

VIABILIDAD TÉCNICA-ECONÓMICA DE IMPLEMENTAR UNA BOMBA COMO
PICO TURBINA PARA SUMINISTRAR ENERGÍA ELÉCTRICA A UNA ESCUELA
RURAL

JUAN CAMILO QUINTERO RAMÍREZ
ALEJANDRO VILLAMIZAR LLANO

UNIVERSIDAD EAFIT
ESCUELA DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
MEDELLÍN
2011

VIABILIDAD TÉCNICA-ECONÓMICA DE IMPLEMENTAR UNA BOMBA COMO
PICO TURBINA PARA SUMINISTRAR ENERGÍA ELÉCTRICA A UNA ESCUELA
RURAL

Juan Camilo Quintero Ramírez
Alejandro Villamizar Llano

Proyecto de grado para optar al título de
Ingeniero Mecánico

Asesora:
Carolina Mira Hernández
Ingeniero Mecánico
Ingeniero Físico

ESCUELA DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
UNIVERSIDAD EAFIT
MEDELLÍN
2011

AGRADECIMIENTOS

La culminación de este trabajo de grado significa estar más cerca de enfrentarnos a la vida real donde aplicaremos nuestros conocimientos en problemas cotidianos. Este es el momento para agradecer a todas las personas que nos colaboraron en el proceso de formarnos como ingenieros mecánicos.

Le queremos agradecer especialmente a la asesora Carolina Mira Hernández por su apoyo incondicional para llevar a cabo este proyecto y todas sus enseñanzas en las diferentes materias que nos dictó y sus explicaciones sobre diferentes temas de ingeniería.

Le agradecemos al personal del laboratorio de hidráulica, especialmente a Jesús Alberto Pérez y Milton Cesar Marín Marín.

CONTENIDO

	pág
CONTENIDO	4
LISTA DE FIGURAS	8
LISTA DE TABLAS	10
INTRODUCCIÓN	12
1 ASPECTOS GENERALES	14
1.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	14
1.2 OBJETIVOS	14
1.2.1 Objetivo general	14
1.2.2 Objetivos específicos	14
1.3 JUSTIFICACIÓN	15
2 ESTADO DEL ARTE	16
2.1 APROVECHAMIENTO HIDROENERGÉTICO A PEQUEÑA ESCALA	16
2.2 BOMBAS CENTRÍFUGAS	17
2.2.1 Curvas Características	18
2.3 MOTOR ASÍNCRONO	19
2.4 BOMBAS COMO TURBINAS	20
2.5 MOTOR COMO GENERADOR	23
2.6 ANTECEDENTES LOCALES E INTERNACIONALES	25
2.6.1 Investigación en India	25
2.6.2 Investigación en México	26
2.6.3 Investigación en Argentina	27

2.6.4	Aplicación práctica en Tailandia	28
2.6.5	Aplicación práctica en Perú	29
2.6.6	Investigaciones en Colombia	30
3	DETERMINACIÓN DE LA POTENCIA HIDRÁULICA	32
3.1	PROCEDIMIENTO AFORO QUEBRADA LA GUAYABERA	32
3.2	SELECCIÓN DEL LUGAR DE MEDICIÓN	33
3.3	ADECUACIÓN DEL SITIO DE MEDICIÓN	34
3.4	PROCESO TOMA DE DATOS	35
3.5	DATOS DE CAMPO	36
3.6	CÁLCULO DEL CAUDAL	38
3.6.1	Perfiles de flujo	39
4	DEFINICIÓN DE LOS REQUERIMIENTOS DE ENERGÍA DEL CENTRO EDUCATIVO RURAL BUGA	44
4.1	DESCRIPCIÓN DETALLADA	45
5	SELECCIÓN DE LAS MÁQUINAS REVERSIBLES	48
5.1	SELECCIÓN DE LA BOMBA CENTRÍFUGA PARA TRABAJAR COMO TURBINA	48
5.1.1	Selección a partir de las características hidráulicas en el modo bomba	48
5.1.2	Selección final de la bomba como turbina	53
5.2	SELECCIÓN DEL MOTOR ASÍNCRONO PARA TRABAJAR COMO GENERADOR	54
5.2.1	Cálculo de la capacitancia	55
6	MONTAJE DE LABORATORIO PARA LAS PRUEBAS DE DESEMPEÑO DE LA BOMBA TURBINA	58
6.1	MONTAJE DE TUBERÍAS	58

6.2	MÁQUINAS REVERSIBLES UTILIZADAS	60
6.2.1	Bomba centrífuga	61
6.2.2	Motor asincrónico	62
6.3	CONFIGURACIÓN ELÉCTRICA PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA	62
6.3.1	Protección y Control del sistema	62
6.3.2	Circuito de capacitores y carga	63
6.4	INSTRUMENTACIÓN UTILIZADA EN LAS PRUEBAS	66
6.4.1	Medición del Caudal	66
6.4.2	Presión	67
6.4.3	Adquisición de las señales de presión	68
6.4.4	Temperatura	71
6.4.5	Revoluciones	71
6.4.6	Frecuencia y voltaje	72
6.4.7	Corriente	72
7	PRUEBAS DE LABORATORIO PARA EL SISTEMA DE PICOGENERACIÓN HIDROELÉCTRICA CON MÁQUINAS REVERSIBLES	74
7.1	DESCRIPCIÓN DEL PROCESO	74
7.2	PROCEDIMIENTO	75
7.3	RESULTADOS DE LAS PRUEBAS	76
7.4	ANÁLISIS DE LAS PRUEBAS	77
8	ELEMENTOS COMPLEMENTARIOS PARA LA PICO GENERACIÓN	81
8.1	ESTRUCTURAS CIVILES	81
8.1.1	Bocatoma	81
8.1.2	Obra de conducción	85

8.1.3	Desarenador	85
8.1.4	Casa de máquinas	87
8.1.5	Tubería de conducción	89
8.1.6	Cable para el transporte de energía	92
8.2	OTROS	92
8.2.1	Banco de capacitores y resistencias para la carga	92
8.2.2	Sistema electrónico para el control de carga	93
9	EVALUACIÓN FINANCIERA DE LA IMPLEMENTACION DE EL PROYECTO	95
9.1	ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA OPCIÓN BOMBA–TURBINA	95
9.2	ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA OPCIÓN CON LA PLANTA DIESEL	97
9.3	ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA OPCIÓN DE LA RED ELÉCTRICA	98
	CONCLUSIONES	100
	RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS	103
	BIBLIOGRAFÍA	105

LISTA DE FIGURAS

	pág
Figura 1 Principales partes de una bomba centrífuga	18
Figura 2 Curva característica de una bomba centrífuga	19
Figura 3 Partes de un motor asíncrono	20
Figura 4 Curva de eficiencia de la bomba modo directo e inverso	22
Figura 5 Tipos de conexión del motor para la generación energía	24
Figura 6 Característica en vacío de autoexcitación	25
Figura 7 Configuración eléctrica para la generación	29
Figura 8 Fotografía cuarto de máquinas para pico central	30
Figura 9 Fotografías de la quebrada	33
Figura 10 Fotografía del punto de medición del caudal	34
Figura 11 Fotografías de la división de verticales para la quebrada	35
Figura 12 Molinete utilizado en las mediciones	36
Figura 13 Perfil de la quebrada	37
Figura 14 Perfiles de velocidad para cada vertical	40
Figura 15 Ejemplo del calculo de la subárea	41
Figura 16 Visión planta del cauce de la quebrada	42
Figura 17 Fotografías de la escuela rural Buga	44
Figura 18 Fotografías de la cocina de la escuela Buga	46
Figura 19 Proyección de la demanda de la escuela Buga	47
Figura 20 Curva característica bomba Hidromac	50
Figura 21 Curva característica de la bomba IHM	52
Figura 22 Esquema del montaje para las pruebas en el laboratorio	59
Figura 23 Bomba Gould Pumps	61
Figura 24 Curva característica de la bomba Gould Pumps	61
Figura 25 Bomba y motor del laboratorio de hidráulica	62
Figura 26 Esquema de protección y control del sistema	63

Figura 27 Conexión C-2C	63
Figura 28 Esquema conexión de los capacitores y la resistencia	65
Figura 29 Circuito para las pruebas del laboratorio	66
Figura 30 Contador de agua instalado para las pruebas en el laboratorio	67
Figura 31 Sensores de presión instalados en la bomba	68
Figura 32 Fotografía sistema de adquisición de datos para las pruebas de laboratorio	69
Figura 33 Programa en LabVIEW® para lectura de presiones	70
Figura 34 Interfaz del programa en LabVIEW	70
Figura 35 Termómetro infrarrojo Fluke	71
Figura 36 Tacómetro digital Tecpel	71
Figura 37 Osciloscopio Fluke	72
Figura 38 Medidor de corriente digital Meterman	72
Figura 39 Gráfica Capacitancia Vs Eficiencia para diferentes caudales	77
Figura 40 Gráfica Caudal Vs Eficiencia para diferente capacitancia	78
Figura 41 Gráfica Capacitancia Vs Velocidad Rotativa y frecuencia	79
Figura 42 Capacitancia Vs Temperatura del motor para diferentes caudales	79
Figura 43 Fotografía térmica del motor	80
Figura 44 Fotografías de bocatomas sugeridas	81
Figura 45 Vista frontal de la bocatoma	84
Figura 46 Vista lateral de la sección de la bocatoma	84
Figura 47 Modelo CAD de la bocatoma	84
Figura 48 Vista frontal del desarenador	86
Figura 49 Vista de planta del desarenador	86
Figura 50 Modelo CAD del desarenador	87
Figura 51 Placa de sedimentación	88
Figura 52 Diagrama de Alturas	89

LISTA DE TABLAS

	pág
Tabla 1 Clasificación de los pequeños aprovechamientos hidroeléctricos	16
Tabla 2 Distribución porcentual de costos implementación de una PCHE	17
Tabla 3 Desempeño de una bomba centrífuga como turbina	27
Tabla 4 Datos obtenidos del aforo de la quebrada	37
Tabla 5 Velocidades para cada punto de medición	38
Tabla 6 Área total para cada perfil	41
Tabla 7 Valores de las áreas parciales	42
Tabla 8 Datos de consumo de la escuela Buga	45
Tabla 9 Potencia instalada en la escuela Buga	45
Tabla 10 Equipos a futuro para la escuela Buga	46
Tabla 11 Factor de simultaneidad para el número de circuitos	47
Tabla 12 Potencia necesaria con factor de simultaneidad	47
Tabla 13 Coeficientes para caudal, altura y eficiencia	49
Tabla 14 Información principal bomba Hidromac	50
Tabla 15 Coeficientes para bomba Hidromac	51
Tabla 16 Valores de caudal, altura y eficiencia bomba Hidromac en el modo turbina	51
Tabla 17 Información bomba IHM	52
Tabla 18 Coeficientes bomba IHM	52
Tabla 19 Valores de caudal, altura y eficiencia de la bomba IHM en el modo turbina	53
Tabla 20 Precios de la bomba Hidromac e IHM	53
Tabla 21 Precio del motor WEG	55
Tabla 22 Datos eléctrico del motor WEG	55
Tabla 23 Descripción de los elementos del montaje para las pruebas	60
Tabla 24 Datos obtenidos de las pruebas de laboratorio	76
Tabla 25 Precio de la construcción de la bocatoma	85

Tabla 26 Precio de construcción del desarenador	87
Tabla 27 Precio construcción de casa de máquinas	88
Tabla 28 Información para calcular la presión de entrada del sistema	89
Tabla 29 Precio tubería conducción	92
Tabla 30 Componentes básicos de un ELC	93
Tabla 31 Inversiones Bomba-Turbina	96
Tabla 32 Costos de operación Bomba-Turbina	96
Tabla 33 Flujo de caja Bomba-Turbina sin financiación	97
Tabla 34 Flujo de caja Bomba-Turbina con financiación.	97
Tabla 35 Flujo de caja planta Diesel	98
Tabla 36 Flujo de caja red eléctrica	98
Tabla 37 Valor presente de las opciones sin interconexión eléctrica	99

INTRODUCCIÓN

Kimberly –Clark y las Universidades de Purdue y EAFIT han decidido aunar esfuerzos para suministrar agua potable a la población aledaña a la planta de producción del Kimberly-Clark en Barbosa (Antioquia), la cual carece de este servicio. Por lo anterior, se ha creado un grupo multidisciplinario de estudiantes para realizar el diseño de detalle de un sistema que brinde una solución a esta problemática en tres veredas: Buga, Graciano y las Peñas.

El proyecto mencionado también busca la forma de favorecer al máximo a la comunidad, especialmente, a cada una de las escuelas rurales en dichas veredas, aprovechando el recurso hídrico y la infraestructura que tendría la planta de aguas a diseñar. Se ve la posibilidad de generar energía eléctrica utilizando la presión del acueducto, para abastecer alguna escuela con energía. Para la generación de energía se propone utilizar una bomba centrífuga como pico-turbina, una idea que se ha venido desarrollando en algunos países con riqueza hídrica, incluso en Colombia se han realizado estudios de esta aplicación.

Los equipos diseñados para pico generación, por lo general son importados y usualmente sus especificaciones, no se ajustan a las condiciones del lugar de aplicación; esto hace que sea una solución costosa. Por esta razón, una alternativa para la pico generación de energía en veredas y lugares lejanos, es la utilización de máquinas reversibles, bombas centrífugas como turbina y motores asíncronos como generadores. Las bombas centrífugas tienen una producción industrial seriada, lo que permite disponer de una gran gama de equipos para diferentes caudales y alturas, y esto facilita seleccionar los equipos que más se ajustan a cada proyecto. (R. Ortiz Flórez, 2008). El presente proyecto analiza la

viabilidad técnica y económica para determinar una futura aplicación de pico generación para una escuela veredal en Barbosa, Antioquia.

El presente documento se estructura por capítulos en los cuales se aborda secuencialmente los objetivos del proyecto. El primer capítulo incluye aspectos generales como las definiciones del problema, los objetivos y la justificación. El segundo capítulo recoge información relevante del estado del arte de las máquinas reversibles. Los capítulos tres y cuatro determinan las condiciones particulares de la aplicación del proyecto, como el caudal disponible y los requerimientos de energía de la escuela a beneficiar. En el capítulo quinto se selecciona las máquinas reversibles teniendo en cuenta los factores determinados en los capítulos anteriores. En los capítulos sexto y séptimo se describen el montaje, las pruebas realizadas y los resultados de las mismas en el laboratorio de hidráulica de la Universidad EAFIT, con una bomba y un motor disponibles en dicho laboratorio. En el octavo capítulo se mencionan los componentes adicionales requeridos para implementar el sistema de pico generación de energía eléctrica para la escuela beneficiada. En el capítulo 9 se hace una evaluación financiera de la implantación del proyecto para la escuela, también se tuvo en cuenta las opciones de utilizar una planta diesel y la red de interconexión eléctrica.

1 ASPECTOS GENERALES

1.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

El problema del presente proyecto es evaluar la posibilidad de utilizar una bomba centrífuga como pico-turbina y un motor asíncrono como generador, para generar energía eléctrica a una de las escuelas de las veredas aledañas a Kimberly – Clark. La evaluación a desarrollar pretende estimar si el proyecto es técnica y económicamente viable.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo general

Evaluar la viabilidad técnica-económica de implementar una bomba centrífuga como pico turbina y un motor asíncrono como generador, para suministrar energía eléctrica a una escuela rural, en el municipio de Barbosa.

1.2.2 Objetivos específicos

- Recopilar información técnica sobre máquinas reversibles.
- Determinar la potencia hidráulica de la cuenca más viable y definir los requerimientos de energía para la escuela aledaña a la cuenca.
- Seleccionar una bomba centrífuga que cumpla las especificaciones.
- Seleccionar un motor asíncrono y realizar las adaptaciones requeridas, para la generación de energía eléctrica.
- Establecer e implementar un plan de pruebas de laboratorio para evaluar el desempeño de la bomba como turbina y el motor asíncrono como generador.
- Definir el esquema para el montaje de pico-generación, seleccionando los componentes complementarios requeridos para su aplicación.

- Hacer una evaluación económica acerca de la implementación del proyecto en la escuela rural.
- Formular conclusiones pertinentes.

1.3 JUSTIFICACIÓN

El proyecto tiene un beneficio social, ya que podría generar energía eléctrica a bajo costo, para uso en una escuela rural. Esto reduce los costos básicos de sostenimiento y podría ayudar a mejorar la calidad en la educación, al poder invertir los recursos ahorrados, en otros aspectos importantes, como alimentación o recursos académicos. Un proyecto similar a este también puede ser útil en escuelas rurales en zonas no interconectadas (ZNI).

También busca determinar la viabilidad de usar energía limpia en pequeñas aplicaciones, con máquinas disponibles y económicas del mercado local, modificando algunos aspectos del uso para el cual fueron diseñadas (máquinas reversibles).

Para la realización del proyecto se cuenta con el apoyo y disponibilidad del laboratorio de hidráulica de la Universidad EAFIT. Para la ejecución de este proyecto se requieren principalmente un motor y una bomba centrífuga, las cuales están disponibles en el laboratorio.

2 ESTADO DEL ARTE

Las máquinas reversibles son aquellas máquinas que trabajan en forma inversa a su aplicación original. Por ejemplo, la función normal de una bomba es transformar la energía mecánica en hidráulica y al emplearla en forma inversa trabaja como turbina, transformando la energía hidráulica en energía mecánica. De igual manera, el motor asíncrono se utiliza normalmente para generar movimiento rotativo por medio de la energía eléctrica, cuando se pone a trabajar en sentido inverso convierte energía mecánica rotacional en energía eléctrica.

2.1 APROVECHAMIENTO HIDROENERGÉTICO A PEQUEÑA ESCALA

Los aprovechamientos hidroenergéticos a pequeña escala se utilizan para el suministro de energía eléctrica en zonas no interconectadas (ZNI) al sistema nacional de energía y que cuentan con los recursos hídricos mínimos para esta aplicación, que genera un bajo impacto ambiental. La clasificación de estas se puede observar en la Tabla 1. (Ortiz, 2011)

Tabla 1 Clasificación de los pequeños aprovechamientos hidroeléctricos

TIPO	POTENCIA [kW]	USUARIO
Picocentrales (PicoCHE)	0,5 a 5	Finca o similar
Microcentrales (MicroCHE)	5 a 50	Caserío
Minicentrales (MiniCHE)	50 a 500	Cabecera municipal
Pequeñas centrales (PCH)	500 a 10000	Municipio

(Ortiz, 2011)

Los equipos eléctricos y mecánicos convencionales para este tipo de aprovechamientos, turbinas y generadores sincrónicos, no tienen una gama amplia que se ajuste a los requerimientos de altura y caudal para diferentes

potencias, lo cual incrementa los costos de este tipo de instalación. A continuación, se muestra en la Tabla 2 de la distribución porcentual de los costos de construcción de una instalación para generar energía a pequeña escala. (Ortiz, 2011)

Tabla 2 Distribución porcentual de costos implementación de una PCHE

ITEM	PORCENTAJE DEL COSTO
Trabajos de montaje y construcción	30-35%
Equipo electromecánico	50-60%
Estudios y diseño	10-15%

(Ortiz, 2011)

El objetivo de un aprovechamiento hidroeléctrico es convertir la energía del agua para generar energía eléctrica, por medio de máquinas como generadores y turbinas. La potencia eléctrica que se obtiene en un aprovechamiento es proporcional al producto del caudal utilizado y la cabeza hidráulica. (Comisión Europea, 1998)

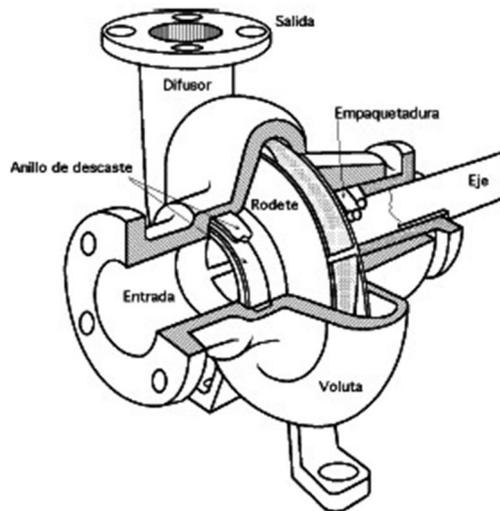
2.2 BOMBAS CENTRÍFUGAS

Las bombas centrífugas están diseñadas para transferir energía cinética a la corriente de un fluido, impulsándolo desde un estado a baja presión a otro de mayor presión.

