

# UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS

INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS Y APLICADAS.

CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO  
TECNOLOGICO EN ENERGÍAS RENOVABLES.

ÁREA DE INVESTIGACIÓN:  
DESARROLLO DE SISTEMAS ENERGETICOS  
RENOVABLES.

## TESIS

"DESARROLLO DE UN BANCO DE PRUEBAS DE  
TECNOLOGÍAS HIDRÁULICAS DE FUENTES  
RENOVABLES"

TESIS PARA LA OBTENCIÓN DEL GRADO DE:

MAESTRO EN MATERIALES Y SISTEMAS ENERGÉTICOS  
RENOVABLES.

AUTOR:  
EDER FABIÁN MEDINA MORALES

### DIRECTORES:

DR. NEÍN FARRERA VÁZQUEZ  
DR. JOEL MOREIRA ACOSTA

TUXTLA GUTIÉRREZ, CHIAPAS A 25 DE AGOSTO DE 2015.



## AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis padres; Eder Medina y Graciela Morales, y a mi hermana Keyla Stephanie, por ser pilares en mi vida y admirables ejemplos de perseverancia, por su apoyo incondicional en cada proyecto que he emprendido.

Agradezco a mi novia Maritza Alejandra por impulsarme a desarrollar la maestría, por acompañarme a lo largo de este proyecto y muchos otros.

Agradezco a mis demás familiares y amigos que me han brindado su apoyo.



Agradezco a mis directores el Dr. Joel Moreira Acosta y al Dr. Neín Farrera Vázquez por guiarme y aconsejarme durante el proyecto de Tesis y durante la maestría. Agradezco al Dr. Alejandro Nettel, al Dr. Francisco Pola Albores y al Dr. Pascual López de Paz por sus recomendaciones y su apoyo académico.

Agradezco también a los jóvenes del servicio social y voluntarios de UNICACH y UVM que colaboraron en el desarrollo de este proyecto.

Agradezco al *CONACYT* por el apoyo económico para desarrollar los estudios de maestría.

## **índice general**

	<i>Pág</i>
<b>ABSTRACT</b> .....	1
<b>CAPÍTULO 1 .- ANTECEDENTES</b> .....	2
1.1.- Introducción.....	2
1.2.- Problemática.....	8
1.3.- Justificación.....	10
1.4.- Referentes actuales.....	13
1.5.- Objetivos.....	17
1.6.- Restricciones.....	17
<b>CAPITULO 2.- FUNDAMENTOS TEÓRICOS</b> .....	19
2.1.- Aspectos Generales de las Energías Renovables.....	19
2.1.1.- Sustentabilidad.....	19
2.1.2.- Energías Renovables.....	20
2.1.3.- Energía Hidráulica.....	20
2.2.- Turbomáquinas Hidráulicas.....	23
2.2.1.- Definición de Máquina Hidráulica.....	23
2.2.2.- Turbinas.....	25
2.2.3.- Selección de Turbina.....	33
2.3.- Parámetros Hidráulicos.....	39
2.4.- Central Hidroeléctrica.....	42
<b>CAPITULO 3.- DISEÑO DEL BANCO DE PRUEBAS</b> .....	54
3.1.- Consideraciones para el diseño del banco.....	55
3.1.1.- Descripción de las funciones del banco de pruebas.....	56
3.1.2.- Determinación de las condiciones hidráulicas del sistema.....	57
3.2.- Diseño del Banco de Pruebas.....	58
3.2.1.- Diseño de la Torre.....	58
3.2.2.- Diseño del Sistema Hidráulico.....	69
3.3.- Dispositivos del banco de pruebas.....	73
3.3.1.- Sistema Micro Hidroeléctrico Michell Banki.....	73
3.3.2.- Sistema Micro Hidroeléctrico Turgo.....	74
3.3.3.- Instrumentos de Medición.....	76

<b>CAPITULO 4.- CONSTRUCCIÓN DEL BANCO DE PRUEBAS.....</b>	<b>79</b>
4.1.- Construcción de infraestructura.....	80
4.1.1.- Construcción de la torre.....	80
4.1.2.- Construcción del pozo.....	88
4.2.- Instalación de Sistema Hidráulico.....	90
4.3.- Instalación de dispositivos.....	95
4.3.1.- Instalación de sistemas hidroeléctricos.....	95
4.3.2.- Instalación bombas fotovoltaicas sumergibles.....	98
4.3.3.- Instalación de equipos de medición.....	99
<b>CAPITULO 5.- ENSAYOS DE S.M.H. Y RESULTADOS PRELIMINARES.....</b>	<b>103</b>
5.1.- Procedimiento de operación del banco de pruebas .....	104
5.2.- Resultados preliminares de ensayos en los S.M.H. ....	108
5.2.1.- Configuración Sistema 20 m y 4 in - Turgo.....	109
5.2.2.- Configuración Sistema 20 m y 6 in - Turgo.....	111
5.2.3.- Configuración Sistema 30 m y 4 in - Turgo.....	113
5.2.4.- Configuración Sistema 30 m y 6 in - Turgo.....	115
5.2.5.- Condiciones generales observadas en los sistemas hidráulicos.....	117
<b>CAPITULO 6.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>120</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....</b>	<b>122</b>

## **índice de figuras**

	<b>Pág.</b>
Fig. 1.1. Distribución de centrales hidroeléctricas en México.....	<b>5</b>
Fig.1.2.- Potencia generada a través de centrales hidroeléctricas en México.....	<b>5</b>
Fig. 1.3.- Centrales Hidroeléctricas construidas y en operación en Chiapas.....	<b>6</b>
Fig. 1.4.- Centrales Hidroeléctricas en desarrollo en Chiapas.....	<b>7</b>
Fig. 1.5.- Banco de ensayos: a) Turbina Peltón, b) Turbina Francis, c) Bombas axiales.....	<b>13</b>
Fig. 1.6.- Circuito de Cavitación.....	<b>14</b>
Fig. 1.7.- Banco de ensayos de Turbina: a) Francis, b) Peltón.....	<b>15</b>
Fig.2.1.- Clasificación de las Máquinas Hidráulicas.....	<b>24</b>
Fig. 2.2 Fenómeno de Acción y Reacción.....	<b>26</b>
Fig.2.3.- a)Turbina axial; b) Turbina radial; c) Turbina tangencial .....	<b>28</b>
Fig 2.4.- Turbina Fourneyron.....	<b>29</b>
Fig 2.5.- Turbina Heuschel-Jonval.....	<b>29</b>
Fig.2.6.- Turbina Francis.....	<b>29</b>
Fig 2.7.- Turbinas Kaplan.....	<b>30</b>
Fig. 2.8.- Turbina Peltón.....	<b>31</b>
Fig. 2.9.- Turbina Schwamkru .....	<b>31</b>
Fig. 2.10. Turbina Girard.....	<b>31</b>
Fig. 2.11.- Turbina Michel Banki.....	<b>31</b>
Fig.2.12. Matriz de elección de Turbinas.....	<b>34</b>
Fig.2.13. Componentes de un sistema Tugo.....	<b>35</b>
Fig. 2.14. Turbina Turgo.....	<b>35</b>
Fig. 2.15.- componentes de un sistema Michell - Banki.....	<b>36</b>
Fig. 2.16.- Vista interior de una Turbina Michel Banki.....	<b>37</b>
Fig. 2.17. Flujo Cruzado en una turbina Michel Banki.....	<b>38</b>
Fig 2.18.- Esquema de un S.M.H.....	<b>46</b>
Fig. 2.19.- Representación de las alturas en una central hidroeléctrica.....	<b>48</b>
Fig. 3.1. Dimensiones de la Zapata.....	<b>59</b>

## **índice de figuras**

Fig.3.2.- Vigas de Concreto y soportes metálicos de los Pilares de la torre.....	59
Fig.3.3.- Armazón metálica.....	60
Fig. 3.4.- Vista ubicación de pilares en el banco de pruebas.....	60
Fig. 3.5.- Diseño de abrazaderas.....	61
Fig. 3.6. Dimensiones y distribución de tornillos en los refuerzos verticales.....	62
Fig. 3.7. Ángulos de solera fijados en las patas de cada armazón.....	62
Fig. 3.7. Ángulos de solera fijados en las patas de cada armazón.....	63
Fig. 3.9. Dimensiones de la estructura de PTR.....	63
Fig. 3.10. Vista de la Lámina antiderrapante.....	64
Fig. 3.11. Vista de la estructura de PTR en la plataforma aérea a 20 metros.....	64
Fig. 3.12.- Plataforma a 30 metros.....	64
Fig.3.13. Ubicación del tanque de almacenamiento.....	65
Fig. 3.14. Dimensiones de la escalera marina (escalones desde la base y separación entre barandales).....	66
Fig. 3.15. Vista de la escalera marina anclada a una pata de la Torre Hidráulica....	66
Fig. 3.16 Dimensiones barandales de Escalera.....	66
Fig. 3.17. Vista - Barandales especiales en Plataforma a 20 m.....	67
Fig. 3.18. Vista Escalera en Plataforma a 30 m.....	67
Fig. 3.19. Dimensiones Galera del cuarto de Máquinas.....	68
Fig. 3.20. Vista de la Galera instalada en los pilares.....	68
Fig. 3.21. Vista - Barandales de seguridad en Plataforma.....	69
Fig.3.22. Tubería vertical en conexión: a) Vista Global, b) Cisterna 30 m. c) Cisterna 20 m.....	70
Fig. 3.23. Caudalímetros en las tuberías de descarga; para 4 in y 6 in.....	70
Fig. 3.24. Configuración Válvulas compuerta.....	72
Fig. 3.23. Sistema de Desfogue y retorno al pozo.....	72
Fig. 3.24. Sistema micro hidroeléctrico Michell Banki.....	74
Fig. 3.25.- Sistema micro hidroeléctrico Turgo.....	75
Fig. 3.26. Componentes del Equipo de Medición de Calidad de la Energía.....	76
Fig. 3.27. Equipo de Medición de Caudal.....	77
Fig. 3.28. Panel Inteligente de Montaje y sensor de presión.....	78
Fig. 4.1.Excavación fosa de las Zapatas.....	80
Fig. 4.2. a) Estructura interna de Zapatas, b) Zapatas cimentadas.....	81

## **índice de figuras**

Fig. 4.3. a) Construcción de vigas b) inserción bases de metal.....	82
Fig. 4.4. a) Cimbrado de Vigas, b) Vigas Cementadas.....	82
Fig. 4.5. Armazón Metálica.....	83
Fig. 4.6. Instalación de Armazones Metálicas (Medina, Fotografía, 2014).....	83
Fig.4.7. Adaptación de abrazaderas e instalación. Fig.4.7. Adaptación de abrazaderas e instalación.....	84
Fig.4.8. Refuerzos verticales.....	84
Fig. 4.9. Zapatas para tensores.....	85
Fig. 4.10. Estructura de PTR de Soporte.....	85
Fig.4.11. Lamina antiderrapante.....	86
Fig.4.12 Barandales de seguridad en plataformas.....	86
Fig.4.13. Estructura de soporte.....	87
Fig. 4.14. Barandales de seguridad en Escalera.....	87
Fig. 4.15. Reja de Seguridad.....	88
Fig. 4.16 Instalación de Maquinaria para excavación.....	88
Fig. 4.17. Sistema de represas.....	89
Fig.4.18. Ampliación del pozo.....	89
Fig.4.19. Tubería instalada en el Pozo.....	90
Fig. 4.20. Adecuación de Bridas de 4 y 6 in en Cisternas.....	91
Fig. 4.21. Instalación de Cisternas en las Plataformas.....	91
Fig.4.22. Línea hidráulica de Descarga.....	92
Fig. 4.23 Instalación de Caudalímetro.....	93
Fig. 4.24. Sistema de bifurcación y regulación de Caudal .....	93
Fig.4.25.. Línea hidráulica de desfogue.....	94
Fig. 4.26. Chimenea de Equilibrio de PVC Hidráulico.....	94
Fig. 4.27 Línea hidráulica de Alimentación.....	95
Fig. 4.28 Bóveda de desfogue para el sistema micro hidroeléctrico Michell Banki.....	96
Fig.4.29. Funda marco de Neopreno.....	97
Fig.4.30. Sistemas micro hidroeléctricos instalados.....	97
Fig. 4.31. Instalación de Bombas y Tubería dentro del pozo.....	98
Fig. 4.32. Conexión a la línea de suministro hacia la torre.....	98
Fig.4.33. Power Pad Datalogger.....	99

## **índice de figuras**

Fig. 4.34. Conexión del Sensor de Presión.....	100
Fig. 4.36. Instalación de anillos de tierra, juntas aislantes y bridas en el medidor de flujo magnético.....	101
Fig. 4.37. Montaje de convertidor MC308c.....	101
Fig.4.38.- Conexión del Medidor al Convertidor Euromag.....	103
Fig. 5.1.- Válvulas compuertas.....	104
Fig. 5.2.- Válvulas de llenado.....	105
Fig. 5.3.- Válvula tipo esfera para 4 in y Válvula tipo Wafer para 6 in.....	105
Fig. 5.4.- Caudalímetros en "Cero" .....	106
Fig. 5.5.- Medidor Futek y sensor de presión.....	106
Fig. 5.6.- Válvula compuerta.....	107
Fig. 5.7.- Válvula del inyector.....	107
Fig. 5.8.- Tablero de control y medidor de Calidad de Energía.....	108
Fig. 5.9. Comparación de Potencias Eléctricas - 20 m 4 in Turgo.....	109
Fig.5.10.- Comportamiento Presión y Potencia Eléctrica - 20 m4 in Turgo.....	110
Fig. 5.11.- Comportamiento Caudal y Potencia - 20m 4 in Turgo.....	110
Fig.5.12. Comparación de Potencias Eléctricas 20m 6 in - Turgo.....	111
Fig.5.13.- Comportamiento Presión y Pot. Eléctrica - 20 m 6 in Turgo.....	112
Fig.5.14.- Comportamiento Caudal y Pot. Eléctrica - 20m 6 in Turgo.....	112
Fig.5.15.- Comparación de Potencias Eléctricas - 30 m 4 in Turgo.....	113
Fig.5.16.- Comportamiento Presión y Potencia - 30 m 4 in Turgo.....	114
Fig.5.17.- Comportamiento Caudal y Potencia - 30 m 4 in Turgo.....	114
Fig.5.18. Comparación de Potencias Eléctricas 20m 6 in - Turgo.....	115
Fig.5.19.- Comportamiento Presión y Potencia - 30 m 4 in Turgo.....	116
Fig.5.20.- Comportamiento Caudal y Potencia - 30 m 4 in Turgo.....	116
Fig.5.21.- Comportamiento Caudal y Potencia - 30 m 4 in Turgo.....	117
Fig.5.22.- Comportamiento Caudal y Potencia - 30 m 4 in Turgo.....	118
Fig.5.23.- Comportamiento de la Potencia con relación al Caudal y la Presión.....	119
Fig.5.24.- Proyección de Potencias en el Sistema Turgo.....	120

## **índice de tablas**

	<i>Pág.</i>
Tabla 1.1.- Capacidad Efectiva a través de Hidroeléctricas en Chiapas.....	<b>6</b>
Tabla 1.2.- Centrales Hidroeléctricas en desarrollo en Chiapas.....	<b>7</b>
Tabla 3.1.- Potencia Eléctrica y condiciones necesarias según el fabricante.....	<b>57</b>
<i>Tabla 5.1.- Comportamiento del Sistema de Bombeo FV.....</i>	<b>117</b>
<i>Tabla 5.2.- Comparación de Potencias Eléctricas - Turgo.....</i>	<b>118</b>
<i>Tabla 5.3.- Parámetros Característicos en los Ensayos.....</i>	<b>119</b>

## RESUMEN

El proyecto que enmarca este trabajo presenta una propuesta innovadora del desarrollo de un banco de pruebas de tecnologías hidráulicas de fuente renovable con base en un sistema integral de aprovechamiento fotovoltaico e hidroeléctrico. acoplado en una estructura de 30 metros de altura, con 2 plataformas aéreas, un sistema de línea hidráulica y un pozo de 60 metros de profundidad; dotado de bombas fotovoltaicas sumergibles, una turbina Michel Banki y una turbina Turgo que simulan el funcionamiento de una micro central hidroeléctrica los cuales en primer etapa son evaluados en conjunto para calcular la eficiencia global del sistema.

La tesis está estructurada en tres etapas fundamentales, las cuales coinciden con los objetivos específicos del proyecto; 1) el diseño del banco de pruebas, 2) la construcción del mismo y el ensayo de un sistema micro hidroeléctrico Turgo con una capacidad de 3 kw con base en un procedimiento de evaluación propuesto para tal efecto.

El banco de pruebas propuesto, permitió determinar que la configuración hidráulica incorpora pérdidas de casi un 40 % del salto hidráulico proyectado en la instalación de las plataformas. Se demostró el funcionamiento de regulación de caudal de operación mediante la adaptación de válvulas; tipo esfera, tipo Wafer, y tipo compuerta, simulación de salto hidráulico como propuesta de banco de pruebas de tecnologías hidráulicas de fuentes renovables.

En función de los caudales máximos de operación de 11.26 lt/s y 15.09 lt/s, una eficiencia global promedio de 0.48% aproximadamente para el salto hidráulico de 8.33 metros correspondiente a la plataforma de 20 metros de altura. Así también para los caudales máximos de operación de 16.75 Lts/s a 25.94 Lt/s se alcanzó una eficiencia global promedio de 0.51% para el salto hidráulico de 17 mts correspondiente a la plataforma de 30 metros de altura.

El banco de pruebas cumple de forma integral las funciones para las cuales ha sido diseñado, proporcionando información para el estudio de las tecnologías existentes y el desarrollo de nuevos prototipos de tecnologías propias en el estado de Chiapas.



# **CAPITULO 1**

## **ANTECEDENTES.**

### **1.1.- INTRODUCCIÓN**

El actual modelo de vida y consumo de nuestra sociedad refleja una elevada demanda energética que indebidamente ha venido manteniendo como principal recurso los combustibles fósiles.

El consumo de combustibles fósiles representa una grave amenaza a la economía, la sociedad, y el ambiente en el mundo, este presenta un incremento exponencial creciente, lo cual ha desencadenado gran cantidad de problemas que cuales pueden clasificarse en tres categorías relacionadas entre sí: en primer lugar los problemas medioambientales; con el calentamiento global debido aparentemente al efecto invernadero creciente, provocado por el incremento en la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera, que se viene produciendo desde que comenzó la revolución industrial (Velasco González, 2009).

Una segunda categoría de problemas que paradójicamente pueden contribuir a resolver los anteriores son los problemas de sostenibilidad, relacionadas con el agotamiento de las fuentes energéticas tradicionales, entendiendo como tales a los combustibles fósiles: carbón, petróleo y gas natural. Estos problemas son de tanta actualidad como los medioambientales y se han discutido desde los años 70 del siglo del pasado, en conjunción con los de agotamiento de las materias primas. Sin embargo, han perdido cierta credibilidad debido a los fracasos que se produjeron en las predicciones sobre el fin de las reservas de diversas materias primas, desde entonces se han producido hallazgos de nuevos yacimientos de combustibles fósiles (Velasco González, 2009).



Finalmente, se habla de los problemas sociales y políticos que son resultado en parte de la dependencia extrema que padecen las sociedades llamadas desarrolladas con respecto a los combustibles fósiles. La localización de las fuentes energéticas en puntos del planeta muy conflictivos es la causa de guerras y tensiones continuas que no se pueden ignorar (Velasco González, 2009).

El examen del modo en que la sociedad actual utiliza la energía y de los problemas derivados de tal uso pone de manifiesto la urgencia por encontrar soluciones. Las denominadas energías de fuentes renovables pueden contribuir a resolver o mitigar las dificultades de abastecimiento que al parecer se presentarán inevitablemente en un futuro cercano. Las fuentes donde se originan las energías renovables son el sol, la gravedad, la rotación de la Tierra y el calor interno de la Tierra (Roldán Vilorio, 2013).

Las energías renovables a nivel mundial representan el 18% de la generación eléctrica, (la mayoría de esta participación considera las energías hidráulica y eólica) mientras que, la contribución al suministro térmico de las renovables es de un 24%. La participación de las energías fotovoltaica, solar, eólica y la bioenergía ha crecido rápidamente en los últimos años, efecto que se atribuye a las inversiones en investigación y desarrollo que se iniciaron hace más de tres décadas (SENER, Programa Especial para el Aprovechamiento de Energías Renovables, 2014).

