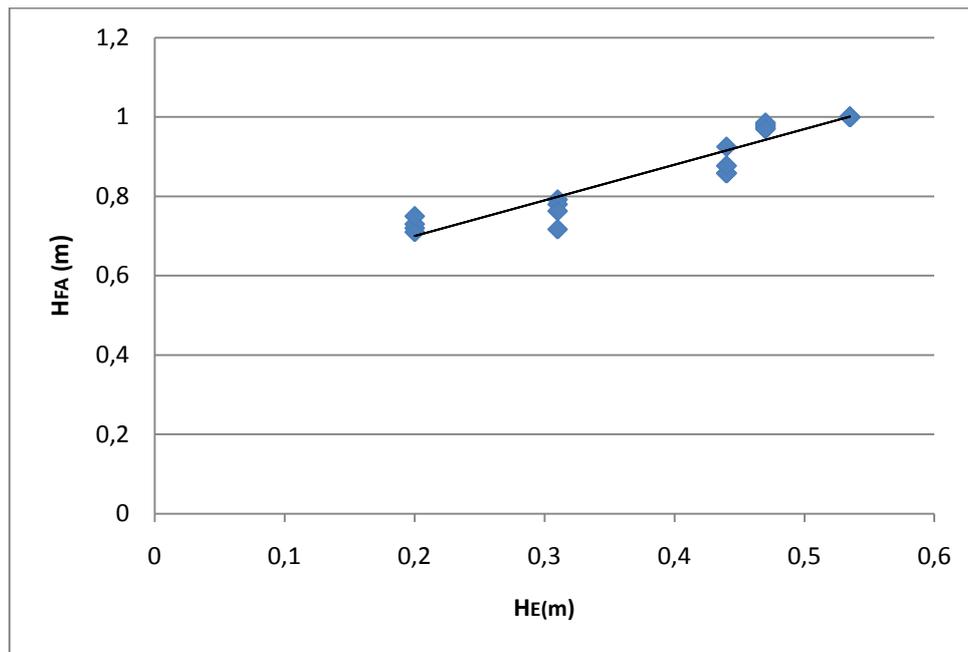
Experimentalmente también se ha determinado que no varía, se ha medido la altura del frente de agua en tres instantes de tiempo y se ha pintado una gráfica.



*Figura 6.4: Altura del frente de agua frente al tiempo.

6.2.2. RELACIÓN ENTRE LA ALTURA DEL FRENTE DE AGUA H_{FA} Y EL NIVEL DE AGUA ÚTIL H_E .

En este punto se procede a determinar la H_{FA} dependiendo del nivel de agua útil en el depósito. Se puede observar en la figura 6.5 una gráfica en la que se relaciona H_{FA} con H_E , ya que varía notablemente.



*Figura 6.5: variación de H_{FA} frente a H_E .

Siendo:

- H_{FA} : altura del frente de agua.
- H_E : nivel de agua útil en el depósito.

La ecuación 6.15 define H_{FA} frente a H_E para una distancia entre pistones de 1 metro. Para otras distancias, lo razonable sería que la curva fuera la misma que hallada, solo debería afectarle el tipo de pistón y la velocidad de la cuerda. Por lo que esta ecuación define, para una distancia entre pistones de 1 metro, la altura mínima del agua en el pozo para un funcionamiento adecuado.