La bomba centrífuga común consiste en un conducto de admisión o succión que lleva el fluido al centro de un impulsor, éste está formado por un rodete y álabes que dirigen al fluido hacia fuera del rotor en forma radial. Cuando el fluido es expulsado hacia afuera del rotor, éste es recogido por la carcasa de la bomba que hace las veces de difusor. El fluido, al pasar por el rodete, aumenta su velocidad y su presión, pero a la salida pierde velocidad y toda esta energía se transforma en

energía de presión (Universidad Católica de la Santísima Concepción). Las principales partes se observan en la Figura 1

Figura 1 Principales partes de una bomba centrífuga



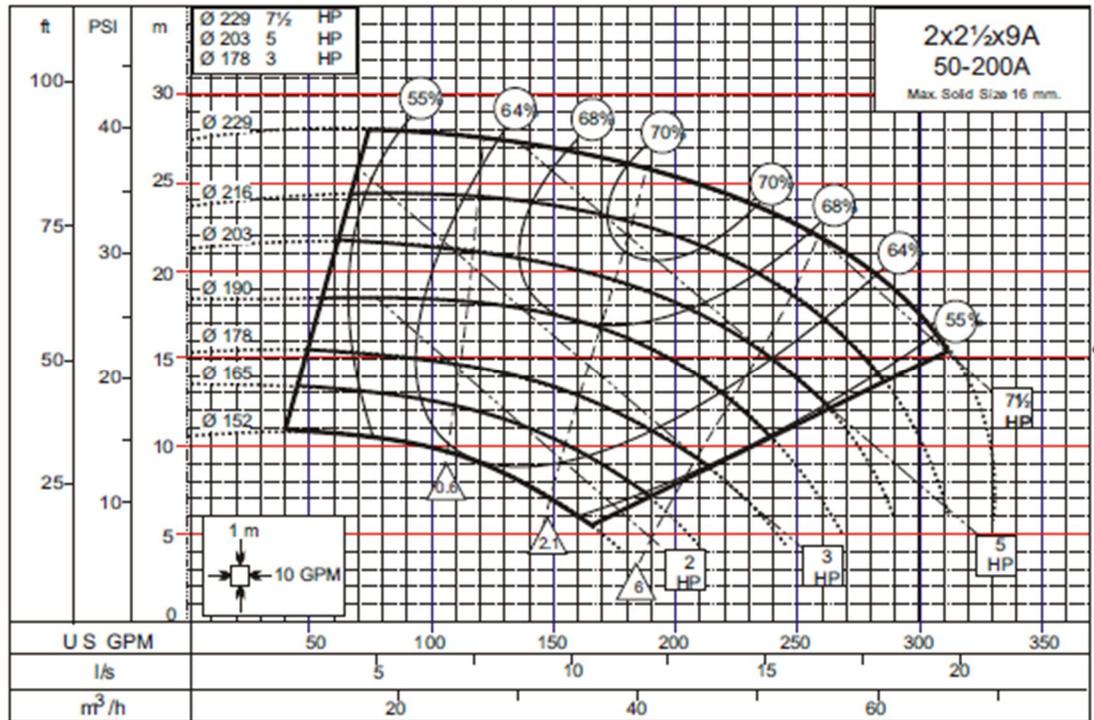
(QUIMINET)

Estas bombas son ampliamente utilizadas en la industria debido a su bajo costo, fácil mantenimiento, ya que es una máquina de sencilla construcción, además tiene una vida útil larga. (Bombas, 2008). Una bomba se puede especificar por medio del caudal (m^3/h o l/h), la presión suministrada o altura h , la altura de aspiración, la potencia consumida y la presión máxima que puede soportar.

2.2.1 Curvas Características

La curva característica de una bomba es una relación gráfica que relaciona caudal con carga, potencia y eficiencia. Son propias de cada bomba y se trazan para una determinada velocidad de giro. La variable independiente es el caudal y las otras son las dependientes. Para la mayoría de los casos las curvas son dadas por el fabricante. Estas curvas ayudan a seleccionar la bomba que más se ajusta a los requerimientos. El ejemplo de una curva característica se observa en la Figura 2.

Figura 2 Curva característica de una bomba centrífuga



(HIDROMAC)

2.3 MOTOR ASÍNCRONO

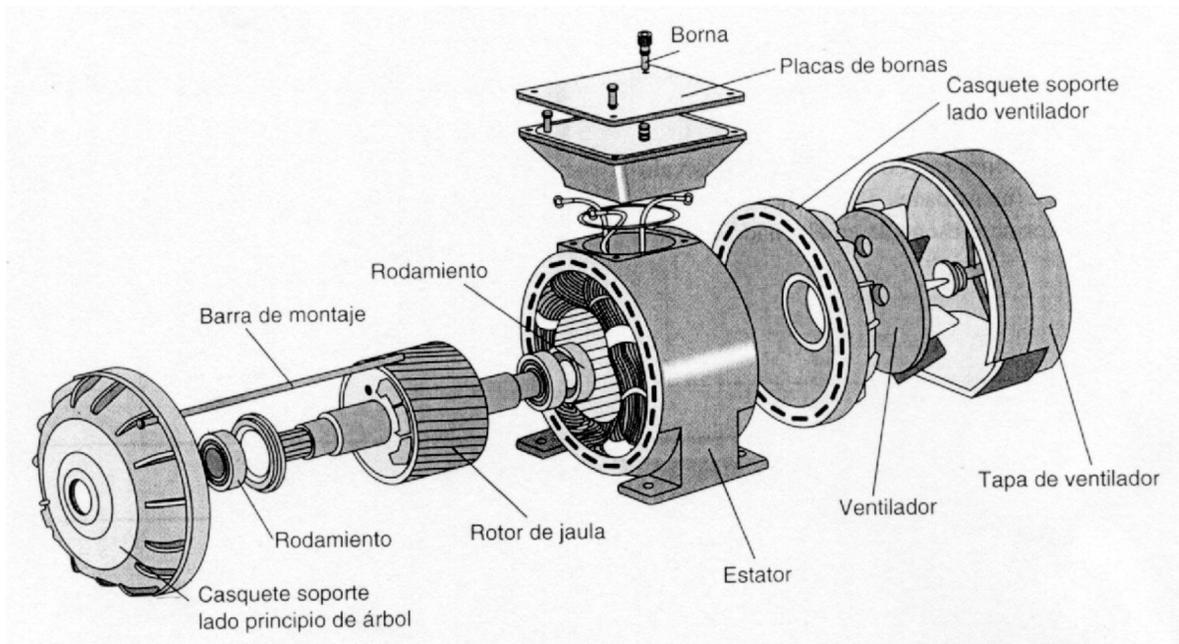
Los motores asíncronos o de inducción, son motores eléctricos de corriente alterna. Los motores son máquinas rotatorias los cuales transforman la energía eléctrica en energía mecánica rotacional. Estos motores tienen muchas ventajas tales como bajos costos, fácil mantenimiento, seguridad al funcionar y una vida útil prolongada. Los motores asíncronos son fabricados con una amplia variedad de potencias para adecuarse a la necesidad de cada usuario. (Ortiz, 2011)

El principio de funcionamiento de estos motores, consiste en aplicar una corriente eléctrica alterna, a las tres bobinas del estator que están desfasadas entre ellas, esto crea un campo magnético giratorio en el circuito magnético de la máquina. La circulación de corrientes se da por el cortocircuito que se crea en el estator,

esto origina un par, que trata de oponerse a la causa que lo produce, haciendo girar al rotor. (Universidad de Almería)

En la Figura 3, se representan las partes que principalmente constituyen un motor asíncrono.

Figura 3 Partes de un motor asíncrono



(Universidad de Almería)

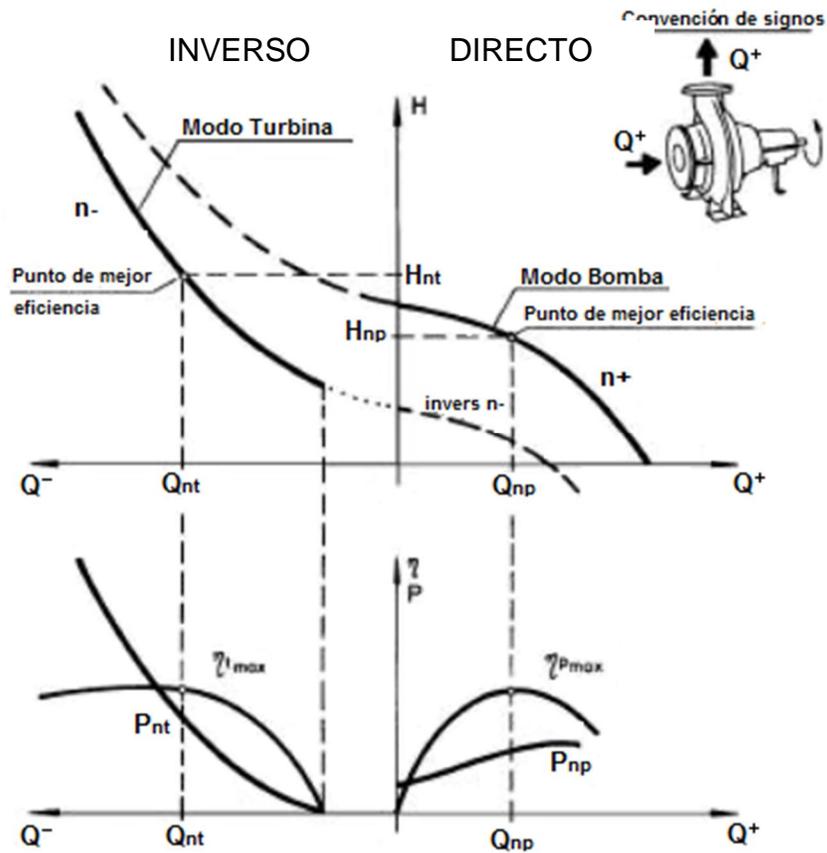
2.4 BOMBAS COMO TURBINAS

Las bombas centrífugas se utilizan como turbinas, ya que cubren una gran gama de caudales y alturas, además el costo de su implementación puede ser menor que cuando se usa una turbina convencional. Por lo general, las turbinas son costosas y requieren su importación lo que incrementa el precio, además es difícil encontrarlas con especificaciones para pequeños aprovechamiento hidroeléctricos. (Audisio, 2011)

La principal diferencia entre una bomba como turbina (BUTU) y una turbina convencional radica en que la primera carece de un dispositivo de control hidráulico, esta es una de las razones del bajo costo de las BUTUs, significa que las mismas necesitan condiciones de operación constantes. Además, los rendimientos no son los mismos. Sin excepción alguna, la altura y caudal en su punto óptimo en el modo turbina es mayor que en el modo bomba; la principal razón de esta diferencia está relacionada con las pérdidas hidráulicas de la máquina. En el caso de operación en el modo bomba y para su punto de mejor eficiencia donde, a la velocidad de rotación nominal el flujo presenta un aspecto óptimo a través de la máquina, la presión o altura en la brida de salida se ven reducidas por las pérdidas hidráulicas tales como pérdidas por fricción y volumétricas; esto haciendo una comparación con las condiciones ideales de acuerdo a la teoría. Para el caso de operación en el modo turbina y a la misma velocidad de rotación que lo hace en el modo bomba, la cabeza de presión requerida a la entrada de la máquina para operar en el punto de mejor eficiencia, debe ser incrementada en una magnitud equivalente a las pérdidas hidráulicas. De este modo la cabeza en el modo bomba difiere de la cabeza en el modo turbina, aproximadamente el doble de las pérdidas hidráulicas. (Audisio, 2011)

Cuando se está operando en el modo turbina, la transferencia de energía al rotor está determinada por la forma de la cámara espiral o voluta de la bomba, por lo tanto diferentes detalles de diseño y fabricación afectarán el desempeño de esta máquina: dos máquinas pueden tener desempeño similar en el modo bomba (similar impulsor) pero no necesariamente alcanzaran el mismo desempeño operando en el modo turbina. (Ortiz, 2011) En la Figura 4 se muestra la curva de eficiencia en modo directo e inverso. La grafica altura total en función del flujo de una bomba y una bomba como turbina, para una misma velocidad en los dos modos de trabajo. Se puede observar que los puntos de mejor eficiencia no corresponden a la misma combinación de valores en los dos modos de trabajo.

Figura 4 Curva de eficiencia de la bomba modo directo e inverso



(Ortiz, 2011)

Por lo general, no se realizan cambios o modificaciones en el diseño cuando se va a utilizar una bomba como turbina; pero una vez realizada la selección se debe realizar una adecuada verificación del diseño, dado que durante la operación de la bomba como turbina, la altura y la potencia son por lo general más altas que las correspondientes a su operación como bomba.

En base a lo expuesto se hace necesaria una revisión del diseño poniendo un especial énfasis en los siguientes puntos:

- Cambiar el sentido de las roscas en los componentes del eje de modo que estos no puedan aflojarse (tuerca sujeta rotor, tapa de cojinetes, etc).

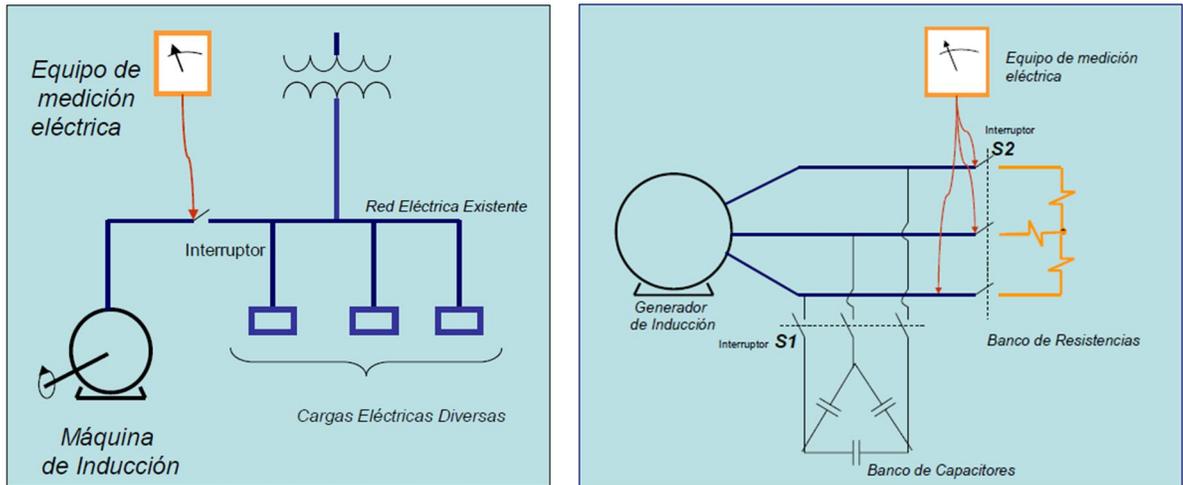
- Chequear los límites de presión de la carcasa; para ello es necesario verificar que la presión de prueba de la carcasa no sea inferior a 1,50 veces la máxima presión de operación de la bomba como turbina. Para esta evaluación es recomendable evaluar el fenómeno de golpe de ariete que es frecuente que se presente durante el proceso de embalamiento. En caso de que esta luego de realizar esta verificación la resistencia de la carcasa no sea la requerida se debe cambiar el material de la carcasa, o eventualmente seleccionar alternativamente una nueva unidad con una velocidad de operación menor.
- Verificar que el eje pueda resistir el torque ejercido en la operación como turbina.
- Evaluar el diseño adecuado para los cojinetes.

2.5 MOTOR COMO GENERADOR

Los estudios demuestran que el costo de un generador de inducción es 40% menos que un motor sincrónico. (Macedo, y otros)

El motor de inducción, al ser reversible, puede convertirse en un generador de potencia activa al acoplarse a un dispositivo mecánico que genere energía mecánica rotacional y logre superar la velocidad sincrónica. Su uso como generador tiene ventajas por que no requiere de equipo de sincronización, posee buena capacidad de sobre velocidad y protección inherente contra cortocircuitos. La principal desventaja es que no dispone de instrumentos que le permitan regular la potencia reactiva, por lo tanto, esta debe ser suministrada externamente. Esto puede lograrse de dos maneras, por medio de un banco de condensadores conectado en sus terminales, la cual es obligatorio para un motor trabajando en forma autónoma, o acoplándolo directamente con la red eléctrica. En la Figura 5 se muestran dos diagramas para cada una de estas soluciones. (Ortiz, 2011)

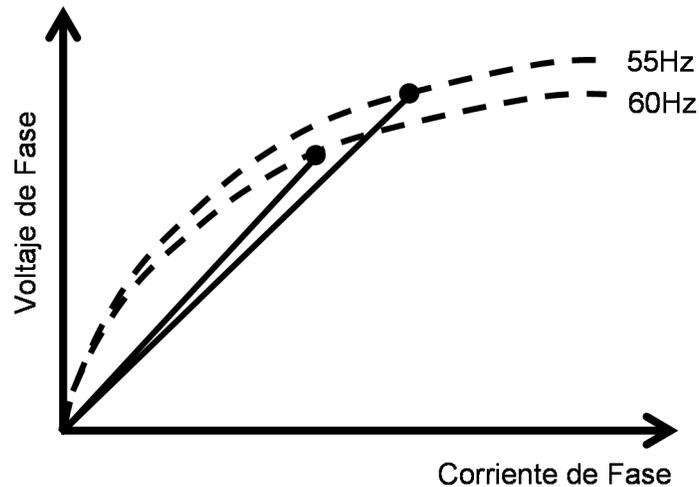
Figura 5 Tipos de conexión del motor para la generación energía



(Terrés)

Además, de la necesidad de un banco de condensadores que proporcione los reactivos requeridos para la excitación de la máquina en estado autónomo, también es necesario que exista un flujo magnético residual en el rotor tal que, al girar este con una velocidad superior a la sincrónica, se induzca una pequeña fuerza electromotriz (fem) en el devanado del estator, la cual hace circular corriente por los condensadores, que a su vez incrementan la fem inducida, aumentando posteriormente la corriente capacitiva, y así sucesivamente, hasta que la fem se estabiliza. En caso de que no exista flujo remanente, la autoexcitación no tendrá lugar, y para obtenerla basta conectar la máquina momentáneamente como motor o suministrarle corriente continua en los terminales del estator. (Ortiz, 2011). Esto último también se puede lograr conectando el motor a una batería de automóvil durante aproximadamente 15 minutos (Smith, 2008). En la Figura 6 muestra el comportamiento de autoexcitación del motor cuando se conecta a los capacitores. El aumento de la frecuencia de operación reducirá la corriente de excitación necesaria para lograr la tensión nominal.

Figura 6 Característica en vacío de autoexcitación



2.6 ANTECEDENTES LOCALES E INTERNACIONALES

Las investigaciones en el mundo se han desarrollado en su mayoría gracias a la academia. Muchas instituciones académicas trabajan experimentalmente en sus laboratorios para encontrar la mejor forma de utilizar esta tecnología. También, se reportan casos donde se está utilizando esta tecnología en zonas no intercomunicadas

Algunos de los países donde se han desarrollado investigaciones sobre el tema son India, Nepal, Tailandia, Irán, Rusia, Argentina, Brasil, Perú, México y Colombia.

2.6.1 Investigación en India

En India se utilizó dinámica computacional de fluidos, con el fin de analizar una bomba centrífuga como turbina a diferentes velocidades para generar de 15 kW a 50 kW. Los resultados fueron buenos, ya que utilizando una bomba centrífuga como turbina se alcanzó una eficiencia casi igual a la de diseño como bomba. La eficiencia alcanzada fue de 83.3% (Rawal, y otros, 2011)

2.6.2 Investigación en México

En México se realizó una investigación sobre la viabilidad técnica de una bomba hidráulica como turbina (en sentido inverso), con un motor de inducción como generador. Al realizar las pruebas se comprobó que una bomba centrífuga y un motor de inducción funcionando de manera inversa representan una oportunidad de generación de energía con un bajo caudal y así aprovechar los recursos hidráulicos de su país. (Llamas Terres, y otros, 2005)

En esta investigación se llegó a la conclusión que resulta más ventajoso el uso de un motor de inducción asíncrono que uno síncrono, debido a la amplia disponibilidad que hay en el mercado y su bajo precio comparativo. Además, porque cuando un motor asíncrono funciona como generador opera dentro de un rango de deslizamiento, con lo cual el control de la velocidad de la flecha no precisa tener exactitud como lo requiere un motor síncrono. (Llamas Terres, y otros, 2005)

Al realizar pruebas con varios equipos de bombeo se obtuvieron mejores resultados con una bomba centrífuga de flujo radial con succión de 3 pulgadas, descarga de 2.5 pulgadas, impulsor de tipo cerrado con un diámetro de 7-1/16 pulgadas y un motor eléctrico trifásico de 3 hp. (Llamas Terres, y otros, 2005)

Los resultados obtenidos se observan en la Tabla 3. Donde el motor fue conectado a la red eléctrica, se observa que conforme se acelera la velocidad del motor, disminuye la magnitud de la potencia eléctrica hasta cambiar de signo, momento en el cual se convierte en generador y empieza a aportar potencia eléctrica a la red, también se observa la eficiencia que alcanzan los equipos en su operación inversa. (Llamas Terres, y otros, 2005)

Tabla 3 Desempeño de una bomba centrífuga como turbina

Velocidad de rotación (RPM)	Presión Diferencial (kg/cm ²)	Caudal (l/s)	Potencia Hidráulica (W)	Potencia eléctrica (W)	Eficiencia conjunto	Eficiencia de la bomba como turbina	Eficiencia del motor como generador
1789	0,75	0,43	32	-983	-	-	-
1789	0,6	1,02	60	-842	-	-	-
1801	1,4	6,32	867	-82	-	-	-
1831	2,2	12,19	2630	1370	52%	63%	82%
1850	2,5	14,08	3436	1820	53%	64%	82%
1860	3	15,54	4573	2420	53%	65%	81%

(Llamas Terres, y otros, 2005)

2.6.3 Investigación en Argentina

En Argentina en la Universidad Nacional de Comahue investigaron sobre el funcionamiento de una bomba como turbina, en este estudio se establece que la principal diferencia entre una bomba como turbina y una turbina convencional radica en que las bombas como turbinas carecen de un dispositivo de control hidráulico; esto explica el bajo costo de las bombas como turbina. En el departamento de electrotecnia de dicha universidad se desarrolló con éxito un controlador electrónico de potencia, mediante el sistema de derivación y disipación de energía en un banco de resistencias. Este equipo electrónico ya se encuentra trabajando en la pico central hidráulica de 1.80 kW (Junín de los Andes – Neuquen). (Audisio, 2011)

Afirman que cualquier bomba centrífuga puede ser usada como turbina. Sin embargo, la principal ventaja de una bomba como turbina es su bajo costo en comparación con una turbina convencional. Las bombas más apropiadas para trabajar como turbinas son las bombas centrífugas de flujo mixto. El punto óptimo es más alto como turbina en comparación con el punto de eficiencia como bomba, lo cual representa un torque mayor en el eje. El rendimiento de una bomba como

turbina inicia desde un caudal mínimo hasta que llega al punto nominal de funcionamiento. La eficiencia en operación como turbina y en operación como bomba es distinta, a pesar de ser la misma máquina con la misma velocidad de rotación. (Audisio, 2011)

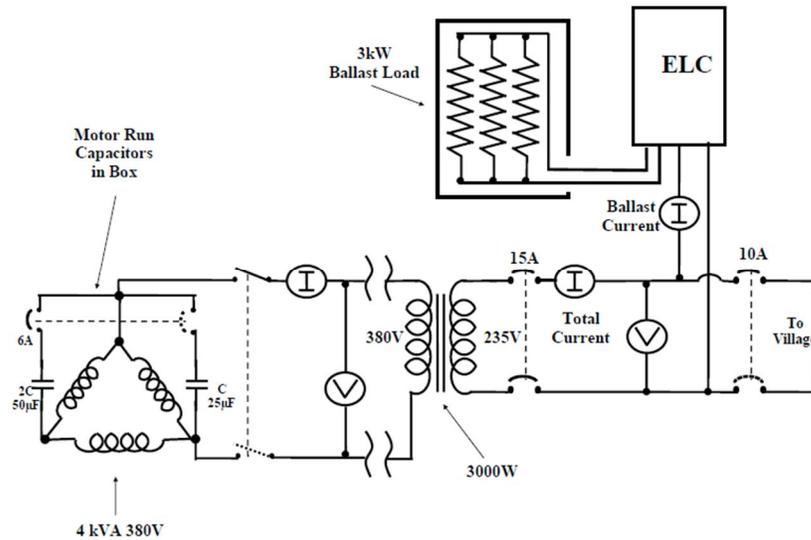
Para la consideración de máquinas de fluido real se deben tener en cuenta dos efectos importantes: la geometría de la bomba y las pérdidas hidráulicas del fluido real. (Audisio, 2011)

Las investigaciones realizadas en esta universidad concluyen que el tema bombas como turbinas tiene un campo muy amplio de aplicación a un costo bajo de operación. Los pequeños fabricantes de bombas no aprovechan este tipo de uso, aunque las grandes compañías multinacionales, que si cuenta con esta información la consideran confidencial. Por lo cual, cuando alguien quiere utilizar una bomba como turbina lo debe hacer a modo de prueba y error, debido a la poca disponibilidad de la información. (Audisio, 2011)

2.6.4 Aplicación práctica en Tailandia

En la villa de Huai Kra Thing se construyó exitosamente una planta de micro generación de 1.6kW. La energía es producida por un motor asíncrono de 4kW, trabajando como generador. Se utilizaron para proveer la excitación dos capacitores, uno de 50 μ F y otro 25 μ F en un arreglo C-2C (para generación monofásica), con 50 μ F en una fase, 25 μ F en otra y en ninguna capacitancia en la otra fase. La energía generada es transmitida a la clínica, a la escuela, dos iglesias. (Greacen, 2006) En la Figura 7 se muestra el esquema utilizado en la aplicación anteriormente mencionada.