La energía hidráulica es la fuente renovable de electricidad más importante y más utilizada en el mundo, registrando 970 GW de capacidad de generación eléctrica en 2011. El crecimiento de centrales hidroeléctricas en el periodo 2001-2011 ha sido del 3% anual. China es el productor más importante de energía hidroeléctrica, seguido por Brasil, Estados Unidos, Canadá y Rusia. La mitad de la capacidad hidroeléctrica se concentra en estos cinco países ubicados en diferentes regiones del mundo: China (22%), Brasil, Estados Unidos, Canadá y Rusia, con 8% de



participación cada uno (SENER, Prospectiva de Energías Renovables 2012 - 2026, 2012).

El resto de la capacidad instalada se concentra en países de Europa (Suecia, Francia, Italia, España, Austria, Suiza, Alemania y Rumania), que en su conjunto representan el 13% de la capacidad; los países asiáticos por su parte aportan 8% de la capacidad (India, Japón, Pakistán, Vietnam, Indonesia). Por su parte, los países de América Latina aportan el 7% (Venezuela, Paraguay, Colombia, México, Argentina, Chile y Perú) (SENER, Prospectiva de Energías Renovables 2012 - 2026, 2012).

En México, aproximadamente del 14 al 16 % de la energía producida es proveniente de fuentes renovables de energía. La Ley para el Aprovechamiento de las Energías Renovables y el Financiamiento para la Transición Energética (LAERFTE) establece que para el 2024 el 35% de la energía que se producirá en el país será generado a través de fuentes no fósiles. Se considera como renovables a los proyectos hidroeléctricos con capacidad hasta 30 MW, o proyectos hidroeléctricos de más de 30 MW con almacenamientos menores a 50 mil m<sup>3</sup> de agua o que tengan un embalse con una superficie menor a 1 hectárea y que no rebasen dicha capacidad de almacenamiento. Ésta se refiere a embalses ya existentes, aún de una capacidad mayor, que sean aptos para generar electricidad (LAERFTE, 2013).

México tiene una capacidad de 15,389 MW y una potencia de 50,383 GWh/a instalada en base a fuentes renovables de energía, de lo cual entre el 78% es decir 12,474 MW y cerca del 76% aproximadamente 38,300 GWh/a, son generadas mediante aprovechamiento hidráulico a través de 79 centrales hidroeléctricas en el país (Fig. 1.1.), de las cuales Chiapas posee siete centrales hidroeléctricas que en sumatoria aportan el 47% de la energía hidroeléctrica de México (Fig. 1.2.) (SENER, Inventario Nacional de Energías Renovables, 2014).



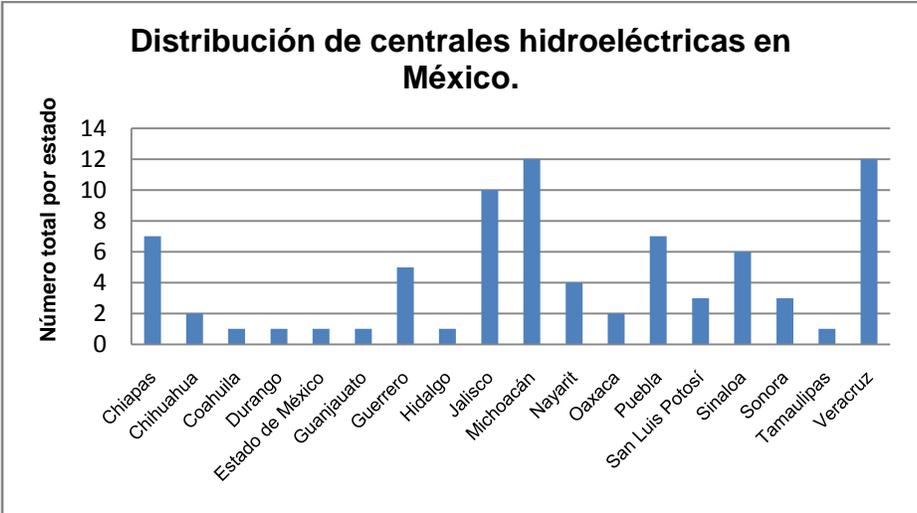


Fig. 1.1. Distribución de centrales hidroeléctricas en México.

Elaborado con información de (SENER, Inventario Nacional de Energías Renovables, 2014).

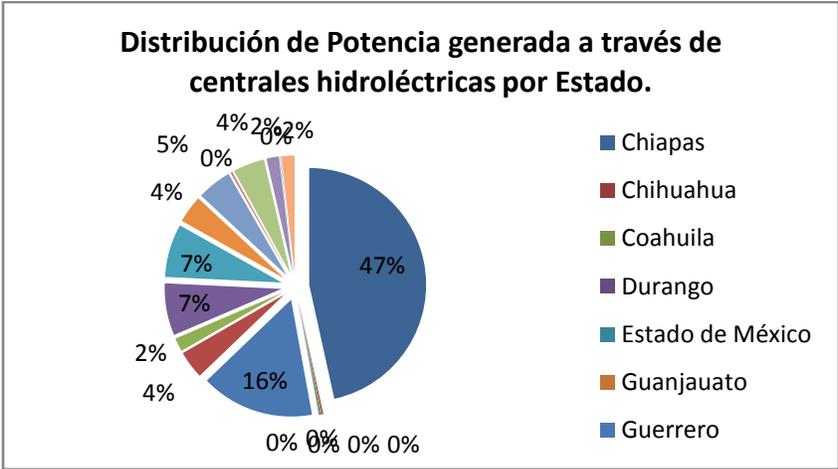


Fig.1.2.- Potencia generada a través de centrales hidroeléctricas en México.

elaborado con información de (SENER, Inventario Nacional de Energías Renovables, 2014)

Chiapas tiene una capacidad efectiva de 4,828 MW. como se puede observar en la Tabla 1.1. y la Figura 1.3., cuatro de las centrales se clasifican en el tipo grandes hidroeléctricas, y las tres restantes como pequeñas hidroeléctricas, todas ellas están pertenecen a la Comisión Federal de Electricidad (SENER, Inventario Nacional de Energías Renovables, 2014).

Municipio	Nombre	Central Hidroeléctrica	Capacidad Efectiva MW	Generación (GWh/a)
Chicoasén	Ing. Manuel Moreno Torres	Grande	2400	7452.32
Tecpatán	Malpaso	Grande	1080	4718
Venustiano Carranza	Belisario Domínguez	Grande	900	3211.44
Ostuacán	Ángel Albino Corzo	Grande	420	2319.48
Tapachula	José Cecilio del Valle	Pequeña	21	
Soyaló	Bombaná	Pequeña	5.24	25.67
Venustiano Carranza	Schpoiná	Pequeña	2.24	10.92

Tabla 1.1.- Capacidad Efectiva a través de Hidroeléctricas en Chiapas elaborado con información de (SENER, Inventario Nacional de Energías Renovables, 2014)

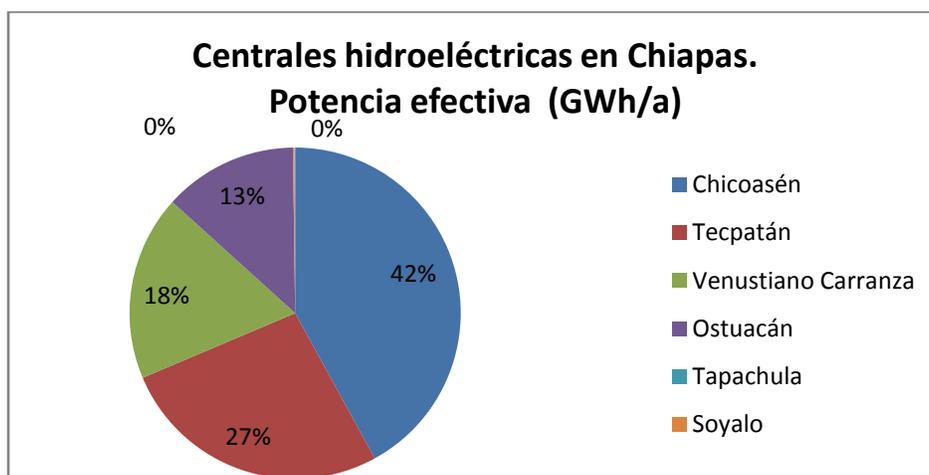


Fig. 1.3.- Centrales Hidroeléctricas construidas y en operación en Chiapas. elaborado con información de (SENER, Inventario Nacional de Energías Renovables, 2014).

En cumplimiento a la LAERFTE, se han realizado estudios de factibilidad de zonas para desarrollar proyectos generadores de energías renovables. Para el caso de las energías de fuente hidráulica en el estado de Chiapas se tiene un registro de 5 proyectos en desarrollo con una capacidad efectiva total de 114.5 MW, con una potencia de generación de 580 GWh/a, (SENER, Inventario Nacional de Energías Renovables, 2014) como se puede observar en la Tabla 1.2. y la Figura 1.4., dos centrales se encuentran en etapa de construcción en el municipio de Cacaohatán, y tres en etapa de inicio de obras en los Municipios de Ostuacán y San Lucas.

Municipio	Empresa	Escala de Hidroeléctrica	Etapas	Capacidad Instalable (MW)	Potencial (GWh/a)
Cacahoatán	Hidrochiapas	Pequeña	En construcción	30	118.2
Cacahoatán	Generadora Hidroeléctrica de Chiapas	Pequeña	En construcción	25.5	101.95
Ostuacán	Hidroeléctrica Xochimilco	Pequeña	Por iniciar obras	22	149.67
San Lucas	Hidroeléctrica Río Frío	Pequeña	Por iniciar obras	21	122.53
San Lucas	Hidroeléctrica Río Blanco	Pequeña	Por iniciar obras	16	87.82

Tabla 1.2.- Centrales Hidroeléctricas en desarrollo en Chiapas, elaborado con información de (SENER, Inventario Nacional de Energías Renovables, 2014)

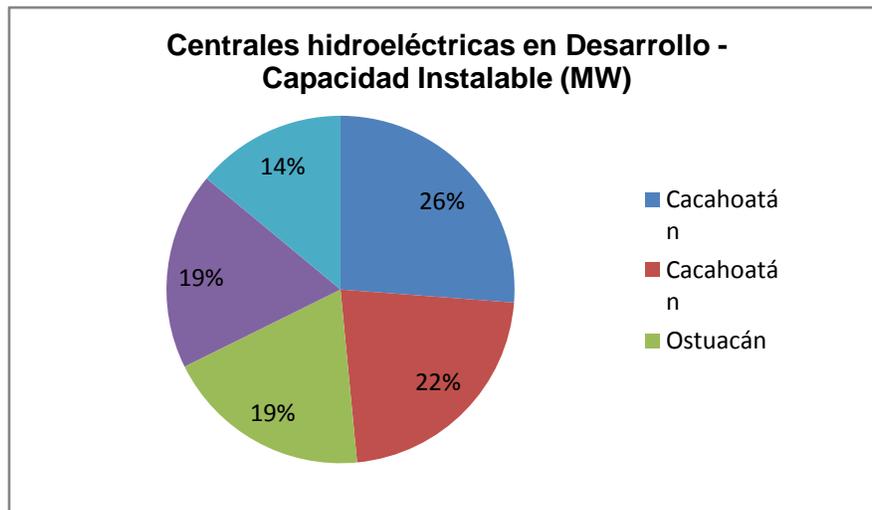


Fig. 1.4.- Centrales Hidroeléctricas en desarrollo en Chiapas elaborado con información de. (SENER, Inventario Nacional de Energías Renovables, 2014)

Existen 78 zonas factibles para el desarrollo de pequeñas hidroeléctricas, 11 posibles zonas para el desarrollo del tipo grandes hidroeléctricas en el estado de Chiapas con una proyección de 1195 MW de capacidad efectiva en total, y 10 468 (GWh/a) que aún no han sido aprovechadas (SENER, Inventario Nacional de Energías Renovables, 2014).

**1.2.- PROBLEMÁTICA**

Existe una gran brecha de desigualdades entre las regiones del sur-sureste y la centro-norte del país en materia de educación, investigación y desarrollo tecnológico. Por ejemplo, Chiapas es el estado más rezagado del país en cobertura universitaria con un 13% (la media nacional es 24.1%). Chiapas es uno de los estados más pobres de México, tiene 28 municipios dentro de los 120 con mayor índice de marginación y pobreza del país. El índice de electrificación del estado es de un 86% mientras que en la mayoría de los estados de la República supera el 95%. Sin embargo, es uno de los lugares del mundo donde se juntan todas las fuentes renovables de energía con un gran potencial para su aplicación. Por lo que es importante la innovación y desarrollo tecnológico y la asimilación de las tecnologías actuales ya probadas y su adaptación a las condiciones climatológicas y socio-culturales de la región y, a su vez, realizar las investigaciones aplicadas necesarias para el desarrollo de tecnologías propias (Farrera, 2011).

Se estima que aproximadamente dos tercios del potencial hidroeléctrico económicamente viable queda aún por desarrollar. La energía hidráulica no aprovechada es todavía muy abundante en América Latina, África Central, India y China. Este tipo de energía juega un papel importante en la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero. Hay estimaciones que indican, que si se desarrollara la mitad del potencial de energía hidráulica económicamente viable se podrían reducir alrededor de 13% de dichas emisiones. Sin embargo, la construcción de grandes presas incluye el necesario desplazamiento de la población y una importante degradación del ecosistema (SENER, Prospectiva de Energías Renovables 2012 - 2026, 2012).

Debido a lo anterior, es evidente la necesidad de promover sistemas de autogeneración eléctrica que auxilien a la población que carece del servicio eléctrico. Una de las mejores variantes de generación energética a partir del uso



de fuentes renovables en el estado de Chiapas es el aprovechamiento del potencial hidráulico a través de Sistemas Micro Hidroeléctricos (S.M.H.) los cuales tienen la ventaja de tener un bajo impacto en el ambiente, ser económicamente viables para comunidades pequeñas, entre otros beneficios.

Cuando se considera la situación energética en países en desarrollo, y en especial en áreas rurales, los S.M.H. desempeñan un importante rol en el desarrollo de las mismas. Sin embargo, el costo de inversión inicial que requiere una PCH es considerado relativamente alto y esto ha restringido, en algunos países mas que en otros, el desarrollo de estas potenciales energía renovables (Audisio, et al).

Los S.M.H. están compuestos por turbinas hidráulicas que de acuerdo al fabricante expresan una eficiencia que tiende a ser muy distinta en la implementación, con la integración de otros complementos o por la operación en condiciones variables. Además, es necesario desarrollar tecnologías locales de menor costo, para ello, se requiere estudiar previamente la eficiencia de los S.M.H. que han de proponerse para estas comunidades, dicho estudio deberá realizarse evaluando la eficiencia global del S.M.H. en conjunto bajo condiciones establecidas de operación.

Los estudios bibliográficos realizados expresan que en México no se cuenta con espacios de evaluación de sistemas hidráulicos o instalaciones con las características propuestas en este trabajo, requeridas para desarrollar tal estudio, así mismo se carece de una metodología particular para estudios de S.M.H., a excepción de los procedimientos efectuados en los bancos de pruebas en los que el caudal y el salto hidráulico es simulado a través de una bomba eléctrica.

Se considera necesario proponer un procedimiento que tome en cuenta las semejanzas entre los otros banco de pruebas, así como los procedimientos efectuados en campo para la determinación de los ensayos a realizarse para la evaluación de eficiencia global y la elaboración de las curvas de potencial.



En resumen, en Chiapas existen un total de 1,313 comunidades sin electrificar en Chiapas (CFE, 2011), caracterizadas por un alto grado marginación y pobreza, la mayoría de las cuales paradójicamente se encuentran ubicadas en las cercanías de pequeños ríos y arroyos con un potencial para implementar tecnologías que permitan aprovechar esta energía hidráulica, satisfacer sus necesidades energéticas y mejorar sus condiciones de vida.

Paralelamente tampoco existe un banco de prueba y caracterización, con la infraestructura y el equipamiento necesario, que permita evaluar el desempeño de los S.M.H. ya existentes en el mercado, y acumular las experiencias necesarias para que en un esquema de innovación y desarrollo tecnológico podamos aportar tecnologías propias.

### **1.3.- JUSTIFICACIÓN**

"Los países latinoamericanos tienen hoy ante sí el reto complejo de diseñar políticas energéticas que permitan avanzar hacia un futuro energético sostenible. Cada vez es más claro que este futuro implica sistemas eléctricos descentralizados, con una multitud de pequeñas centrales generadoras esparcidas en las redes eléctricas, y basadas en fuentes renovables" (Alatorre Frenk, 1997).

Chiapas tiene establecido en la Constitución Política del Estado cumplir con los Objetivos de Desarrollo del Milenio, los cuales establecen claramente que se debe erradicar el hambre, la marginación y la pobreza extrema, y esto no podrá ser posible jamás sin el uso de la energía como vector fundamental en el desarrollo humano de nuestras sociedades.

La autogeneración de energía eléctrica es una de las actividades necesarias para el desarrollo humano. En el caso de Chiapas, está permitirá atender el déficit



energético que afecta a las comunidades rurales que no cuentan con acceso al servicio eléctrico.

Chiapas es un estado con alto potencial hídrico que aprovecha el potencial hidráulico de los grandes efluentes, así también posee un elevado número de efluentes de tipo perenne (permanentes en el año) que contienen potencial hidráulico que puede ser aprovechado por sistemas hidroeléctricos de menor tamaño como lo son los S.M.H.

Los S.M.H. por su tamaño brindan beneficios sociales como lo son la participación directa de los usuarios en todas las actividades, desde el desarrollo, operación, mantenimiento y administración de la central micro hidroeléctrica. Así también, en un esquema de desarrollo hidráulico; los S.M.H. se pueden integrar a proyectos de irrigación, o de agua potable para maximizar el beneficio compartiendo el costo entre varios sectores.

En lo económico, los S.M.H. se caracterizan por demandar menores gastos en comparación a los requeridos a la electrificación por torres de la red energética del estado; los costos de instalación se mitigan rápidamente con la productividad del sistema. Desde el punto de vista ambiental estos sistemas promueven la baja contaminación química al agua. Permiten un aprovechamiento estable del agua, ya que el agua que se ocupa en un punto, posteriormente a su aprovechamiento se dirige, al mismo efluente. Esto favorece la conservación del ambiente y la conservación de los recursos naturales, en un sistema de manejo integral de cuenca.

Para el aprovechamiento de pequeños recursos hidráulicos, existen diversos tipos de turbinas hidráulicas, entre las cuales la turbina Michel Banki y la Turbina Turgo proyectan ventajas de orden técnico así como económico respecto a las turbinas hidráulicas convencionales. Además de caracterizarse por su alta velocidad específica, flujo alto, e incluso curva de eficiencia, también son de construcción



simple, fácil instalación y ajuste, operación confiable y mantenimiento sencillo de bajo costo, lo cual las ubican adecuadas para el sector social a beneficiar.

En el funcionamiento de un S.M.H. los valores fundamentales son variables (caudal, carga y velocidad de giro). Las condiciones de servicio exigen con frecuencia la variación de alguna variable con lo cual inevitablemente variará al menos otra de ellas.

Es posible llegar a un conocimiento completo del comportamiento del S.M.H. en diferentes condiciones de servicio, haciendo un estudio mediante un banco de pruebas, para el cual es necesario simular condiciones de salto hidráulico, caudal y mantener un abastecimiento constante de agua, así mismo para lograr una independencia tecnológica de los grandes países y monopolios internacionales se hace necesario adquirir las experiencias de desarrollar tecnologías propias.

Por tal motivo, el presente trabajo propone el desarrollo de un banco de pruebas de tecnologías hidráulicas de fuentes renovables que posibilite el estudio de las curvas de potencia eléctrica y la eficiencia global de S.M.H., la evaluación y la comparación de la eficiencia entre diferentes combinaciones (caudal y salto hidráulico) de los componentes de un sistema hidráulico. Esta información es indispensable para posteriormente adecuar la innovación tecnológica a las necesidades energéticas de las poblaciones que carecen del servicio eléctrico.



**1.4.- REFERENTES ACTUALES**

Las pruebas o ensayos que se realizan a las turbinas son de dos tipos; por un lado están los ensayos de rendimiento y por el otro los de cavitación. Los primeros tienen la finalidad de evaluar el rendimiento de la turbina bajo distintas condiciones de operación y como veremos se sintetizan en los diagramas colineares). Los ensayos de cavitación consisten en describir la evolución de la misma, para una condición de funcionamiento, y poder obtener puntos característicos del comportamiento (Depto. Hidráulica, UP Argentina, 2009).

