

Nelson Jara<sup>1</sup>, Felipe Saquicela<sup>2</sup>, Iván Velepucha<sup>2</sup>

## 1. Introducción

De acuerdo a los resultados obtenidos en el Plan de Desarrollo Provincial, en coordinación del Consejo Provincial del Azuay se manejan estadísticas en cuanto a la calidad de terrenos cultivables que se poseen en la provincia del Azuay, de esto se puede indicar que el 60% de terrenos cultivables tienen una pendiente no menor al 40 %, haciendo que las actividades productivas sean cada vez más difíciles y costosas, ya que los sistemas de bombeo de agua convencionales (moto-bomba eléctrica o MCI-bomba) poseen un alto costo de funcionamiento (costo de combustibles o electricidad), llegando a encarecer el producto y elevando los costos de producción; todo esto lleva a los campesinos a desistir el hacer producir sus tierras y los empuja a tomar decisiones como la migración.

El presente trabajo muestra una alternativa para el bombeo mediante energías renovables; es menester que en el sitio a emplazar se cuente con una vertiente o riachuelo del que se pueda obtener la energía suficiente para hacer girar una rueda hidráulica, el reto que se plantea en este proyec-

---

1 Director del proyecto de investigación, Coordinador de extensión universitaria y pasantías, Facultad de Ingenierías, Univesidad Politécnica Salesiana.

2 Egresados de la Carrera de Ingeniería Mecánica de la Univesidad Politécnica Salesiana.

to es llevar agua a un desnivel total de 120 metros en una distancia lineal de pendiente de 740 metros.

Las Sistemas de Bombeo propuestos trabajarán mediante la energía (Torque, Potencia) que entregue una rueda hidráulica movida por la fuerza del desplazamiento de agua, logrando así un funcionamiento de manera automática y constante sin consumir combustibles o electricidad; estos sistemas son de bajo costo en comparación con moto-bombas a diesel o eléctricas, de fácil instalación (puede ser instalada por su propio dueño) y de mínima manutención (con un costo anual menor al 5% del costo del equipo).

Sin embargo, es importante mencionar que para lograr que los sistemas de bombeo de agua con energía renovable sean una solución viable y sustentable en aplicaciones de poblaciones remotas, la intervención de la tecnología debe estar acompañada de una estructura institucional adecuada y manejable. Entre los cuales cabe destacar algunos puntos como: el apoyo local de la comunidad y su capacitación es crucial y las responsabilidades y propiedad de los sistemas deben establecerse tempranamente ya que la supervivencia a largo plazo del sistema se basa en su mantenimiento.

Además, es importante indicar que para todos los proyectos con energía renovable es necesaria una planeación a largo plazo, y las organizaciones ejecutoras de proyectos deben luchar para trabajar con la industria para realizar instalaciones, fortaleciendo así a la industria local, a la vez, que se desarrolla una infraestructura para el mantenimiento de los sistemas.

Para evitar abandonos, los sistemas de bombeo de agua con energía renovable deben ser de un tamaño realista y deben contar con controles institucionales adecuados desde su concepción. Sólo así los sistemas de bombeo de agua con energía renovable podrán dar un servicio confiable y duradero.

Se considera que al tener el respaldo de la Universidad Politécnica Salesiana este proyecto tendrá su incidencia directa en los usuarios; al momento se tiene planificado el emplazamiento en Yumacay–Paute, Campus Juan Lunardi; la intención será en primera instancia probar los equipos para riego, verificar su eficiencia y luego presentar a las comunidades de la cuenca del río Paute como una alternativa de riego fiable y económica.