$$H_{FA} = 0,9 * H_E + 0,55 \quad [6.15]$$

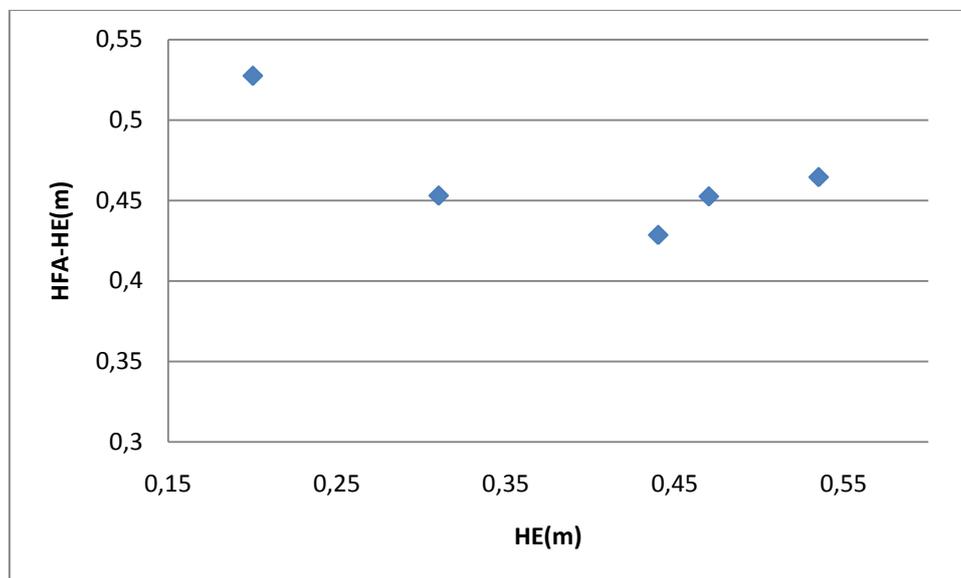
Con un nivel útil de 0,535 metros se consigue que $H_{FA}=1$ metro. Por tanto se concluye que la profundidad mínima del pozo para que la bomba funcione de manera óptima con una distancia entre pistones de un metro es:

$$H_D = 0,535 + 0,2 = 0,737 \text{ metros}$$

Siendo 0,2 el nivel de agua no útil.

Una vez determinado esto se va a caracterizar la capacidad de succión que tiene la bomba.

La distancia entre pistones es de 1 metro, como se ha dicho anteriormente todo este espacio está completamente lleno a un determinado nivel del depósito y una determinada frecuencia, sin embargo el nivel de agua útil H_E no alcanza nunca 1 metro en esta instalación. Con la siguiente gráfica se pretende determinar qué capacidad de succión tiene frente a la altura del depósito. Se han usado los valores medios de la gráfica anterior (figura 6.5) y se les ha restado H_E obteniendo la gráfica representada en la figura 6.6.



*Figura 6.6: Gráfica que indica la succión de la bomba ($H_{FA}-H_E$) frente al nivel útil del depósito (H_E)

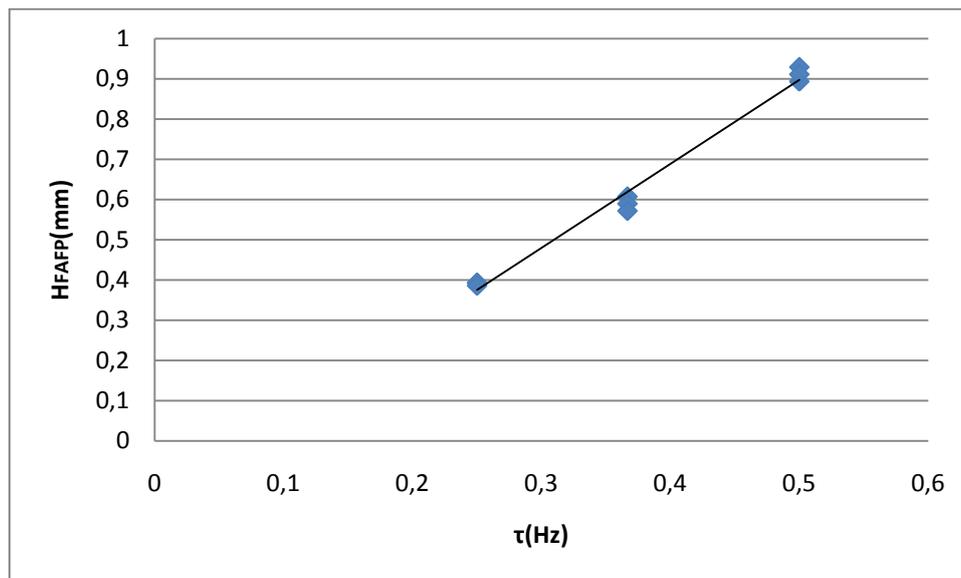
La capacidad de succión se encuentra casi constante obteniendo un valor promedio de:

$$H_{FA} - H_E \sim 0,46 \text{ metros}$$

6.2.3. EVOLUCIÓN DE H_{FA} CON RESPECTO A LA FRECUENCIA (τ) DE GIRO.

Se mide la altura del frente de agua a diferentes frecuencias de giro. Para estas medidas el depósito de agua se encuentra completamente lleno ($H_E=0,6$ metros) por tanto en este apartado H_{FA} no depende de H_E .