Existen aparatos o dispositivos utilizados para llevar a cabo las pruebas a las turbinas hidráulicas, específicos para cada tipo de turbina. En la Universidad Nacional de la Paz, ubicado en Argentina existe una Sala de Turbinas del Departamento de Hidráulica que cuenta con cuatro bancos de ensayos destinados al uso docente: un banco de ensayo de una turbina Peltón, el segundo de una Turbina Francis, el tercero de una Turbina Francis y una bomba axial y el cuatro de dos bombas centrífugas (Fig. 1.5.).



Fig. 1.5.- Banco de ensayos: a) Turbina Peltón, b) Turbina Francis, c) Bombas axiales (Depto. de Hidráulica, 2009).

Así también cuenta con un Banco Universal de Prueba de Turbomáquinas Hidráulicas con el que pueden realizarse ensayos de rendimiento y cavitación sobre modelos de bombas y turbinas (Fig. 1.6.) .También existe un banco de ensayos en el Instituto Universitario de Tecnología del Bolívar, ubicado en Venezuela.



Fig. 1.6.- Circuito de Cavitación (Depto. de Hidráulica, 2009)

Los ensayos realizados generalmente en dichos bancos de ensayos, son para realizar la “Teoría de Similitud”, la cual permite realizar ensayos sobre turbinas de tamaño reducido y trasladar los resultados a turbinas semejantes de mayor tamaño, así también hacen uso de un salto hidráulico simulado a través de una bomba centrífuga que abastece del agua a presión en un circuito cerrado, En la actualidad, las turbinas reducidas son conocidas como micro (por la escala de generación eléctrica que produce).

El grado de importancia de un determinado ensayo (prueba) está en función directa con la aplicación de la turbina las condiciones de trabajo, es por ello que la mayoría de los bancos de pruebas para turbinas existentes, no cubren la mayoría de los ensayos (Hernández Flores, Márquez Sánchez, & Nieto Avila, 2014).

Comercialmente pueden encontrarse bancos de ensayos para distintos tipos de turbinas pequeñas, en las cuales se observa la turbina, la bomba e instrumental (equipo de medición) sobre un carro móvil de laboratorio (Fig. 1.7).

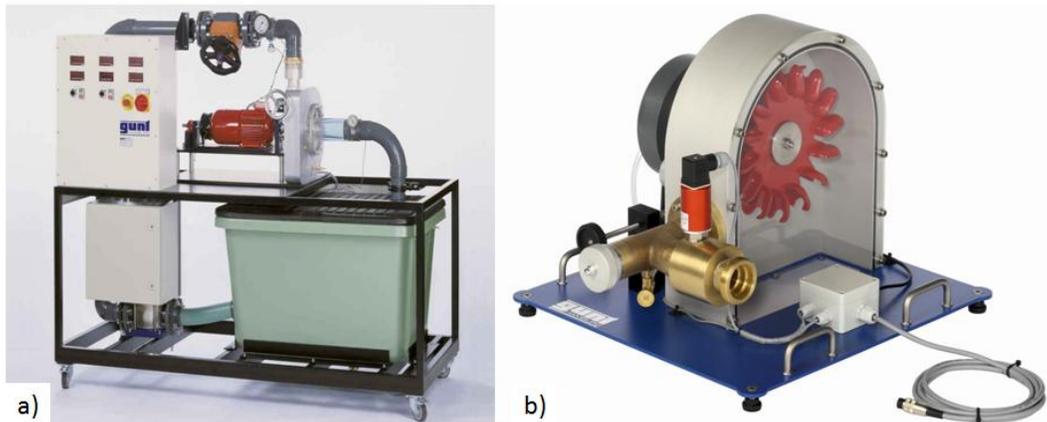


Fig. 1.7.- Banco de ensayos de Turbina: a) Francis, b) Peltón (Hamburg, 2005).

Así también, en el transcurso de la historia de las turbinas hidráulicas se ha generado diversos estudios, siendo algunos de estos los que se describen a continuación:

Por parte de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Comahue en Argentina, expone un proyecto en el cual se analiza la tendencia general de diseño de pequeñas turbinas de reacción de hasta 5000 Kw y obtener una metodología preliminar, trabajando con dos esquemas básicos correspondientes a turbinas radiales (tipo Francis) y a turbinas axiales (tipo hélice y Kaplan) (R. Marchegiani, 1997).

En el año 2007 Javier Ignacio Alfonso Larios Lagos escribió la memoria: diseño montaje y Pruebas de un Prototipo de Micro central hidroeléctrica con turbina Peltón, para la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Chile.

En el año 2008, Jorge Eliecer Alarcon Ramirez y Jaime Arley Sandoval Delgado, escribió el trabajo de grado: Ensayo y estudio de una turbina Peltón, de la facultad de Ingeniería mecánica de la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga. Se implementó una micro central hidráulica, para realizar el estudio

a una turbina Peltón, con el fin de analizar el comportamiento de los diferentes parámetros que intervienen en su funcionamiento.

En septiembre del año 2009, Julio César Egúsqiza Goñi y Julio cesar Sanches Camones realizaron como Tesis: Diseño de un Banco de Pruebas para Turbinas Michel Banki para el laboratorio de energía de la Pontificia Universidad Católica del Perú. La tesis desarrollada abarca el diseño de un sistema que muestra el funcionamiento de una turbina Michel Banki, aprovechando la operación de una bomba centrífuga para simular el salto hidráulico. El trabajo comprende, el diseño de todos los componentes de la turbina, el diseño del sistema de transformación de energía mecánica a eléctrica, la selección de los instrumentos y dispositivos para el control y el registro de las variables y los protocolos de ensayo así como los procedimientos de evaluación.



**1.5.- OBJETIVOS.**

**a) GENERAL**

Desarrollar un banco de pruebas de tecnologías hidráulicas de fuentes renovables para la evaluación de eficiencia global de sistemas micro hidroeléctricos.

**b) ESPECIFICOS**

- Diseñar un banco de pruebas de tecnologías hidráulicas de fuentes renovables.
- Construir el banco de pruebas de tecnologías hidráulicas de fuentes renovables.
- Evaluar la eficiencia global de sistemas micro hidroeléctricos.

**1.6- RESTRICCIONES**

El proyecto contempla el estudio de un S.M.H. Michel Banki, y un S.M.H. Turgo, adquiridos de empresas particulares, una de ellas proveniente de la empresa Hidráulica 3HC en Perú, y el otro proveniente de la empresa SAVOIA en Argentina respectivamente.

La evaluación se realizará de forma general al conjunto de componentes que conforman el S.M.H. Turgo específicamente por condiciones de tiempo como pruebas preliminares, del cual se elaborará la curva de potencia eléctrica y calculo de eficiencia global en función de los parámetros determinados por el salto hidráulico y variación de caudal simulados en el banco de pruebas.



Los equipos eléctricos; generador de corriente, tablero de control, y disipador de corriente constituyen equipos incluidos S.M.H. adquirido.

El proyecto se enfocó en la simulación de las condiciones hidráulicas requeridas para la evaluación a través de las características físicas del banco de pruebas.

Los cálculos estructurales para la edificación de la torre construida fueron efectuados por el residente de obra. El autor del presente trabajo expresa a manera de descripción las características de la construcción realizada para las zapatas, armazones, pilares, plataforma y escalera que constituyen parte de la infraestructura del banco de Pruebas.



## **CAPITULO 2**

### **FUNDAMENTOS TEORICOS.**

#### **2.1.- ASPECTOS GENERALES DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES.**

##### **2.1.1.-Sustentabilidad.**

El Concepto de Sustentabilidad explora la relación entre las políticas de desarrollo económico, la calidad del medio ambiente y la equidad social. Este concepto ha evolucionado desde 1972, cuando la comunidad internacional exploró por primera vez la conexión entre la calidad de vida y la calidad del medio ambiente en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente Humano en Estocolmo.

Sin embargo, no fue hasta 1987 que el termino Desarrollo Sustentable fue definido como: "El desarrollo que puede satisfacer las necesidades de la generación presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer sus propias necesidades".

La definición estableció la necesidad para integrar decisiones haciendo que esta capacidad de equilibrar las necesidades económicas y las necesidades sociales de las personas con la capacidad regenerativa del ambiente natural (Rogers, Jalal, & Boyd, 2008).

El desarrollo Sustentable es un proceso dinámico de cambio en el cual la explotación de recursos, la dirección de las inversiones, la orientación del desarrollo tecnológico y cambios institucionales son hechos consistentes con el futuro como también con las necesidades del presente (Rogers, Jalal, & Boyd, 2008).



### **2.1.2.- Energías Renovables.**

Se conoce como Energías de Fuentes Renovables a la energía procedente de los procesos naturales, que se reponen a un ritmo más rápido de lo que se consumen (IEA, 2015).

Aquellas cuya fuente reside en fenómenos de la naturaleza, procesos o materiales susceptibles de ser transformados en energía aprovechable por la humanidad, que se regeneran naturalmente, por lo que se encuentran disponibles de forma continua o periódica (LAERFTE, 2013).

En México se consideran con fuentes renovables de energía:

- a) El Viento;
- b) La radiación solar, en todas sus formas;
- c) El movimiento del agua en causas naturales o artificiales; La energía oceánica en sus distintas formas, a saber: mareomotriz, maremotérmica, de las olas, de las corrientes marinas y del gradiente de concentración de sal;
- d) El calor de los yacimientos geotérmicos;
- e) Los bioenergéticos, que determine la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos.

### **2.1.3.- Energía Hidráulica.**

#### **Definición Energía Hidroeléctrica:**

Transformación de la energía cinética del agua en energía eléctrica, a través de un dispositivo llamado turbina hidroeléctrica. La energía hidroeléctrica es una tecnología madura y bastante simple: la energía potencial de una fuente de agua (caracterizada por la cabeza y la tasa de flujo de masa) es convertida en energía cinética que hace girar una turbina conducir un generador de electricidad. La energía cinética del agua que cae se utilizó para moler el trigo hace más de 2 000 años. Desde finales del siglo 19, la energía hidroeléctrica se ha utilizado para generar electricidad (IRENA, 2015).



En la actualidad, la energía hidráulica es la fuente renovable de energía más utilizada a nivel internacional, alrededor de 160 (de unos 200 en el mundo) países en todo el mundo utilizan la tecnología de la energía hidráulica para la generación de energía. Con una capacidad total instalada de 1 060 GW (19,4% de la capacidad eléctrica del mundo en 2011), la energía hidroeléctrica genera aproximadamente 3 500 Twh al año, lo que equivale al 15,8% de la generación mundial de electricidad (IRENA, 2015).

Las centrales hidroeléctricas proporcionan al menos el 50% del suministro total de electricidad en más de 35 países (en Países tales como Brasil, más del 90% de su energía es producida a través de esta fuente de energía). También ofrecen otros servicios clave, tales como el control de inundaciones, riego y depósitos de agua potable. La energía hidroeléctrica es una tecnología extremadamente flexible de generación de electricidad. Los embalses hidroeléctricos proporcionan una función de almacenamiento de energía que permite una respuesta rápida a las fluctuaciones de la demanda de electricidad a través de la red, optimización de la producción de electricidad y la indemnización por la pérdida de energía de otras fuentes. Ahora se presta especial atención a las centrales hidroeléctricas de bombeo, ya que son en la actualidad las opciones más competitivas para el almacenamiento de energía a gran escala para ser utilizados en combinación con las energías renovables variables (por ejemplo, energía solar y energía eólica).

Existen dos configuraciones básicas para las centrales hidroeléctricas: la primera basada en presas con embalses y la segunda, de gestión del-río esquema (sin depósito). El esquema de la presa puede ser subdividido en pequeñas presas con regulación noche y día, las grandes presas con un almacenamiento estacional y plantas de almacenamiento y bombeo reversible, tanto para la generación de bombeo y la electricidad que se utiliza para el almacenamiento de energía, regulado en el día y la noche, de acuerdo con la demanda de electricidad (IRENA, 2015).

La energía hidroeléctrica a pequeña escala está normalmente diseñado para funcionar en el río, una opción amigable con el medio ambiente ya que no interfiere significativamente con el flujo del río.

En un curso de agua, la energía que ésta tiene y puede cedernos para otros usos ésta en función de dos situaciones o estados complementarios del agua, que nos dan dos formas de definir la energía hidráulica (Menéndez Pérez, 1997)

Energía Potencial: es la capacidad de transformarse en energía en razón de su posición de altura frente a un nivel de referencia, determinada por la ecuación:

donde:

m = masa

g = constante de la gravedad

h = altura

$$E_p = m \cdot g \cdot h$$

Energía cinética: Energía que corresponde a la desarrollada en su movimiento. Se rige por la ecuación:

donde:

m = masa

V = velocidad (al cuadrado).

$$E_c = \frac{1}{2} mV^2$$



## **2.2.-TURBOMÁQUINAS HIDRÁULICAS:**

### **2.2.1.- Definición de Maquina Hidráulica**

Una máquina es un transformador de energía, absorbe energía de una clase y restituye energía de otra clase o de la misma clase pero transformada.

Las maquinas hidráulicas pertenecen a un grupo muy importante de máquinas que se llaman máquinas de fluido. Las maquinas de fluido son aquellas máquinas en que el flujo, o bien proporciona la energía que absorbe la máquina, o bien aquellas en que el fluido es el receptor de energía, al que la maquina restituye la energía mecánica absorbida (Mataix, 1982).

En toda máquina de fluido hay un intercambio entre energía de fluido y energía mecánica. Las maquinas de fluido revisten infinidad de formas y encuentran un sin fin de aplicaciones en la técnica. Las máquinas de fluido se clasifican en máquinas térmicas y máquinas hidráulicas. Máquina térmica es aquella en que el fluido en su paso a través de la maquina varía sensiblemente de densidad y volumen específico, el cual en el diseño y estudio de la maquina ya no puede suponerse constante (Marchegiani, 2011).

Una máquina hidráulica es un dispositivo capaz de convertir energía hidráulica en energía mecánica; pueden ser motrices (turbinas), o generatrices (bombas), modificando la energía total de la vena fluida que las atraviesa. En el estudio de las turbomáquinas hidráulicas no se tienen en cuenta efectos de tipo térmico, aunque a veces habrá necesidad de recurrir a determinados conceptos termodinámicos; todos los fenómenos que se estudian serán en régimen permanente, caracterizados por una velocidad de rotación de la máquina y un caudal constante (Díez., 2009).



En una máquina hidráulica, el agua intercambia energía con un dispositivo mecánico de revolución que gira alrededor de su eje de simetría; éste mecanismo lleva una o varias ruedas, (rodetes o rotores), provistas de álabes, de forma que entre ellos existen unos espacios libres o canales, por los que circula el agua (Lagos, 2007).

Los métodos utilizados para su estudio son, el analítico, el experimental y el análisis dimensional. El método *analítico* se fundamenta en el estudio del movimiento del fluido a través de los álabes, según los principios de la Mecánica de Fluidos. El método *experimental*, se fundamenta en la formulación empírica de la Hidráulica, y la experimentación. El análisis dimensional ofrece grupos de relaciones entre las variables que intervienen en el proceso, confirmando los coeficientes de funcionamiento de las turbomáquinas, al igual que los diversos números adimensionales que proporcionan información sobre la influencia de las propiedades del fluido en movimiento a través de los órganos que las componen (Díez., 2009).

Las máquinas hidráulicas se clasifican en turbomáquinas y máquinas de desplazamiento positivo, las turbomáquinas a su vez se clasifican en generadoras y motoras, dentro de las cuales se encuentran las turbinas hidráulicas (Mataix, 1982).

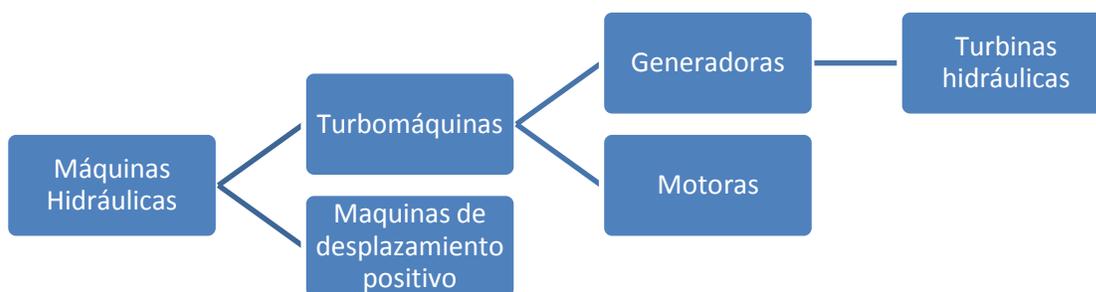


Fig.2.1.- Clasificación de las Máquinas Hidráulicas (Mataix, 1982).



### **2.2.2.- Turbinas**

La turbina hidráulica es una turbomáquina motora, y por tanto esencialmente es una bomba rotodinámica que trabaja a la inversa. Así como una bomba absorbe energía mecánica restituye energía al fluido, una turbina absorbe energía del fluido y restituye energía mecánica (Mataix, 1982).

Las turbinas hidráulicas son elementos capaces de convertir energía hidráulica en energía mecánica absorbiendo energía del fluido de trabajo, pertenecen a las turbomáquinas motrices dinámicas o cinéticas. (Lagos, 2007)

#### **2.2.2.1.- Elementos constitutivos**

Los elementos constitutivos de una turbina son análogos a los de una bomba, pero dispuestos en orden inverso, siendo principalmente los siguientes:

- *Canal de llegada:* Corresponde a la tubería de impulsión en una bomba.
- *Caja espiral:* Transforma presión en velocidad.
- *Distribuidor:* transforma presión en velocidad y actúa como tobera.
- *Rodete:* es el elemento esencial de la turbina, estando provisto de álabes en los que tiene lugar el intercambio de energía entre el agua y la máquina. Atendiendo a que la presión varíe o no en el rodete, las turbinas se clasifican en: a) turbinas de acción o impulsión, b) turbinas de reacción o sobrepresión.
- *Tubo de aspiración:* crea una aspiración o depresión a la salida del rodete.

*Las turbinas de acción carecen de tubo de aspiración, en ellas el agua sale del rodete directamente al canal de salida.*



### 2.2.2.2.- Clasificación de las turbinas

Existen diferentes clasificaciones de los tipos de turbinas hidráulicas, las más usadas son de acuerdo al grado de reacción y de acuerdo al número específico de revoluciones.

#### a) Clasificación según el grado de reacción

Las turbinas hidráulicas, según el grado de reacción, se clasifican en dos grupos: turbinas de acción y turbinas de reacción. Esta clasificación se funda en el concepto de grado de reacción, si el grado de reacción es 0, la turbina se llama de acción. Si el grado de reacción es distinto de 0, la turbina se llama de reacción (Hernández, et al, 2014).

El grado de reacción de una turbina  $\varepsilon_T$  se define como:

$$\varepsilon_T = \frac{\text{altura de presión absorbida por el rodete}}{\text{altura total absorbida por el rodete}}$$

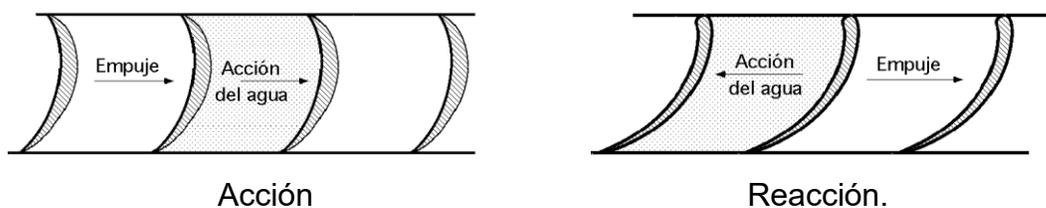


Fig. 2.2 Fenómeno de Acción y Reacción (Díez Fernández, 2009).

En las **turbinas de acción** el agua sale del distribuidor a la presión atmosférica, y llega al rodete con la misma presión; en estas turbinas, toda la energía potencial del salto se transmite al rodete en forma de energía cinética (Díez., 2009).

En las **turbinas de reacción** el agua sale del distribuidor con una cierta presión que va disminuyendo a medida que el agua atraviesa los álabes del rodete, de forma que, a la salida, la presión puede ser nula o incluso negativa; en estas turbinas el agua circula a presión en el distribuidor y en el rodete y, por lo tanto, la energía potencial del salto se transforma, una parte, en energía cinética, y la otra, en energía de presión (Díez., 2009).