## 2. Materiales y métodos

### 2.1. Análisis del sitio Yumacay, Paute

Al realizar los análisis *in situ* se determinó que el sitio idóneo para la implementación de un sistema de bombeo mediante rueda hidráulica fue Yumacay, en los predios de la Universidad Politécnica Salesiana, Campus Juan Lunardi de Paute, debido a que cumple los requisitos fundamentales como poseer un río o vertiente en donde se pueda contar con un caudal de agua constante durante todo el año, tanto para mover la turbina como para el riego de la región, además la zona debe presentar desniveles de hasta 10 m para ser aprovechados como salto hidráulico (distancia desde donde se captará el agua hasta donde se ubicará el equipo de bombeo) y los terrenos para el cultivo deben tener una pendiente no menor a 40° y estar ubicados en sitios con desniveles de hasta 120 m desde la captación del agua.

Específicamente, Yumacay dispone de terrenos para ser cultivados con desniveles de entre 50 y 150 m sobre el nivel del depósito de captación de agua de aproximadamente 40.000 m<sup>3</sup> que ya está implementado en dicha zona, este depósito está alimentado por una vertiente de agua; sumado a esto y por la orografía del sitio, se cuenta con el suficiente salto hidráulico para hacer funcionar la rueda, tal como muestran las Figuras 1a y 1b.



Figura 1. a) (izq.) Reservorio de agua en la zona baja de Yumacay  
b) (der.) Área de cultivo con pendiente de 40°.

Es importante indicar que en Yumacay, no se tiene establecido el tipo y área exacto de cultivo, por lo que se ha señalado únicamente la hipótesis de llegar con el fluido hasta el estanque de acumulación, de esta forma se pueden validar caudales entregados por la bomba de un rango entre 0,1 l/s a 0,35 l/s.

## 2.2 Medición de alturas y longitudes para el emplazamiento

Para la medición de alturas del salto hidráulico y desnivel total con respecto a la posible ubicación de la turbobomba se utilizaron dos métodos, el primero es el de manguera de nivelación, que consiste en llenar de agua una manguera transparente de aproximadamente 10 m de longitud e ir controlando en el sitio el desnivel en función de medir la altura de la columna de agua con respecto al desnivel del piso, basado en el principio que “los vasos comunicantes”. El segundo método utilizado fue el de realizar mediciones con equipo GPS (*Global Position System*), mismo que recomienda se determine posiciones (hitos) que pasan a ser puntos referenciales de medición tanto de desnivel como de longitud de pendiente, en cuanto a las longitudes se realizó la medición directamente en el sitio, utilizando una cinta métrica.

Así, se logró determinar que en el sitio a emplazar hay 30,5 m de longitud en la pendiente y desde el reservorio se tiene 10 m de desnivel,

logrando de esta forma un salto hidráulico adecuado. En cuanto a la altura de bombeo existen 120 m de desnivel desde el sitio de ubicación del estanque de acumulación de agua para riego hasta el sitio de ubicación del sistema de bombeo mediante rueda hidráulica, además una vez determinando el camino a seguir de la tubería que comunica la bomba hasta el estanque de acumulación, se estableció que existen 766 m de longitud de pendiente o distancia de bombeo.

### 2.3 Medición de caudal en la vertiente

El valor de caudal exacto de la vertiente, y el aseguramiento de su presencia durante todo el año son los factores preponderantes en la implementación de un sistema de esta naturaleza. Es así que para la medición del caudal se procedió a instalar en la vertiente (aguas arriba del sitio seleccionado a ubicar la rueda) un vertedero triangular a  $90^\circ$  (recomendado por su gran precisión en caudales menores a 110 l/s) ver las Figuras 2a, y 2b.



Figura 2. a) (izq.) Vertiente (Yumacay) b) (der.) Vertedero metálico colocado en la vertiente

Una vez colocado el vertedero con escotadura triangular a  $90^\circ$ , se ha procedido a tomar mediciones de la altura desde el vértice hasta el nivel que presente el agua, valor que luego de aplicar una ecuación, determina la cantidad de litros por segundo que esta desplazándose por esa vertiente, ver figuras. 3a y 3b.