En la figura 6.7 se pueden observar los resultados obtenidos.



*Figura 6.7: Determinación de H_{FA} en relación con la frecuencia de giro (τ)

Siendo:

- H_{FA} : altura del frente de agua.
- τ : frecuencia de giro de la rueda.

Se puede observar como a muy bajas frecuencias H_{FA} es menor que para frecuencias mayores, aunque a una frecuencia de 0,53 Hz las columnas de agua van al completo. Una vez observado esto y sabiendo que la frecuencia natural hallada anteriormente es aproximadamente 0,8Hz se puede determinar que a una frecuencia normal con un nivel del depósito adecuado el espacio entre pistones estará completamente lleno de agua, es decir:

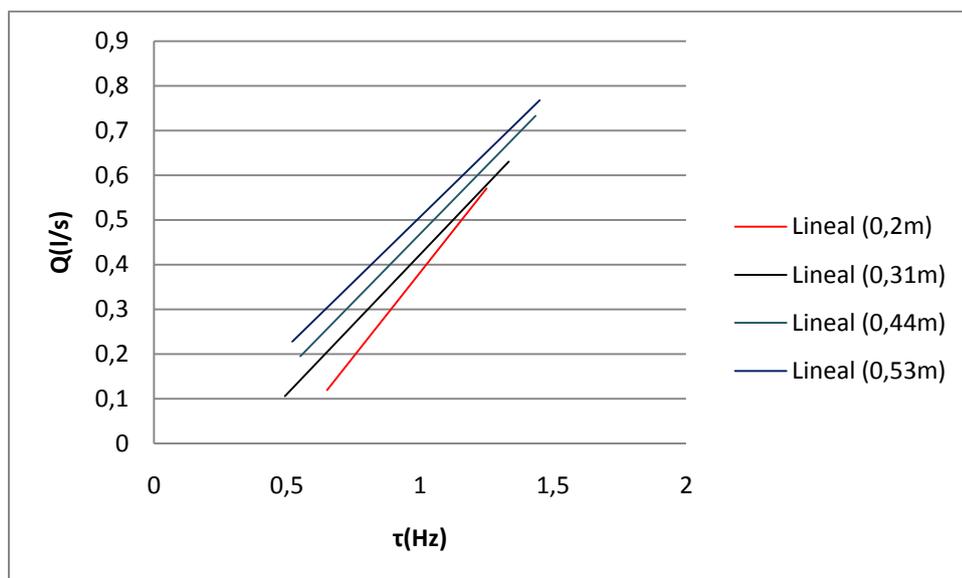
$$H_{FA} = 1\text{metro}$$

6.3. ESTUDIO DE EL CAUDAL (Q) FRENTE A LA FRECUENCIA (τ).

El procedimiento que se sigue en este apartado es el siguiente: se ha variado el nivel de agua del depósito y se ha variado la frecuencia en cada prueba, por tanto se obtiene una gráfica del caudal en relación con la frecuencia para diferentes niveles del depósito. De estos datos se obtienen ecuaciones cuyos valores se compararan en el siguiente apartado con valores teóricos.

Se han realizado cuatro medidas de caudal para cada frecuencia, en las gráfica solo consta la media de ellas.

En la figura 6.8 se representa una gráfica con todos los datos obtenidos pudiéndose observar la evolución.



**Figura 6.8: representación de todos los niveles.*

Ya que los datos muestran una tendencia claramente lineal, se representa solo la línea de tendencia pudiéndose obtener las ecuaciones. Se observa claramente como el caudal crece con el nivel del depósito y con la frecuencia.

Las ecuaciones extraídas de las líneas son las siguientes:

- Para $H_E=0,2\text{m}$

$$Q = 0,75 * \tau - 0,37 \quad [6.16]$$

- Para $H_E=0,31\text{m}$

$$Q = 0,6 * \tau - 0,14 \quad [6.17]$$

- Para $H_E=0,44\text{m}$

$$Q = 0,61 * \tau - 0,14 \quad [6.18]$$

- Para $H_E=0,53\text{m}$

$$Q = 0,58 * \tau - 0,074 \quad [6.19]$$

6.4.COMPARACIÓN DEL CAUDAL TEÓRICO CON EL CAUDAL EXPERIMENTAL.