En las turbinas de acción, el empuje y la acción del agua, coinciden, mientras que en las turbinas de reacción, el empuje y la acción del agua son opuestos. Este empuje es consecuencia de la diferencia de velocidades entre la entrada y la salida del agua en el rodete, según la proyección de la misma sobre la perpendicular al eje de giro (Díez., 2009).

Atendiendo a la dirección de entrada del agua en las turbinas, éstas pueden clasificarse en:

- **Axiales;** (Kaplan, hélice Bulbo), el agua entra paralelamente al eje.
- **Radiales** (centrípetas y centrifugas); , el agua entra perpendicularmente al eje, siendo centrifugas cuando el agua vaya de adentro hacia afuera, y centrípetas, cuando el agua vaya de afuera hacia adentro.
- **Mixtas;** se tiene una combinación de las anteriores.
- **Tangenciales:** el agua entra lateral o tangencialmente contra las palas, cangilones o cucharas de la rueda.



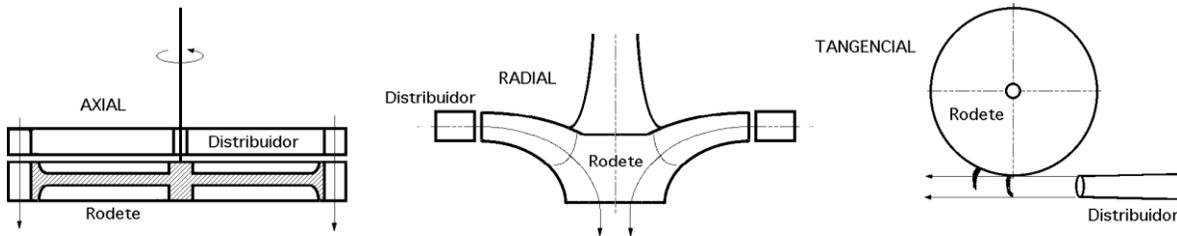


Fig.2.3.- a) Turbina axial; b) Turbina radial; c) Turbina tangencial (Díez Fernández, 2009).

**b) Clasificación según el número específico de revoluciones.**

La naturaleza ofrece saltos hidráulicos con potencias muy variadas y una misma potencia con combinaciones múltiples de caudal y salto neto, para ello el rodete de las turbinas hidráulicas va cambiando insensiblemente de forma para adaptarse a las diferentes condiciones de servicio.

Por tanto la clasificación más precisa de las turbinas hidráulicas es una clasificación numérica, que se hace asignando a toda la familia de turbinas geoméricamente semejantes un número, a saber, el Número específico de Revoluciones,  $ns$ .

$$ns = \frac{nPa^{\frac{1}{2}}}{H^{\frac{5}{4}}}$$

donde:

$n$  - número de revoluciones.

$H$  - altura neta.

$Pa$  - Potencia en el eje o potencia útil.

**c) Turbinas hidráulicas de Acción y Reacción.**

***Turbinas de reacción.***

- Turbina **Fourneyron** (1833); en la que el rodete se mueve dentro del agua. Es una turbina radial centrífuga, lo que supone un gran diámetro de rodete; en la actualidad no se construye (Fig.2.4).

- Turbina **Heuschel - Jonval**; axial, y con tubo de aspiración; el rodete es prácticamente inaccesible; en la actualidad no se construye (Fig 2.5)

- Turbina **Francis** (1849); es radial centrípeta, con tubo de aspiración; el rodete es de fácil acceso, por lo que es muy práctica. Es fácilmente regulable y funciona a un elevado número de revoluciones; es el tipo más empleado, y se utiliza en saltos variables, desde 0,5 m hasta 180 m; pueden ser, lentas, normales, rápidas y extra rápidas (Fig 2.6).

- Turbina **Kaplan** (1912); las palas del rodete tienen forma de hélice; se emplea en saltos de pequeña altura, obteniéndose con ella elevados rendimientos, siendo las palas

orientables lo que implica paso variable. Si las palas son fijas, se denominan turbinas hélice (Fig 2.7).

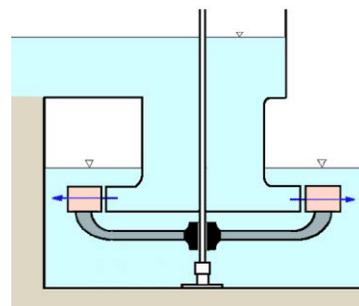


Fig 2.4.- Turbina Fourneyron (Díez Fernández, 2009).

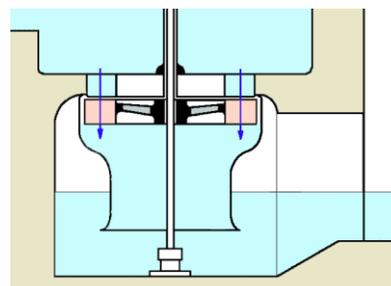


Fig 2.5.- Turbina Heuschel-Jonval (Díez Fernández, 2009).

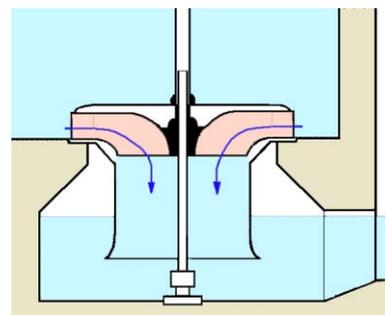


Fig.2.6.- Turbina Francis (Díez Fernández, 2009)

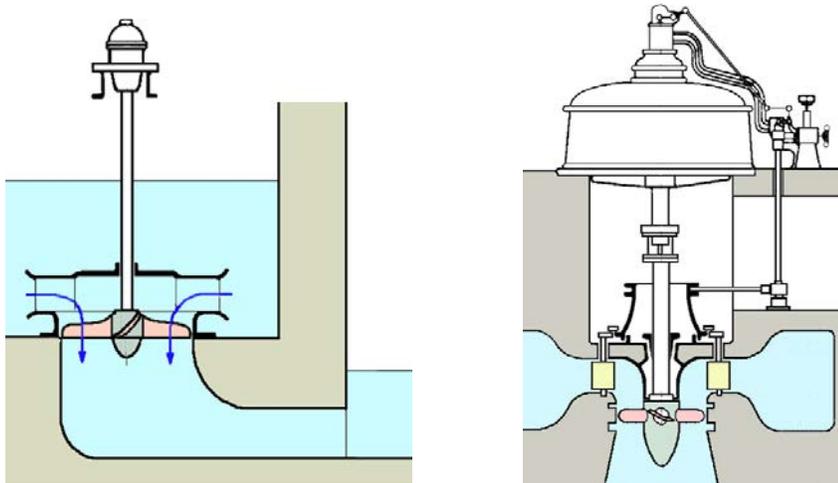


Fig 2.7.- Turbinas Kaplan (Díez Fernández, 2009).

### **Turbinas de Acción.**

Estas turbinas se empezaron a utilizar antes que las de reacción; entre ellas se encuentran:

- Turbina **Zuppinger** (1846); con rueda tangencial de cucharas.
- Turbina **Peltón**; es tangencial, y la más utilizada para grandes saltos (Fig 2.8).

Turbina **Turgo**; es tangencial y se ocupa para saltos medianos.

- Turbina **Schwamkrug**; (1850); radial y centrífuga, (Fig 2.9)
- Turbina **Girard** (1863); axial, con el rodete fuera del agua; mientras el cauce no subía de nivel trabajaba como una de acción normal, mientras que si el nivel subía y el rodete quedaba sumergido, trabajaba como una de reacción, aunque no en las mejores condiciones; en la actualidad no se utiliza (Fig 2.10).

Turbina **Michel, o Banki**; el agua pasa dos veces por los álabes del rodete, construido en forma de tambor; se utiliza para pequeños y grandes saltos (Fig. 2.11).

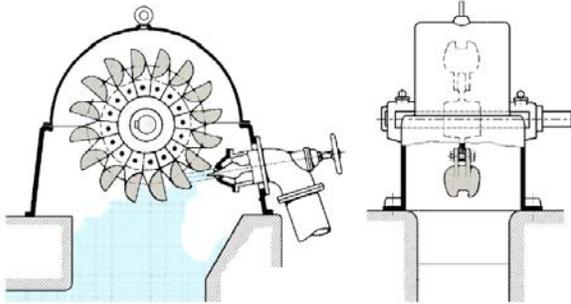


Fig. 2.8.- Turbina Peltón (Díez Fernández, 2009).

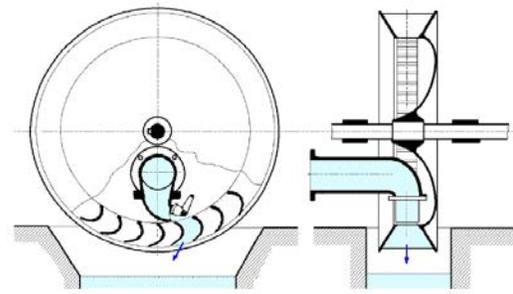


Fig. 2.9.- Turbina Schwamkru (Díez Fernández, 2009).

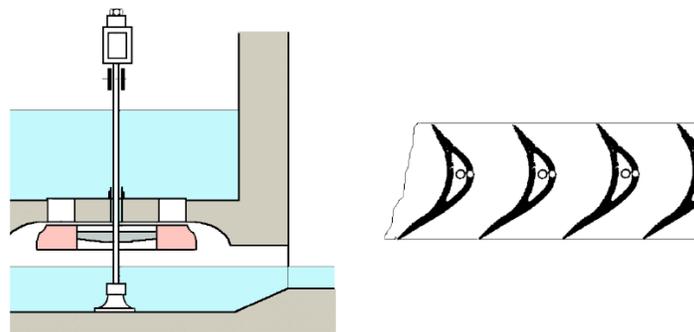


Fig. 2.10. Turbina Girard (Díez Fernández, 2009).

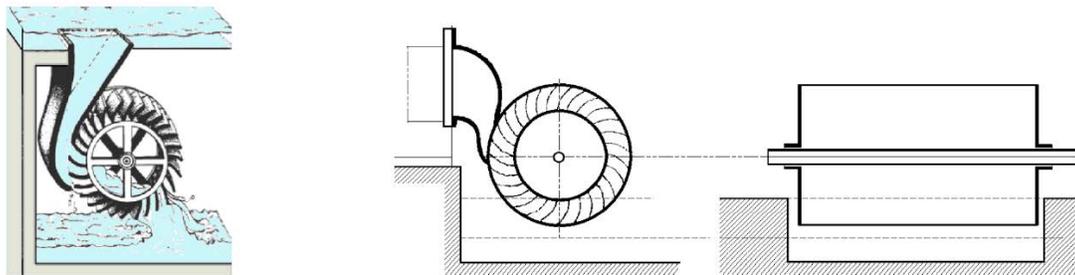


Fig. 2.11.- Turbina Michel Banki (Díez Fernández, 2009).

### 2.2.2.3.- Cavitación en la Turbina.

Es el fenómeno de los cambios de líquido a gas y de gas a líquido de fase que se producen cuando las presiones dinámicas de fluido locales en las zonas de caída de flujo acelerado por debajo de la presión de vapor del fluido local. El cambio de fase de líquido a gas es similar a la de ebullición del agua, excepto que se da a temperaturas ambiente (Interior, 2004).

La cavitación es un serio obstáculo en el proyecto de las turbinas, porque al producirse este fenómeno se origina la destrucción del material por erosión y corrosión química, disminuye el rendimiento de la turbina y se produce ruido con vibraciones intensas. Modernamente se tiende a construir las turbinas con potencia unitaria creciente y reduciendo su precio a costa de la disminución de su peso y que se origine la cavitación (Mataix, 1982).

La cavitación ocurre comúnmente en las turbinas hidroeléctricas, por lo general aparece alrededor de álabes de guía, puertas peatonales incorporadas, el rodete de la turbina, y en el tubo de aspiración. Por lo general, la cavitación dentro de la corriente de fluido no es perjudicial para la turbina. Sin embargo, cuando implosiones se producen cerca de los límites sólidos dentro de la máquina, las superficies de flujo pueden ser dañados y erosionados (Interior, 2004).

Muchas veces la solución más económica no consiste en construir una turbina en la cual se excluya totalmente la cavitación. En la práctica se construyen turbinas en las cuales puede originarse un grado de cavitación controlado, con erosión de los alabes tolerable que obligue a reparaciones periódicas pero que no afecte ni al rendimiento de la turbina ni a un funcionamiento de la turbina totalmente exento de cavitación. Esto puede hoy lograrse gracias al conocimiento que se tiene en la actualidad de este fenómeno. Los materiales empleados en la construcción de las turbinas han de ser especialmente resistentes a la erosión y corrosión cavitativa (Mataix, 1982).

El Coeficiente de cavitación de Thomas se define:

donde:

**P<sub>amb</sub>** - Presión atmosférica indicada por el barómetro

**P<sub>s</sub>** - Presión de saturación del vapor.

**H<sub>s máx</sub>** - Valor máximo que H<sub>s</sub> alcanza cuando tiene lugar la cavitación.

$$\sigma = \frac{(p_{amb} - p_s)/\rho g - H_{s \text{ máx}}}{H}$$



**2.2.2.4. Golpe de Ariete de una turbina.**

El fenómeno del golpe de ariete, también denominado transitorio, consiste en la alternancia de depresiones y sobrepresiones debido al movimiento oscilatorio del agua en el interior de la tubería, es decir, básicamente es una variación de presión, y se puede producir tanto en impulsiones como en abastecimientos por gravedad. El valor de la sobrepresión debe tenerse en cuenta a la hora de dimensionar las tuberías, mientras que, en general, el peligro de rotura debido a la depresión no es importante, más aún si los diámetros son pequeños (EUITACR).

La sobrepresión que se produce al cerrar una válvula está en razón de la longitud de la tubería forzada: luego el golpe de ariete se presentará más en los saltos de grande y mediana altura, en que la tubería forzada tiene mayor longitud; está en razón inversa del tiempo de cierre. Para solucionar este problema se utiliza en las turbinas Francis el orificio compensados, en las turbinas Peltón la pantalla deflectora, y en unas y otras la chimenea de equilibrio (Mataix, 1982).

**2.2.3.- Selección de Turbina.**

La selección del tipo de turbina hidráulica inicia con el análisis de los datos característicos o de diseño con que se cuenta; estos son en general la altura bruta y el caudal disponible. La dimensión en longitud y sección del conducto de admisión o tubería forzada (con las restricciones y condicionamientos del emplazamiento), y el estudio de pérdidas en el mismo que para esa caída nominal se produzcan, reducirán la altura bruta a la neta.

La elección del tipo de turbina y posterior dimensionado y diseño, se realizará a partir de estos datos de  $H_n$  y  $Q$ . Por otra parte, la velocidad de giro viene impuesta por el alternador y es por tanto conocida. Con todos estos datos, se puede definir la velocidad específica (Viedma Robles & Amora Parra, 1997).



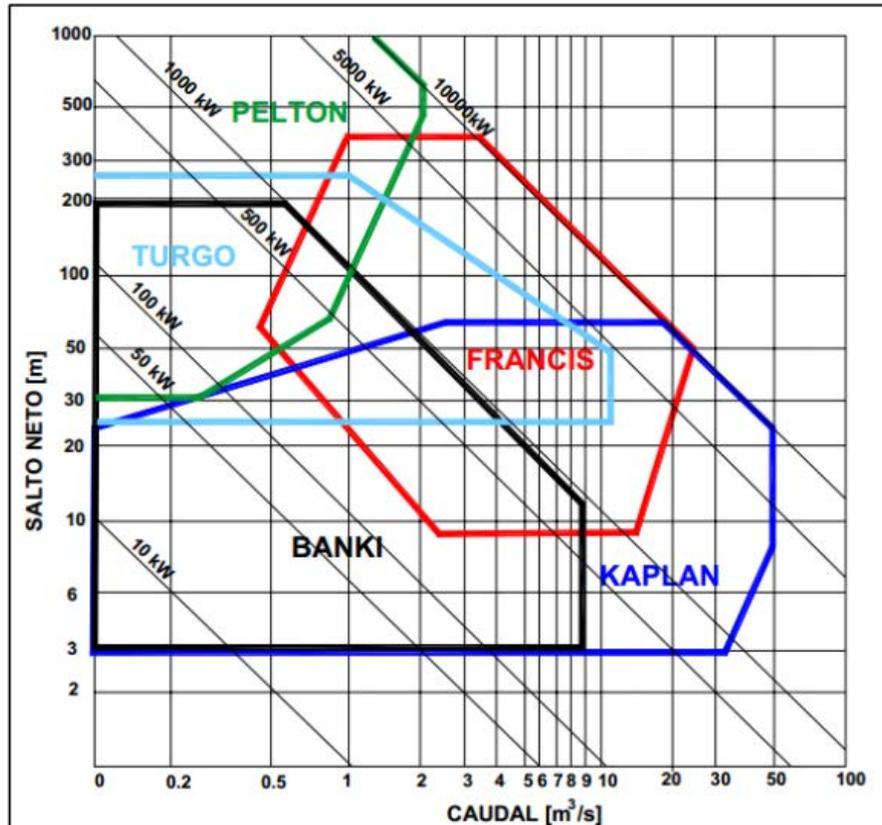


Fig.2.12. Matriz de elección de Turbinas (Marchegiani & Audisio, *Diseño, Construcción y Ensayo de una turbina de Flujo Transversal para Generación Eléctrica en Sitios Aislados.*, 2011).

Posteriormente establecida la velocidad específica y teniendo en cuenta de que se desea un rendimiento máximo en estas condiciones nominales, el tipo de turbina adecuado se obtiene de una tabla o de un gráfico como el de la fig.2.12 (Viedma Robles & Amora Parra, 1997).

### 2.2.3.1.-Turbina Turgo.

La Turbina Turgo es una turbina de impulso inventada y desarrollada para un proyecto escocés en 1919 por la Sociedad Americana Gilkes como una variante de la turbina Peltón. Más de 60 países alrededor del mundo cuentan bajo condiciones de operatividad a estas turbinas (Benzon, 2013).

Teóricamente, se puede considerar de eje vertical, donde el rotor está conformado por álabes muy característicos y similares a un casquete hemisférico achatado y con un radio de apertura cercano a los  $160^\circ$ . Los álabes no son perpendiculares al plano de rotación, pero sí ligeramente inclinados respecto a éste, de manera que el chorro que impacta sea perpendicular a su apertura. Así mismo, se encuentran soldados entre sí en el borde lateral interno y cercano al eje, como por el cinturón que los contiene en el borde exterior, en algunos casos.

Una turbina Turgo puede trabajar en saltos con alturas comprendidas entre 50 m y 300 m, es una turbina de acción, donde el chorro de agua incide con un ángulo de  $20^\circ$  respecto al plano diametral del rodete, entrando por un lado del disco y saliendo por el otro, simultáneamente sobre varios alabes. Su menor diámetro conduce, para igual velocidad periférica, a una mayor velocidad angular, lo que facilita su acoplamiento directo al generador, lo que la hace ideal para aplicaciones de micro y pico generación con un costo efectivo favorable y, que a su vez, pueden ser adaptadas a la carga eléctrica de una vivienda para contrarrestar el consumo eléctrico proveniente de la red.

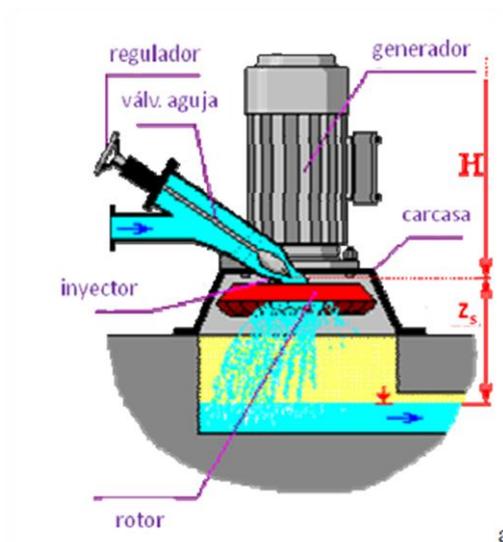


Fig.2.13. Componentes de un sistema Tugo (Clamberauz Correa, 2012).



Fig. 2.14. Turbina Turgo (Ramírez del Barrio, 2012).