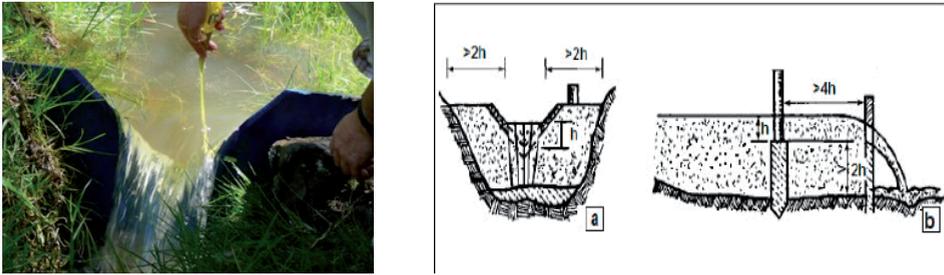


Figura 3. a) (izq.) Medición de la altura en el vertedero  
b) (der.) Sitio de ubicación de la estaca para medición

Así, se han obtenido diversos valores de caudal en las mediciones realizadas durante cada semana y mes del período mayo de 2007 hasta abril de 2008. Se puede notar en la información presentada en la figura 3, que el valor promedio de caudal presentado en el riachuelo en los distintos meses del periodo de medición cambia trascendentalmente en los meses de julio de 2007 y de febrero hasta abril de 2008, dándonos un valor promedio de 42,95 l/s siendo este valor el que se hubiese tomado para el diseño hidráulico de la rueda; sin embargo, con la intención de asegurar el caudal de alimentación para este proyecto de bombeo se obviaron los meses antes citados ya que los valores altos de caudal se debieron al temporal presentado en aquellas fechas y por lo tanto se convertían en datos atípicos; así el valor que se tomó como parámetro de diseño fue un caudal promedio de 26,4 l/s, que al redondearlo queda en 25 l/s.

## 2.4 Planificación del sistema de bombeo hidráulico

Se establecen los componentes que forman parte del sistema de bombeo por rueda hidráulica: Depósito (Embalse que se cuenta en la zona de Yumacay), Tubería de carga, Rueda hidráulica, Bomba de pistón de doble efecto, salida al canal (retorno del agua a la vertiente), Tubería de alimentación de agua, Estanque (depósito en la parte alta para almacenar el agua para riego), ver figura 4.

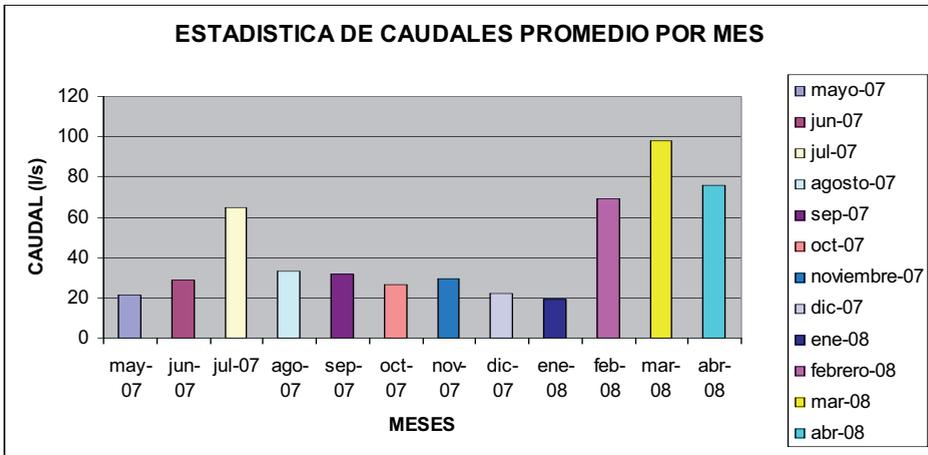


Figura 4. Estadísticas de caudal obtenidas en base a las mediciones semanales, se eliminaron los datos de los meses de julio 2007 y de febrero hasta abril 2008 por deberse a condiciones atípicas.



Figura 4. Esquema de sistema de bombeo por rueda hidráulica

El tipo de tubería a utilizar para la carga y elevación del agua, será de cloruro de polivinilo (PVC) enterrado a una profundidad mínima de 5 cm o protegido con algún recubrimiento, ya que no lleva ninguna barrera frente a la radiación solar.