El objetivo de analizar el comportamiento de forma experimental es para compararlo con los datos obtenidos de forma teórica.

De manera experimental se van a utilizar las ecuaciones halladas en el apartado anterior, es decir, 6.16,6.17,6.18,6.19.

De manera teórica se van a utilizar las ecuaciones 6.1 y 6.4:

$$Q = V_S * (A_T - A_C) * \Phi \quad [6.1]$$

$$\Phi = \frac{(H_{FA} * A_T - V_{pistón})}{H_P * A_T} \quad [6.4]$$

Donde:

- A_C : área de la cuerda.
- A_T : área transversal del tubo de subida.
- H_{FA} : altura del frente de agua.
- H_P : distancia entre pistones (1 metro)
- Q : caudal de extracción.

- $V_{\text{pistón}}$: volumen del pistón.
- V_S : velocidad de subida de los pistones.
- ω : velocidad de giro de la rueda.

Con respecto a H_{FA} se ha demostrado anteriormente que a una frecuencia superior a 0,53 Hercios el frente de agua sube al completo, por tanto H_{FA} solo dependerá del nivel del depósito ya que la frecuencia que se va a utilizar es 0,8 Hercios. De los datos y la gráfica incluidos en el apartado 6.2.3 se obtiene la siguiente expresión:

$$H_{FA} = 0,9 * H_E + 0,55 \quad [6.20]$$

A partir de un valor de H_E igual o mayor a 0,535 metros H_{FA} es igual a un metro.

En la siguiente tabla se ordenan los valores obtenidos y su error.

H_E (m)	$Q_{\text{TEÓRICO}}$ (l/s)	$Q_{\text{EXPERIMENTAL}}$ (l/s)	Error($Q_T - Q_E$)
0,2	0,34	0,23	0,11
0,31	0,38	0,30	0,08
0,44	0,44	0,34	0,1
0,53	0,46	0,39	0,07

**Tabla 6.1: comparativa del caudal teórico con el experimental.*

El error es muy parecido en todos los casos, lo que significa que la fuente de error siempre es la misma.

Como fuente de error un parámetro muy importante es la frecuencia porque hemos demostrado que a partir de 0,53 Hercios la altura del frente de agua no depende de la frecuencia, pero esto lo hemos determinado para un nivel del depósito adecuado y aquí lo estamos variando, es un parámetro que en el futuro habría que caracterizar mejor.

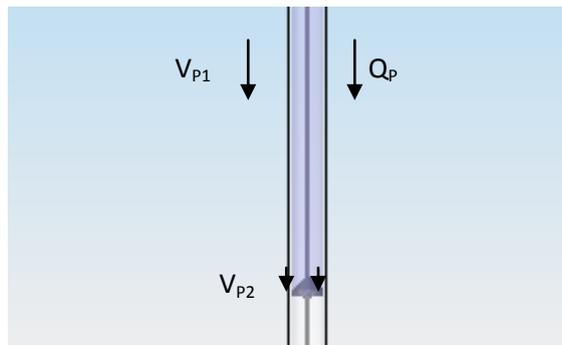
Otra fuente de error es la zona de burbujas de aire que no lleva volumen de agua y a priori no se puede determinar.

Y, por último no se ha tenido en cuenta el caudal de pérdidas, por tanto se va a hallar en el siguiente apartado y se va a intentar ajustar más el valor teórico al experimental.

6.5. VELOCIDAD Y CAUDAL DE PÉRDIDAS.

En puntos anteriores se ha comentado que las columnas de agua que van ascendiendo van cediendo agua a la columna inferior y recuperando agua de la columna superior.

En este apartado se van a estudiar tres parámetros (representados en la figura 6.9):



*Figura 6.9.

- Q_p : es el caudal de pérdidas, independiente de donde se mida, ya sea en la tubería o entre el espacio entre tubería y pistón, es el mismo.

- V_{P1} : es la velocidad con la que se vacía la columna de agua dentro de la tubería.

- V_{P2} : es la velocidad de pérdidas que hay entre el espacio existente entre el pistón y la tubería.

En las siguientes ecuaciones está indicada la relación entre ellas.

$$Q_p = V_{P1} * A_T = V_{P1} * \pi * \frac{d_i^2}{4} \quad [6.21]$$

$$V_{P2} = \frac{Q_p}{\pi \left(\frac{d_i^2}{4} - \frac{d_p^2}{4} \right)} \quad [6.22]$$

Siendo:

- d_i : diámetro interior del tubo de subida.
- d_p : diámetro del pistón.