### 2.2.3.2- Turbina Michell Banki

La turbina Michell -Banki presenta una alternativa favorable en cuanto a su aplicación a pequeños aprovechamientos hidroeléctricos. Las ventajas inherentes a su concepción y diseño hacen factible su fabricación en industrias locales que no posean tecnologías de producción complejas; además, esto otorga una seguridad respecto de la disponibilidad de repuestos, lo cual puede definir, en muchos casos, la aplicación del equipamiento propuesto. (Marchegiani & Audisio, Diseño, Construcción y Ensayo de una turbina de Flujo Transversal para Generación Eléctrica en Sitios Aislados., 2011).

#### Descripción.

Se trata de una turbina de acción ya que opera por lo general a presión atmosférica, flujo radial centrípeto- centrifugo, de flujo transversal, de doble paso ya que el flujo de agua incide sobre los alabes en dos oportunidades, entrada y salida y de admisión parcial ya que el flujo de agua actúa sobre un sector de los alabes del rotor (Egúsqiza Goñi & Sánchez Camones, 2009).

La turbina consta de dos elementos principales: un inyector y un rotor. El agua es restituida mediante una descarga a presión atmosférica. El rotor está compuesto por dos discos paralelos a los cuales van unidos los álabes curvados en forma de sector circular. El inyector posee una sección transversal rectangular que va unida a la tubería por una transición rectangular - circular (Marchegiani, 2011).

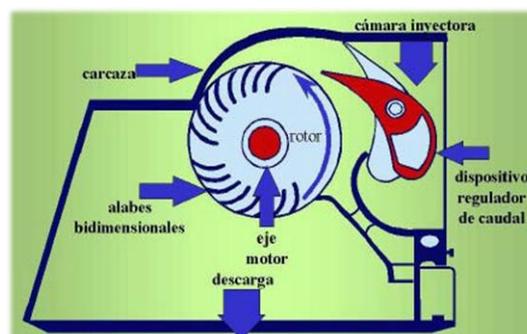


Fig. 2.15.- componentes de un sistema Michell - Banki  
(Egúsqiza Goñi & Sánchez Camones, 2009).

Este inyector es el que dirige el agua hacia el rotor a través de una sección que toma una determinada cantidad de álabes del mismo, y que guía el agua para que entre al rotor con un ángulo determinado obteniendo el mayor aprovechamiento de la energía. La regulación de la potencia se realiza variando el caudal que ingresa a la máquina, mediante un álabe regulador que permite estrechar la sección de pasaje del agua a través de un movimiento sobre su eje.

El chorro entra al rotor con un ángulo que es constante en toda la admisión y tangente a la periferia del rotor. El flujo que abandona las paredes sólidas del inyector es definido como un chorro libre. La diversidad de diseño en la geometría del inyector hace que se adopten distintos ángulos de admisión. A través de las diversas investigaciones que se han realizado sobre esta máquina los ángulos de admisión del inyector van desde los  $30^\circ$  hasta los  $120^\circ$  (Marchegiani, Simulación numérica del flujo en una turbina tipo Banki, 2011).

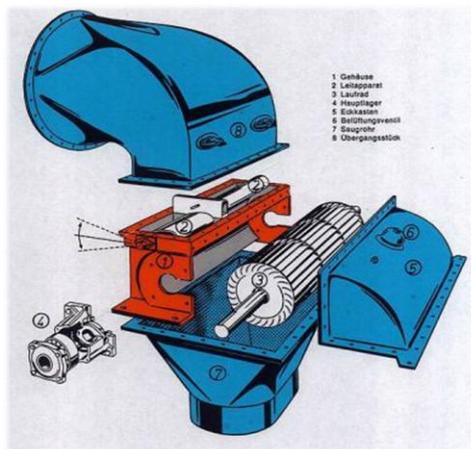


Fig. 2.16.- Vista interior de una Turbina Michel Banki (Egúsqiza Goñi & Sánchez Camones, 2009).

La energía del agua es transferida al rotor en dos etapas, lo que también da a esta máquina el nombre de turbina de doble efecto, y de las cuales la primera etapa entrega un promedio del 70% de la energía total transferida al rotor y la segunda alrededor del 30% restante como se puede observar en la fig. 2.17 (Marchegiani, 2011).

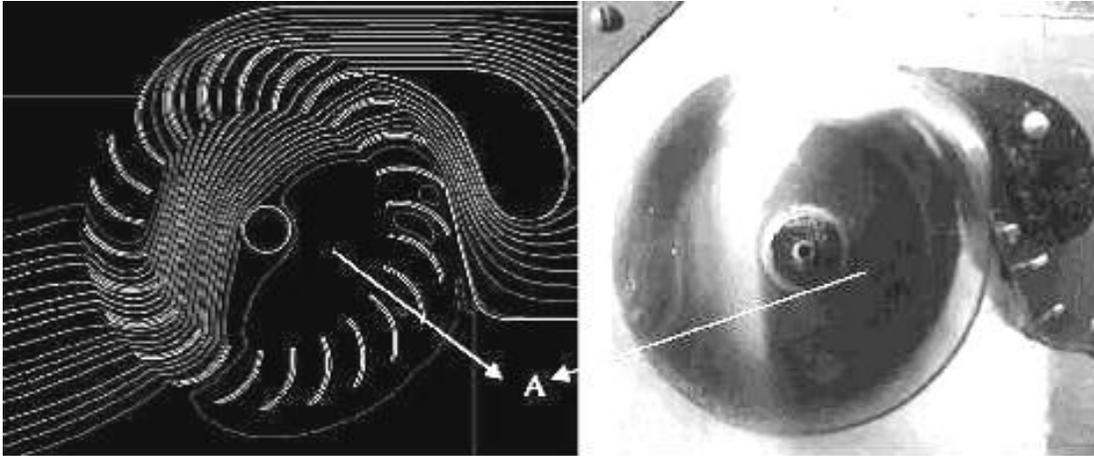


Fig. 2.17. Flujo Cruzado en una turbina Michel Banki  
(Marchegiani, Simulación numérica del flujo en una turbina tipo Banki, 2011).

#### **2.4.- Sistema de Bombeo Fotovoltaico**

El proceso de extracción de agua es aquel que, mediante un sistema mecánico, es posible elevar agua desde un cierto nivel y llevarlo a otro en donde estará a disposición del usuario. Para realizar esto, el sistema mecánico tiene que realizar cierto trabajo y vencer la fuerza que ejerce la Tierra sobre el volumen de agua que hay que elevar a la altura deseada.

Un sistema de Bombeo Fotovoltaico (FV) es la integración de dos tecnologías para satisfacer una necesidad de agua. La tecnología fotovoltaica que transforma la luz del sol en electricidad y la tecnología del bombeo de agua que transformará dicha electricidad en energía hidráulica para extraer el agua requerida.

Hay varias alternativas mediante las cuales se puede acoplar ambas tecnologías. Cada una de ellas depende del tipo de sistema de bombeo seleccionado, y dentro de los cuales se tienen motores corriente directa (CD) y Corriente Alterna (AC), y bombas centrífugas y de desplazamiento positivo. Sin embargo, independientemente de la tecnología de bombeo que elija, se debe tener presente que el desempeño diario y rendimiento dependerá de la manera en que se comporte la radiación solar y de la temperatura de operación del arreglo FV.

### **Acoplamiento Directo.**

Cuando una carga se conecta directamente a un arreglo FV se dice que se tienen un acoplamiento directo. Esta configuración es la más simple de todas las alternativas en que se puede ensamblar un sistema FV. La única condición que se exige para establecer es que la carga opere con corriente directa. Si hay Sol hay generación de electricidad y la carga funciona. Si no hay sol, no hay electricidad y la carga no funciona.

### **2.3.- PARÁMETROS HIDRÁULICOS.**

#### **Demanda o requerimiento de agua.**

Cantidad de agua solicitada por un usuario, en un tiempo determinado, para satisfacer cierta necesidad. Se mide en litros, l y se especifica por día, por mes ó por temporada.

#### **Capacidad del pozo ó noria.**

Es la cantidad de agua que la fuente puede suministrar en un tiempo determinado(día, mes, etc.) Se mide en litros o metros cúbicos.

#### **Razón de flujo o Gasto.**

Volumen de agua que se desplaza por una tubería en la unidad de tiempo. Es el producto de la velocidad,  $v$ , que lleva el líquido por el área de la sección transversal,  $S$ , de la tubería. Se simboliza  $Q$  y se mide en litros por segundo, ó metros cúbicos por hora. Si el volumen,  $v$ , a la que se desplaza el agua por una tubería cuya sección transversal tiene un área  $S$ , está dada por

$$Q = v S$$



### **Régimen de bombeo, $R_b$ .**

Es el volumen de agua proporcionado por la bomba en la unidad de tiempo. Si el volumen se mide en litros, l, y el tiempo en segundos, s, el régimen de bombeo se mide en litros/segundo (l/s).  $R_b = V/t$  Aforo: Es el procedimiento mediante el cual se cuantifica la capacidad de una fuente de agua (pozo ó noria). Este se debe de realizar con un régimen de bombeo igual al requerido para satisfacer la demanda de agua diaria. Al mismo tiempo, permite conocer el nivel de abatimiento.

### **Ademe.**

Diámetro del tubo de protección ó "camisa" del pozo.

### **Espejo de Agua.**

Superficie en reposo del agua dentro del pozo o noria.

### **Nivel estático.**

Profundidad a la que se ve el espejo de agua en estado estacionario. Esta representado por B, se mide en metros , m.

### **Nivel dinámico.**

Profundidad a la que se ve el espejo de agua en el proceso de bombeo (durante la extracción),

### **Nivel de descarga.**

Altura a la que hay que elevar el agua . Distancia desde la superficie hasta el borde superior del tanque de almacenamiento, está representado por A, se mide en metros, m.

### **Profundidad de abatimiento.**

Diferencia de distancias entre el nivel estático y el dinámico. Esta representador por C, también se llama simplemente abatimiento, se mide en metros, m.



### **Altura de fricción.**

Distancia adicional que hay que considerar debido a la fuerza de fricción que opone las paredes de la tubería, conexiones, y válvulas, al flujo de agua.

### **Profundidad de succión o aspiración.**

Es la distancia que hay desde el centro de una bomba superficial al espejo de agua.

### **Carga Hidráulica.**

Es la distancia a la que se debe de elevar el agua desde el nivel de bombeo hasta la altura que se requiera (superficial, nivel de descarga, etc.). Esta cantidad se mide en metros, m (unidad de longitud). También se mide en pies (ft)

### **Carga estática.**

Es la distancia a la que hay que llevar el agua desde el nivel estático hasta el nivel de descarga. La carga estática simbolizada por CE y medida en metros (m), estará dada por la suma entre la profundidad del espejo de agua (B), con la altura de descarga (A).

$$CE = A + B$$

### **Carga dinámica o de fricción.**

Carga adicional que aparece cuando el agua se desplaza dentro de la tubería, en toda su longitud, a un gasto dado. Se simboliza por CF y también se mide en metros (m). Se cuantifica por factores físicos que dependen del tipo de tubería, longitud y área de la misma , y el gasto que circula en ella.

### **Carga dinámica total.**

Es la carga hidráulica total en el proceso de bombeo. simbolizada por CDT, esta definida como la suma de todas las cargas: la estática con la fricción. Es la suma



de la altura de bombeo con la profundidad estática con la profundidad de abatimiento y con la pérdida por fricción, es decir:

$$CDT = A + B + C + CF$$

### **2.4.- CENTRAL HIDROELÉCTRICA**

Una central hidroeléctrica es una instalación cuya misión es convertir la energía potencial y cinética del agua en energía eléctrica disponible. Lo cual implica que la central hidroeléctrica este formada por todos aquellos elementos que intervienen en esta transformación, elementos de diverso tipo:

- Elementos de retención y almacenaje de agua, tales como embalses, presas o azudes.
- Elementos de conducción del agua, tales como obras de toma, canales, cámaras de carga, tuberías, sifones, etc.
- Elementos de apertura y cierre del paso de agua: compuertas, válvulas.
- Equipamiento hidráulico: turbina, multiplicador, rejas y limpiarrejas.
- Equipamiento eléctrico: generador, transformador, línea eléctrica.
- Equipamiento de control y protección: interruptores, seccionadores, auto-válvulas, red de tierras, etc.
- Equipamiento auxiliar: baterías de corriente continua iluminación, tomas de fuerza, etc.
- El edificio de la central.

Todos los elementos que intervienen, desde la captación del agua hasta su devolución al cauce, todo el equipamiento que intervienen en la transformación energética hasta la entrega de la energía eléctrica donde la compañía eléctrica disponga, forman parte de la central (Sanz Osorio, 2008).

Por lo tanto, en el análisis de una central hidroeléctrica se debe considera dos grandes bloques:

- Obra civil
- Equipamiento electromecánico



### **Clasificación administrativa**

Desde el punto de vista administrativo, las centrales hidroeléctricas se dividen en tres grupos según sea su potencia:

- Centrales de más de 50 MW
- Centrales de entre 10 y 50 MW
- Centrales de menos de 10 MW (hidráulica pequeña)

Las mini centrales son reconocidas como generadoras de energías renovables, quedando las dos primeras fuera de esta categoría. La razón de esta diferencia proviene del distinto impacto medioambiental que unas y otras producen, considerándose que las centrales de más de 10 MW, a pesar de producir energía con el agua, generan un impacto de carácter medioambiental de tal calibre que no pueden considerarse como renovables (Sanz Osorio, 2008).

Dentro de las mini centrales, y en función de la potencia, se encuentra el subgrupo de micro centrales , que son las de menos de 100 Kw. Estas tienen el mismo tratamiento que el resto de las mini centrales, pero técnicamente son muy simples, por lo que suelen incluirse en un grupo propio (Sanz Osorio, 2008).

### **Clasificación técnica**

Las centrales hidroeléctricas presentan una gran diversidad en todos los aspectos; es difícil encontrar dos centrales iguales, pero existen dos configuraciones básicas para las centrales hidroeléctricas: la primera basada en presas con embalses y la segunda, de gestión del-río esquema (sin depósito). El esquema de la presa puede ser subdividido en pequeñas presas con regulación noche y día, las grandes presas con un almacenamiento estacional y plantas de almacenamiento y bombeo reversible, tanto para la generación de bombeo y la electricidad que se utiliza para el almacenamiento de energía, regulado en el día y la noche, de acuerdo con la demanda de electricidad (IRENA, 2015), se considera la siguiente clasificación.



- 1) Centrales de embalse
- 2) Centrales de agua fluyente
- 3) Centrales mixtas

La diferenciación, se debe más a su modo de operar que la configuración técnica de los elementos que las forman.

### **1) Centrales de embalse**

Tienen como característica básica la existencia de un embalse en el que se almacena el agua y del que se realiza la toma de agua, con capacidad suficiente como para permitir una regulación del caudal superior a un día. Su funcionamiento es muy simple. En momentos de alta demanda energética funcionan como centrales turbinando el agua. Sin embargo, en momentos de baja demanda energética, en la que el precio de la energía es muy bajo ( y el nivel de embalse es superior lo permite), funcionan bombeando agua del embalse inferior al embalse superior, asegurando de esta forma la posibilidad de turbinar cuando la demanda lo requiera (Sanz Osorio, 2008).

Las centrales de agua embalsada regulan los caudales de salida para utilizarlos cuando sea necesario. Tienen la capacidad de generar cantidades considerables de electricidad en forma constante durante ciertos periodos, pero causan impactos ambientales y sociales como: la obstrucción de la corriente de ríos, la inundación de áreas considerables y la re-ubicación de comunidades. Este tipo de centrales son de tamaño mediano o grande en donde el caudal aprovechado por las turbinas es proporcionalmente muy grande al caudal promedio anual disponible en el río (Ramírez del Barrio, 2012).

### **2) Centrales de agua fluyente.**

Son centrales que no disponen de embalse de regulación y que deben turbinar el agua que circula por el cauce del río o del canal a medida que esta pasa. Las centrales a filo de agua son aquellas instalaciones que mediante una obra de toma, captan una parte del caudal del río y lo conducen hacia la central para su



aprovechamiento y después lo devuelven al cauce del río. Esta disposición es característica de las centrales medianas y pequeñas, en las que se utiliza una parte del caudal disponible en el río para la producción de energía hidroeléctrica (Ramírez del Barrio, 2012).

### **2.1.- Centrales ubicadas directamente en el azud.**

Su configuración es muy similar a la de un pie de presa, pero de menor tamaño y potencia. Son centrales ubicadas que no detraen ninguna cantidad de agua del cauce, y , por lo tanto no dejan ninguna zona seca o con bajos caudales.

### **2.2.- Centrales con canal de derivación**

Son centrales que toman el agua mediante una obra de toma dispuesta en el azud y la dirigen hacia la central mediante un canal. DE esta forma se consigue un salto más elevado. Estas centrales detraen agua del cauce, por lo que, para evitar que el tramo afectado quede seco, deben asegurar un caudal de servidumbre o caudal ecológico. Cuando el caudal en el cauce es superior al que la central puede turbinar, este pasa por encima del azud siguiendo su camino por el cauce natural del río.

### **2.3.- Centrales mixtas**

Son centrales que disponiendo de un pequeño embalse de captación de agua no tienen capacidad de regulación, o, en caso de tenerla, esta no es superior a un día. Por lo tanto, son centrales que pueden decidir en qué momento del día turbinan, pero que no pueden estar paradas más de un día sin perder agua. Generalmente se ubican en zonas montañosas, en las que el embalse capta el aguade lluvias o procedentes del deshielo.

### **2.4.2.- Sistemas micro hidroeléctricos.**

Son centrales de menos de 100 Kw, con instalaciones que deben satisfacer las necesidades de núcleos aislados tales como granjas, comunidades o similares, por lo tanto, tienen necesidades de regulación específicas.



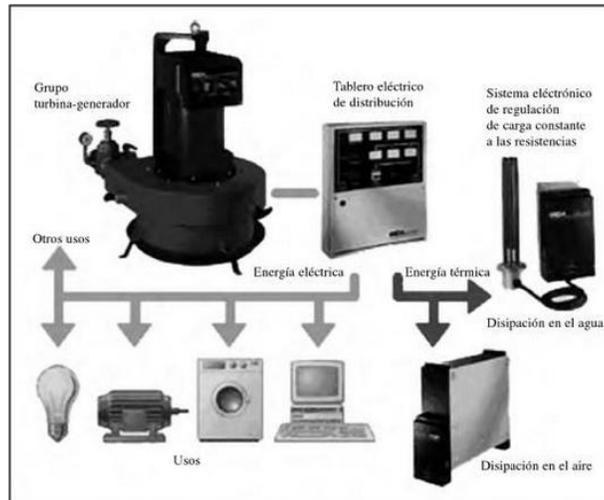


Fig 2.18.- Esquema de un S.M.H. (Suescún Monsalve)

### 2.4.2.1.- Aspectos básicos de centrales hidroeléctricas.

#### Potencia instalada $P_{inst}$ :

La potencia instalada  $P_{inst}$  (también se denomina potencia útil nominal) de la central hidroeléctrica se realiza a partir de la ecuación siguiente:

$$P_{inst} = \gamma * Q_e * H_n * n_t * n_m * n_g * n_{tr}$$

donde:

$n_{tr}$  = Rendimiento del transformador

$P_{inst}$  = Potencia instalada o potencia útil nominal (Kw)

$\gamma$  = Peso específico del agua (9.81KN/m<sup>3</sup>)

$Q_e$  = Caudal de equipamiento (m<sup>3</sup>/s)

$H_n$  = Salto neto (m)

$n_t$  = Rendimiento de la turbina

$n_m$  = Rendimiento del multiplicador

$n_g$  = Rendimiento del generador

Los rendimientos de los diferentes elementos varían con el caudal y el salto, y pueden ser obtenidos de los datos de los fabricantes y de los catálogos. Para centrales hidroeléctricas se puede tomar, como primera aproximación, el producto de todos los rendimientos, comprendido entre 0.8 y 0.85.

Si no se conocen las eficiencias reales de los elementos de la CH, se puede considerar como una primera aproximación, la siguiente ecuación se supone eficiencias comunes (Sanz Osorio, 2008).

$$P_{inst} = 8 * Q_e * H_n$$

### **Altura del Salto de agua H:**

Se denomina salto de agua a la distancia vertical recorrida por una masa de agua desde un determinado nivel superior a otro inferior, se distinguen cuatro tipos de saltos:

**Salto bruto (Hb):** Es el salto total existente, y su valor es igual a la diferencia de altura entre el nivel de aguas arriba del salto y el nivel inferior. El nivel inferior depende del tipo de turbina: en el caso de las turbinas de reacción corresponde al punto de devolución del agua al río, mientras que en el caso de las turbinas de acción el nivel inferior viene dado por el punto donde el agua golpea a las cazoletas del rodete.