## 2.5 Diseños hidráulicos y mecánicos de la rueda hidráulica

A partir de los valores obtenidos de caudal, salto hidráulico, desnivel total al elevar el agua, longitudes, tipos de tubería, materiales, etc., se procede a diseñar la rueda hidráulica, el pistón y el cálculo de diámetros de tuberías más accesorios. Los análisis realizados han tomado en cuenta teorías y conceptos hidráulicos y mecánicos, de esta manera se obtiene valores fundamentales como el diámetro exterior de la rueda, ancho, número de álabes, perfiles y curvaturas de álabes, sistemas de sujeción, ejes soporte, ubicación del chorro, dimensiones del pistón de doble efecto, sistema de accionamiento del pistón, etc.

### 2.5.1 *Diseño y construcción de 6 ruedas hidráulicas modelo calculadas basados en la teoría de la semejanza*

Una vez obtenida la información correspondiente del sistema, era menester probarlo antes de construir, por lo que se diseñaron seis ruedas a escala (aplicando la teoría de la semejanza), ver figura 5, en dos juegos de tres, cada juego presenta una variante de la curvatura y ángulos del perfil de álabes y el número de álabes, la intención es probar la teoría haciendo funcionar estas ruedas en un banco de pruebas, los parámetros que se requieren medir son el torque que genera la rueda y las revoluciones que alcanza con la acción de un chorro de agua.

La teoría de las turbomáquinas se basa en las relaciones entre chorros y álabes. La mecánica de transferencia de trabajo y energía de chorros y fluidos a álabes en movimiento se estudia como una aplicación de los principios de cantidad de movimiento. Cuando un chorro libre golpea un álabe liso que es curvo, el chorro se desvía, cambia su cantidad de movi-

miento y se ejerce una fuerza sobre el álabe. Se supone que el chorro fluye contra el álabe en dirección tangencial, sin choque y, más aun, se desprecia la resistencia de fricción entre el chorro y el álabe, se supone que la velocidad es uniforme en todo el chorro corriente arriba y corriente abajo del alabe, ya que éste está abierto al aire, mantiene la presión en cada extremo.



Figura. 5 Rueda Hidráulica Modelo (Diámetro 30 cm)

Según la teoría de los álabes, mientras mayor sea el ángulo de salida del chorro, mayor será la fuerza que impacta, no obstante si el ángulo de salida es  $180^\circ$  el chorro impactaría en el siguiente álabe. Así el ángulo de salida que está determinado en este sistema es  $150^\circ$  por que presenta facilidad en el desfogue del agua en la rueda. En la Tabla 3 se presentan valores de velocidades, diámetros, fuerza y fundamentalmente potencia y torque calculados en base a la variación de caudal de chorro incidente en la rueda hidráulica prototipo.

Tabla 4 Valores de velocidades, diámetros del chorro, Fuerza en el alabe, potencia y Torque generados en la Rueda hidráulica Prototipo.

Caudal	Altura neta	C1 velocidad de entrada en los álabes	u velocidad periférica rueda	n número de revoluciones de la rueda	diámetro del chorro	Fx fuerza tangencial	Potencia obtenida de la Rueda	Torque
(l/s)	Hn(m)	(m/s)	(m/s)	(rpm)	m	N	W	N*m
12,09	10,93	14,06	6,33	71,08	0,05	174,48	1103,88	148,30
14,20	10,91	14,05	6,32	71,00	0,05	204,62	1293,23	173,92
16,50	10,88	14,03	6,31	70,91	0,06	237,59	1499,69	201,95
19,03	10,85	14,00	6,30	70,80	0,06	273,44	1723,21	232,43
21,76	10,80	13,98	6,29	70,66	0,07	312,19	1963,52	265,37
24,73	10,75	13,94	6,27	70,49	0,07	353,85	2220,17	300,77