6.5.1. ESTABILIDAD Y CÁLCULO DE V_p .

Se va a tratar de determinar si la velocidad de pérdidas varía con respecto a H_{FA} tomando diferentes medidas y representándolas en una gráfica. A priori, no debería variar o si varía debería ser casi imperceptible. En la figura 6.10 se representan medias ponderadas de los valores obtenidos.

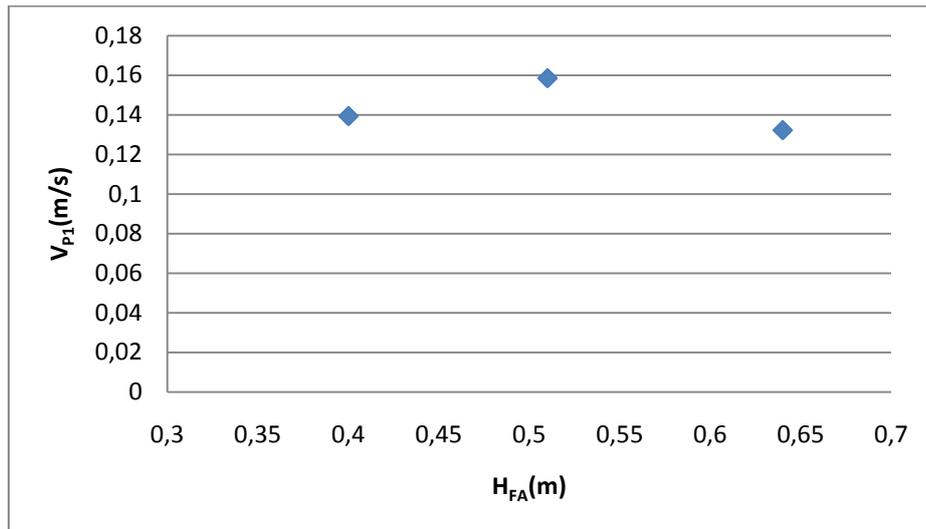


Figura 6.10: velocidad de pérdidas en la tubería respecto a H_{FA} .

La velocidad de pérdidas en la tubería la trataremos como invariable e independiente de la altura del frente de agua.

Después de esta demostración, la explicación del apartado 6.2.1 es diferente. Se puede concluir que a partir del segundo pistón que sube con agua H_{FA} permanece constante y el sistema ya se puede tomar como estacionario.

Se toma la velocidad de pérdidas en la tubería como la media de todas las halladas:

$$V_{p1} = 0,14 \frac{m}{s}$$

Por tanto el caudal de pérdidas ha de ser:

$$Q_p = 0,081 \frac{l}{s}$$

Como el caudal es el mismo, calculamos V_{p2} como:

$$V_{p2} = \frac{Q_p}{\pi \left(\frac{d_i^2}{4} - \frac{d_p^2}{4} \right)} = 2,74 \frac{m}{s} \quad [6.23]$$

6.6. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS SOBRE EL CAUDAL.

En la tabla 6.2 se muestra una tabla con el resultado del caudal teórico corregido (es el resultado de restarle al caudal teórico obtenido en el apartado 6.4 el caudal de pérdidas) el caudal experimental y el nuevo error.

$H_E(m)$	$Q_{TEÓRICO}(l/s)$	$Q_{EXPERIMENTAL}(l/s)$	Error(Q_T-Q_E)
0,2	0,26	0,23	0,03
0,31	0,3	0,30	0
0,44	0,36	0,34	0,02
0,53	0,38	0,39	0,01