**Salto útil (Hu):** Es la diferencia de altura entre el nivel de cámara de carga y el nivel inferior.

**Pérdidas de carga (Hp):** Corresponde a la pérdida de altura efectiva debido a rozamientos en los diversos elementos de conducción y control de caudal, desde el nivel en la cámara y el nivel inferior.

**Salto neto (Hn):** Es el valor obtenido al restarle al salto útil todas las pérdidas de carga Hp. Este es el salto empleado para el cálculo de la potencia de la turbina.

Altura neta o salto neto es la altura puesta a disposición de la turbina. Una turbina absorbe energía hidráulica y restituye energía mecánica. La diferencia entre la



energía específica que tiene el fluido a la entrada de la turbina y a la salida es la energía suministrada a la turbina, que puesta en forma de altura se denomina altura neta  $H$  (Mataix, 1982).

La altura neta no es la altura útil aprovechada por la turbina, sino la altura teórica que hubiera aprovechado si no hubiera habido pérdidas. Parte de esta altura se disipa, pues, en pérdidas hidráulicas, y el agua intercambia con el rodete una altura menor que la que ha absorbido (Mataix, 1982).

Es importante determinar en qué sección comienza la máquina y en que sección termina, las normas coinciden en las expresiones de la altura neta, el objeto de la norma es determinar precisamente las secciones de entrada y salida.

Altura neta es la diferencia de alturas totales entre la entrada y la salida de la turbina. Las normas más empleadas en la actualidad son las normas internacionales para los ensayos de las turbinas hidráulicas en las centrales hidroeléctricas.

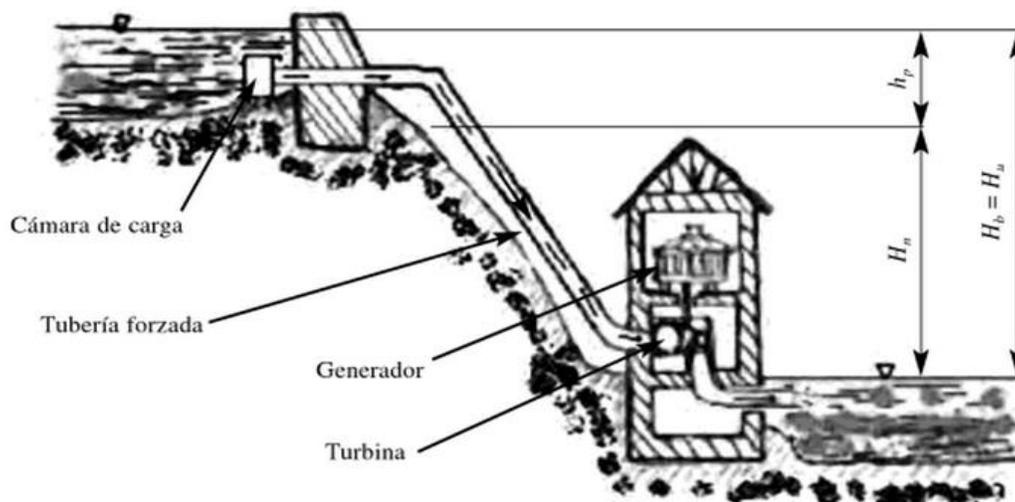


Fig. 2.19.- Representación de las alturas en una central hidroeléctrica (Sanz Osorio, 2008).

### Métodos de medida del salto

La medida del salto bruto no es sencilla, depende del nivel de potencia y de las características físicas del terreno; sin embargo, su conocimiento es fundamental, ya que la potencia generada, y por ello la energía producida, depende

directamente de este parámetro. Existen varias formas de medición que sirven como estimación inicial con más o menos precisión, pero, debido a la importancia de levantamiento topográfico del emplazamiento. A continuación se exponen brevemente algunos de los métodos sencillos.

Como primera aproximación se pueden utilizar los mapas detallados del terreno, como por ejemplo, las curvas de nivel obtenidas en los mapas de escala topográficos. En los casos de poco desnivel y en los que el terreno sea fácilmente accesible, simplemente mediante una regla, una tabla y un nivel se puede medir el salto total.

Si el aprovechamiento dispone ya de una tubería o se puede aplicar una manguera, podrá conocerse el salto directamente mediante un manómetro con el agua detenida, teniendo en cuenta que 1 atmósfera equivale aproximadamente a 10 m de altura.

Una vez conocida la altura del salto total del aprovechamiento, se debe descontar una cantidad debida a los rozamientos que sufre el agua dentro de los conductos, desde la captación hasta la turbina. Dichos cálculos se podrán realizar con precisión una vez definidos los elementos que forman la central.

### **Caudal Q**

El caudal se define como el volumen de agua por unidad de tiempo que atraviesa una superficie. Sus unidades en el sistema internacional son ( $m^3/s$ ). En general, el caudal de un aprovechamiento sufre grandes variaciones tanto estacionales como anuales, pudiéndose constatar la existencia de periodos húmedos, secos o medios, sin que exista un ciclo claramente definido. Por este motivo es conveniente disponer del número de datos suficiente como para asegurar que abarcan todos ellos. Debería disponerse de al menos un dato del caudal diario durante un periodo de 15 a 20 años, aunque esto dependerá del a cuenca concreta que se analice. A partir de todos estos datos se obtienen:

- La curva de caudales medios diarios de un año tipo.



Representa el caudal medio diario de todos los años de los que se dispone de datos de caudal. Se obtiene calculando el promedio de los caudales de cada uno de los días del año.

- Curva de caudales medios clasificados.

Se obtiene ordenando de mayor a menor los datos de la curva de caudales medios diarios, permitiendo conocer de esta forma el número de día en los que se supera un determinado caudal.

- Curva de caudales del año más seco.

Representa el caudal del año más seco del que se disponga. Esta curva se utilizará para el estudio de sensibilidad económico.

### **2.4.3.- Ecuación de Darcy - Weisbach**

La ecuación de Darcy -Weisbach es una ecuación ampliamente usada en hidráulica. Permite el cálculo de la pérdida de carga debida a la fricción dentro una tubería llena. La ecuación fue inicialmente una variante de la ecuación de Prony, desarrollada por el francés Henry Darcy. En 1845 fue refinada por Julius Weisbach, de Sajonia.

Esta fórmula permite la evaluación apropiada del efecto de cada uno de los factores que inciden en la pérdida de energía en una tubería. Es una de las pocas expresiones que agrupan estos factores. La ventaja de esta fórmula es que puede aplicarse a todos los tipos de flujo hidráulico (laminar, transicional y turbulento), debiendo el coeficiente de fricción tomar los valores adecuados, según corresponda (Vicente, 1995).

### **Fórmula general**

La forma general de la ecuación de Darcy-Weisbach es:



$$h_f = f * \frac{L}{D} * \frac{V^2}{2g}$$

siendo:

$h_f$  = pérdida de carga debida a la fricción (m).

$f$  = factor de fricción de Darcy (adimensional).

$L$  = longitud de la tubería (m).

$D$  = diámetro de la tubería (m).

$V$  = velocidad media del fluido (m/s).

$g$  = aceleración de la gravedad  $\approx 9,80665 \text{ m/s}^2$ .

La fórmula de Darcy–Weisbach puede ser escrita, en función del caudal  $Q$ , como:

$$h_f = f \frac{8}{g} * \frac{L}{\pi^2} * \frac{Q^2}{D^5}$$

#### 2.4.4.- Generación de curvas de potencia eléctrica.

El rendimiento o eficiencia en una central hidroeléctrica es el cociente entre la energía de salida y la energía de entrada del elemento en cuestión (circuito, alternador, turbina, grupo, etc.). La determinación de estos rendimientos requiere por tanto la medida y el cálculo de una serie de parámetros, tales como: potencia eléctrica, pérdidas, caudales, salto neto, salto bruto, salto estático, velocidades, aceleración de la gravedad, densidades, cotas, etc.



**Rendimiento de la turbina ( $\eta_t$ ):**

Se define, en función de potencias (P), por la expresión:

$$\eta_t = \frac{P_{\text{salida turbina}}}{P_{\text{entrada turbina}}}$$

Potencia de entrada a la turbina ( $P_e$ ):

$$P_e = \rho \cdot g \cdot Q_t \cdot H_n$$

Donde :

$\rho$  = densidad del agua

$Q_t$  = caudal turbinado

$g$  = aceleración local de la gravedad

$H_n$  = salto neto

Potencia de salida de la turbina ( $P_t$ ):

$$P_t = P_a + \delta_a + \delta_v + \delta_c + \delta_g$$

Donde:

$P_t$  = potencia en el eje de la turbina

$\delta_v$  = pérdidas en volantes de inercia

$P_a$  = potencia en barras del alternador

$\delta_c$  = pérdidas en cojinetes

$\delta_a$  = pérdidas del alternador

$\delta_g$  = pérdidas en engranajes

Con lo cual la expresión del rendimiento de la turbina, expresado en %, queda como:

$$\eta_h (\%) = \frac{P_a + \delta_a + \delta_v + \delta_c + \delta_g}{\rho \cdot g \cdot Q_t \cdot H_n} \times 100$$



**Rendimiento del circuito hidráulico ( $\eta_h$ ):** El circuito hidráulico es el elemento de transporte del fluido, su eficacia se mide en términos de pérdida de carga y se define como:

$$\eta_h = \frac{P_{hn}}{P_{ht}} = \frac{H_n}{H_t}$$

Donde:

$P_{hn}$  = potencia hidráulica neta

$H_n$  = salto neto

$P_{ht}$  = potencia hidráulica total disponible

$H_t$  = salto total

**Rendimiento del alternador ( $\eta_a$ ):** Es la relación entre la potencia eléctrica desarrollada por el alternador ( $P_a$ ) y la potencia mecánica absorbida por el mismo ( $P_{ma}$ ).

$$\eta_a = \frac{P_a}{P_{ma}}$$

**Rendimiento del grupo ( $\eta_g$ ):** Es el rendimiento del conjunto turbina-alternador.

$$\eta_g = \eta_t \cdot \eta_a$$

**Rendimiento total de la instalación ( $\eta_I$ ):** Se define como la relación entre la potencia eléctrica desarrollada por los alternadores ( $P_a$ ) y la potencia hidráulica total disponible ( $P_{ht}$ ).

$$\eta_I = \frac{P_a}{P_{ht}}$$



### **CAPITULO 3**

## **DISEÑO DEL BANCO DE PRUEBAS DE TECNOLOGÍAS HIDRÁULICAS DE FUENTES RENOVABLES.**

En este capítulo se describe el proceso efectuado para realizar el diseño del banco de pruebas; desde las consideraciones físicas hasta llegar a la comprensión del diseño de los componentes estructurales del banco de pruebas, la selección de equipos e instrumentos de medición para la conformación del banco de pruebas, así como la base para la construcción del laboratorio.



### **3.1.- CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO DEL BANCO DE PRUEBAS**

El banco de pruebas de tecnologías hidráulicas es un conjunto de elementos, partes y componentes. Configurado y distribuido de forma conveniente para evaluar y caracterizar diversas tecnologías de aprovechamiento y transformación de la energía cinética del agua en energía eléctrica.

"Un banco de pruebas es el conjunto de equipos, dispositivos de regulación y control así como instrumentos de medición que permite simular un recurso hidráulico y su aprovechamiento en la generación de energía eléctrica mediante una turbina hidráulica. El registro de las variables, caudal , presión, entre otras permitirán la evaluación del funcionamiento y la determinación de las curvas de operación de la turbina" (Egúsqiza Goñi & Sánchez Camones, 2009).

Para su diseño se tuvieron en cuenta los siguientes elementos:

- |   |  |
|---|--|
| <b>a)</b> La potencia de los sistemas micro hidroeléctricos.          | <b>h)</b> Tipo y medios de conducción de agua.                 |
| <b>b)</b> Tipos de turbinas y oferta tecnológica.                     | <b>i)</b> Tipo y forma de almacenamiento de agua.              |
| <b>c)</b> Costos y disposición de materiales.                         | <b>j)</b> Aprovechamiento de agua subterránea y recirculación. |
| <b>d)</b> Lugar de ubicación.   | <b>k)</b> Facilidad de construcción.                           |
| <b>e)</b> Tipo de variables a determinar.                             | <b>l)</b> Resistencia y durabilidad de los materiales.         |
| <b>f)</b> Equipamiento necesario para la evaluación de las variables. | <b>m)</b> Operación y mantenimiento.                           |
| <b>g)</b> Medidas de seguridad y protección necesarias.               | <b>n)</b> Integración al entorno.                              |

Las variables anteriores fueron contempladas en el análisis del diseño del banco de pruebas, y jerarquizadas en 3 grupos, el primero incluye los incisos a, b, c y d. El segundo los incisos e, f, g, h, i. y el tercero desde el inciso j hasta el n.



En tal sentido, su diseño consideró los tipos de S.M.H. y bombeo de agua, mismos que están en función de las demandas energéticas que deben ser satisfechas en las diversas comunidades típicas del Estado de Chiapas (comunidades pequeñas y aisladas). Estas demandas se establecieron con base en el concepto de mini redes (electrificación de pequeños grupos de viviendas), los estudios socio culturales previos (Farrera, 2011), y a su vez proyectadas a las diferentes aplicaciones que este podrá tener en el desarrollo y evaluación de nuevas tecnologías.

### **3.1.1.-Descripción de las funciones del banco de pruebas.**

Se determinaron las funciones específicas que se realizarán cuando el banco de pruebas se encuentre en operación, con el propósito de distinguir las características determinantes para el diseño del banco de pruebas, así como los factores a evaluar dentro del mismo, las cuales son:

- Representar las características del potencial hidráulico, determinado por el salto hidráulico y el caudal, y determinar el desempeño de los S.M.H. analizados.
- Estudiar diferentes tipos de bombas fotovoltaicas; determinar su desempeño bajo diversas condiciones de profundidad de extracción y alturas de descarga.
- Establecer procedimientos de evaluación de las tecnologías hidráulicas incorporadas al banco de pruebas que permita establecer esquemas de capacitación de alto nivel en materia de energía hidráulica.
- Determinar las zonas de aplicación de la turbina hidráulica, a partir de las curvas de funcionamiento.
- Exploración de nuevos prototipos desarrollados y evaluación de nuevas tecnologías, en comparación con los modelos de referencia.
- Visualizar el proceso de transformación de energía potencial e energía cinética, así como la transformación de energía mecánica a energía eléctrica.

- Validar los diferentes modelos que expliquen los procesos de transformación energética y en caso de ser necesario establecer un modelo propio.

**3.1.2.- Determinación de Condiciones hidráulicas del sistema**

La oferta tecnológica en sistemas de generación eléctrica basados en el aprovechamiento del potencial hidráulico, representó uno de los factores principales considerados al momento de realizar el diseño del banco de pruebas. Estos son los objetos principales en estudio, por lo cual se realizó una búsqueda de los sistemas de generación hidroeléctrica disponibles.

Se considero una capacidad de 5 kW y 3 kW "puesto que son las potencias promedio para el abastecimiento de electrificación a las comunidades rurales". Se analizó las condiciones físicas a los que un S.M.H. en operación se encuentra generalmente sometido, y las características fisiográficas en que el caudal y las variaciones de cotas de los efluentes son similares a los requeridos para estos sistemas.

Se seleccionaron dos sistemas, un S.M.H. Michel Banki y un S.M.H. Turgo. Para estos sistemas el fabricante expresa un salto hidráulico y caudal específico para cada sistema, mismos que serán representados físicamente en el Banco de Pruebas para el adecuado funcionamiento de los sistemas micro hidroeléctricos, siendo estos:

<b>Tipo de S.M.H.</b>	<b>Potencia</b>	<b>Salto Hidráulico</b>	<b>Caudal</b>
<b>Michel Banki</b>	5 kW	30 mts.	40 Lts/s
<b>Turgo</b>	3 kW/w	18 - 20 mts.	30 Lts/s

Tabla 3.1.- Potencia Eléctrica y condiciones necesarias según el fabricante.

**3.2.- DISEÑO DEL BANCO DE PRUEBAS.**

El diseño del banco de pruebas se realizó analizando las necesidades para el desarrollo de las pruebas de S.M.H., esto en lo respectivo a la demanda hidráulica que exigen los equipos micro hidroeléctricos a adquirirse y a las condiciones físicas que el banco de pruebas representa a manera de simular las condiciones, a las cuales los equipos se encuentran sometidos *in situ*.

El salto hidráulico representativo de las condiciones reales de operación de un equipo micro hidroeléctrico in situ en nuestro estado, será simulado a través de las diferencias de cotas (variación del nivel o altura) respectivamente desde el suelo o nivel inferior en el que estarán situados los equipos micro hidroeléctricos dentro del banco de pruebas.

**3.2.1.-Diseño de la Torre.**

Se diseñó una torre que proporcionará la elevación requerida para los saltos hidráulicos, siendo el máximo salto hidráulico de 30 metros, por lo cual la infraestructura a diseñar será de esa misma altura; con características particulares para contener 2 depósitos de 5 mil litros, siendo esto igual a una carga aproximada de 10 Toneladas.

Se determinó construir una torre con 4 armazones metálicos como base, los cuales conforman una estructura de  $3.8 \text{ m}^2 \times 30$  metros de altura.

**a) Zapatas**

Se realizó el diseño de las zapatas con base en las dimensiones y estimaciones de la carga, conformada por 4 zapatas individuales, cada una con una base de  $2.2 \text{ m}^2 \times 0.5 \text{ m}$  y un pilar de  $0.7 \text{ m}^2 \times 2.9$  metros de alto, separadas entre sí 0.3 metros cubriendo una superficie de  $5.5 \text{ m}^2$  como se muestra en la fig.3.1.



PLANO ZAPATA - TORRE METALICA

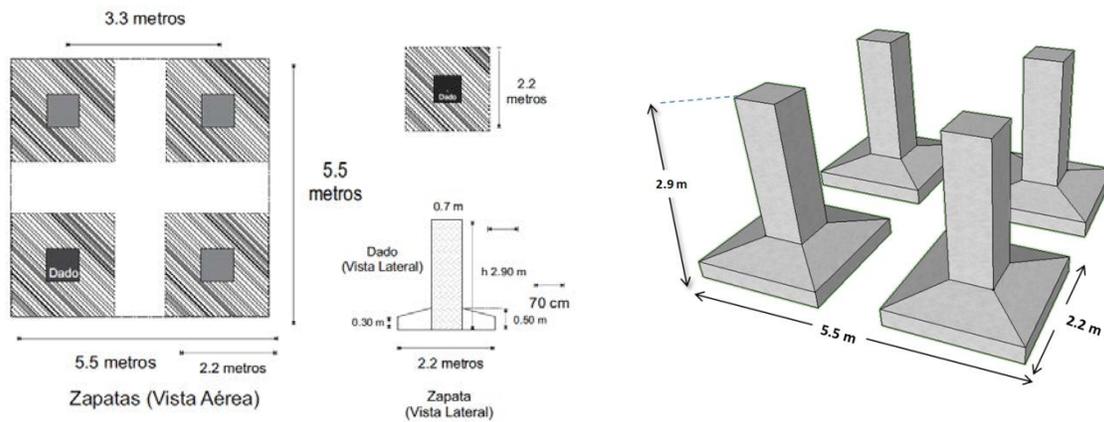


Fig. 3.1. Dimensiones de la Zapata (Medina, Diseños, 2014).

b) Vigas

Los pilares de concreto de las zapatas entrelazan a través de 4 vigas de concreto conformado un marco cementado de  $3.8 \text{ m}^2 \times 0.5 \text{ m}$ . En el centro de cada dado se fijaron marcos de  $0.48 \text{ m}^2$  que soportaran a 4 armazones metálicas de  $0.5 \text{ m}^2 \times 30$  metros de altura como se observa en la fig. 3.2.