Figura 7 Configuración eléctrica para la generación



(Greacen, 2006)

2.6.5 Aplicación práctica en Perú

Gracias al ITDG (Soluciones prácticas para la pobreza) y al programa ENISER (Energía infraestructura y servicios básicos) que busca ayudar a las poblaciones más pobres, para ofrecerles soluciones energéticas a muy bajos costos, se construyó un proyecto piloto de pico central para beneficiar a la provincia de Buenos Aires en San Ignacio jurisdicción de Cajamarca. Allí se utiliza un motor asíncrono como generador movido por una turbina Michel Banki que trabaja con 25 m de cabeza hidráulica y con un caudal de 40 l/s, para generar 5kW. La Figura 8 muestra el cuarto de máquinas de un pico central en Perú.

Figura 8 Fotografía cuarto de máquinas para pico central



(Ortiz, 2011)

2.6.6 Investigaciones en Colombia

La investigación realizada en Colombia fue desarrollada en la Universidad del Valle y financiada por el Departamento Administrativo de Ciencias, Tecnología e innovación, Colciencia. La investigación se realizó en el laboratorio de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas, donde han validado experimentalmente los métodos propuestos por diferentes escuelas y autores. Las principales conclusiones de las investigaciones son:

- Al utilizar una bomba como turbina es importante tener en cuenta la relación entre diámetros de succión y descarga.
- La mayor eficiencia en una bomba en modo reversible se tiene cerca de sus parámetros nominales, de caída y caudal; sin embargo al momento de utilizar la bomba como turbina es más relevante disponer de una mayor potencia.

- El resultado del rediseño y la manufactura de los rotores para las dos bombas del laboratorio no arrojó los mejores resultados. El rotor que mejor comportamiento por unidad de potencia presentó fue el modelo convergente, que se aproximó a la potencia generada por el rotor original de la bomba.
- Los resultados obtenidos y el análisis realizado indican que, para obtener un generador asíncrono monofásico, se debe utilizar un motor trifásico con rectificación a corriente continua (CC) e inversión de CC a una señal monofásica. Este esquema permite suprimir picos inherentes al generador asíncrono y almacenar energía en baterías.
- La autorregulación que ofrecen los condensadores en serie a través de los transformadores de corriente continua son una excelente aplicación, debido a ventajas que de por sí ofrece la autorregulación y reduce la cantidad de condensadores.
- Los resultados de este trabajo indican la necesidad de abordar la selección de las bombas como turbinas en forma similar a la selección de una turbina. La cual se puede considerar como un método sencillo, que entrega unos valores aproximados de las dimensiones más relevantes de la bomba. No obstante, es indiscutible la necesidad de validar experimentalmente estos resultados.

3 DETERMINACIÓN DE LA POTENCIA HIDRÁULICA

Como se ha mencionado anteriormente, el proyecto busca beneficiar a una de tres veredas, del municipio de Barbosa, Buga, Graciano y las Peñas, especialmente a una de las escuelas. Pero para efecto del análisis que compete a este proyecto, solo en la escuela de Buga es más viable o adecuado hacer el estudio, debido a que en la vereda Graciano la quebrada contigua a la escuela no tiene el suficiente caudal para la pico generación y en la escuela de las Peñas la quebrada está muy retirada, lo que incrementaría los costos de transporte de la energía.

3.1 PROCEDIMIENTO AFORO QUEBRADA LA GUAYABERA

Básicamente el procedimiento consiste en realizar mediciones directamente de la quebrada, para determinar el caudal disponible. Se define aforo como el volumen de agua que pasa a través de una sección transversal de una corriente en unidad de tiempo generalmente se expresa en m^3/s o l/s. (Instituto de hidrología, 1999)

De los diferentes tipos de aforos propuestos por el IDEAM, el seleccionado para esta medición es el aforo por vadeo que requiere el siguiente equipo:

- Cinta métrica
- Varillas de vadeo
- Contador
- Molinete
- Cartera de aforos y planillero
- Personal requerido: Inspector y aforador

El procedimiento, básicamente consiste en dividir, en distancias iguales, el ancho de la quebrada, en donde cada división representa un punto de medición, definido como vertical. En cada vertical, se mide con el molinete a diferentes alturas.

3.2 SELECCIÓN DEL LUGAR DE MEDICIÓN

Las normas para medir el caudal de un afluente precisan que, el punto de medición tiene que ser un tramo recto, en lo posible, la longitud del tramo tendrá un mínimo equivalente a cinco veces el ancho de la sección, con el agua fluyendo en una misma dirección y hacia adelante, sin puntos muertos, con laderas naturales sobresalientes de manera que no ocurran desbordamientos. (Instituto de hidrología, 1999).

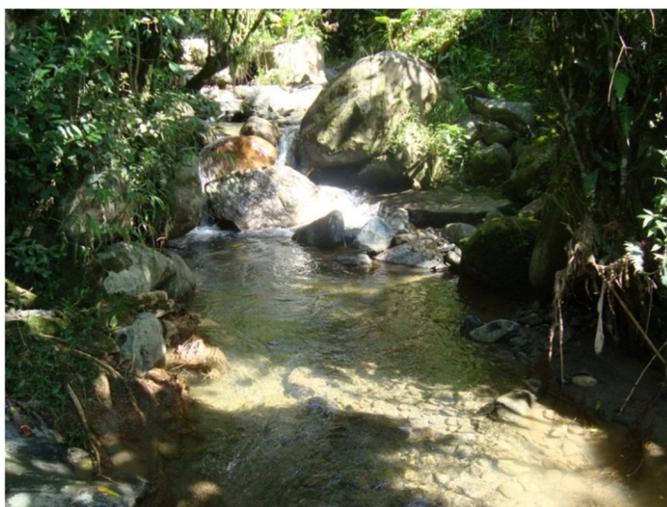
La quebrada se encuentra en una geografía bastante agreste, lo cual implica que la quebrada tenga cambios abruptos en el cauce y muchas rocas de diferentes tamaños como se muestra en la Figura 9 , lo cual dificulta la selección de un tramo con las características apropiadas.

Figura 9 Fotografías de la quebrada



Además, el punto a medir, exige una buena cota de altura con respecto a la escuela, obligando a que el tramo quede quebrada arriba, donde el terreno tiene más caídas. Después de hacer un recorrido por la quebrada, se selecciona el punto más adecuado para realizar las mediciones, siguiendo las recomendaciones. Ver Figura 10.

Figura 10 Fotografía del punto de medición del caudal



La quebrada se llama los Guayabales, ubicada en el municipio de Barbosa, sector la Buga y muy cercano a la Institución educativa rural Buga. El punto seleccionado se encuentra en las coordenadas N $06^{\circ} 27,519'$ W $075^{\circ} 21,045'$, a una altura de 1668 metros sobre el nivel del mar medido con un GPS Garmin eTrex Legend.

3.3 ADECUACIÓN DEL SITIO DE MEDICIÓN

La selección del número de verticales ayuda a mejorar la precisión de las mediciones, así entre más verticales más preciso se es. La distancia entre verticales debe de ser menor o igual al 10% del ancho total. Con el ancho de la quebrada, que es 2.15 metros, se calcula la distancia entre verticales, al

multiplicarlo por un 10%. El resultado es que las verticales tendrán 21.5 centímetros de separación entre ellas, para un total de 9 verticales.

Se instala una cuerda a ras de la superficie de la quebrada y perpendicular al flujo, con los dos extremos anclados a la orilla. Sobre la cuerda se marca la distancia entre cada vertical, siempre midiendo desde la ladera izquierda para tener la misma referencia. Este montaje inicial se muestra en la Figura 11.

Figura 11 Fotografías de la división de verticales para la quebrada



Además, se retiran los principales obstáculos como raíces y rocas grandes, para cada vertical y se limpia un poco la superficie para poder apoyar el dispositivo de medición adecuadamente.

3.4 PROCESO TOMA DE DATOS

Para la toma de datos es necesario el uso de un molinete electrónico, que envía un pulso por cada revolución en un periodo de tiempo, para nuestras mediciones el tiempo fue 80 segundos. Las revoluciones se registran en un contador. El molinete a utilizar es de hélice con eje horizontal, el modelo es el 0SS-PC1 fabricado por Hidrological Services PTY. LTD Australia. Ver Figura 12. Este equipo tiene la característica especial de medir velocidades menores de 0.025m/s.

El préstamo del equipo y la capacitación acerca de su manejo, fue dado por el Laboratorio de hidráulica de la Universidad EAFIT.

Figura 12 Molinete utilizado en las mediciones



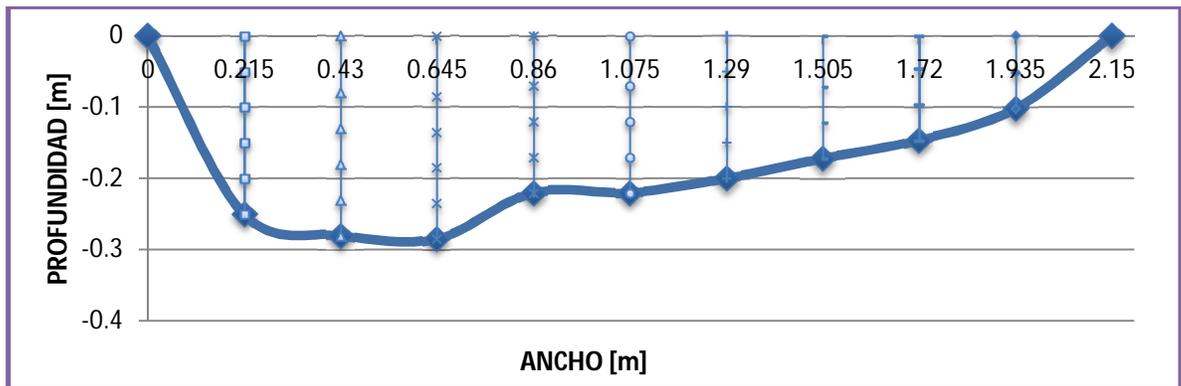
(MEDITECNA)

Se arma el molinete con la hélice para caudales bajos, además se conecta al contador eléctrico por medio de los cables y se sujeta a la varilla graduada, que esta previamente ensamblada. Para comenzar se ubica el molinete a 5 centímetros, del extremo inferior de la varilla. Con el molinete a dicha altura se registra el número de pulsos en cada vertical en un período de 80 segundos. Al terminar las mediciones en las nueve columnas se aumenta 5 centímetros más y se repite hasta alcanzar una altura con el molinete de 20 centímetros, cabe resaltar que todas las verticales tienen alturas diferentes lo que impide que para todas las verticales se midiera a todas las alturas.

3.5 DATOS DE CAMPO

El perfil de la quebrada y la disposición de las medidas que se realizan, se muestra en la Figura 13

Figura 13 Perfil de la quebrada



Los datos tomados se encuentran en la Tabla 4.

Tabla 4 Datos obtenidos del aforo de la quebrada

VERTICAL	DISTANCIA A LA MARGEN IZQ [m]	PROFUNDIDAD TOTAL [cm]	MEDIDA	DISTANCIA DESDE EL FONDO [cm]	PULSOS	TIEMPO [s]
1	0,215	25	1A	5	96	80
2	0,430	28	2A	5	179,5	80
3	0,645	28,5	3A	5	98	80
4	0,86	22	4A	5	105,5	80
5	1,075	22	5A	5	127,5	80
6	1,29	20	6A	5	127,5	80
7	1,505	17,2	7A	5	149	80
8	1,720	14,6	8A	5	18,5	80
9	1,935	10,2	9A	5	0	80
1	0,215	25	1B	10	172,3	80
2	0,430	28	2B	10	200	80
3	0,645	28,5	3B	10	126	80
4	0,86	22	4B	10	192	80
5	1,075	22	5B	10	220,5	80
6	1,29	20	6B	10	228	80
7	1,505	17,2	7B	10	236,6	80
8	1,720	14,6	8B	10	19	80
1	0,215	25	1C	15	217,5	80
2	0,43	28	2C	15	209	80

VERTICAL	DISTANCIA A LA MARGEN IZQ [m]	PROFUNDIDAD TOTAL [cm]	MEDIDA	DISTANCIA DESDE EL FONDO [cm]	PULSOS	TIEMPO [s]
3	0,645	28,5	3C	15	173	80
4	0,86	22	4C	15	195,5	80
5	1,075	22	5C	15	242,5	80
6	1,29	20	6C	15	258	80
1	0,215	25	1D	20	235	80
2	0,43	28	2D	20	215,5	80
3	0,645	28,5	3D	20	214,5	80
2	0,43	28	2E	25	228,5	80
3	0,645	28,5	3E	25	230,3	80

3.6 CÁLCULO DEL CAUDAL

Con los datos obtenidos se calcula la velocidad de cada punto por medio de la ecuación (1) y (2) que se encuentra en el manual técnico del molinete

Si $Pulsos/s > 0,99$

$$Velocidad = 0,1374 \times (Pulsos/s + 0,0828) \quad (1)$$

sino

$$Velocidad = 0,1429 \times (Pulsos/s + 0,0774) \quad (2)$$

En la Tabla 5 se muestra las velocidades obtenidas por medio de las ecuaciones.

Tabla 5 Velocidades para cada punto de medición

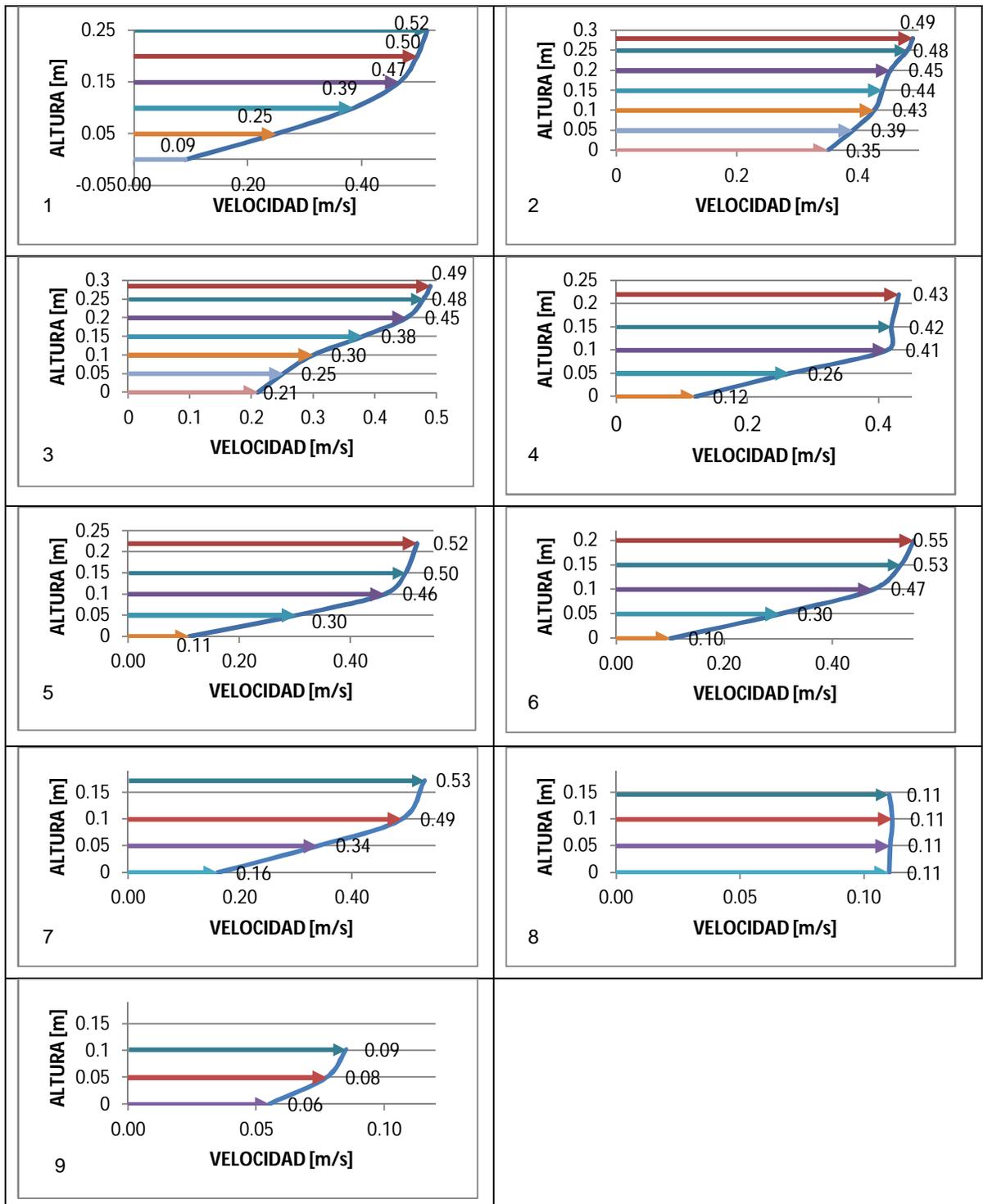
VERTICAL	PULSOS	TIEMPO [s]	PULSOS POR SEGUNDO [Pulsos/s]	VELOCIDAD [m/s]
1	96	80	1,20	0,25
1	172,3	80	2,15	0,39
1	217,5	80	2,72	0,47
1	235	80	2,94	0,50
2	179,5	80	2,24	0,39
2	200	80	2,50	0,43

VERTICAL	PULSOS	TIEMPO [s]	PULSOS POR SEGUNDO [Pulsos/s]	VELOCIDAD [m/s]
2	209	80	2,61	0,44
2	215,5	80	2,69	0,45
2	228,5	80	2,86	0,48
3	98	80	1,23	0,25
3	126	80	1,58	0,30
3	173	80	2,16	0,38
3	214,5	80	2,68	0,45
3	230,3	80	2,88	0,48
4	105,5	80	1,32	0,26
4	192	80	2,40	0,41
4	195,5	80	2,44	0,42
5	127,5	80	1,59	0,30
5	220,5	80	2,76	0,46
5	242,5	80	3,03	0,50
6	127,5	80	1,59	0,30
6	228	80	2,85	0,47
6	258	80	3,23	0,53
7	149	80	1,86	0,34
7	236,6	80	2,96	0,49
8	18,5	80	0,23	0,11
8	19	80	0,24	0,11
9	0	80	0,00	0,08

3.6.1 Perfiles de flujo

Con los datos anteriores, se dibujan primero los perfiles de flujo sobre papel milimetrado, para hacer una aproximación del perfil y obtener los valores de la velocidad en la superficie y en el fondo. De esta manera obtenemos los nueve perfiles. (Ver Figura 14)

Figura 14 Perfiles de velocidad para cada vertical



Luego se halla la superficie dentro del perfil, el método utilizado es la suma de las sub áreas que forman dos vectores de velocidad. Las sub áreas son calculadas por medio de la ecuación (3) la cual se utiliza para calcular el área de trapezoides. Se muestra un ejemplo de la sub área en la Figura 15 y la Tabla 6 con los resultados finales.

$$A = h \left(\frac{b1 + b2}{2} \right) \quad (3)$$

Figura 15 Ejemplo del calculo de la subárea

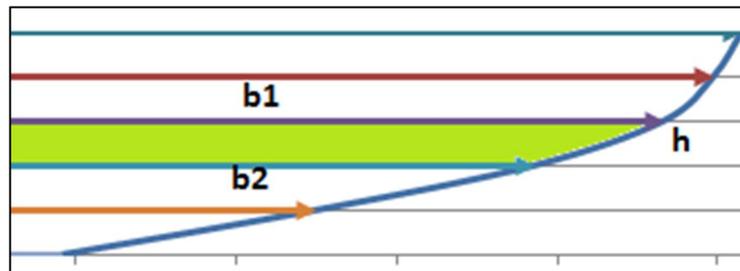
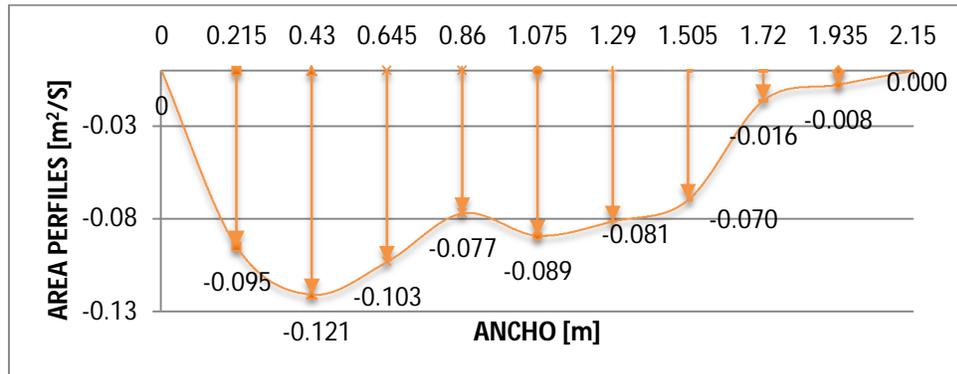


Tabla 6 Área total para cada perfil

PERFIL	1	2	3	4	5	6	7	8	9
AREA [m ² /s]	0,095	0,121	0,103	0,077	0,089	0,081	0,070	0,016	0,008

Con los valores (m²/s) encontrados en el paso anterior, se dibuja la visión planta del cauce. La vertical representa la magnitud de cada perfil de flujo y la horizontal la distancia desde la margen izquierda de la quebrada de cada vertical. La Figura 16 muestra la visión de planta del cauce de afluente.