### 2.5.2 Diseño de un banco de pruebas

Para ensayar con estas ruedas se diseñó además un banco de pruebas a fin de asegurar el funcionamiento del prototipo. Para simular el chorro de agua con la energía suficiente provocada por el salto hidráulico se ha utilizado una bomba centrífuga con un rango de caudales de 25 a 50 l/min y un rango de presiones de 80 a 200 psi, ésta hace girar a la rueda permitiendo realizar la medición de las revoluciones mediante un tacómetro, el valor de la presión es registrada en el manómetro de agua con capacidad de 0 a 200 psi y la determinación del torque se determina mediante un freno, (ver figuras 6a y 6b.) ya que se obtiene la fuerza con la que dicha rueda se detiene durante el trabajo. La bomba centrífuga se acciona con un motor trifásico de 2 hp generando 1740 rpm.

Las tablas de resultados presentadas a continuación constan de los siguientes ítems.



Figura. 6 a) (izq.) Banco de pruebas de ruedas hidráulicas  
b) Rueda hidráulica y su dispositivo de frenado

*Código Rueda:* Se utilizaron códigos para las ruedas que constan de dos partes, el primer término se refiere al tipo de rueda con cierta forma de álabes, es decir, las de codificación de 1, 2 y 3, son de ángulo de salida del chorro de 150°, mientras las de codificación 4, 5 y 6, tienen el ángulo de salida de 135°. El segundo término en todas las ruedas hace referencia al número de álabes de cada rueda, así por ejemplo la rueda de codificación “1 – 20” es de 150° de ángulo de salida de chorro y de 20 álabes.

Mientras que una de codificación “4 – 22” es de 135° de ángulo de salida del chorro y 22 álabes.

*Angulo salida chorro:* Nomenclatura utilizada para indicar el ángulo de salida del chorro de agua del álabe. (grados).

*RPM Motor:* Indica el número de revoluciones por minuto que estuvo trabajando el motor de la bomba en el momento de las pruebas.

*RPM Rueda:* Indica el número de revoluciones por minuto que giró el eje del banco de pruebas al momento de su funcionamiento, este fue medido mediante un tacómetro digital, el error de medición del aparato es de 5 rpm.

*Diámetro inyector:* Indica el diámetro del inyector o salida del chorro antes del impacto con los álabes, aquí se construyeron dos inyectores, uno de 4 mm y otro de “\_” o su equivalente de 6,35mm. Se realizaron distintas pruebas a distintas presiones con cada uno de estos dos tipos.

*Caudal Total:* Hace referencia al caudal de salida de cada inyector, ya que al variar las presiones en las pruebas este es cambiante en cada estado.

*Fuerza Romana:* Fuerza F determinada accionando el resorte de medición (Balanza Romana) hasta que el sistema se detenga por completo.

*Fuerza en B:* Valor de la fuerza en el punto de la balanza romana y determinado mediante una ecuación.

*Torque Real:* Magnitud encontrada mediante la multiplicación de la fuerza en B por el radio del tambor, con la que posteriormente determinaremos la potencia del sistema con cada rueda.

*Potencia:* Resultado de aplicar (Ec.1), siendo esta la Potencia Teórica generada en el sistema.

$$P = T (2\pi n) / 60 \quad (\text{vatios}) \quad (1.1)$$

A continuación se presenta en la Tabla 1, los resultados obtenidos de la rueda modelo 1-20 en las pruebas realizadas en el banco con sus correspondientes variaciones en la presión

Tabla 1. Valores reales obtenidos en una rueda de 300mm de diámetro, con diámetro de inyector de 6,35 mm y ángulo de salida del chorro de 150°.