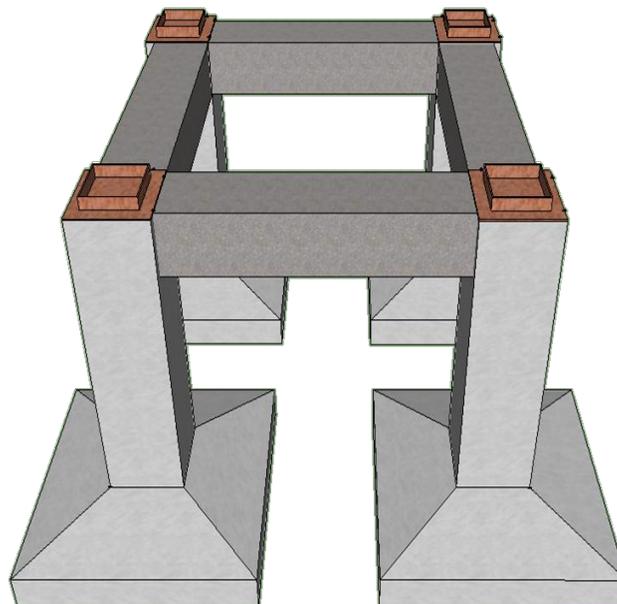
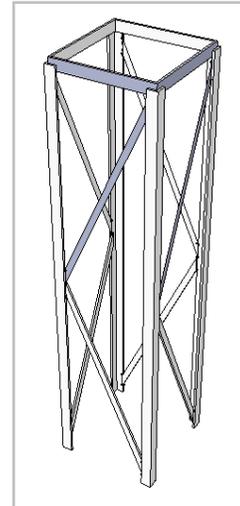


Fig.3.2.- Vigas de Concreto y soportes metálicos de los Pilares de la torre (Medina, Diseños, 2014).

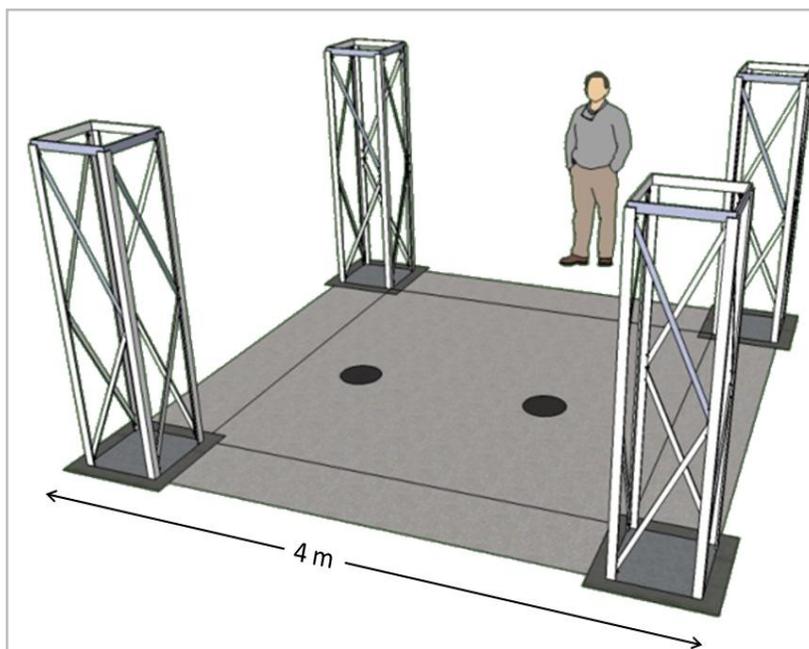
**c) Pilares.**

Se diseñaron piezas ensambladas con ángulos de solera, con dimensiones de  $0.5 \text{ m}^2 \times 2$  metros de altura, los cuales serán las piezas de conformación de los armazones metálicos, teniendo un marco de anclaje en la parte superior, para facilitar el mecanismo de instalación, serán construidas 60 armazones que divididos en los 4 pilares conformarán la estructura final de soporte de las plataformas aéreas.



*Fig.3.3.- Armazón metálica (Medina, Diseños, 2014).*

Se diseñó la estructuración de 4 pilares verticales que conforman la torre, cada pilar vertical se constituye a través del ensamble de 15 armazones metálicos, alcanzando una altura de 30 metros. Los pilares estarán situados en el área de 4 metros delimitado para la base de la torre (Fig. 3.4.).



*Fig. 3.4.- Vista ubicación de pilares en el banco de pruebas (Medina, Diseños, 2014).*

#### d) Abrazaderas (anclajes).

Se realizó el diseño de abrazaderas metálicas que permitan fijar el sistema hidráulico a los pilares verticales que conformaran la torre, se realizaron 3 diseños de omegas respectivamente para la tubería hidráulica de 2, 4 y 6 pulgadas de diámetro nominal (Fig. 3.5), estas proporcionarán estabilidad a la tubería hidráulica en la operación de los ensayos, así también servirán de anclaje para el soporte distribuido de la línea hidráulica de tubos en vertical.

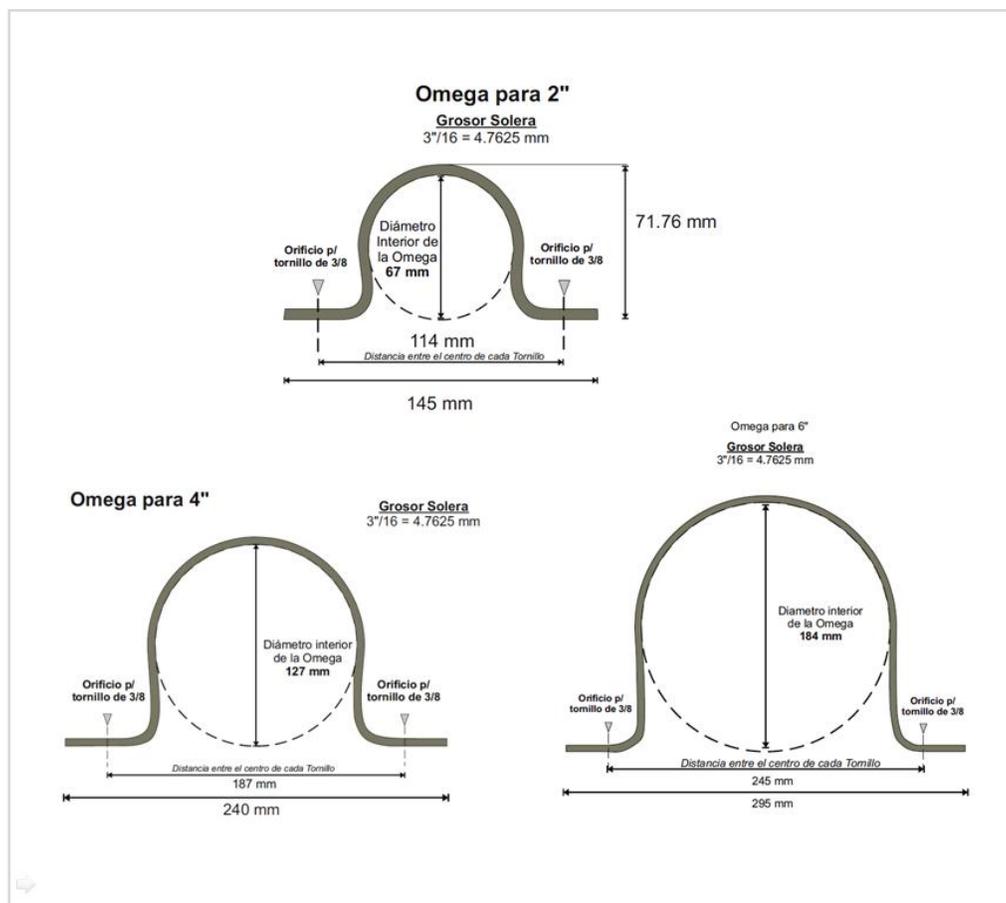


Fig. 3.5.- Diseño de abrazaderas (Medina, Diseños, 2014).

Se consideró necesario el diseño de abrazaderas que permitieran alojar completamente la circunferencia de las diferentes tuberías a utilizar en la instalación hidráulica, sin embargo para la construcción se hizo una adaptación mediante abrazaderas comerciales.

e) Refuerzo y Tensores.

- Refuerzos verticales

Las piezas que abajo se ilustran, serán hechas de ángulo de solera de 2 pulgadas de lado y lado, y una longitud de 30 centímetros, en las cuales se fijaran 4 tornillos, los cuales fijaran el ángulo de solera con las patas de cada armazón (en base a recomendación del estructurista).

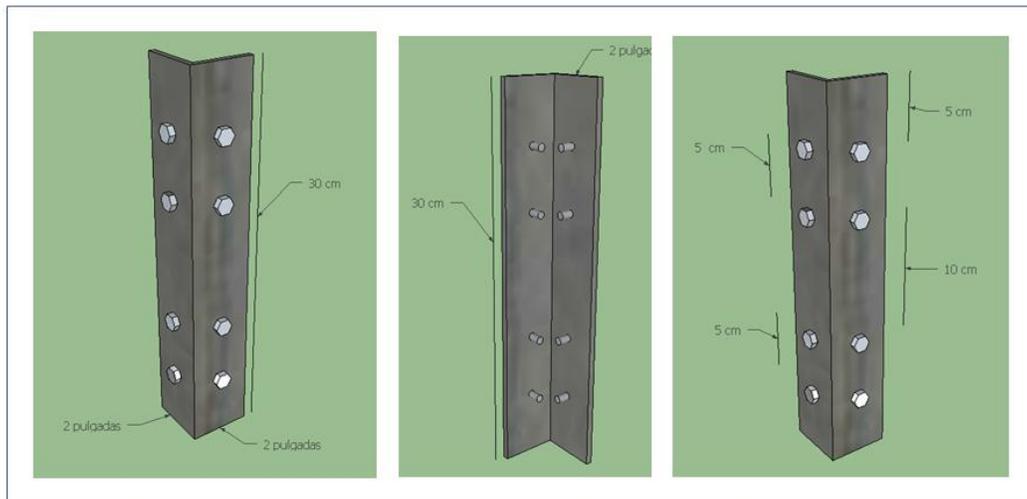


Fig. 3.6. Dimensiones y distribución de tornillos en los refuerzos verticales (Medina, Diseños, 2014).

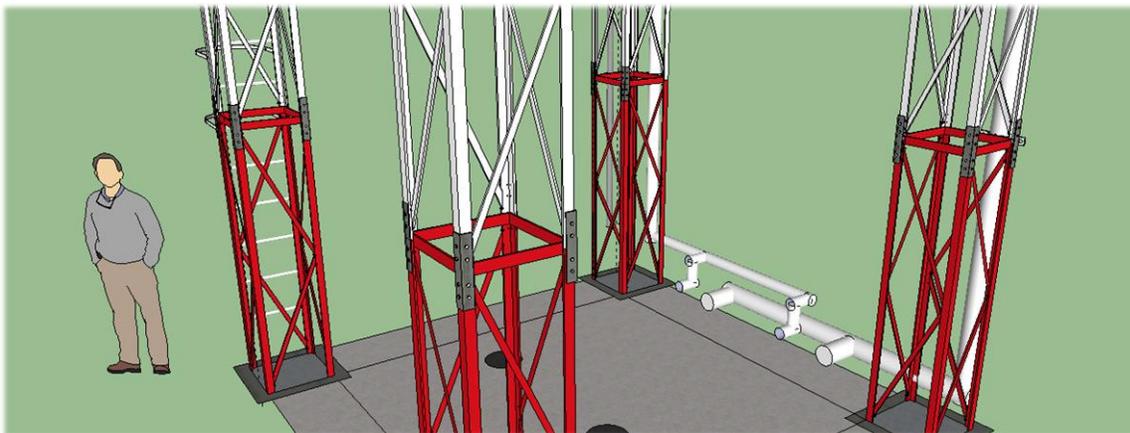


Fig. 3.7. Ángulos de solera fijados en las patas de cada armazón (Medina, Diseños, 2014).

- **Tensores.**

La estructura esta tensada por 12 cables de acero que están sujetos a 4 zapatas; la estructura tiene un esqueleto de acero del cual sale un extremo de 20 cm con un aro para sujetar los cables, y el resto estará cementado en una pieza de cemento de 1 m<sup>3</sup>, como se puede observar en la (fig. 3.8 ).

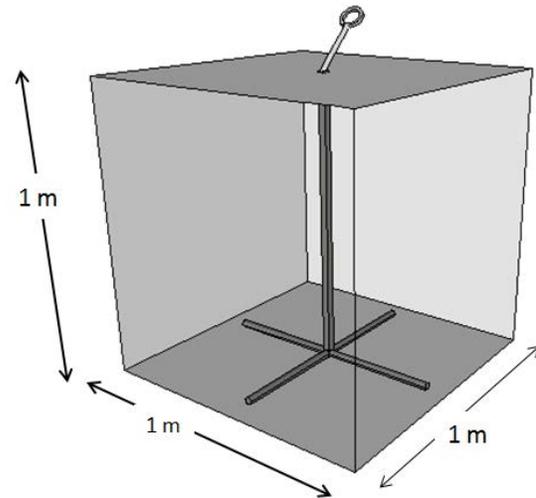


Fig.3.8.- Zapata para tensores (Medina, Diseños, 2014).

**f) Plataformas.**

- **Estructura de Soporte**

Se construirá una estructura que soportará la lamina antiderrapante los cuales constituirán las plataformas aéreas de la torre que estarán sostenidas a 20 metros y 30 metros de altura, cada una soportará una Cisterna con capacidad e 5,000 Lts. Se ha considerado usar PTR de 3.5 in<sup>2</sup> como material para la construcción de las bases de cada plataforma.

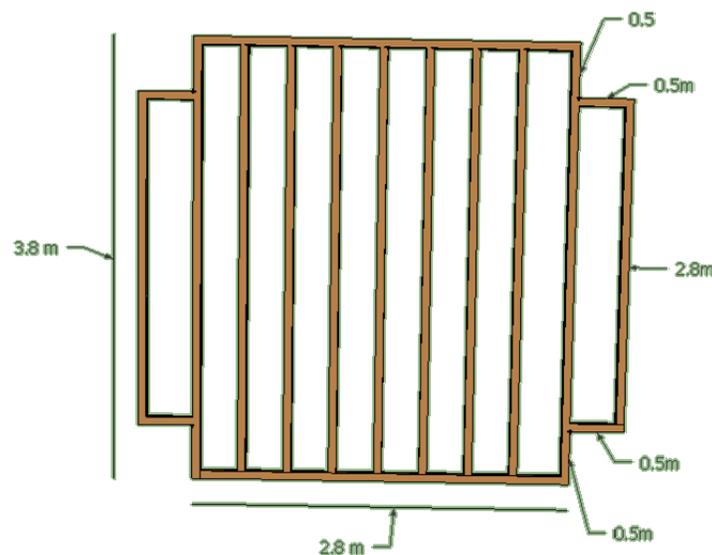


Fig. 3.9. Dimensiones de la estructura de PTR (Medina, Diseños, 2014).

- **Lámina antiderrapante**

La lámina deberá cumplir la función de ser una base firme y que prevenga el derrape sobre su superficie (deberá tener textura rugosa o similar), dicha lamina estará ubicado sobre la estructura de perfil tubular rectangular (PTR) anteriormente comentada. (Se ocupara una en la plataforma a 20 metros de altura y otra en la plataforma a 30 metros de altura).

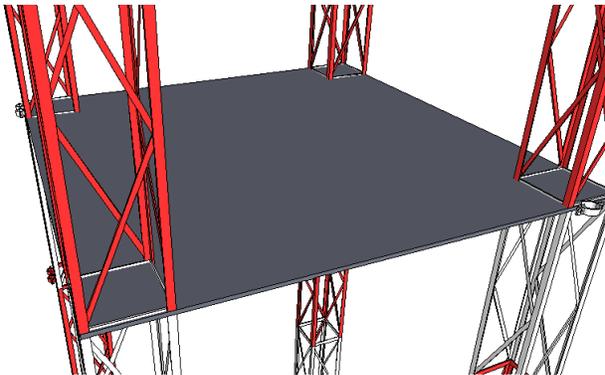


Fig. 3.10. Vista de la Lámina antiderrapante (Medina, Diseños, 2014).

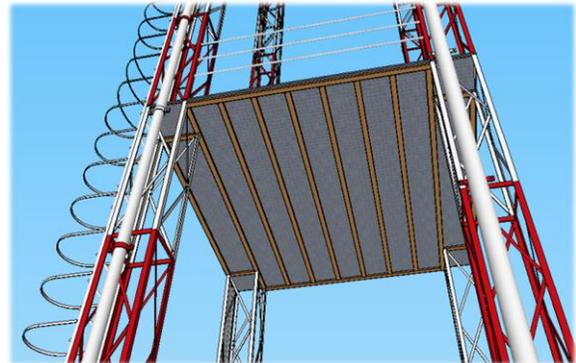


Fig. 3.11. Vista de la estructura de PTR en la plataforma aérea a 20 metros (Medina, Diseños, 2014).

Las plataformas son superficies metálicas de 3.8 m<sup>2</sup> que se fijarán a una altura de 20 metros y 30 metros para brindar soporte a los tanques de almacenamiento de 5,000 litros (fig. 3.12.).

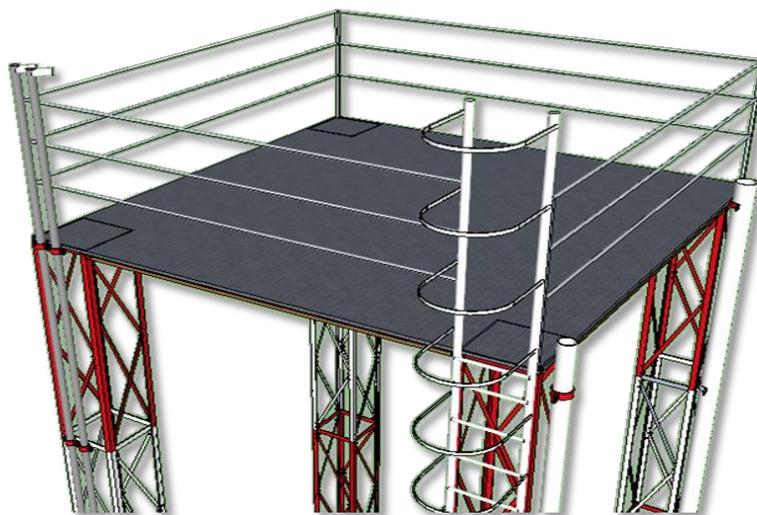


Fig. 3.12.- Plataforma a 30 metros (Medina, Diseños, 2014).

Los tanques de almacenamiento fueron ubicados al centro de la plataforma en dirección Norte - Sur y a 57.5 cm del lado Poniente de la plataforma, con la finalidad de que la tubería hidráulica pueda coincidir en las bridas situadas en la cisterna, y evitar cruzar la tubería en el eje de alguna barrera como puede ser las armazones metálicas

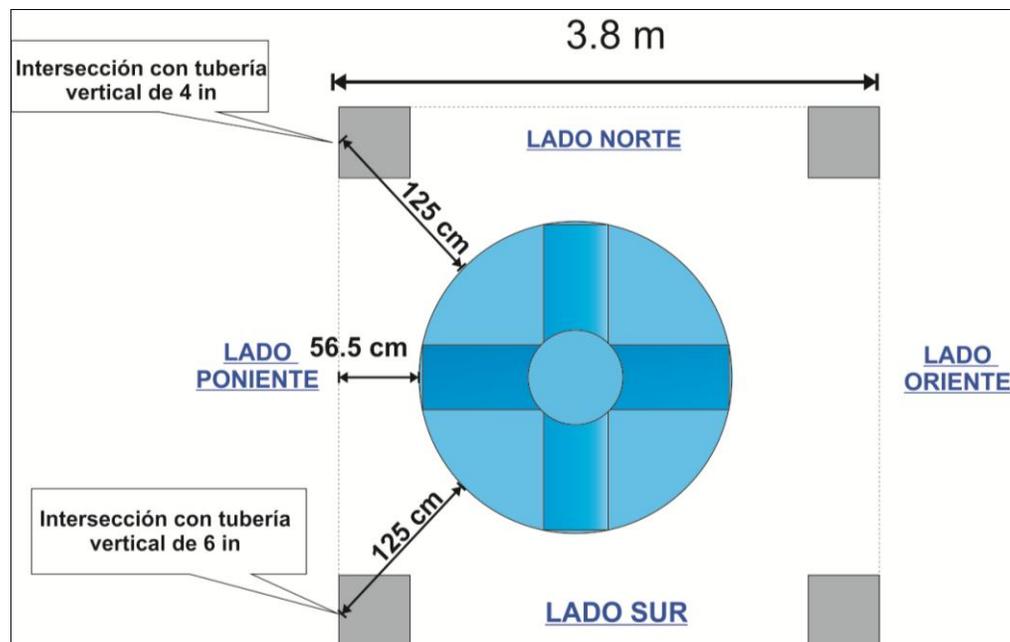


Fig.3.13. Ubicación del tanque de almacenamiento (Medina, Diseños, 2014).