**Tabla 6.2: valores corregidos.*

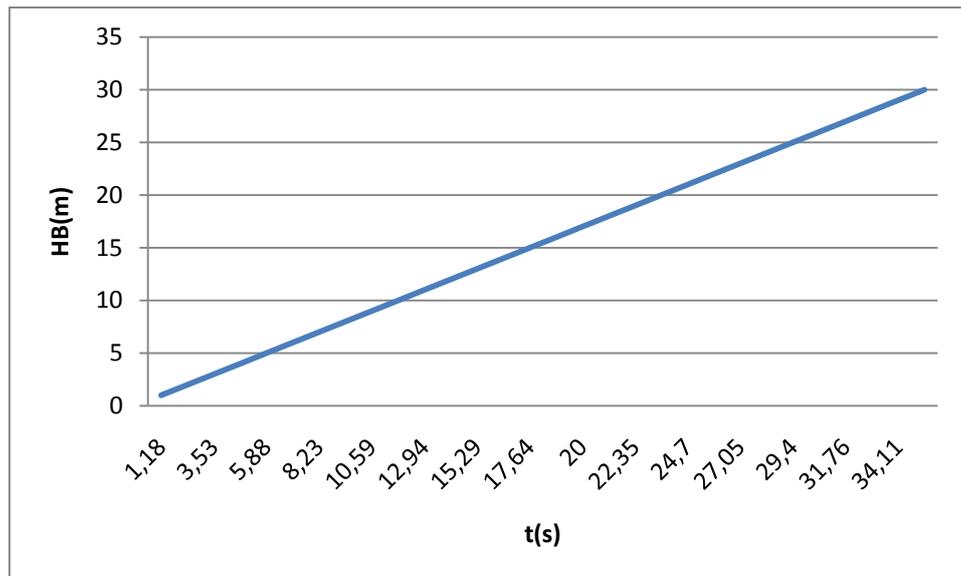
Se puede observar que el caudal de pérdidas influía con un peso bastante importante el error actual es muy pequeño y lo podemos achacar a los factores explicados al final del punto 6.4.

6.7. TIEMPO NECESARIO PARA EXTRAER AGUA FRENTE A LA ALTURA DE BOMBEO.

Con tiempo necesario para extraer agua se quiere referir al tiempo que se tarda desde que se pone en funcionamiento hasta que el agua se extrae.

$$H_B = (V_s - V_{P1}) * t \quad [6.25]$$

En la figura 6.11 se representa una gráfica representando la altura de bombeo frente a este tiempo.



*Figura 6.11: altura de bombeo frente al tiempo.

6.8.DETERMINACIÓN DEL PAR Y DE LA POTENCIA.

En este punto se va a combinar parte teórica y práctica, porque se va a hallar el par y la potencia de giro de manera teórica pero la fuerza de rozamiento se ha hallado de manera práctica.

6.8.1. Calculamos la fuerza hay que ejercer sobre la cuerda.

$$F = \text{Peso}_{\text{cuerda}} + \text{Peso}_{\text{pistones}} + \text{Peso}_{\text{columna de agua}} + FR_{\text{cuerda-botella}} + FR_{\text{pistón-tubería}} \quad [6.26]$$

$$F = (m_{cs} * g - m_{cb} * g) + (m_{ps} * g - m_{pb} * g) + m_{H2O} * g + \mu_{c-b} * N_{c-b} + \mu_{c-t} * N_{c-t} \quad [6.27]$$

Siendo:

- μ_{c-b} : coeficiente de rozamiento entre la cuerda y la botella.
- μ_{p-t} : coeficiente de rozamiento entre el pistón y la tubería.
- F : fuerza que ejerce la cuerda.
- g : aceleración de la gravedad.
- m_{caja} : masa de la caja guía (5,9kg)
- m_{cb} : masa de la cuerda que baja.
- m_{cs} : masa de la cuerda que sube.
- m_{H2O} : masa de agua en la tubería.
- m_{pb} : masa de los pistones que bajan.
- m_{ps} : masa de los pistones que suben.
- N_{c-b} : fuerza normal entre la cuerda y la botella.
- N_{p-t} : fuerza normal entre el pistón y la tubería.

Ya que la masa de la cuerda y los pistones que suben es igual a la masa de la cuerda y los pistones que bajan y la normal entre el tubo y los pistones es 0 ya que tienen holgura:

$$F = m_{H2O} * g + FR_{cuerda-botella} \quad [6.28]$$

La fuerza de rozamiento de la cuerda con la botella de la caja guía se ha calculado de manera experimental (explicada en técnica de medida) obteniendo:

$$FR_{cuerda-botella} = 7,6 N$$

Para determinar la masa de agua que se aloja en la tubería se ha hallado primero el volumen de esta y se le ha restado el volumen de los pistones y de la cuerda que se encuentran dentro de ella, al ser la longitud de la tubería algo más de 4 metros (4,2m) el número de pistones es 4.

$$V_{tubería} = \pi * \frac{d_i^2}{4} * L = 2,4l$$

$$V_{pistón} = 0,004l$$

$$V_{cuerda} = \pi * \frac{d_{cuerda}^2}{4} * L = 0,038l$$

$$V_{agua} = V_{tubería} - 4 * V_{pistón} - V_{cuerda} = 2,34l$$

Donde:

- V_{agua} : volumen de agua dentro de la tubería.
- $V_{\text{pistón}}$: volumen del pistón.
- $V_{\text{tubería}}$: volumen de la tubería.
- V_{cuerda} : volumen de la cuerda dentro de la tubería.