PRESIÓN [PSI]	50	45	40	35	30	25	20	15	10
Código Rueda	1 - 20	1 - 20	1 - 20	1 - 20	1 - 20	1 - 20	1 - 20	1 - 20	1 - 20
Ángulo salida chorro	150°	150	150°	150°	150°	150°	150°	150°	150°
RPM Motor:	3534	3534	3534	3534	3534	3534	3534	3534	3534
RPM Rueda:	445	392	339	286	233	180	127	74	21
Dim. Inyector [mm]:	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35	6,35
Caudal Total [/s]:	0,27636	0,24642	0,23284	0,21122	0,1998	0,17394	0,16071	0,13027	0,12321
Fuerza Romana [Kg]:	1	0,875	0,75	0,625	0,5	0,375	0,25		
FUERZA EN B [FB]	8,44505	7,73709	7,02914	6,32118	5,61323	4,90528	4,19732		
TORQUE REAL	0,55737	0,51065	0,46392	0,4172	0,37047	0,32375	0,27702		
POTENCIA [W]	25,9738	20,9622	16,4693	12,495	9,03944	6,10251	3,68424		

Los valores de Fuerza Romana en 10 y 15 PSI de presión no pudieron ser determinados en la prueba, ya que no se podía censar la fuerza de esta en la balanza, debido a que al actuar el peso del brazo del sistema de freno sobre el tambor, este se detenía, es decir la fuerza del chorro actuante sobre los álabes no producía un torque suficiente como para ser censado.

A continuación se presenta en la Tabla 2 los valores generados mediante el cálculo teórico o ideal, en la cual, en la última fila consta la eficiencia del banco de pruebas en base a lo real sobre lo teórico, teniendo en cuenta la eficiencia máxima del sistema.

Tabla 2. Valores ideales obtenidos por el cálculo en una rueda de 300mm de diámetro, con diámetro de inyector de 4 mm y ángulo de salida del chorro de 150°.

Presión	50PSI	45PSI	40PSI	35PSI	30PSI	25PSI	20PSI	15PSI	10PSI
H = mca	35,16	31,65	28,13	24,61	21,10	17,58	14,07	10,55	7,03
C1	23,62	22,40	21,12	19,76	18,29	16,70	14,94	12,93	10,56
U	10,63	10,08	9,50	8,89	8,23	7,51	6,72	5,82	4,75
n[rpm]	676,53	641,81	605,11	566,02	524,04	478,38	427,87	370,55	302,55
FUERZA DE LA RUEDA [N]	5,23	4,69	3,96	3,51	2,97	2,37	1,84	1,35	0,91
POTENCIA GENERADA EN LA RUEDA [W]	55,59	47,27	37,61	31,18	24,44	17,79	12,38	7,88	4,31
TORQUE FUERZA ROMANA EFICIENCIA	0,78	0,70	0,59	0,53	0,45	0,36	0,28	0,20	0,14
	1,62	1,40	1,11	0,92	0,71	0,46	0,25	0,05	-0,13
	0,97	0,86	0,90	0,76	0,78	0,75	0,67		

### 3. Resultados

Se construye una rueda hidráulica con paredes circulares de diámetro 1,7 m construida en plancha de acero de 3 mm, de espesor; que posea 24 álabes curvados con un radio de 17 cm (ver figura 10), y con los elementos necesarios para la sujeción y la suspensión a una altura del suelo de 20 cm, girará a 70 revoluciones por minuto, cuando se dispare un chorro de agua conducida por una tubería de polietileno PE de 4 pulgadas de diámetro, desde el embalse hasta la rueda, este giro poseerá la suficiente energía proveniente tanto de la incidencia del chorro de agua como de la inercia de la masa de la rueda, llegando a presentar valores de potencia de hasta 2220 W y un torque de hasta 300,77 Newton x metro; suficiente para hacer funcionar un pistón de doble efecto de un diámetro de 50 mm, y una longitud de carrera de 135 mm, mismo que tomará 0,26 litros de volumen para ser empujado cada vez que gire una vuelta la rueda hidráulica. Con lo que el objetivo de este prototipo queda cumplido.



Fig. 10 Rueda Hidráulica Prototipo de un diámetros de 1,7 m.