Figura 16 Visión planta del cauce de la quebrada



De igual manera a como se calculó anteriormente el área en cada perfil, se hace para calcular el caudal total de la quebrada, que es la suma de todas las áreas parciales. La Tabla 7 muestra los resultados del cálculo.

Tabla 7 Valores de las áreas parciales

DISTANCIA MARGEN IZQ. [m]	AREA PERFIL [m ² /s]	AREA PARCIAL [m ³ /s]
0	0	0,0102
0,215	0,095	0,0232
0,430	0,121	0,0241
0,645	0,103	0,0194
0,86	0,077	0,0179
1,075	0,089	0,0183
1,29	0,081	0,0163
1,505	0,070	0,0092
1,720	0,016	0,0025
1,935	0,008	0,0008
2,150	0,000	0
CAUDAL TOTAL [m³/s]		0,142

Según el resultado final, el caudal medido en la quebrada los Guayabales en el punto que determinamos, es de 142 l/s ó 0,142m³/s. Con la altura desde el punto medido hasta el nivel de la escuela, que es de 47 metros, podríamos obtener una potencia hidráulica de 65kW si se tomara todo el caudal. Pero por disposiciones

ambientales, para este tipo de aprovechamiento solo se puede captar un porcentaje determinado. Para agregar, las mediciones se hicieron en tiempo seco (verano), esto indica que el caudal en invierno aumenta, esto se pudo constatar visualmente, en una visita posterior en tiempo de lluvias.

4 DEFINICIÓN DE LOS REQUERIMIENTOS DE ENERGÍA DEL CENTRO EDUCATIVO RURAL BUGA

Gracias a las visitas realizadas al centro educativo rural Buga, a las conversaciones con la única profesora, la Señora Anubia Luz Morales y con datos suministrados por la Secretaria de Educación de Barbosa y EPM quien es la empresa encargada de suministrar energía a esta escuela, se pudo definir los requerimientos de energía eléctrica y la posible situación futura de esta. La Figura 17 muestra algunas imágenes de la escuela rural Buga.

Figura 17 Fotografías de la escuela rural Buga



En la Tabla 8 se presenta el consumo promedio de energía de la escuela y sus costos actuales.

Tabla 8 Datos de consumo de la escuela Buga

C.E.R. BUGA		
Valor promedio de facturación de energía mensual	\$ 45.149	pesos
Valor del kWh para la vereda Buga Municipio de Barbosa (EPM)/Estrato 1	\$ 140	pesos
Consumo de energía mensual	322.49	kWh
Horas de actividad energética por día en el C.E.R Buga 8am-2pm	6	horas
Horas de actividad energética por mes (20 días de estudio)	120	horas
Consumo de potencia promedio	2,7	kW

4.1 DESCRIPCIÓN DETALLADA

Los circuitos de la escuela son para usos generales, de tipos monofásicos que alimentan bocas de salida para iluminación y tomacorrientes sencillas de 120 V. De acuerdo con las charlas con la profesora encargada se puede describir los hábitos de consumo muy fácilmente. La escuela comienza actividades a las 8 a.m y terminan clases a las 2p.m por lo cual en este rango de tiempo es donde se consume la energía, el único equipo que permanece activo todo el día es la nevera. Todos los salones durante las clases permanecen con su iluminación encendida. La preparación del almuerzo puede tardar aproximadamente dos horas, en las cuales los implementos de la cocina están consumiendo energía.

En una de las visitas se determina los electrodomésticos existentes y la instalación eléctrica de la escuela, con estos datos podemos determinar la potencia máxima necesaria para satisfacer todos los equipos y dispositivos. En la Tabla 9 se describen los electrodomésticos instalados con su respectiva potencia.

Tabla 9 Potencia instalada en la escuela Buga

ELECTRODOMÉSTICO	Cantidad	Potencia(W)	Potencia Total (W)
Bombillos ahorradores	6	42	252
Lámparas fluorescentes	4	18	72
Nevera Pequeña	1	200	200
Licuadaora	1	600	600
Estufa eléctrica (2 Puestos)	1	2200	2200
		Total	3324

En la Figura 18 se muestra en interior de la cocina de la escuela, donde se observa alguno de los electrodomésticos.

Figura 18 Fotografías de la cocina de la escuela Buga



Además, ante la posibilidad de que doten la escuela con equipos de cómputo, un televisor, DVD y otros equipos en un futuro, se genera la Tabla 10.

Tabla 10 Equipos a futuro para la escuela Buga

ELECTRODOMESTICO	Cantidad	Potencia (W)	Potencia total (W)
Equipo de computo	3	160	480
DVD	1	10	10
TV a Color	1	67	67
Olla arrocera 8 tazas	1	610	610
Grabadora	1	11	11
		Total	1178

Normalmente, todos los equipos nunca trabajan simultáneamente lo que obliga a trabajar con un factor de simultaneidad (fs). Como no conocemos como se distribuyen las cargas en los circuitos, el factor de simultaneidad con el que trabajaremos será de 0,8 de acuerdo a la Tabla 11.

Tabla 11 Factor de simultaneidad para el número de circuitos

NUMERO DE CIRCUITOS	FACTOR DE SIMULTANIEDAD
2 y 3	0,9
4 y 5	0,8
6 a 9	0,7
10 o más	0,6

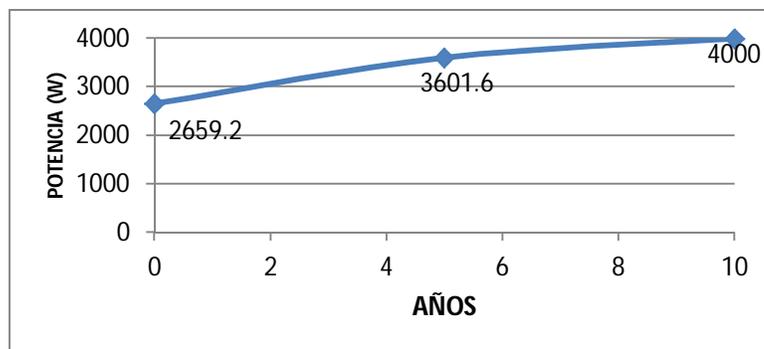
(Universidad de la República - Uruguay)

En consecuencia obtenemos los valores necesarios de generación de energía y construimos la proyección de la demanda a 10 años. Ver Tabla 12 y Figura 19. Antes de 5 años, la escuela deberá de contar con equipos antes descritos y después la demanda se estabiliza.

Tabla 12 Potencia necesaria con factor de simultaneidad

	POTENCIA INSTALADA [W]	FS	POTENCIA NECESARIA [W]
Presente	3324	0,8	2659,2
Futuro 5 años	4502	0,8	3601,6
Futuro 10 años	5000	0,8	4000

Figura 19 Proyección de la demanda de la escuela Buga



En consecuencia la selección de los equipos deberá garantizar la generación de energía suficiente a 10 años, lo que significa que la pico central deberá generar mínimo 4kW.

5 SELECCIÓN DE LAS MÁQUINAS REVERSIBLES

Según Corantioquia, cuando se va captar parte del caudal de una quebrada, se debe garantizar un caudal ecológico del 20% o 30%. Cabe aclarar que cuando se concesiona una quebrada, el ente encargado tendrá que hacer estudios para poder determinar la cantidad de caudal que se podrá utilizar, esto dependerá de muchos factores. Para el caso del presente estudio se trabaja con estimados generales.

Entonces se hace necesario escoger la combinación de caudal y cabeza, necesarios para generar 4kW, teniendo en cuenta la eficiencia de la bomba, del motor y las pérdidas por tuberías.

5.1 SELECCIÓN DE LA BOMBA CENTRÍFUGA PARA TRABAJAR COMO TURBINA

Diferentes autores y escuelas han propuesto diferentes métodos para pronosticar el comportamiento en el punto de mayor eficiencia de la bomba, usando los datos hidrodinámicos como: altura, caudal y velocidad específica.

5.1.1 Selección a partir de las características hidráulicas en el modo bomba

Este método indica que las condiciones de caudal, altura y eficiencia entre el modo turbina y el modo bomba están relacionados por coeficientes de la siguiente forma:

$$Q_t = K_Q \times Q_B \quad (4)$$

$$H_t = K_H \times H_B \quad (5)$$

$$n_T = K_n \times n_B \quad (6)$$

Los valores de estos coeficientes, difieren de acuerdo con los diferentes autores. En la Tabla 13 Coeficientes para caudal, altura y eficiencia se presentan los valores sugeridos por estos.

Tabla 13 Coeficientes para caudal, altura y eficiencia

Autor	K_Q	K_h	K_n
Stephanoff	$\frac{1}{\sqrt{n_B}}$	$\frac{1}{n_B}$	1
Mc. Claskey	$\frac{1}{n_B}$	$\frac{1}{n_B}$	1
Sharma – Williams	$\frac{1}{n_B^{0,8}}$	$\frac{1}{n_B^{1,2}}$	1
BUTU	$\frac{0,85n_B^5 + 0,358}{2n_B^{9,5} + 0,205}$	$\frac{1}{0,85n_B^5 + 0,358}$	$1 - \frac{0,03}{n_B}$
MICI	0,9 – 1,0	1,56 – 1,78	0,75 – 0,80

(Ortiz, 2011)

Los métodos anteriores requieren los valores, del punto de mejor eficiencia de una bomba pre seleccionada. Esta bomba se selecciona, con las características hidráulicas disponibles, pero con el requisito de que trabaje con caudales bajos, para que la tubería de transporte necesaria no sea muy grande y por ende costosa. Así se busca la bomba en las curvas características que inicialmente pueda generar 4kW (7HP) en su mejor punto de eficiencia.

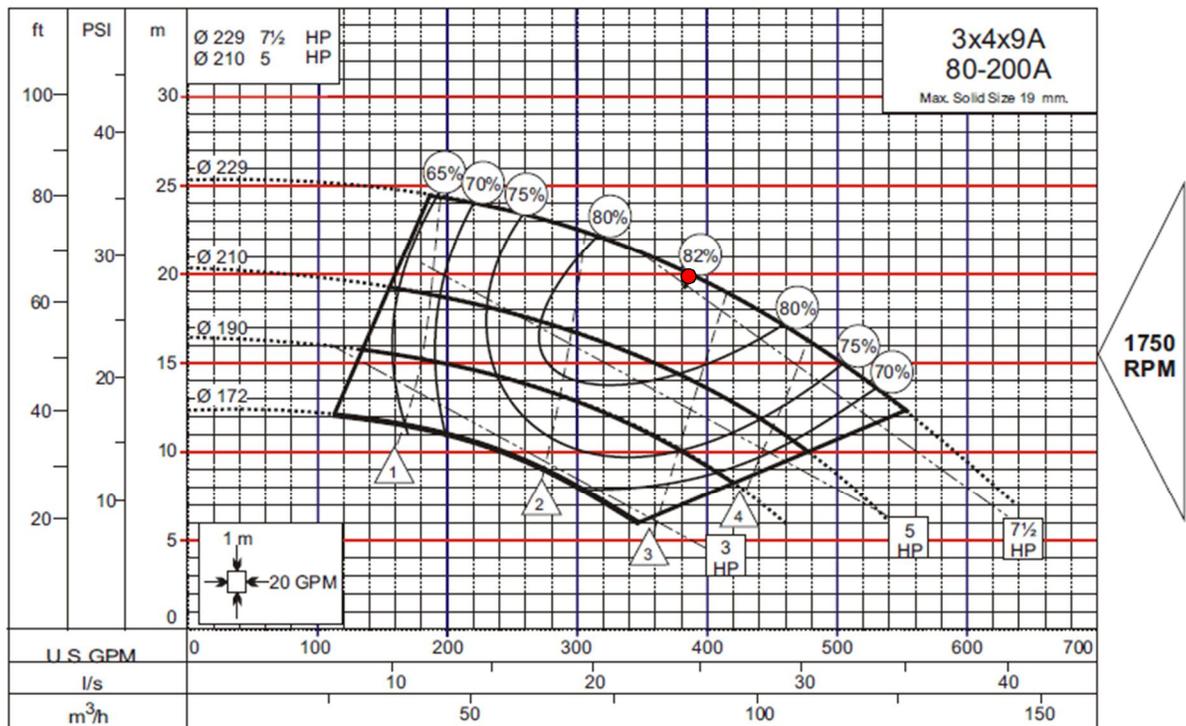
Se busca en las curvas de IHM e Hidromac. Estas dos reconocidas empresas fabrican, ensamblan y comercializan, en Colombia, bombas centrifugas. Lo cual favorece la adquisición soporte y posterior mantenimiento de los equipos.

Al preseleccionar la bomba, obtenemos el punto de mejor eficiencia el cual indica los valores para calcular las variables hidráulicas de la bomba en el modo turbina. A continuación, se muestran las curvas características con su punto de mejor eficiencia y los resultados obtenidos para que bomba trabaje como turbina.

- Bomba Hidromac:

La Figura 20 muestra la curva característica de una bomba Hidromac, y la Tabla 14 muestra la información principal de la bomba.

Figura 20 Curva característica bomba Hidromac



(HIDROMAC)

Tabla 14 Información principal bomba Hidromac

HIDROMAC MALMEDI
Modelo:80-200A Succión 3" Descarga 4"
BEP Q=86 m ³ /h H=20 m n=82%
220/440 Volts, 1750 RPM
Impeler: 229mm

Los coeficientes para estimar el desempeño como turbina de esta bomba centrífuga se presentan en la Tabla 15

Tabla 15 Coeficientes para bomba Hidromac

REFERENCIA	Kq	Kh	Kn
Stephanof	1,10	1,22	1
Mc Claskey	1,22	1,22	1
Sharma-Williams	1,17	1,27	1
BUTU	1,32	1,49	0,963415
Mici	0,95	1,67	0,775

Las variables como turbina se muestran en la Tabla 16 los valores más parecidos son los de Mc Claskey y Sharma-Williams

Tabla 16 Valores de caudal, altura y eficiencia bomba Hidromac en el modo turbina

REFERENCIA	$Qt=Kq*Qb$	$Ht=Kh*Hb$	$nt=Kn*nb$	PH [kW]	HP	Q [m ³ /h]
Stephanof	0,026	24,4	0,82	5,2	6	95,3
Mc Claskey	0,029	24,4	0,82	5,7	6	105,2
Sharma-Williams	0,028	25,4	0,82	5,7	6	101,1
BUTU	0,032	29,7	0,79	7,3	8	114,2
Mici	0,023	33,4	0,6355	4,7	4	82,0

- Bomba IHM:

La Figura 21 muestra la curva característica de una bomba IHM, y la Tabla 17 muestra la información principal de la bomba.

Figura 21 Curva característica de la bomba IHM

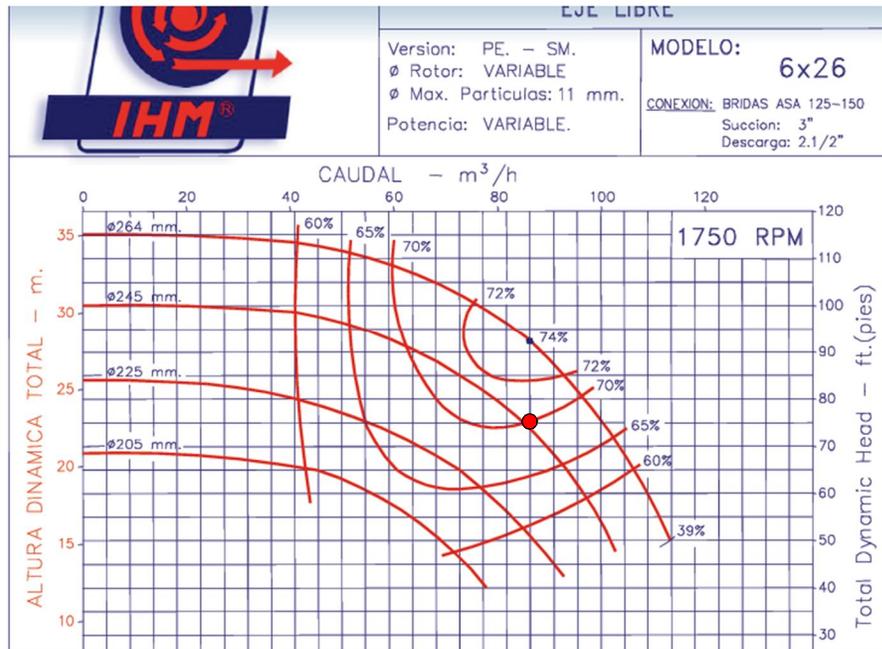


Tabla 17 Información bomba IHM

IHM EUROLINEA EJE LIBRE
Modelo:8x31 Succión 3" Descarga2 1/2"
BEP Q=85 m ³ /h H=24 m
220/440 Volts, 1750 RPM
Impeler: 245mm

Los coeficientes para estimar el desempeño como turbina de esta bomba centrífuga se presentan en la Tabla 18

Tabla 18 Coeficientes bomba IHM

REFERENCIA	Kq	Kh	Kn
Stephanof	1,20	1,43	1
Mc Claskey	1,43	1,43	1
Sharma-Williams	1,33	1,53	1
BUTU	1,84	2,00	0,957143
Mici	0,95	1,67	0,775

Las variables como turbina se muestran en la Tabla 19 los valores más parecidos son los de Mc Claskey y Sharma-Williams

Tabla 19 Valores de caudal, altura y eficiencia de la bomba IHM en el modo turbina

REFERENCIA	$Qt=Kq*Qb$	$Ht=Kh*Hb$	$nt=Kn*nb$	PH [kW]	HP	Q [m ³ /h]
Stephanof	0,028	34,3	0,7	6,6	6	101,6
Mc Claskey	0,034	34,3	0,7	7,9	7	121,4
Sharma-Williams	0,031	36,8	0,7	7,9	7	113,1
BUTU	0,043	47,9	0,67	13,7	12	156,2
Mici	0,022	40,1	0,5425	4,8	3	80,8

Se cotizan las dos bombas en la empresa Jaime Ochoa R. de Medellín, esta empresa es la distribuidora de IHM y también maneja bombas Hidromac. Los precios se muestran en la Tabla 20

Tabla 20 Precios de la bomba Hidromac e IHM

REFERENCIA BOMBA	PRECIO ANTES DEL IVA
IHM Modelo 6x26 1750rpm	\$ 2'193,000
Hidromac Modelo 80-200A 1750rpm	\$3'072,000

5.1.2 Selección final de la bomba como turbina

Inicialmente la diferencia de precios entre las bombas es considerable, pero si se analiza la bomba IHM, esta necesita más cabeza por ende más tubería. Además, se genera más energía de la necesaria, lo que posiblemente incrementaría el calibre de transporte de la energía, y las resistencias, para controlar la carga. Teniendo en cuenta estos costos adicionales, la diferencia en los costos de inversión se reduce.

Se sugiere utilizar la bomba Hidromac Modelo 80-200A, para que trabaje con un caudal de 0,029 m³/s con una cabeza de 24,4m. Además, esta bomba tiene una alta eficiencia igual al 82%.

5.2 SELECCIÓN DEL MOTOR ASÍNCRONO PARA TRABAJAR COMO GENERADOR

La selección del motor, dependerá del valor de potencia eléctrica deseado. Cuando se utiliza la configuración C-2C para la generación, la potencia eléctrica generada debe ser 0,9 la potencia nominal del motor asíncrono, a utilizar como generador, para evitar daños y deterioro del bobinado. (Smith, 2008)

Con esto tenemos que la potencia del motor seleccionado debe ser:

$$P_{motor} = \frac{P_{generada}}{0,9} = \frac{5,7kW}{0,9} = 6,33kW \approx 8,5 HP \quad (7)$$

La potencia del motor teóricamente debe de ser de 8,5HP pero es difícil conseguir en el mercado un motor con estas especificaciones, entonces se selecciona un motor con una potencia nominal de 10HP.

Existen otros aspectos necesarios para la selección del motor.

- Tipo del rotor: Los motores de inducción con rotor tipo jaula son los más comunes en el medio, los más económicos y también hay una gran variedad de estos. Estas razones justifican el tipo de motor necesario para el proyecto ya que también los repuestos son económicos y asequibles.
- Condiciones del lugar: Determinamos la clasificación IP del motor, para darle el nivel de protección que necesita el motor en su lugar de funcionamiento. Ya que el montaje del equipo requiere un cuarto de máquinas, podemos decir que el motor estará aislado de cierta forma de los elementos del ambiente, sin embargo no podemos descartar la presencia de polvo o suciedad o alguna filtración de agua en el cuarto, por esto determinamos que el nivel de protección para el motor debe ser un IP44 que protege contra solidos de 1mm y agua salpicada desde cualquier

dirección o IP54 el cual protege contra polvo e igualmente agua salpicada desde cualquier dirección, o también un IP55 que es la máxima protección

- El motor debe de ser de 1800 rpm (igual que la bomba), con los rodamientos sellados para facilitar el mantenimiento. El motor debe de tener flanches para poderlo sujetar una base.