Por tanto, como la densidad del agua es 1000kg/m^3 :

$$m_{H_2O} = 2,34\text{kg}$$

$$F = 2,34[\text{kg}] * 9,82 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] + 7,6[\text{N}] = 30,6\text{N} \quad [6.29]$$

$$\mathbf{F = 30,6 N}$$

- Se calcula el par en la rueda:

$$M = F * R \quad [6.30]$$

Siendo:

M: par que se ejerce en la rueda.

F: fuerza que ejerce la cuerda.

R: radio de la rueda.

$$M = 30,6[\text{N}] * 0,198[\text{m}]$$

$$\mathbf{M = 6,05 Nm}$$

- Cálculo de la potencia.

Para hallar la potencia se necesita la velocidad de giro, experimentalmente en puntos anteriores se ha hallado la frecuencia natural $\tau_{\text{natural}}=0,8$ Hz, por tanto, la velocidad de giro es:

$$\omega = 2 * \pi * \tau_N = \frac{5,02rad}{s}$$

Donde:

- ω : velocidad de giro de la rueda.
- τ_N : frecuencia natural.

$$P = M * \omega = 30,40vattios \quad [6.31]$$

Donde:

- P: potencia.

$$P = 30,4vattios$$

En la tabla 6.3 se representan los datos teóricos de potencia desarrollable.

	Parte del cuerpo empleada	Potencia desarrollable (w)
Hombre	Piernas: pedaleo	100
	Brazos: manivela, palanca	70
Mujer	Piernas: pedaleo	75
	Brazos: manivela, palanca	50
Niña/niño	Piernas: pedaleo	65
	Brazos: manivela, palanca	40

**Tabla 6.3: potencia desarrollable.*

Se puede observar como la bomba de mecate construida puede ser usada por cualquier persona, incluso niños. Aunque hay que tener en cuenta que la altura de bombeo no es muy alta, cuando ésta aumente, también aumentará la potencia.

7. NOMENCLATURA:

ABREVIATURA	CONCEPTO
μ_{c-b}	Coeficiente de rozamiento entre la cuerda y la botella.
μ_{p-t}	Coeficiente de rozamiento entre el pistón y la tubería.
A_T	Área transversal del tubo de subida.
d_e	Diámetro exterior del tubo de subida.
d_i	Diámetro interior del tubo de subida.
F	Fuerza que ejerce la cuerda.
F_R	Suma de las fuerzas de rozamiento del sistema.
g	Aceleración de la gravedad.
H_B	Altura de bombeo.
$H_{Bmáx}$	Altura de bombeo máxima.
H_D	Nivel del depósito.
H_E	Nivel de agua en el depósito útil.
H_{FA}	Altura del frente de agua.
H_i	Altura del frente de agua en el apartado de pérdidas.
H_p	Distancia entre pistones (1 metro)
L	Longitud del tubo de subida (4,2 metros)
M	Masa de agua en el volumen de control.
m_{caja}	Masa de la caja guía (5,9kg)
m_{cb}	Masa de la cuerda que baja.
m_{cs}	Masa de la cuerda que sube.

m_{H_2O}	Masa de agua en la tubería.
m_i	Gasto másico de pérdidas.
m_{pb}	Masa de los pistones que bajan.
m_{ps}	Masa de los pistones que suben.
N_{c-b}	Fuerza normal entre la cuerda y la botella.
N_{p-t}	Fuerza normal entre el pistón y la tubería.
P	Potencia.
Q	Caudal de extracción.
Q_P	Caudal de pérdidas.
Q_{P1}	Caudal de pérdidas.
t	Tiempo de bombeo.
t_p	Tiempo en el que H_{FA} tarda en valer cero.
V_{P1}	Velocidad de pérdidas dentro de la tubería.
V_{P2}	Velocidad de pérdidas en el hueco entre pistones-tubería.
$V_{pistón}$	Volumen del pistón.
V_S	Velocidad de subida de los pistones.
$V_{tubería}$	Volumen de la tubería.
Y	Altura del pistón respecto del suelo de la instalación.
τ	Frecuencia de giro de la rueda.
τ_N	Frecuencia natural de giro de la rueda.
ω	Velocidad de giro de la rueda.
Φ	Factor de corrección.
A_C	Área de la cuerda.