Por otra parte, hemos de tomar en cuenta que el costo inicial de estos sistemas está por el orden de los 6 mil dólares (considerando costo de equipos y materiales para montaje y puesta a punto en el sitio), y el costo de mantenimiento de los equipos es relativamente bajo, por lo tanto si existiera la posibilidad de organizar a ciertos grupos de personas que puedan beneficiarse almacenando agua para riego para sus cultivos, en desniveles de hasta 120 metros desde la toma de agua, se podría financiar dichos costos iniciales y el beneficio sería alto ya que no requiere de inversión adicional en energía para su funcionamiento.

#### **4. Discusión**

Las tecnologías de energía renovable, como el caso de los sistemas de bombeo mediante rueda hidráulica, construidos a pequeña escala presentan una alternativa económica y ambiental factible para la provisión de agua para riego a comunidades rurales remotas que no posean la capacidad eléctrica instalada.

Al analizar cada uno de los elementos que se requieren para el buen funcionamiento de este tipo de sistema de bombeo, se concluye que es factible el bombeo de agua en desniveles de hasta 120 metros con una alimentación de caudal de hasta 0,4 l/s; sin embargo, el limitante seguirá siendo la captación de agua con caídas de entre 5 y 10 m, y un caudal constante

que oscile entre 15 a 25 [l/s] como un rango mínimo para el funcionamiento

## 5. Recomendaciones

Este tipo de proyectos requieren de continuidad, es decir no se puede afirmar que está concluido el proyecto de investigación por cuanto existen muchas más actividades como construir un sistema desarenador y la instalación de tubería de carga (salto hidráulico = 10 metros), en el Campus Juan Lunardi sector Yumacay, para la toma de agua del depósito natural de acumulación de agua que se posee en el sitio, además es importante construir una plataforma de hormigón, con depósito (toma de agua para la succión) y canal de retorno al riachuelo; para el anclaje de las base que sujetarán a la rueda hidráulica. La instalación de la tubería de polietileno de diámetro 1/2 de pulgada, para la descarga de agua para riego sería de gran ayuda en la zona, y por último la construcción de un depósito de acumulación de agua en el nivel 120 metros, ubicado en las faldas de la montaña, mismo que servirá para el almacenamiento de agua para el riego.

## Bibliografía

NORTON, Robert L.

1999 *Diseño de Máquinas*, Edit. Prentice Hall, Primera Edición, México, 1080 p.

ERDMAN, Arthur G., Sandor, George N.

1998 *Diseño de Mecanismos*, Edit. Prentice Hall, Tercera Edición, México, 664 p.

SHIGLEY, Joseph E., Mischke Charles R.

2002 *Diseño en Ingeniería Mecánica*, Editorial McGraw-Hill, Sexta Edición, 1258 p.

BEER, Ferdinand P., Johnston, E. Russell

2000 *Mecánica de Materiales*, Edit. McGraw-Hill, Tercera Edición.

1998 Catálogo de Rodamientos de Bolas y de Rodillos NTN.

AGUERA, Soriano José

2003 *Mecánica de Fluidos Incompresibles y Turbomáquinas Hidráulicas*, Quinta Edición, 705 pg.

STREETER, Victor L.

2000 *Mecánica de Fluidos*, Edit. McGraw-Hill, Novena Edición, 752 p.

HERNÁNDEZ, Roberto

1996 *Metodología de la Investigación*, Edit. Mc.Graw-Hill, México.

MERINO de Diego, Amparo

2007 *La Gestión del Agua de Riego*, Edit. Días de Santos, 319 p.

**Páginas de internet**

1. <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/centroa22/Ponencia10.pdf>
2. [http://www.gea.usm.cl/archivos/inv\\_bombeosinconstosGEA.pdf](http://www.gea.usm.cl/archivos/inv_bombeosinconstosGEA.pdf)
3. [www.energias-renovables.com](http://www.energias-renovables.com)
4. <http://www.angelfire.com/emo/tomaustin/Met/metinacap.htm>
5. <http://www.presidencia.gov.ec/modulos.asp?id=14>
6. <http://www.cenace.org.ec/>
7. <http://www.mer.gov.ec/pagina/ministerio.h>