De acuerdo con lo anterior, el motor sugerido es un WEG de 10 HP trifásico de 4 polos, 1800 rpm. El valor del motor se muestra en la Tabla 21

Tabla 21 Precio del motor WEG

DESCRIPCION	CANT.	VALOR UNITARIO ANTES DE IVA
Motor 10 HP trifásico 1.800 rpm	1	\$ 2,194.500

5.2.1 Cálculo de la capacitancia

Los principales datos del motor se muestran en la siguiente Tabla 22

Tabla 22 Datos eléctrico del motor WEG

MOTOR WEG /TRIFASICO/ 4 POLOS/1800 RPM			
Potencia	Voltaje	Corriente de plena carga	Tipo de protección
10 HP	220V	26,3A	IP55

Se calcula la capacitancia necesaria para generar los reactivos necesarios para la generación (Smith, 2008):

Se calcula la potencia total aparente:

$$\sum S_{NO\ CARGA} = \sqrt{3} \times V_{Linea} \times I_{Linea} = \sqrt{3} \times 220 \times 26,3 = 10021,65\ VAR \quad (8)$$

Como la potencia total aparente sin carga es igual a la potencia reactiva tenemos:

$$\sum Q = \sum S_{NO\ CARGA} = 10021,65\ VAR \quad (9)$$

Luego, se calcula la potencia reactiva por fase

$$Q_{Fase} = \frac{Q}{3} = \frac{10021,65}{3} = 3340,5\ VAR \quad (10)$$

Para capacitores conectados en delta:

$$V_{fase} = V_{linea} = 220V \quad (11)$$

Se calcula la corriente de la fase:

$$I_{fase} = \frac{Q_{fase}}{V_{fase}} = \frac{3340,5}{220} = 15,18\ A \quad (12)$$

Luego se calcula el valor de la capacitancia:

$$C = \frac{I}{2\pi fV} = \frac{15,18}{2\pi \times 60 \times 220} = 183,07\ \mu F \approx 185\ \mu F \quad (13)$$

El precio de un capacitor es de aproximadamente \$ 15,000 pesos.

NOMENCLATURA

C : Capacitancia

H_B : Cabeza hidráulica en el punto de optima eficiencia como bomba

H_T : Cabeza hidráulica en el punto de optima eficiencia como turbina

I : Corriente

K_H : Coeficiente para cabeza hidráulica para la relación

K_n : Coeficiente para la eficiencia para la relación

K_Q : Coeficiente para caudal para la relación

n_T : Eficiencia hidráulica en el punto más eficiente como turbina

n_B : Eficiencia hidráulica en el punto más eficiente como bomba

Q : Potencia reactiva

Q_T : Caudal en el punto de optima eficiencia como turbina

Q_B : Caudal en el punto de optima eficiencia como bomba

S : Potencia aparente

V : Voltaje

6 MONTAJE DE LABORATORIO PARA LAS PRUEBAS DE DESEMPEÑO DE LA BOMBA TURBINA

El esquema para el montaje de la turbina en el laboratorio de hidráulica de la universidad EAFIT, fue definido de la siguiente manera: La bomba-turbina fue instalada sobre una plataforma de manera que descarga al vertedero. El agua es recirculada por un sistema de bombeo desde el vertedero hacia el sistema para el ensayo de la bomba-turbina.

6.1 MONTAJE DE TUBERÍAS

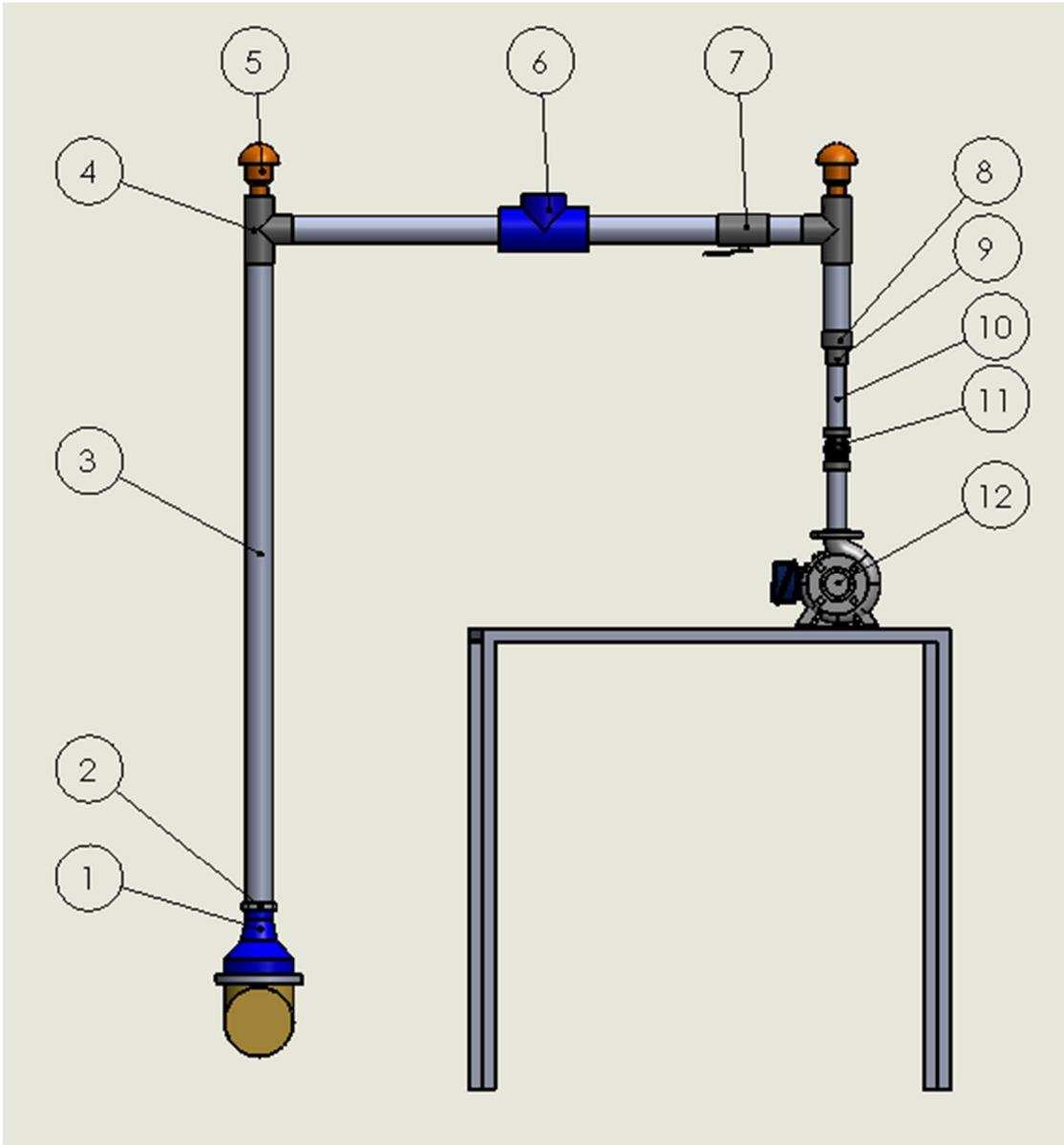
Una vez definido el punto de ubicación de la bomba-turbina, se procedió a diseñar el montaje de tuberías necesario para completar todo el sistema de generación de energía.

En el laboratorio de hidráulica se tiene un sistema de tuberías que consiste en un anillo en el cual se recircula el agua y al cual se acoplan los distintos montajes. El anillo de 8 pulgadas de diámetro lleva el fluido hasta la terminal seleccionada, ahí se conecta una reducción de 8" a 3" vertical y se coloca una brida roscada de 3" para unir con un tubo de PVC de 3 metros de altura, luego este se conecta con una unión "T" para instalar un aireador vertical y direccionar fluido de manera horizontal.

En el tramo horizontal se instala un medidor de caudal, respetando los 5 diámetros mínimos de longitud antes del mismo para alcanzar flujo desarrollado. Después del medidor de caudal deja un tramo de 3 diámetros de longitud y se instala una llave de bola y luego se coloca una unión "T" con otro aireador y se direcciona el

fluido de manera vertical descendente. Se continua el montaje en tubería de PVC de 3" y a los 20 cm de la unión "T" se instala una unión universal y a la salida un reducción de 3" a 2", a los 40 cm se instala un acople flexible y por último a los 20 cm de este se instala una brida roscada de 2" para conectarla con la bomba centrífuga. En la Figura 22 se muestra un esquema del montaje de tuberías realizado en el laboratorio para las pruebas de la bomba – turbina.

Figura 22 Esquema del montaje para las pruebas en el laboratorio



La Tabla 23 contiene el listado de materiales utilizados en el montaje del sistema de generación de energía.

Tabla 23 Descripción de los elementos del montaje para las pruebas

#	NOMBRE	CANTIDAD
1	Reducción 8" a 3"	1
2	Bridas acero roscada 3" x 150 lbs	3
3	Tubo PVC presión 3" (m)	6
4	Accesorio PVC T 3"	2
5	Ventosa 1 ½"	2
6	Contador de agua	1
7	Válvula de bola 3"	1
8	Unión universal PVC 3"	1
9	Reducción 3" a 2" PVC	1
10	Tubo PVC presión 2" (m)	2
11	Bridas acero roscada 2" x 150 lbs	3
12	Acople flexible	1

6.2 MÁQUINAS REVERSIBLES UTILIZADAS

El laboratorio de hidráulica tiene una bomba centrífuga acoplada a un motor, la cual facilita la realización de las pruebas. La bomba se encuentra acoplada por medio de un acople flexible tipo omega y además, ambos elementos están instalados en una base, fabricada a partir de perfiles de acero, para garantizar su alineación.

6.2.1 Bomba centrífuga

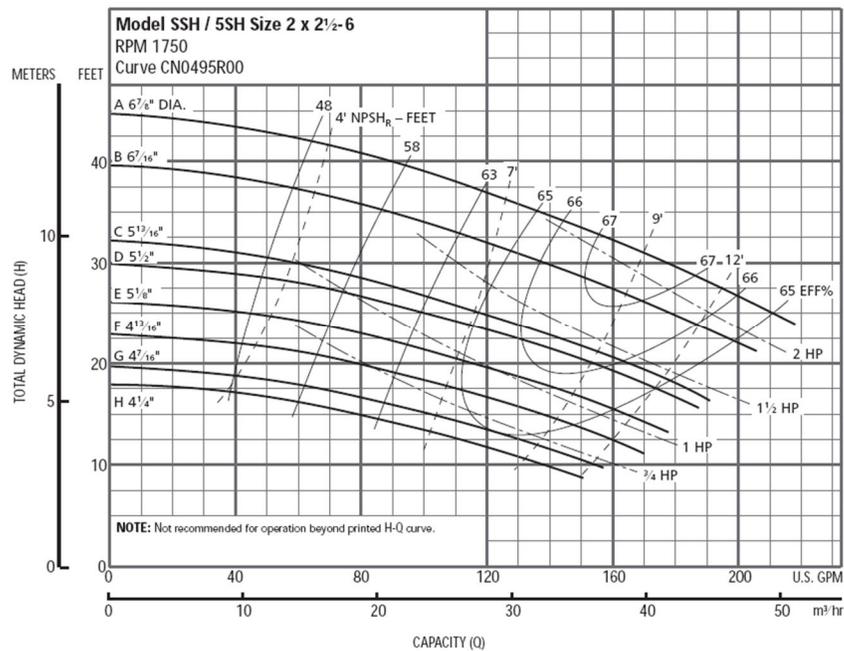
La bomba centrífuga con la cual se realizaron las pruebas en el laboratorio es una Gould Pumps serie SSH-C de 2"x2 1/2" en acero inoxidable. La bomba centrífuga se muestra en la Figura 23

Figura 23 Bomba Gould Pumps



En la Figura 24 se observa las curvas de rendimiento a 1750 RPM.

Figura 24 Curva característica de la bomba Gould Pumps



6.2.2 Motor asincrónico

El motor asincrónico utilizado como generador es un motor SIEMENS de 1.5 hp trifásico de 4 polos con tensión conmutable 220/440V. Arranque directo a 220V ó 440V (SIEMENS) . En la Figura 25 se muestra la bomba y el motor del laboratorio, acoplados y en su base.

Figura 25 Bomba y motor del laboratorio de hidráulica

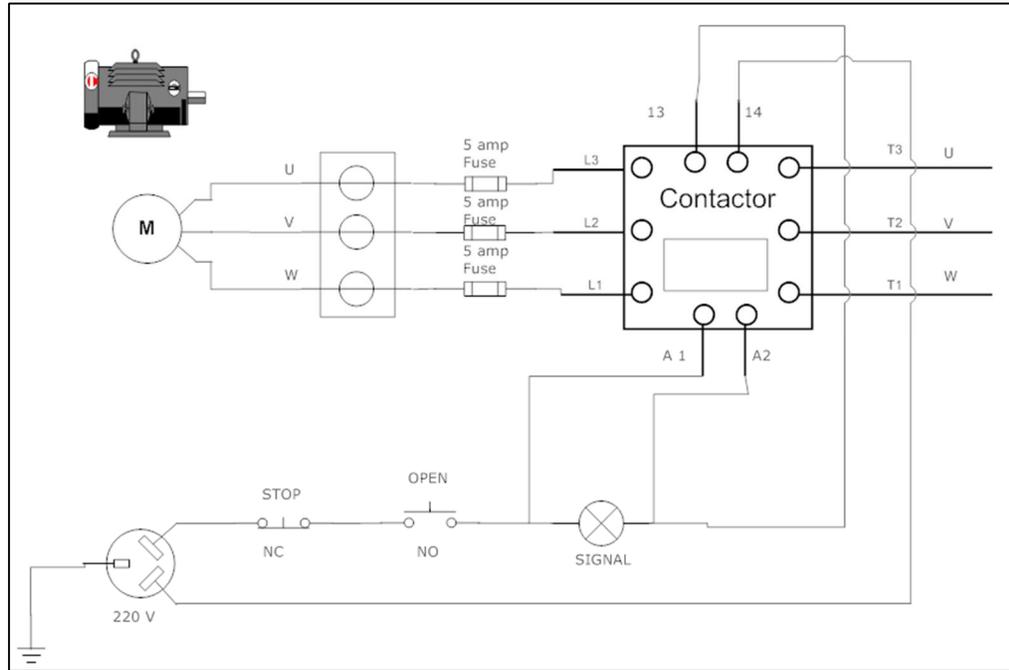


6.3 CONFIGURACIÓN ELÉCTRICA PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA

6.3.1 Protección y Control del sistema

La generación el sistema, se protege con fusibles y un contactor de 220 V, el cual fue conectado a la red eléctrica de la Universidad para que las pruebas no se afecten por el consumo de este contactor, con el fin de prevenir accidentes. El sistema cuenta con dos botones, uno para el encendido y otro para el apagado. El botón de encendido energiza el contactor para permitir el flujo de energía desde el motor – generador hasta la resistencia y el botón rojo corta el paso de la energía hacia el contactor. En la Figura 26 se muestra el esquema de las conexiones.

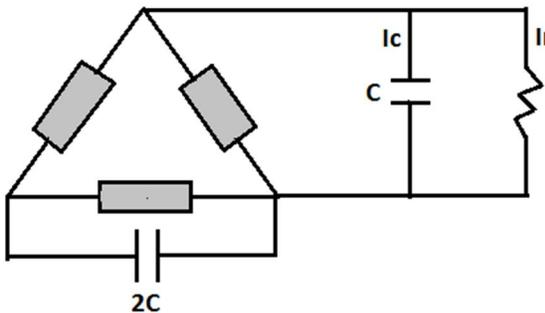
Figura 26 Esquema de protección y control del sistema



6.3.2 Circuito de capacitores y carga

Para la generación de energía con el motor asíncrono se utiliza la configuración de capacitancia C-2C, donde una capacitancia C está conectada en paralelo con la carga y una capacitancia de 2C está conectada con la fase atrasada, este arreglo se hace para compensar la carga desbalanceada del generador. Con este arreglo la generación es monofásica, que es el tipo de energía residencial. La conexión C-2C se muestra en la Figura 27

Figura 27 Conexión C-2C



Se calcula la capacitancia necesaria para el motor del laboratorio (Smith, 2008)

Se calcula la potencia total aparente:

$$\sum S_{NO\ CARGA} = \sqrt{3} \times V_{Linea} \times I_{Linea} = \sqrt{3} \times 220 \times 5 = 1905,3VAR \quad (14)$$

Como la potencia total aparente sin carga es igual a la potencia reactiva tenemos:

$$\sum Q = \sum S_{NO\ CARGA} = 1905,3VAR \quad (15)$$

Luego, se calcula la potencia reactiva por fase

$$Q_{Fase} = \frac{Q}{3} = \frac{1905,25589}{3} = 635,09VAR \quad (16)$$

Para capacitores conectados en delta:

$$V_{fase} = V_{linea} = 220V \quad (17)$$

Se calcula la corriente de la fase:

$$I_{fase} = \frac{Q_{fase}}{V_{fase}} = \frac{635,09}{220} = 2,9A \quad (18)$$

Luego se calcula el valor de la capacitancia:

$$C = \frac{I}{2\pi fV} = \frac{2,9}{2\pi \times 60 \times 220} = 34,9\mu F \approx 35\mu F \quad (19)$$

La capacitancia calculada es de 35 μF . Lo que significa que en un arreglo C-2C, seria decir 35-70 μF respectivamente.

Al motor se le conecta una resistencia de estufa eléctrica de 1100 W a 220 V para poder consumir la energía eléctrica generada. En la Figura 28 y Figura 29 se muestra el esquema de la conexión de los capacitores y la resistencia eléctrica y una imagen del montaje eléctrico. Donde V,U,W son las tres salidas del motor, R es una resistencia eléctrica de estufa. Además se muestra a que líneas deben estar conectados los capacitores

Figura 28 Esquema conexión de los capacitores y la resistencia

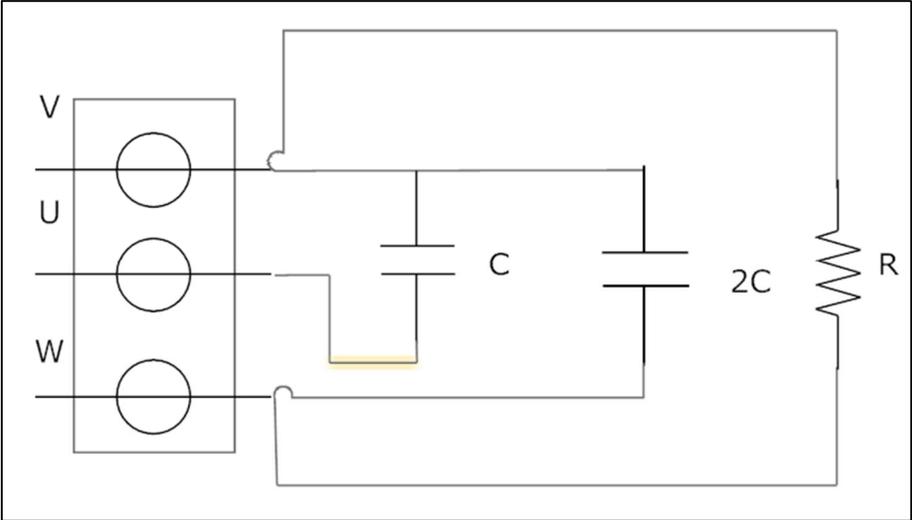
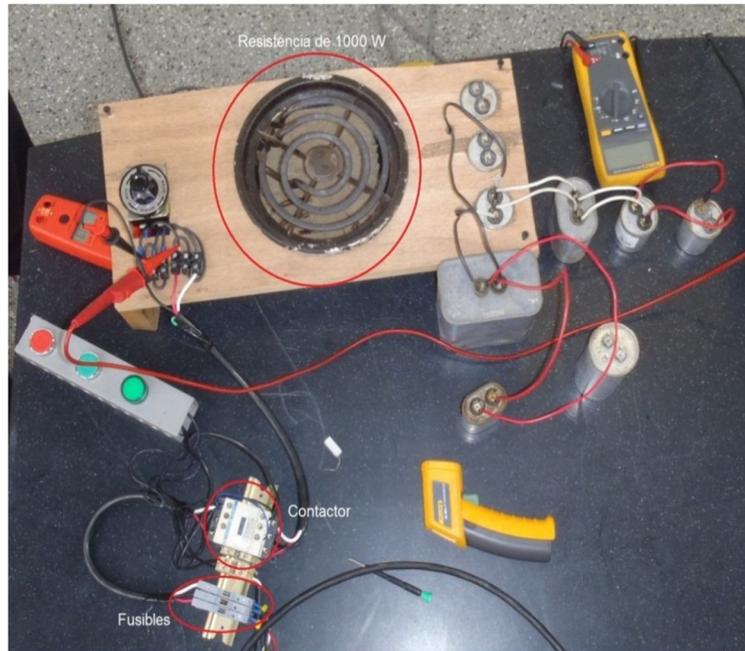


Figura 29 Circuito para las pruebas del laboratorio



6.4 INSTRUMENTACIÓN UTILIZADA EN LAS PRUEBAS

Una vez definido y realizado el montaje se procede a tomar las lecturas correspondientes de las variables hidráulicas de caudal y presión, además de otras variables relacionadas con el motor como temperatura, velocidad de giro, frecuencia, voltaje y corriente generados. Para esto fue necesario contar con varios instrumentos de medición.

6.4.1 Medición del Caudal

Para la medición de caudal se instala inicialmente una placa orificio, los resultados obtenidos con este instrumento no eran confiables, ya que los resultados se vieron afectados por el aire que circula en el sistema. Por esta razón se decidió instalar un contador de agua ELSTER, el cual es más confiable en comparación con el instrumento mencionado anteriormente. El valor del caudal se toma cronometrando el tiempo de un giro de la manecilla del contador de agua. Un giro indica un volumen de 10 l/s, dividiendo por el tiempo cronometrado se obtiene el

caudal. Para cada medición, se cronometra 3 veces para promediar el valor del caudal. En la Figura 30 se muestra el contador de agua.