8. CONCLUSIONES.

. Se ha conseguido, en primer lugar, construir la instalación como se había planteado en un principio y, finalmente, se han determinado los parámetros más importantes de funcionamiento para variarlos y mejorarlos en proyectos siguientes.

A pesar de ser este proyecto un estudio previo se ha conseguido establecer con bastante precisión los parámetros de su caracterización, sin disponer de aparatos de medida adecuados ni precisos.

Como trabajos futuros, en primer lugar, habría que instalar procesos de control y medidas para obtener una caracterización más exacta.

Con respecto a las medidas tomadas se pueden establecer varias alternativas de proyectos posteriores;

- habría que estudiar alternativas de pistones y de tubo de subida (disminuir caudal de pérdidas)
- se podría estudiar otro método de accionamiento (por ejemplo, pedal)...
- ampliar conducto de bajada.
- Etc.

9. BIBLIOGRAFÍA.

ALERTS, H., *Community rope pumps in Nicaragua; a private sector approach*, International Institute for Sustainable Development, Winipeg, 2000.

KARL, E.; RANDRIANASOLO, A., *Madagascar Rope Pump Specification*. SKAT, Swiss Centre for Development Cooperation in Technology and Management, 2004.

BAUMANN, E., *Water lifting*, SKAT, Swiss Centre for Development Cooperation in Technology and Management, 2000.

BAUMANN; KEEN, *Afridev Handpump Specification, Revision 2*, Swiss Centre for Development Cooperation in Technology and Management (SKAT). St.Gallen, 1994.

DUNCAN, C. *Afridev Shallow Water Well Handpump Cylinder Liner Damage*, C&M Engineering, Alberta, 1996.

ELSON R.J.; SHAW R.J., No. 35: "Low-lift irrigation pumps", *Technical Brief n° 35*, 1993.

ARROLLO FERNÁNDEZ-RAÑADA, J. RUIZ,RIVAS, U. (2006), *PFC: Diseño de un banco de ensayos de bombas manuales*, Universidad Carlos III, Madrid, 2006.

JOURNEY; WILLIAM, K., *A Hand Pump for Rural Areas of Developing Countries* The World Bank, Washington, D.C., 1978.

MARTIN-LOECHES, M. *Tecnologías apropiadas de captación y elevación de agua en contextos de desarrollo*, Departamento de geología de la universidad de Alcalá, Alcalá, 2005.

NAMPUSOUR, R. *Report on The Performance of Afridev and Nira Handpumps on the Upper regions Community Water Project (COWAP)*, Ghana Report for the GWSC/CIDA Upper regions, Ghana, 2000.

ROPE PUMPS CO. TECHNOLOGY TRANSFER DIVISION *Extra-Strong Rope Pump Manual of Technical Drawings*. (1997).

ROPE PUMPS CO. TECHNOLOGY TRANSFER DIVISION *Photographic Presentation of the Rope Pump Production Process..* (1997).

TOMILLO GUTIERREZ, U.; RUIZ RIVAS, U. *PFC: Estudio acerca del empleo de la bomba manual de agua en el ámbito rural en países en vías de desarrollo*, Universidad Carlos III, Madrid, 2005.

10. LISTADO DE LAS ORGANIZACIONES INTERNACIONALES RELACIONADAS.

Bombas de mecate

<http://www.ropepumps.org/>

ISF Ingeniería sin fronteras

<http://www.ingenieriasinfronteras.org/home/index.php>

SKAT Swiss resource centre and consultancies for development

<http://www.skat.ch/>

The rope pump

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

11. ANEXOS.

Los planos se adjuntan en formato electrónico, aquí se muestran dos ejemplos en miniatura. Solo se han realizado los planos de las partes más críticas cuya dificultad de construcción es complicada. También se adjunta en formato electrónico parte de la bibliografía.