Figura 30 Contador de agua instalado para las pruebas en el laboratorio



6.4.2 Presión

Para la medición de presión a la entrada y salida de la bomba se instalan anillos piezométricos. A la entrada se acoplan racores roscados en la brida de acero al carbón. A la salida de la bomba, en la tubería de PVC, también se instaló el anillo piezométrico para realizar la medición de presión. Los transductores utilizados tienen un rango de 0 – 60 psi con una respuesta en corriente de 4 - 20mA, son marca Noshok y tienen una precisión de $\pm 0.25\%$, (NOSHOK). Los transductores fueron calibrados en el laboratorio de hidráulica de la universidad EAFIT para verificar su precisión. Estos fueron conectados al sistema COMPACT RIO 9074, para la adquisición de datos. Los valores de presión se monitorean y analizan mediante un programa en LabVIEW.

En la Figura 31 se muestran los transductores en la entrada y salida de la bomba.

Figura 31 Sensores de presión instalados en la bomba

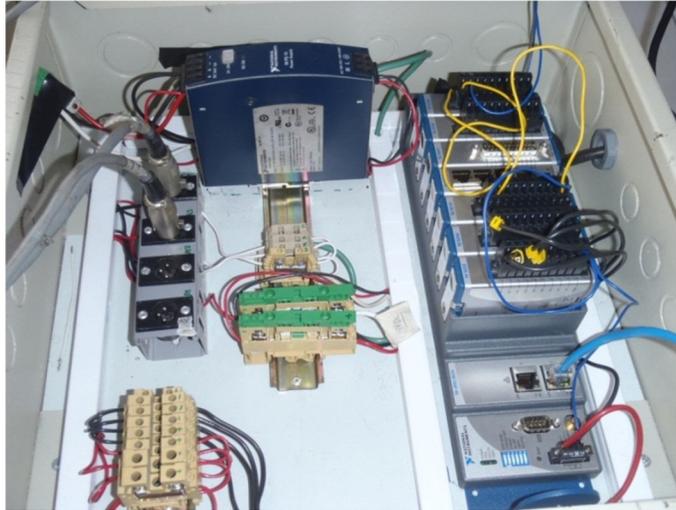


6.4.3 Adquisición de las señales de presión

Para el proyecto se realizó un montaje para la adquisición de datos de la presión a la entrada y salida de la bomba. Se utilizó un dispositivo de National InstrumentTM, el CompactRIO permite tomar los datos y llevarlos a una interfaz de LabVIEW. El controlador de automatización programable (PAC) NI CompactRIO es un sistema reconfigurable de control y adquisición. El sistema tiene módulos industriales de entradas y salidas (E/S) intercambiables en vivo. El sistema tiene una variedad de puertos de entrada y salida, incluyendo entradas de termopares de ± 80 mV, E/S analógicas de muestreo simultáneo de ± 10 V, E/S digital e industrial de 24 V con capacidad de corriente de hasta 1 A, entradas digitales diferenciales/TTL con salida de suministro regulado de 5 V para codificadores y entradas digitales universales de 250 V_{rms}." (National Instruments)

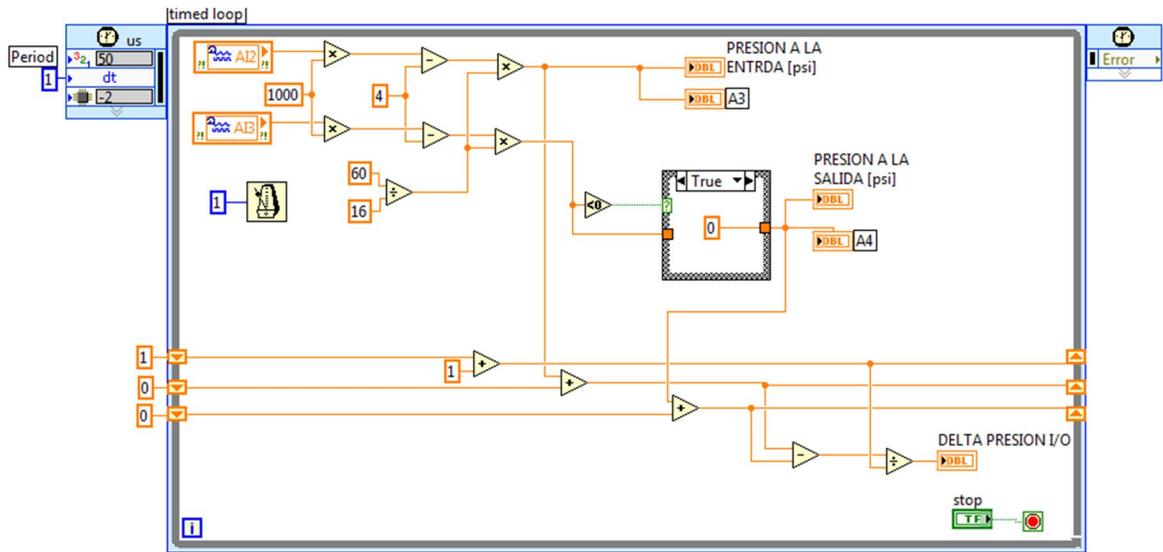
El resultado de sistema de adquisición de datos se observa en la Figura 32, el cual quedara funcionado para el laboratorio de hidráulica.

Figura 32 Fotografía sistema de adquisición de datos para las pruebas de laboratorio



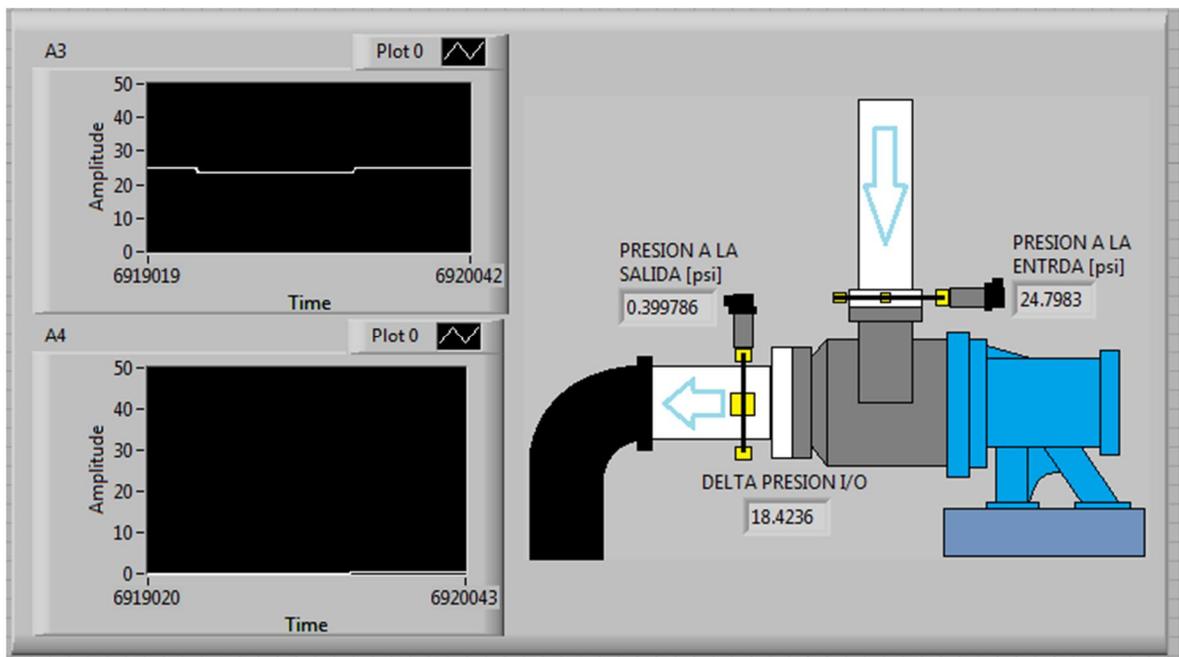
Para visualizar los datos, se programa en LabVIEW® un algoritmo para la toma de datos de presión a la entrada y salida de la bomba. El algoritmo convierte la señal de los transductores, que está en mA, a valores de presión en psi. En la Figura 33 se muestra el diagrama de bloques de la aplicación en LabVIEW, este lee los datos adquiridos por el CompactRIO y realiza la conversión de mA a psi, según la curva de calibración. Además, cada señal adquirida se almacena y se promedia.

Figura 33 Programa en LabVIEW® para lectura de presiones



En la Figura 34 se muestra la interfaz del programa, donde se observan los valores de presión a la entrada y salida con su respectiva grafica.

Figura 34 Interfaz del programa en LabVIEW



6.4.4 Temperatura

Durante las pruebas de generación con la bomba-turbina se toma la temperatura del motor y la resistencia para cada configuración de capacitores, estas fueron obtenidas con un termómetro infrarrojo digital Fluke 62. El rango de temperatura es de -30°C a 500°C y la precisión es del 1% de la lectura. Ver Figura 35. (Fluke Corporation)

Figura 35 Termómetro infrarrojo Fluke



(Fluke Corporation)

6.4.5 Revoluciones

Para medir las revoluciones del motor se utiliza un tacómetro digital Tecpel 1501. El rango de medidas de 10 a 99999 rpm con una precisión del 0,04%. Ver Figura 1.

Figura 36 Tacómetro digital Tecpel



(TECPEL)

6.4.6 Frecuencia y voltaje

La frecuencia y el voltaje generado por el motor se obtienen con un osciloscopio Fluke 192b. Ver Figura 37.

Figura 37 Osciloscopio Fluke



(Fluke Corporation)

6.4.7 Corriente

El valor de la corriente generada por el motor, fue obtenido con un medidor de corriente digital Meterman AC71. Ver Figura 38.

Figura 38 Medidor de corriente digital Meterman



(TEquipment)

NOMENCLATURA

C: Capacitancia

I: Corriente

Q : Potencia reactiva

S : Potencia aparente

V : Voltaje

7 PRUEBAS DE LABORATORIO PARA EL SISTEMA DE PICOGENERACIÓN HIDROELÉCTRICA CON MÁQUINAS REVERSIBLES

Las pruebas fueron realizadas en el laboratorio de fluidos de la Universidad EAFIT, con la intención de conocer de manera experimental el funcionamiento de un sistema de generación similar al propuesto. Además, de comprobar la eficiencia de este tipo de generación y definir la dificultad técnica que tiene.

7.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

Las pruebas consisten en medir las principales variables hidráulicas y eléctricas, cuando el motor este generando con los capacitores calculados, para determinar la eficiencia entre la generación teórica y la del laboratorio. Luego se varía la magnitud de la capacitancia para observar las variaciones.

La eficiencia se calcula de la siguiente manera:

$$Eficiencia = \frac{Potencia\ Electrica\ generada\ [W]}{Potencia\ Hidraulica\ [W]} \quad (20)$$

La carga eléctrica de la resistencia de estufa eléctrica de 1100 W, siempre esta alto, para todas las pruebas. El montaje hidráulico instalado restringe el caudal máximo a 12 l/s. El caudal se disminuye desviando una parte del mismo hacia el canal del laboratorio, pero esto, solo brindaba un pequeño rango de variación. La presión a la entrada de la bomba, depende del caudal utilizado en cada prueba. Estos inconvenientes limitan el rango de pruebas. Además, se dispone de pocas combinaciones de capacitancia.

El punto de mejor eficiencia de la bomba del laboratorio en modo turbina, el cual es de 17 l/s, el cual es un valor cercano al caudal máximo de prueba. La cabeza en el mejor punto de operación de la bomba como turbina es de 12m, la cual solo se alcanza en algunas pruebas; además, esta variable no puede manipularse de manera independiente puesto que depende del caudal. Este aspecto condiciona de entrada la eficiencia obtenida en las pruebas ya que, la mayor eficiencia se presenta al operar cercano al mejor punto de operación como máquina reversible.

7.2 PROCEDIMIENTO

Al inicio de las pruebas se utiliza con una capacitancia de 35 μF en arreglo C-2C. Luego se disminuye la magnitud, hasta poder evidenciar la disminución de la eficiencia. Después se aumenta la capacitancia hasta comprobar, que la eficiencia no mejora.

Para cada arreglo de capacitancia se mide el caudal máximo que pasa por el sistema, luego se miden las demás variables con los equipos dispuestos especialmente para cada medición y se registran los datos en un formato. Después se repite el proceso disminuyendo el caudal, hasta alcanzar el caudal mínimo requerido para la generación para cada configuración de capacitancia.

Una vez se encuentra el caudal mínimo de generación, se cambia la magnitud de la capacitancia equivalente, utilizando distintas configuraciones de serie y paralelo de los capacitores. Lo anterior, con el fin de volver a realizar la misma secuencia de toma de datos.

La capacitancia se incrementa hasta evidenciar que el motor se frena y por ende disminuye la generación de electricidad.

7.3 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS

Los resultados obtenidos de muestran en la siguiente Tabla 24

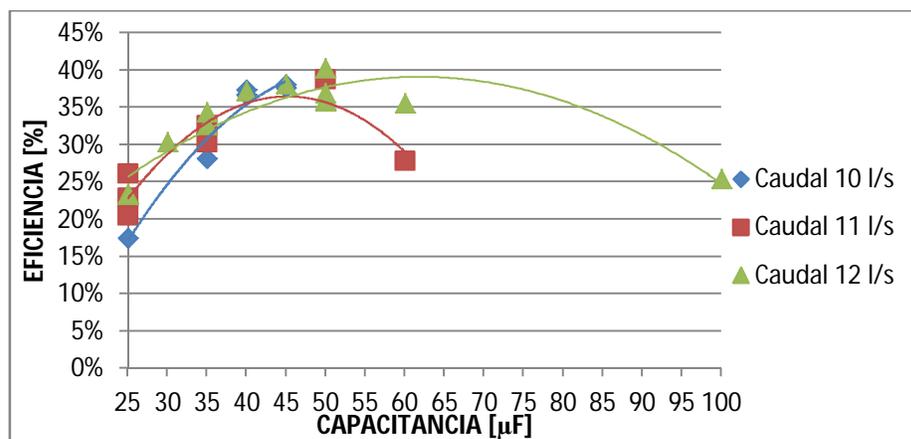
Tabla 24 Datos obtenidos de las pruebas de laboratorio

SISTEMA							MOTOR		SISTEMA ELECTRICO					CAPACITORES C-2C		Eficiencia [%]
Q [l/s]	Q [m3/s]	Vin [m/s]	V out [m/s]	P [PSI]	H [m]	PH [W]	rpm	T motor [°c]	V1	V2	A1	f [Hz]	P E [w]	2C	C	
10	0,010	5,2	3,3	14,41	11,0	1131	1750	32,8	112,8	1,75	56,9	197	50	25	17%	
11	0,011	5,6	3,6	16,02	12,3	1360	1765	32,1	148	2,1	56,5	311	50	25	23%	
11	0,011	5,6	3,6	14,77	11,4	1272	1760	36,2	127	2,05	56,3	260	50	25	20%	
12	0,012	5,9	3,8	16,15	11,3	1319	1776	27,2	144	2,15	56,8	310	50	25	23%	
12	0,012	5,8	3,7	15,64	11,0	1253	1766	35,6	135,8	2,15	56,3	292	50	25	23%	
12	0,012	5,8	3,7	15,81	12,2	1409	1697	38	168	2,55	54,3	428	60	30	30%	
10	0,010	4,9	3,2	11,82	9,1	893	1495	30,4	125,9	2	47,8	252	70	35	28%	
11	0,011	5,3	3,4	13,08	10,1	1077	1534	34	145	2,25	49,1	326	70	35	30%	
11	0,011	5,6	3,6	14,08	10,9	1219	1576	37	159	2,5	50,3	398	70	35	33%	
12	0,012	6,2	3,9	15,12	11,9	1449	1635	36,4	178	2,8	52,2	498	70	35	34%	
12	0,012	5,9	3,8	14,6	11,4	1329	1609	40,8	167	2,6	51,3	434	70	35	33%	
7	0,007	3,4	2,2	8,5	6,4	439	1358	43,6	87	1,35	43,3	117	80	40	27%	
10	0,010	5,2	3,3	12,58	9,7	1001	1516	54	156	2,4	47,9	374	80	40	37%	
10	0,010	4,9	3,2	12,02	9,3	907	1479	**	148	2,25	47,1	333	80	40	37%	
12	0,012	5,9	3,8	15	11,7	1362	1621	54	181	2,8	51,2	507	80	40	37%	
9	0,009	4,3	2,7	9,6	7,4	628	1329	40	118	1,85	42,36	218	90	45	35%	
10	0,010	5,2	3,3	12,1	9,4	965	1445	45,6	153	2,4	46	367	90	45	38%	
10	0,010	4,9	3,1	11,14	8,6	842	1405	47	144	2,2	44,8	317	90	45	38%	
12	0,012	5,8	3,7	14,3	11,1	1278	1541	36,4	174	2,8	48,8	487	90	45	38%	
11	0,011	5,3	3,4	12,46	9,7	1016	1441	**	160,5	2,45	46	393	100	50	39%	
12	0,012	5,8	3,7	14,98	11,6	1348	1550	**	187,4	2,9	49,2	543	100	50	40%	
12	0,012	5,7	3,7	13,96	10,9	1241	1477	37,8	170	2,7	46	459	100	50	37%	
11	0,011	5,4	3,4	15,71	12,0	1283	1335	**	148,5	2,4	42,3	356	120	60	28%	
12	0,012	5,9	3,8	14,71	11,5	1346	1433	**	174	2,75	45,3	479	120	60	36%	
12	0,012	5,9	3,8	14,62	11,4	1330	1192	**	147	2,3	36	338	200	100	25%	

7.4 ANÁLISIS DE LAS PRUEBAS

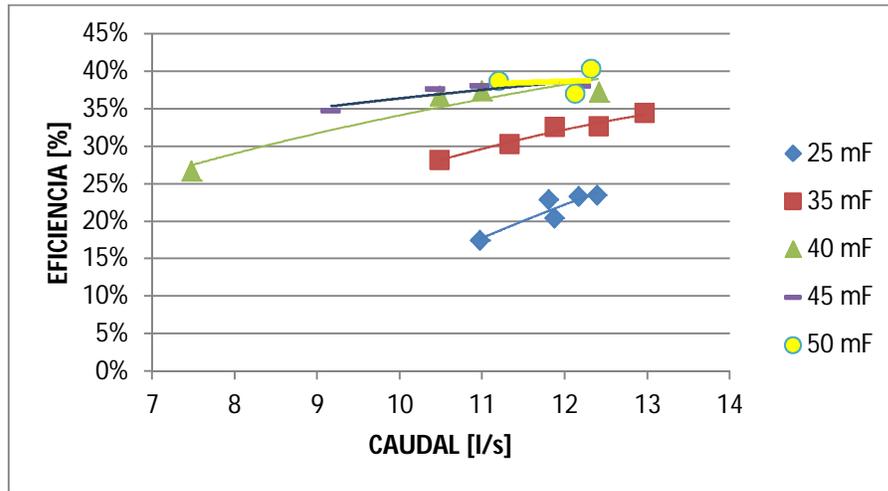
Al graficar la capacitancia contra la eficiencia, para los distintos caudales, se puede comprobar que el mejor punto obtenido es con la combinación 50-100 μF . Estos valores de capacitancia se alejan de los valores calculados inicialmente. Ver Figura 39

Figura 39 Gráfica Capacitancia Vs Eficiencia para diferentes caudales



Como se dijo antes el montaje solo permite manejar un caudal máximo de 12 l/s, pero la gráfica de caudal contra la eficiencia para los diferentes capacitores, muestra que al aumentar el caudal la eficiencia aumenta, lo que hace pensar que si se realizan pruebas con un caudal mayor puede obtenerse una mayor eficiencia. (Ver Figura 40).

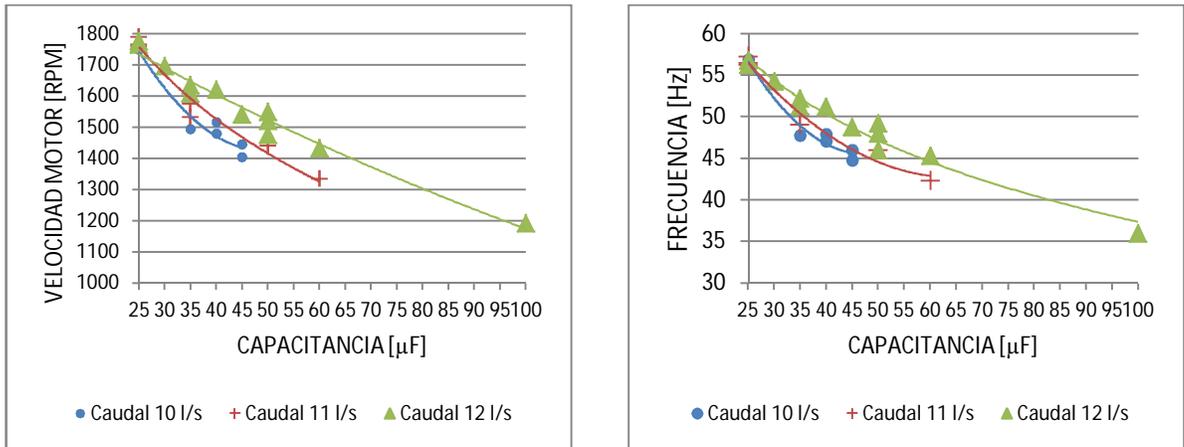
Figura 40 Gráfica Caudal Vs Eficiencia para diferente capacitancia



Previamente se dijo que para que un motor asíncrono genere, debe de alcanzar la velocidad sincrónica, que para el caso del motor instalado es de 1800 rpm. De acuerdo con los resultados el motor genera a velocidades menores. Y si observamos la gráficas de la Figura 41, se ve la relación entre la velocidad de rotación y la frecuencia. Podemos concluir que al aumentar la capacitancia disminuye la velocidad de rotación y la frecuencia. Esto debido a que se aumenta los reactivos para la excitación y esto frena el motor.

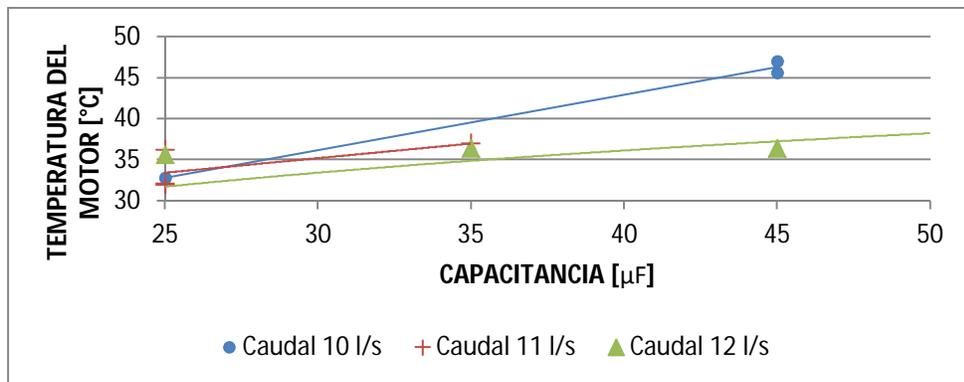
En las pruebas realizadas no se alcanza una frecuencia de 60Hz, debido a que nunca se alcanza la velocidad sincrónica de 1800rpm. Esto va en contra de la calidad de la energía eléctrica generada, lo que implica la necesidad de corregir la frecuencia, para que alcance los 60 Hz. Puede ser necesario incrementar la velocidad de rotación del motor, lo cual puede lograrse incrementando el caudal; como se mencionó anteriormente. Lo anterior, puede representar también incremento en la eficiencia.

Figura 41 Gráfica Capacitancia Vs Velocidad Rotativa y frecuencia



Al generar energía con un motor asíncrono, se debe de tener especial cuidado en la temperatura que pueda alcanzar, debido a que si es muy alta, puede dañar el bobinado. De acuerdo a la Figura 42, donde se grafica la capacitancia contra la temperatura del motor, para cada caudal, se puede observar como al aumentar la capacitancia, aumenta la temperatura en el motor. Esto puede ser ocasionado por la saturación de reactivos generados por los capacitores, en el bobinado.

Figura 42 Capacitancia Vs Temperatura del motor para diferentes caudales



La Figura 43 muestra una foto térmica tomada al motor durante las pruebas, se puede observar que la temperatura es uniforme en todo el motor y que para la prueba, el motor no alcanza una temperatura muy alta.

Figura 43 Fotografía térmica del motor



Al momento de realizar las pruebas, se observa que el valor del voltaje es inestable, e igualmente el de la corriente y la frecuencia. Esto indica que puede ser necesario un sistema de regulación eléctrico para que el sistema de generación eléctrica pueda ser utilizado para suministrar energía a equipos que no soportan estas variaciones.

8 ELEMENTOS COMPLEMENTARIOS PARA LA PICO GENERACIÓN

El proyecto se diseña para que funcione a filo del agua ya que toma el agua directamente de la quebrada y después es devuelta a su mismo cauce unos metros abajo.

8.1 ESTRUCTURAS CIVILES

Se pretende mencionar las principales obras civiles necesarias para la pico generación. Cabe aclarar que para implementar este proyecto respecto a dichas obras, se necesitan estudios técnicos en el lugar de aplicación y personal experto para el diseño y construcción de los mismos. En este caso solo se hacen descripciones generales para hacer una valoración económica preliminar.

8.1.1 Bocatoma

Esta obra permite tomar el caudal deseado, captándolo por medio de una rejilla. Ya que para el proyecto se captara un pequeño caudal se sugiere una bocatoma como se observa en la Figura 44.

Figura 44 Fotografías de bocatomas sugeridas



(Comisión Europea, 1998)

La ubicación más apropiada para una bocatoma es en los tramos rectos y estables del río, (Quintero, 2009). Por lo que se recomienda ubicarla en el punto donde se midió el caudal.

El diseño de la bocatoma se calcula para obtener las principales medidas, para poder estimar los costos de construcción. El método aplicado es tomado de la tesis de grado llamada Metodologías de diseño de obras hidráulicas en estudios de pre factibilidad de pequeñas centrales hidroeléctricas, (Quintero, 2009)

Información de la quebrada:

Caudal diseño= 0,142 m³/s (practico)

Caudal máximo = 0,71 m³/s (5 veces el caudal diseño, teórico)

Ancho del rio= 2,15m

Se calcula la altura del agua:

$$H_l = \left(\frac{Q}{1,84 L}\right)^{2/3} = \left(\frac{0,142}{1,84 \times 2,15}\right)^{2/3} = 0,11m \quad (21)$$

Velocidad del río sobre la presa:

$$V_r = \frac{Q}{L \times H_l} = \frac{0,142}{2,15 \times 0,11} = 0,61 \frac{m}{s} \quad (22)$$

Como $0,3 m/s < 0,61m/s < 3m/s$

Se pueden aplicar las ecuaciones de H. Babbit, para calcular el ancho del canal colector

Ancho canal de colector (B):

$$X_s = 0,36 \times (0,61)^{2/3} + 0,60 \times (0,11)^{4/7} = 0,43m \quad (23)$$

$$X_i = 0,18 \times (0,61)^{4/7} + 0,74 \times (0,11)^{3/4} = 0,28m \quad (24)$$

$$B = 0,43 + 0,10 = 0,53m \quad (25)$$

Longitud de la rejilla y número de orificios:

Se sugiere barrotes de 1", con una separación entre ellos de 2". Por otra parte, se supone la velocidad entre barrotes igual a 0,3 m/s.

$$A_n = \frac{Q}{0,9 \times V_b} = \frac{0,142}{0,9 \times 0,3} = 0,52m^2 \quad (26)$$

$$L_r = \left(\frac{a+b}{a}\right) \frac{A_n}{B} = \left(\frac{0,05 + 0,0254}{0,05}\right) \frac{0,52}{0,53} = 1,5m \quad (27)$$

El número de espacios es de:

$$N = \frac{A_n}{a \times B} = \frac{0,52}{0,05 \times 0,53} \approx 20 \text{ espacios} \quad (28)$$

$$0,3 \text{ m/s} < 1,4 \text{ m/s} < 3 \text{ m/s}$$

Las principales medidas de la bocatoma se muestran en la Figura 45 y la Figura 46, de las cuales algunas fueron calculadas, y las otras fueron sugeridas por una Ingeniera de Aguas Gina Espinal Pérez.

Figura 45 Vista frontal de la bocatoma

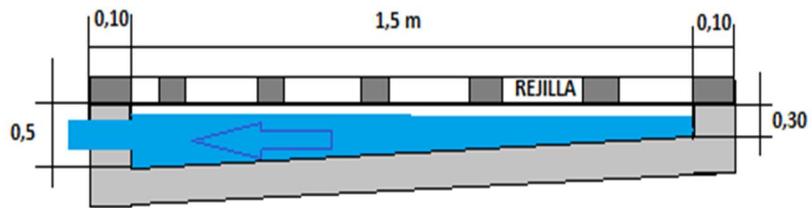
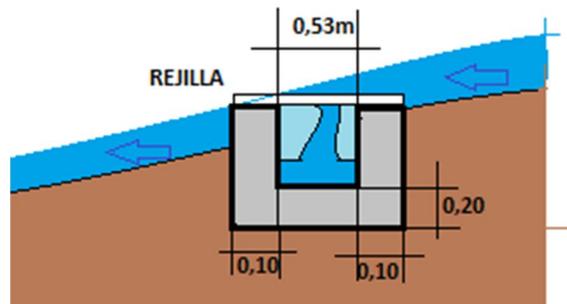
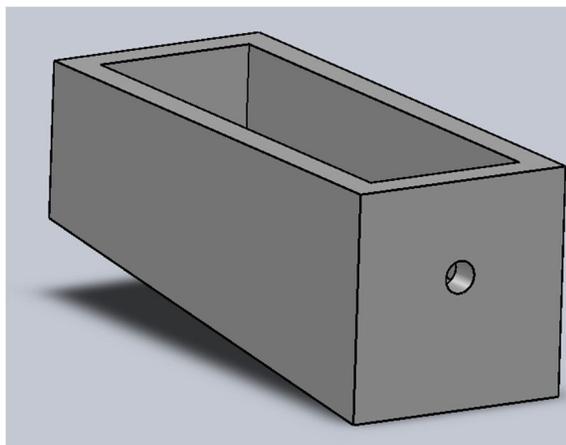


Figura 46 Vista lateral de la sección de la bocatoma



Se calcula el volumen de hormigón requerido para la construcción de la bocatoma por medio de un modelo en software CAD. El volumen es igual a $0,43 \text{ m}^3$. Ver Figura 47

Figura 47 Modelo CAD de la bocatoma



El valor del m³ de hormigón reforzado, puesto en el lugar, es aproximadamente de \$380,000, con esto se calcula el costo de la bocatoma. En la Tabla 25 se muestra los costos aproximados de la construcción de la bocatoma.

Tabla 25 Precio de la construcción de la bocatoma

Precio del volumen de hormigón reforzado para la bocatoma	\$ 162.602,00
Precio de la rejilla de aducción. (0,53x1,5m)	\$ 200.000,00
TOTAL PRECIO BOCATOMA	\$ 362.602,00

8.1.2 Obra de conducción

Es el ducto o canal que conduce el agua desde la bocatoma hasta el desarenador, normalmente tiene una pequeña pendiente para reducir la velocidad pero se debe garantizar que no se decanten las partículas en este. Para el sistema se sugiere una tubería de PEAD (Polietileno de alta densidad) de diámetro 4" (70-80 lbs), por 3 metros de largo.

8.1.3 Desarenador

Esta obra permite que las partículas sean decantadas, así se impide que la bomba sufra algún daño o deterioro por efecto de la suciedad. Funciona como un tanque desde el cual el agua se conduce por medio de tubería hasta la bomba-turbina. Se sugiere un tanque con una relación de longitud de 3:1 donde las medidas sugeridas por un Ingeniero de Aguas, se muestran en la Figura 48 y en la Figura 49

Figura 48 Vista frontal del desarenador

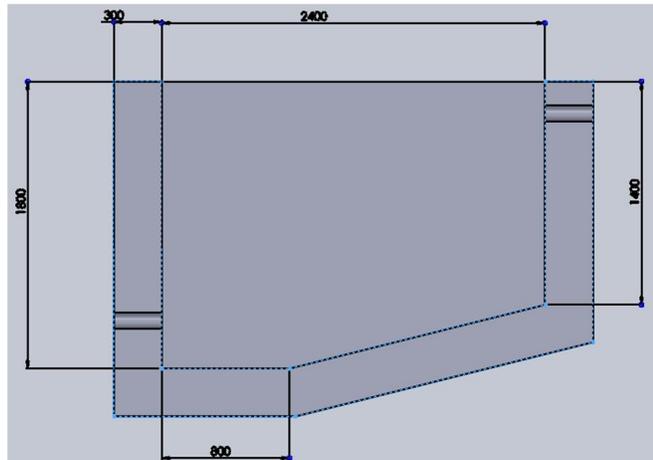
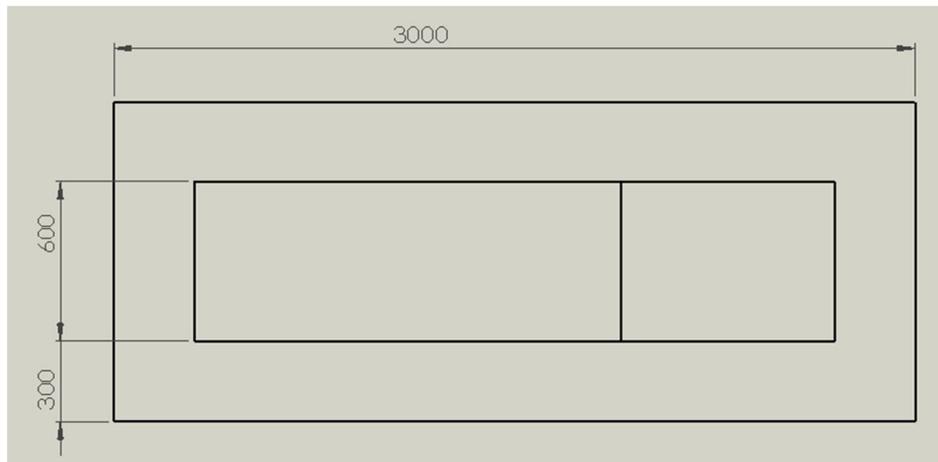
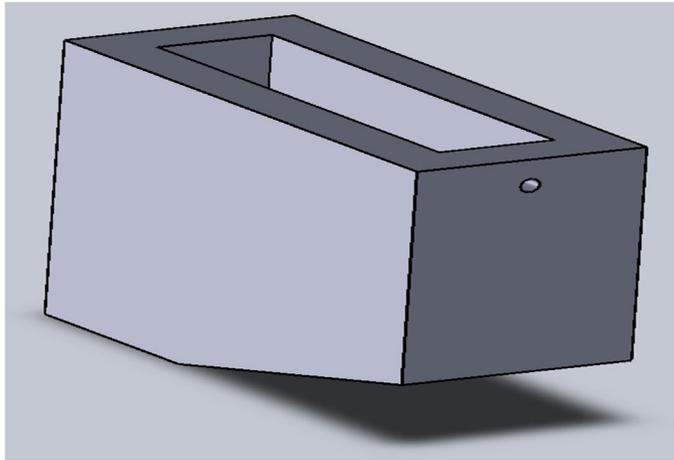


Figura 49 Vista de planta del desarenador



Se calcula el volumen de hormigón requerido para la construcción por medio de un modelo, en un software CAD. El volumen es de $4,6\text{m}^3$. Ver Figura 50

Figura 50 Modelo CAD del desarenador



Con el valor del m^3 de hormigón reforzado, dado anteriormente, se calcula el costo de la bocatoma. En la Tabla 26 se muestra el costo total de la construcción del desarenador.

Tabla 26 Precio de construcción del desarenador

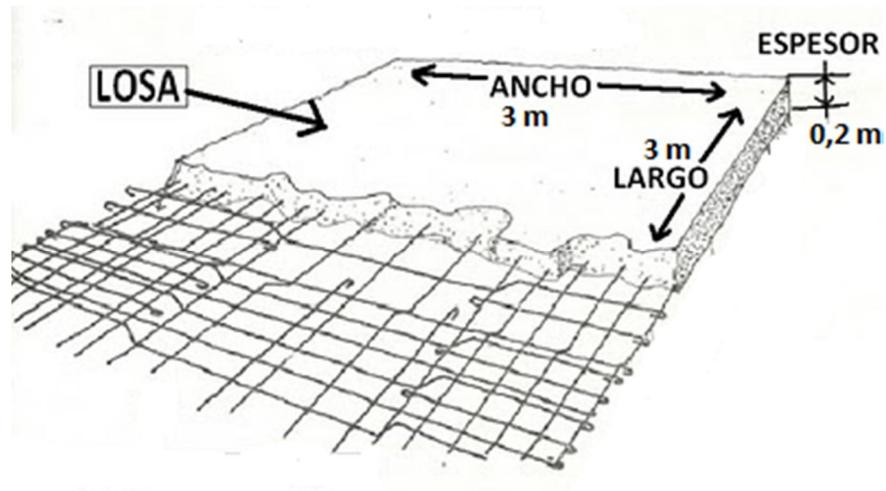
Volumen total [m^3]	4,6
Precio del volumen desarenador	\$ 1.748.000

8.1.4 Casa de máquinas

Se sugiere que la casa de máquinas sea fabricada en construcción tradicional, para más seguridad y resistencia. Las dimensiones son: área de $2m^2$ y 2m de alto. La casa de máquinas, que es el corazón del proyecto, es donde se ubica la bomba, el motor, el banco de capacitores, las resistencias y el sistema de control de carga. Este espacio debe de ser lo suficientemente amplio para permitir, el mantenimiento básico de los equipos en el lugar. Para la construcción se requiere una placa de sedimentación en hormigón de 3x3 metros

Para la placa con las dimensiones mostradas en la Figura 51

Figura 51 Placa de sedimentación



(Blogspot)

Se calcula el volumen de la placa y el precio del hormigón necesario para su construcción.

$$V_{placa} = A \times L \times e = 3 \times 3 \times 0,20 = 1,8 \text{ m}^3 \quad (29)$$

$$Precio = 1,8 \times 380,000 = \$684,000 \quad (30)$$

En la Tabla 27 se muestran los valores aproximados de la construcción de la casa de máquinas en construcción tradicional (mampostería)

Tabla 27 Precio construcción de casa de máquinas

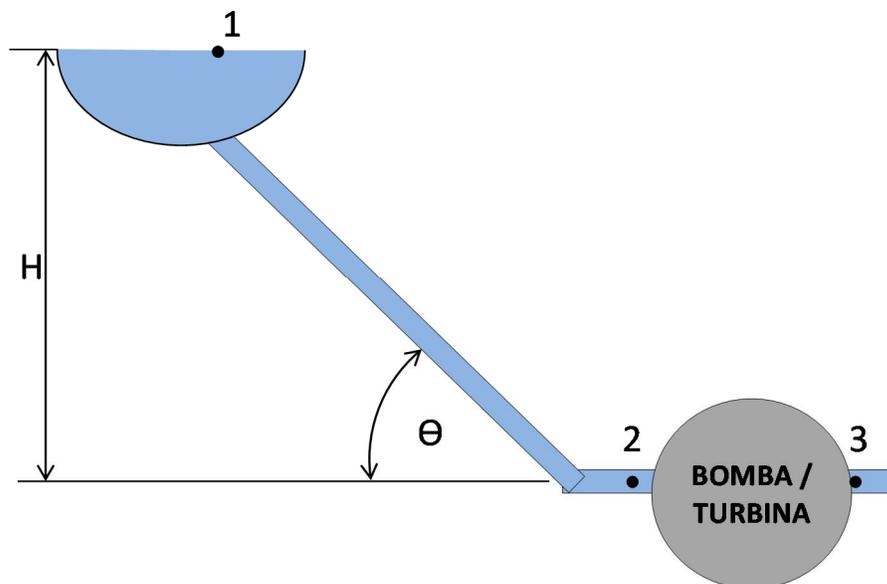
Muros	\$	527.000
Techo	\$	182.000
Varios	\$	200.000
Placa de sedimentación	\$	684.000
Mano de Obra	\$	350.000
TOTAL	\$	1.943.000

8.1.5 Tubería de conducción

Para calcular la longitud aproximada es necesario primero calcular la altura, necesaria para compensar el nivel de pérdidas. Además, esto permite conocer la altura del cuarto de máquinas con respecto a la bocatoma

Para esto se determina tres puntos en el montaje, el punto uno será la bocatoma a una altura H , al nivel del suelo se encuentra el punto 2, que es la entrada de la bomba como turbina, (descarga en modo Bomba) y el punto 3 que también está al nivel del suelo que es la descarga de la bomba en modo turbina. (Ver Figura 52).

Figura 52 Diagrama de Alturas



Dado la Tabla 28 :

Tabla 28 Información para calcular la presión de entrada del sistema

Densidad del agua	997	m^3/s
Viscosidad del agua	8,91E-04	Pa-s

Caudal	0,029234	m ³ /s
Cabeza turbina h_t	24,39024	M
Diámetro de descarga (2)	3	In
	0,0762	M
Diámetro de succión (3)	4	In
	0,1016	M

Primero calculamos la presión a la entrada de la bomba como turbina considerando conservación de energía entre el punto 2 y 3 tenemos:

$$\frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} = \frac{V_3^2}{2g} + h_t \quad (31)$$

De donde puede encontrarse la presión en el punto 2.

$$P_2 = \frac{1}{2}(V_3^2 - V_2^2)\rho + \rho g h_t \quad (32)$$

La velocidad en el punto 3 se encuentra como:

$$V_3 = \frac{Q}{\frac{\pi}{4}D_3^2} = 3,6 \text{ m/s} \quad (33)$$

La velocidad en el punto 2 se encuentra como:

$$V_2 = \frac{Q}{\frac{\pi}{4}D_2^2} = 6,4 \text{ m/s} \quad (34)$$

Con los datos anteriores la presión la entrada de la bomba/turbina es:

$$P_2 = \frac{1}{2}(3,6^2 - 6,4^2)997 + 997 \times 9,81 \times 24,4 \approx 224547,1 \text{ Pa} = 32,6 \text{ PSI} \quad (35)$$

Considerando conservación de energía entre el punto 1 y el punto 2 se determina la altura de la bocatoma.

$$H = h_l + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} \quad (36)$$

Donde:

$$h_l = f \left(\frac{L}{D} \right) \frac{V^2}{2g} \quad (37)$$

$$L = \frac{H}{\sin\theta} \quad (38)$$

$$f = (0,790 \ln(Re) - 1,64)^{-2} \text{ para } 3000 < Re < 5 \times 10^6 \quad (39)$$

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} = 4,10 \times 10^5 \quad (40)$$

$$f = 0,013616 \quad (41)$$

Dado H= 31,8m se calcula L:

$$L = \frac{H}{\sin\theta} = \frac{31,8}{0,4} = 75,8m \quad (42)$$

Se calcula la cabeza de pérdida:

$$h_l = 0,013616 \left(\frac{75,8}{0,1016} \right) \frac{3,6^2}{2 \times 9,8} = 6,7m \quad (43)$$

Luego, se encuentra la altura entre la bocatoma y la casa de máquinas:

$$H = 6,7 + \frac{224547,1}{997 \times 9,81} + \frac{6,4^2}{2 \times 9,81} = 31,8 m \quad (44)$$

La bocatoma deberá quedar a una altura de 31,8 m con respecto a la casa de máquinas, lo cual cubre las pérdidas por fricción en la tubería. La tubería sugerida es la misma que se utilizara para la conducción, la cual es de PEAD de 4", con una longitud de 75,8 m. Esta tubería es capaz de soportar la presión del sistema, y

puede quedar expuesta en el terreno. El precio dado por Central de manguera se muestra en la Tabla 29

Tabla 29 Precio tubería conducción

DESCRIPCION	PRECIO
Tubería de PEAD 4"x 100mts (70-80 lbs)	\$2'617,192

8.1.6 Cable para el transporte de energía

Desde el cuarto de máquinas hasta la escuela hay aproximadamente 300m, medidos con un GPS. El sistema requiere entonces el transporte de la energía generada por una tubería eléctrica de media pulgada, esta debe ir enterrada para llevar el cable hasta la escuela.

El calibre del cable de acuerdo con su capacidad de corriente. Se sugiere el # 8 ya que este tiene una capacidad máxima de 24 amperios (PowerStream). Para la instalación de la bomba-turbina se necesitarían 600 metros de cable calibre #8 con un precio de \$2.350 más IVA y se requiere de 300 metros de tubería eléctrica de ½" con un precio \$2.000 el tubo de 3 metros más IVA. También se sugiere instalar en el cuarto de máquinas un polo a tierra de protección con una Varilla Copperweld de 3 metros de longitud y 16 milímetros de diámetro, esta tiene un valor aproximado de \$ 50.000 mil pesos.

8.2 OTROS

8.2.1 Banco de capacitores y resistencias para la carga

Como se ha dicho anteriormente, el motor necesita un banco de capacitores, los cuales deben de ser montados de manera independiente en una caja con conexión a tierra. Además, para consumir la energía que no se está utilizando se sugiere instalar resistencias eléctricas de estufa.

8.2.2 Sistema electrónico para el control de carga

Este tipo de generación requiere un sistema que controle la carga, es decir cuando no se esté consumiendo energía, se deben de activar un grupo de resistencias para disipar la potencia consumida. El ELC (Electronic Load Controller) es un dispositivo electrónico que básicamente consta de las partes mostradas en la

Tabla 30

Tabla 30 Componentes básicos de un ELC

ELEMENTO	COSTO \$
2 transductores 20A /0,5V	\$130,000 aprox.
Comparador 500-55	\$100,000 aprox.
Relé de transferencia	\$60,000 aprox.
Mano de Obra	\$500,000 aprox.
TOTAL	\$790,000

NOMENCLATURA

A_n : Área neta de la rejilla

B : Ancho canal colector

f : factor de fricción

g : aceleración de la gravedad

H : Altura de la bocatoma

H_l : altura de la lamina

h_l : pérdidas hidráulicas

h_T : Cabeza hidráulica de la turbina

L : Longitud de la tubería

μ : Viscosidad dinamica del fluido

P : Presion

Re : Numero de Reynolds

ρ : Densidad del fluido

V : Velocidad

V_{placa} : Volumen de la placa

V_r : Velocidad del rio

X_i : Alcance lamina inferior

X_s : Alcance lamina superior

9 EVALUACIÓN FINANCIERA DE LA IMPLEMENTACION DE EL PROYECTO

Para analizar la viabilidad económica de la bomba como turbina en la escuela rural de Barbosa se hicieron varios estudios económicos para comparar las diferentes opciones de obtener energía. En estos estudios el horizonte del proyecto son 10 años para así poder analizar con el valor actual del dinero cual opción es más viable. Las opciones a comparar fueron la bomba como turbina con un motor asíncrono como generador financiando el proyecto a 5 años y sin financiación. La tercera opción fue comprar una planta diesel de contado que cumpla con las mismas condiciones de generación de la bomba-turbina y por último la conexión a la red eléctrica, con la cual es la situación actual. En los análisis se halla el valor presente neto de las cuatro opciones con una tasa de descuento del 8% para así determinar cuál de estas opciones es la más favorable.

El consumo proyectado de energía a 10 años se realizó teniendo en cuenta que en 5 años la escuela adquiere computadores incrementando el consumo de energía. El consumo actual es de 4145.16 kW/H por año y en el año 5 sería de 5614.16 kW/H.

9.1 ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA OPCIÓN BOMBA–TURBINA

Para poner en funcionamiento la bomba turbina en la escuela es necesario construir una bocatoma y un cuarto de máquinas. Además, se requiere 75 metros de manguera de polietileno en 4" desde la bocatoma hasta el cuarto de máquinas. También se tiene en cuenta el cableado eléctrico desde el cuarto de máquinas hasta la escuela en cable calibre #8. La inversión inicial considera los elementos del sistema de generación de energía hidroeléctrica que son: Bomba centrífuga HIDROMAC 80200^a, motor WEG de 10 hp y ELC. En la Tabla 31 se presenta el detalle de las inversiones requeridas.

Tabla 31 Inversiones Bomba-Turbina

CONCEPTO	VALOR	FRACCIÓN
Obras civiles	\$ 4.053.602	22%
Tuberia	\$ 2.617.192	14%
Cable	\$ 1.869.982	10%
Instalacion	\$ 1.000.000	6%
Bomba	\$ 3.563.520	20%
Motor	\$ 2.545.040	14%
Acople	\$ 1.740.000	10%
ELC	\$ 790.000	4%
TOTAL	\$ 18.179.336	100%

Para la operación confiable del sistema pico generación se requiere realizar un mantenimiento preventivo que consiste en una revisión general semestral y un cambio anual de sellos de la bomba y de rodamientos del motor. Los costos anuales de mantenimiento y operación de la bomba – turbina se observan en la Tabla 32

Tabla 32 Costos de operación Bomba-Turbina

CONCEPTO	VALOR
Rodamientos motor	\$ 80.000,00
Sellos bomba	\$ 60.000,00
Mano de obra mantenimiento	\$ 60.000,00
TOTAL	\$ 200.000,00

En la Tabla 33 se presenta el análisis económico para la opción bomba turbina sin financiación. En este se considera la inversión inicial de \$18'179.336 pesos y los costos anuales de mantenimiento, cuyo valor se ajusta con el Índice de Precios al Consumido (IPC). Para esta alternativa el VPN es de \$ 19'754.749 pesos.

Tabla 33 Flujo de caja Bomba-Turbina sin financiación

	AÑO										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
IPC	3,50%	3,20%	3,20%	3,20%	3,20%	3,20%	3,20%	3,20%	3,20%	3,20%	3,20%
Inversión inicial	-\$18.179.336										
Costos mtto y operación		-\$ 207.000	-\$ 213.624	-\$ 220.460	-\$ 227.515	-\$ 234.795	-\$ 242.309	-\$ 250.062	-\$ 258.064	-\$ 266.323	-\$ 274.845
FLUJO DE CAJA NETO	-\$18.179.336	-\$ 207.000	-\$ 213.624	-\$ 220.460	-\$ 227.515	-\$ 234.795	-\$ 242.309	-\$ 250.062	-\$ 258.064	-\$ 266.323	-\$ 274.845
VALOR PRESENTE NETO	-\$19.754.749										

En la Tabla 34 se presenta el análisis económico para la opción bomba turbina con financiación a 5 años con interés anual del 23.9%. En este se considera la inversión inicial de \$18'179.336 pesos con pagos anuales \$ 6'604.174 pesos por 5 años y los costos anuales de mantenimiento, cuyo valor se ajusta con el IPC. Para esta alternativa el VPN es de \$ 27'943.965 pesos.

Tabla 34 Flujo de caja Bomba-Turbina con financiación.

	AÑO										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
IPC	3,50%	3,20%	3,20%	3,20%	3,20%	3,20%	3,20%	3,20%	3,20%	3,20%	3,20%
Inversión inicial	-\$18.179.336										
Préstamo	\$18.179.336	-\$6.604.174	-\$6.604.174	-\$6.604.174	-\$6.604.174	-\$6.604.174					
Costos mtto y operación		-\$ 207.000	-\$ 213.624	-\$ 220.460	-\$ 227.515	-\$ 234.795	-\$ 242.309	-\$ 250.062	-\$ 258.064	-\$ 266.323	-\$ 274.845
FLUJO DE CAJA NETO	\$ -	-\$6.811.174	-\$6.817.798	-\$6.824.634	-\$6.831.688	-\$6.838.969	-\$ 242.309	-\$ 250.062	-\$ 258.064	-\$ 266.323	-\$ 274.845
VALOR PRESENTE NETO	-\$27.943.965										

9.2 ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA OPCIÓN CON LA PLANTA DIESEL

La opción para la generación de energía con una planta diesel la cual funciona durante la jornada de estudio que son 6 horas diarias de lunes a viernes. La planta electrogeneradora considerada es marca KAMA de 6.5 kW. Estas plantas requieren de cambio de aceite cada 75 horas, cuando su uso continuo, así como también cambio de filtro de aceite y gasolina cada 6 meses. En esta opción se

considera una inversión inicial de \$ 2'760.800 pesos y los costos anuales de mantenimiento y operación, para los cuales se considera el alza del precio del combustible de acuerdo con el IPC. Para esta alternativa el VPN es de \$48'529.349 pesos. En la siguiente Tabla 35 se observa el análisis financiero de esta opción.

Tabla 35 Flujo de caja planta Diesel

	AÑO										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
IPC	3,50%	3,20%	3,20%	3,20%	3,20%	3,20%	3,20%	3,20%	3,20%	3,20%	3,20%
Inversión inicial	-\$ 2.760.800										
Costos mtto y operación		-\$6.013.716	-\$6.206.155	-\$6.404.752	-\$6.609.704	-\$6.821.215	-\$7.039.494	-\$7.264.757	-\$7.497.230	-\$7.737.141	-\$7.984.730
FLUJO DE CAJA NETO	-\$ 2.760.800	-\$6.013.716	-\$6.206.155	-\$6.404.752	-\$6.609.704	-\$6.821.215	-\$7.039.494	-\$7.264.757	-\$7.497.230	-\$7.737.141	-\$7.984.730
VALOR PRESENTE NETO	-\$48.529.349										

9.3 ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA OPCIÓN DE LA RED ELÉCTRICA

Por último, el sistema de conexión a la red eléctrica el cual tiene un costo de \$140 pesos el kWh y anualmente consumen 4145kWh, en los primeros 5 años. Esto representa un costo anual de \$600.634. El precio del kWh se proyecta también con un valor de inflación de 3.2% anual. Además, se tiene en cuenta que en el quinto año el consumo aumenta a 5614kWh, debido a los nuevos computadores. Para esta alternativa el VPN es de \$ 5'453.900 pesos. En la siguiente Tabla 36 se observa el análisis financiero de la red de interconexión eléctrica instalada actualmente.

Tabla 36 Flujo de caja red eléctrica

	AÑO										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
IPC	3,50%	3,20%	3,20%	3,20%	3,20%	3,20%	3,20%	3,20%	3,20%	3,20%	3,20%
Costo kW-h	\$ 140,00	\$ 144,90	\$ 149,54	\$ 154,32	\$ 159,26	\$ 164,36	\$ 169,62	\$ 175,04	\$ 180,65	\$ 186,43	\$ 192,39
Costos mtto y operación	\$ -	-\$ 600.634	-\$ 619.854	-\$ 639.689	-\$ 660.159	-\$ 922.727	-\$ 952.254	-\$ 982.726	-\$1.014.173	-\$1.046.627	-\$1.080.119
FLUJO DE CAJA NETO	\$ -	-\$ 600.634	-\$ 619.854	-\$ 639.689	-\$ 660.159	-\$ 922.727	-\$ 952.254	-\$ 982.726	-\$1.014.173	-\$1.046.627	-\$1.080.119
VALOR PRESENTE NETO	-\$ 5.453.900										

Al analizar los valores presentes netos de cada una de las cuatro opciones se concluye que la opción más viable para este problema sería seguir utilizando la instalación para la red de interconexión eléctrica. Sin embargo, al comparar el VPN de la opción de bomba-turbina con y sin financiación contra la opción de la planta diesel, como se observa en la Tabla 37, resulta más viable la opción de la bomba- turbina con y sin financiación. Este último caso se puede considerar si el lugar de aplicación del proyecto es en una zona no interconectada. La opción de la bomba-turbina sin financiación es \$ 27'523.058 pesos más económico que opción de la planta diesel y si la bomba-turbina se financia es \$ 19'674.897 pesos más económico que una planta diesel. Además, la bomba-turbina tiene ventajas como el bajo costo de mantenimiento anual y que esta genera energía durante las 24 horas del día sin implicar costos adicionales.

Tabla 37 Valor presente de las opciones sin interconexión eléctrica

Bomba-Turbina sin financiación	Bomba-Turbina con financiación	Planta diesel
\$ 18,997,639	\$ 26,845,800	\$ 46,520,697

CONCLUSIONES

El proyecto de pico generación para una escuela rural es técnicamente viable ya que es posible y poco complejo utilizar una bomba como turbina y un motor asíncrono como generador para la generación de energía eléctrica, como se evidencio en las pruebas de laboratorio. En cuanto a la viabilidad financiera se concluye que la implementación del proyecto resulta ventajoso cuando se trata de una ZNI. En zonas interconectadas resulta mas viable financieramente utilizar la energía de la red

Se logró recolectar suficiente información acerca de generación eléctrica con máquinas reversibles. Lo cual permite tener unas bases de estudio. En Colombia los estudios más importantes se han realizado en la Universidad del Valle, de donde se pudo obtener información pertinente, gracias al curso dictado en dicha universidad por el Profesor Ramiro Ortiz.

En el mundo se han realizado estudios teóricos, experimentales y simulaciones en distintas instituciones académicas Además, se encontraron algunas aplicaciones de generación de energía eléctrica con máquinas reversibles para comunidades, la cuales resultaron exitosas. En general, los estudios concluyen que la eficiencia de la bomba como turbina es muy cercana a la eficiencia como bomba

El caudal de la quebrada la Guayabera, de la vereda Buga del municipio de Barbosa, se midió exitosamente, en verano, lo cual hace pensar que es el caudal mínimo para esa quebrada. El caudal medido fue de 142 l/s, este valor es suficiente para un aprovechamiento energético, pensando en que la topografía del sitio permite utilizar bajos caudales y cabezas hidráulicas altas.

La potencia eléctrica instalada en la escuela es de 3.3kW y se espera que en 10 años alcance 5kW. Considerando un factor de simultaneidad de 0.8 se estima una potencia de diseño para el sistema de generación de 4kW, buscando no sobredimensionar el sistema. Además, cuando se va a suministrar energía a algún establecimiento, es importante proyectar la demanda a 10 años, para garantizar la durabilidad del proyecto.

Para la selección de la bomba se utilizaron los valores de los coeficientes propuestos por Mc Claskey, los cuales son similares a los valores propuestos por Sharma-Williams. Los factores entre todos los autores difieren entre ellos, lo cual crea una cierta incertidumbre.

La selección de la potencia del motor asíncrono, para trabajar como generador depende de la bomba seleccionada, las otras características del motor son definidas por la literatura, cuando va a trabajar como generador. La bomba seleccionada es una Hidromac modelo 80-200A y el motor seleccionado es un WEG trifásico de 10HP.

Se logró realizar un montaje para las pruebas de desempeño de la bomba en modo turbina y el motor como generador, sin embargo el mismo, montaje restringía el rango del caudal, alcanzado 12 l/s Además el sistema no permitía controlar la presión.

La mayor eficiencia global del sistema de generación alcanzada en las pruebas de laboratorio es igual al 40% y se logró con una capacitancia de 50 μ F. Este valor de eficiencia es relativamente bajo ya que en el estado del arte se reporta que la eficiencia de la bomba como turbina, es similar a la del modo bomba. Sin embargo, esto se cumple alrededor del BEP como turbina, y en las pruebas no se alcanzó el caudal necesario en este punto.

El valor de la capacitancia es mayor del calculado teóricamente, lo cual comprueba que hay que ajustar los valores de la capacitancia experimentalmente.

El aumento de la capacitancia aumenta la temperatura del motor, además, disminuyen la velocidad de rotación del motor y en consecuencia la frecuencia. La calidad de la frecuencia dependerá de la velocidad rotativa que alcance el motor. En las pruebas no se logró llegar a las 1800rpm con el motor, el resultado de esto es que la frecuencia nunca llegó a los 60Hz, que es la frecuencia utilizada para nuestros equipos.

Se sugieren los principales complementos necesarios para la pico central. Las medidas de las obras civiles fueron estimadas para poder tener una idea del costo de estas. Estas obras civiles juegan un papel importante ya que representan una fracción importante en los costos totales del proyecto.

Comparada con la red de interconexión eléctrica la opción de la bomba-turbina no resulta ventajosa desde el punto de vista financiero. Pero si se necesita tener energía en un lugar remoto sin red eléctrica y se tiene disponibilidad de recurso hídrico aprovechable, la opción de bomba-turbina es una opción financieramente viable, ya que se puede generar energía las 24 horas del día sin tener la necesidad de comprar combustible como se debe hacer con una planta electrogeneradora diesel. La mayor diferencia entre las opciones de la bomba – turbina y la planta eléctrica es la inversión inicial y sus costos de mantenimiento, cuando la bomba-turbina tiene una inversión inicial de \$18'179.336 y la planta eléctrica de \$2'760.800 presentando una diferencia considerable. Sin embargo, los costos de operación y mantenimiento de la planta eléctrica son muy altos (\$6'013.716), más aun si su uso es continuo. Es por esto que la bomba-turbina es más viable desde el punto de vista financiero, ya que sus costos anuales de mantenimiento y operación son bajos (\$200.000).

RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Medir el caudal de la quebrada, en diferentes épocas del año para poder determinar su comportamiento durante todo el año.

Para disminuir la potencia eléctrica requerida en la escuela se recomienda utilizar bombillos LED. Una bombilla LED utiliza la décima parte de energía de un bombillo incandescente de 100 W. Además, de cambiar la estufa eléctrica a estufa de gas.

Para lograr mayores caudales en el montaje del laboratorio se recomienda una tubería con un diámetro mayor a 3". Además, lograr configurar el medidor de caudal para conectarlo al sistema de adquisición de datos.

La disminución del rango de los transductores del montaje en el laboratorio, de 60 psi, podría mejorar las mediciones ya que el sistema no generaba más de 20 psi.

Utilizar un banco de capacitores más adecuado y seguro que permita tener más combinaciones de ellos.

Como trabajo futuro se propone crear un controlador de carga. Además, realizar pruebas con este y una unidad UPS (Uninterrupted Power System) para corregir la frecuencia.

Realizar las pruebas de laboratorio en el punto de mejor eficiencia de la bomba. Además, realizar pruebas con diferentes cargas eléctricas para estudiar más a fondo el comportamiento del motor como generador.

Se recomienda la asesoría de expertos en construcción de obras civiles para aprovechamientos hidráulicos, y una visita al lugar propuesto para determinar su implementación.

Realizar la selección de la bomba como turbina aplicando un método que se base en la velocidad específica.

Investigar que sistemas de protección necesitaría este tipo de pico centrales.

BIBLIOGRAFÍA

Audisio, Orlando. 2011. BOMBAS UTILIZADAS COMO TURBINAS. [En línea] Mayo de 2011. <http://fainweb.uncoma.edu.ar/centraleshidraulicas/archivos/PCH-BOMBAS%20COMO%20TURBINAS.PDF>.

Blogspot. Armado de una losa de concreto. [En línea] <http://armadodelosa.blogspot.com/>.

Bombas. 2008. Bombas Centrifugas. [En línea] WordPress, 2008. <http://bombascentrifugas.info-tecnica.org/>.

Comisión Europea. 1998. *Manual de pequeña hidraulica.* 1998.
El mundo en cifras. CIDOB, Anuario Internacional. 2008. 2008.

Fluke Corporation. Fluke. [En línea] <http://www.fluke.com/fluke/coes/instrumentos-de-medida-electricos/termometros-digitales/fluke-62.htm?PID=56096>.

Greacen, Chris. 2006. *Project report – Huai Kra Thing Micro-hydro project.* 2006.

HIDROMAC. Hidromac. [En línea] [Citado el: 2 de Octubre de 2011.] www.hidromac.com.

Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales. IDEAM. 1999. AFOROS LIQUIDOS. 1999.

Llamas Terres, Armando, y otros. 2005. *Plantas mini hidroeléctricas con bombas centrífugas y motores de inducción.* [Documento] Acapulco, México : s.n., 2005.

Macedo, Daniel de y Carvalho, Augusto Nelson. *Estudo de geradores de indução na geração de energia elétrica em microcentrais hidrelétricas.* s.l. : Instituto de Engenharia Elétrica.

MEDITECNA. Meditecna. [En línea] www.meditecna.com.

National Instruments. National Instruments Latino America. [En línea] <http://www.ni.com/compactrio/whatis/esa/>.

NOSHOK. NOSHOK. [En línea] http://www.noshok.com/100_series_current.shtml.

Ortiz, Ramiro. 2011. *Máquinas Reversibles aplicadas a microcentrales hidroeléctricas.* Cali : Colciencias, Universidad del Valle, 2011.

Planeación, Departamento Nacional de. 2010. *Los municipio Colombianos hacia los ODM.* 2010.

PowerStream. PowerStream. [En línea] http://www.powerstream.com/Wire_Size.htm.

QUIMINET. QUIMINET. [En línea] [Citado el: 12 de Agosto de 2011.] www.quiminet.com.

Quintero, Karen Beatriz. 2009. *Metodologías de diseño de obras hidraulicas en estudios de pre factibilidad de pequeñas centrales hidroelectricas.* Medellin : Universidad Nacional de Colombia, 2009.

R. Ortiz Flórez, J. A. Abella Jiménez. 2008. *Máquinas Hidráulicas Reversibles Aplicadas a Micro Centrales Hidroeléctricas.* s.l. : IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS, 2008.

Rawal, Sonia y Kshirsagar, J.T. 2011. NUMERICAL SIMULATION ON A PUMP OPERATING IN A TURBINE MODE. [En línea] Mayo de 2011. <http://turbolab.tamu.edu/uploads/files/papers/p23/P23Lec05.pdf>.

SIEMENS. [En línea] http://www.siemens.com.co/SiemensDotNetClient_Andina/medias/PDFS/70.pdf.

Smith, Nigel. 2008. *Motors as Generators for Micro Hydro Power.* s.l. : Practical action, 2008.

TECPEL. TECPEL. [En línea] <http://www.tecpel.net/RM-1501.html>.

TEquipment. TEquipment. [En línea] <http://www.tequipment.net/WavetekAC71.html>.

Terrés, Dr. Armando Llamas. *Plantas mini hidroeléctricas con bombas centrífugas y motores de inducción.* s.l. : ITESM Campus Monterrey.

Universidad Católica de la Santísima Concepción. Capitulo IV: Maquinaria Hidraulica. *Hidraulica en contorno cerrado.*

Universidad de Almería. Universidad Almeria. *Electrotecnia: Practica 6.* [En línea]
[Citado el: 2 de Octubre de 2011.] www.ual.es.

Universidad de la República - Uruguay. Facultad de Ingeniería. [En línea]
<http://www.fing.edu.uy>.