### g) Escaleras

- **Estructura de Soporte**

La escalera tipo marina tendrá una altura total de 31.8 metros, y 0.5 metros de ancho (Fig. 3.14), ya que estará soportada a lo ancho de las armazones metálicas de los pilares como se muestra en la fig. 3.15. Los tramos verticales y los escalones serán construidos con varilla de 1 in, los escalones estarán distribuidos a los largo de la escalera, hasta llegar a la plataforma situada a 30 mts de altura.

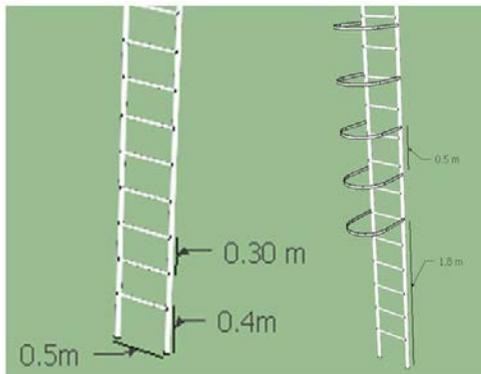


Fig. 3.14. Dimensiones de la escalera marina (escalones desde la base y separación entre barandales) (Medina, Diseños, 2014).

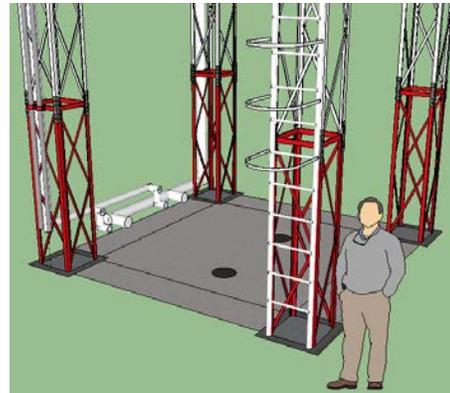


Fig. 3.15. Vista de la escalera marina anclada a una pata de la Torre Hidráulica (Medina, Diseños, 2014).

- **Barandales en Escalera.**

La escalera tendrá provisto como protección al usuario una serie de barandales en forma de U, estos estarán situados desde los 1.8 metros de altura y hasta los 30 metros a lo largo de la escalera. Se usarán barandales con dimensiones específicas, como se muestra en fig. 3.16.

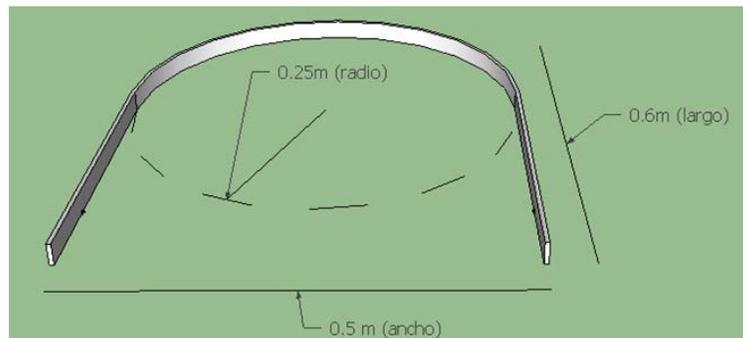


Fig. 3.16 Dimensiones barandales de Escalera (Medina, Diseños, 2014).

En la Plataforma aérea a 20 metros de altura será necesario fijar 3 barandales especiales; los cuales tendrán un diámetro de 1 metro (para permitir moverse de la escalera hacia la plataforma y proteger al usuario, como se muestra en la fig. 3.17

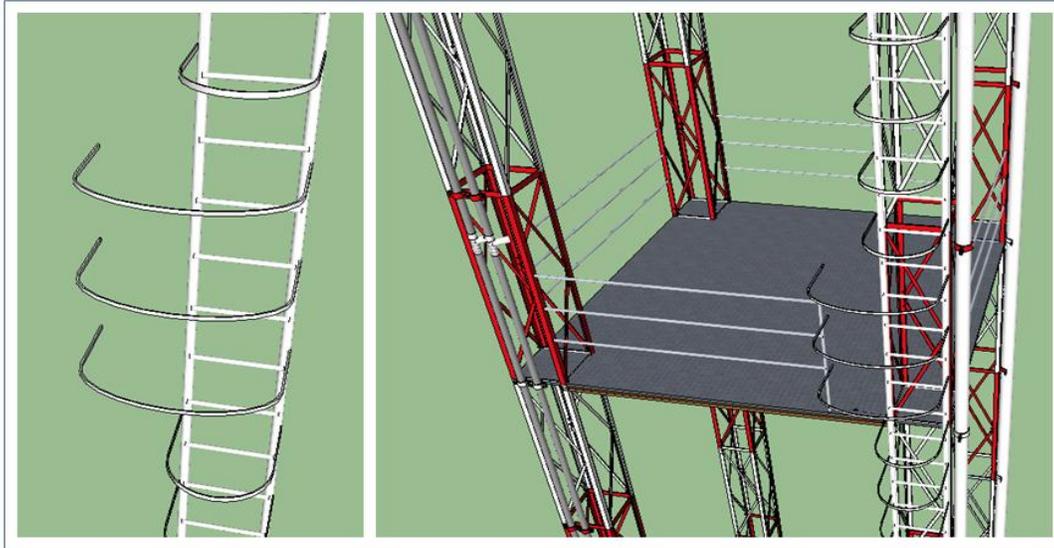


Fig. 3.17. Vista - Barandales especiales en Plataforma a 20 m (Medina, Diseños, 2014).

La escalera marina tendrá escalones hasta los 30 metros, los 1.8 metros restantes solo estarán protegidos con los barandales anti caídas (ya que este estará situado en el acceso a la plataforma situada a 30 metros de altura).

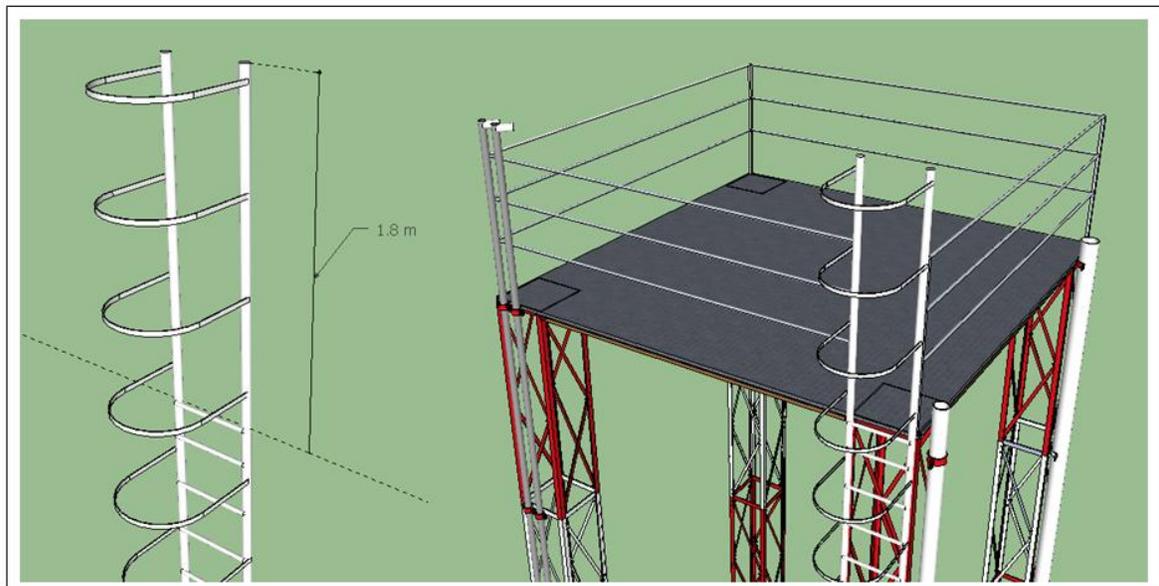
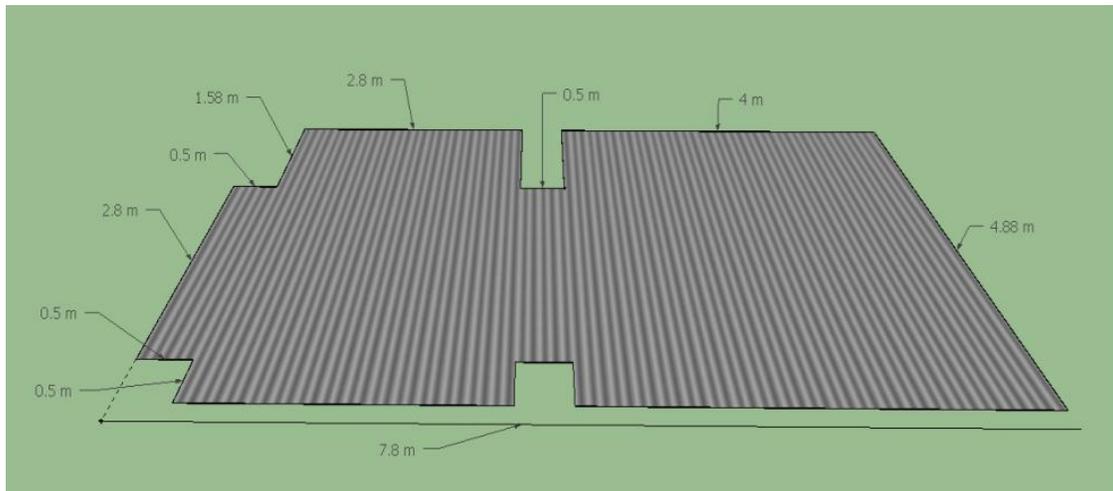


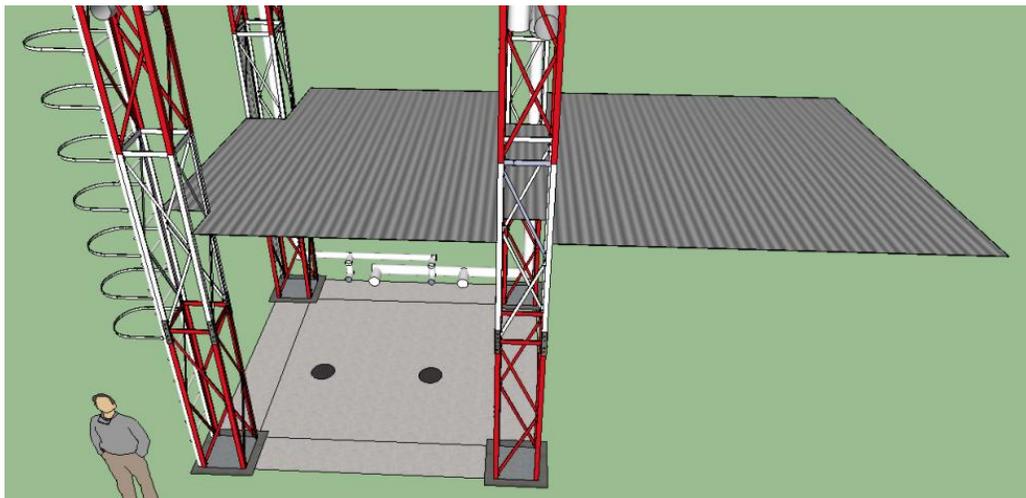
Fig. 3.18. Vista Escalera en Plataforma a 30 m (Medina, Diseños, 2014).

**h) Galera.**

El cuarto de máquinas estará protegido en el techo con una galera hecha a base de PTR y laminas ondulares de zintro alum, con un área de 7.8 m x 4.8 m (Fig. 3.19)., con cortes específicos ubicados en los espacios de los pilares de la estructura del banco de pruebas como se muestra en la fig. 3.20.



*Fig. 3.19. Dimensiones Galera del cuarto de Máquinas (Medina, Diseños, 2014).*



*Fig. 3.20. Vista de la Galera instalada en los pilares (Medina, Fotografía, 2014).*

**Medidas de Seguridad.**

El piso en la base de la torre será construido con concreto en acabado rustico, así también las plataformas tienen laminas antiderrapante para reducir el peligro de deslizamientos del personal que opera en el banco de pruebas, también se construyeron barandales horizontales de 1.5 metros de alto alrededor de las plataformas y la escalera tipo marina será construida con una protección posterior a lo largo de los 31 metros de longitud de la misma para reducir el riesgo de caídas. Es importante señalar que la parte inferior se colocará un sistema de protección con mallas y candado que impida el acceso al personal no autorizado.

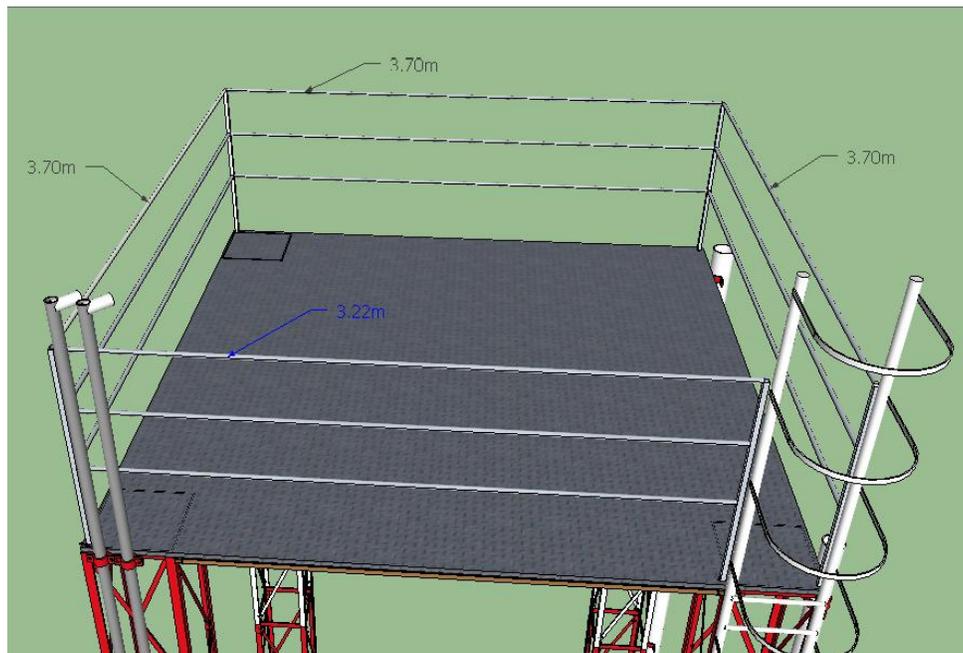


Fig. 3.21. Vista - Barandales de seguridad en Plataforma (Medina, Diseños, 2014).

**3.2.2.-Diseño del sistema Hidráulico.**

**a) Tuberías.**

El sistema hidráulico está conformado por tubería de PVC hidráulico para alta presión, estas conforman líneas de tubería en vertical, horizontal, cisternas para el almacenamiento temporal del agua, así como una serie de bifurcaciones para la regulación del caudal y gestión del ensayo a realizar.

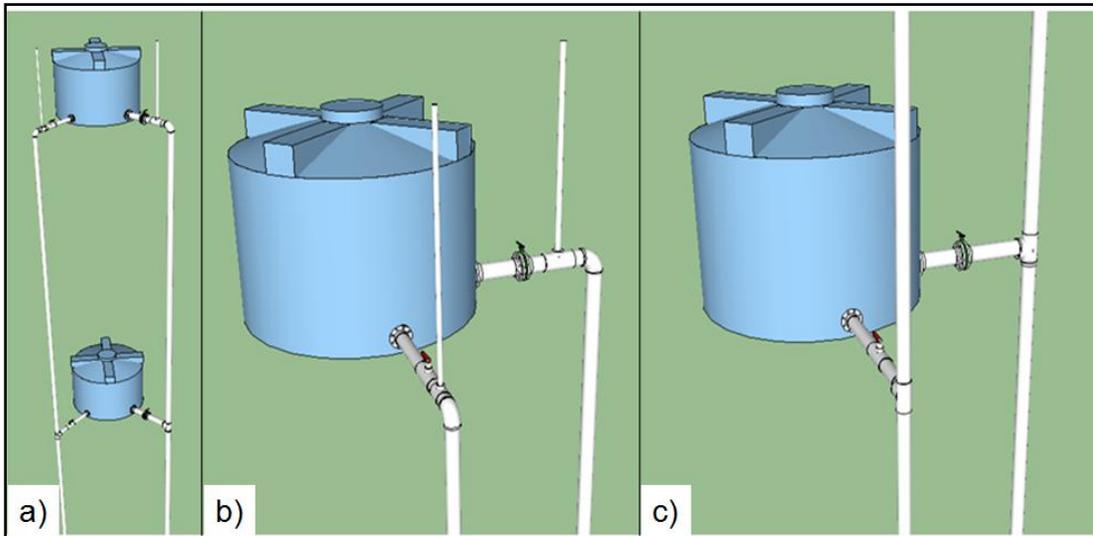


Fig.3.22. Tubería vertical en conexión: a) Vista Global, b) Cisterna 30 m. c) Cisterna 20 m (Medina, Diseños, 2014).

El sistema hidráulico de descarga (es decir el agua que saldrá de las cisternas), conformado por una línea de tubería de 4 in y una línea de tubería de 6 in, las cuales tienen una altura de 25 metros desde la plataforma ubicada a 30 metros, y se encuentran conectados en su trayectoria con la línea de descarga de la plataforma a 20 metros de altura, descendiendo hasta una altura de 5 metros en el cual se presenta un cambio de giro hacía los equipos de medición del caudal, posteriormente se tiene 5 metros de tubería vertical que bajan a un sistema de bifurcación y regulación con válvulas tipo compuerta.

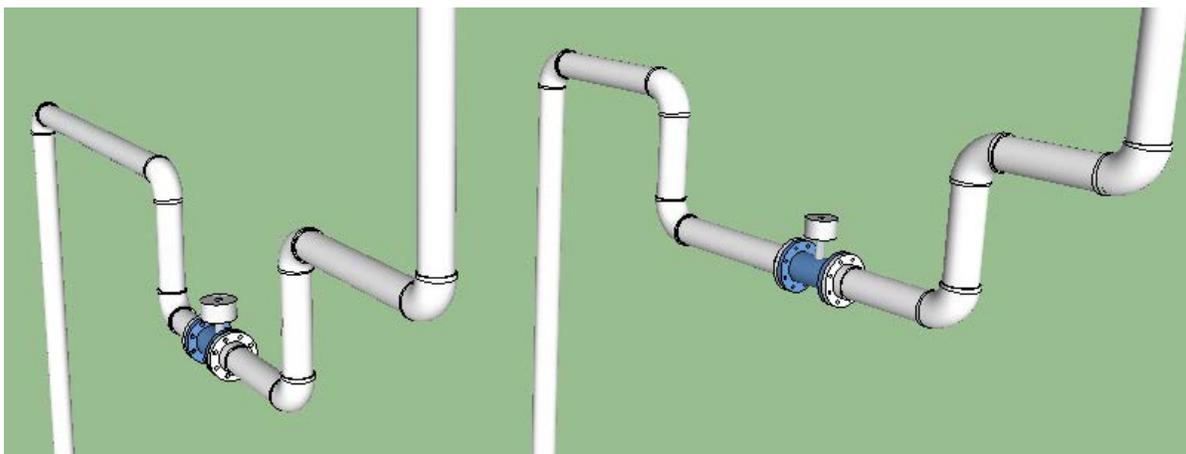


Fig. 3.23. Caudalímetros en las tuberías de descarga; para 4 in y 6 in (Medina, Diseños, 2014).

Los caudalímetros requieren estar situados en una línea hidráulica en forma de omega la cual garantice el llenado total del conducto de medición, como se muestra en la fig. 3.23. Esta geometría de la instalación son sugeridas por el fabricante de los medidores de flujo, para garantizar el llenado total del conducto de tubería en el cual será medido, y obtener una medición correcta.

El sistema de llenado de las cisternas está conformado por dos líneas de tubería de 2 in, de 30 metros de longitud en posición vertical, y 8 metros en posición horizontal hasta el pozo, el cual es regulado mediante válvulas tipo esfera de 2 in.

### ***b) Dimensionamiento y adecuación del tanque de almacenamiento de agua.***

El tanque de almacenamiento cumplirá 3 funciones específicas dentro del banco de pruebas;

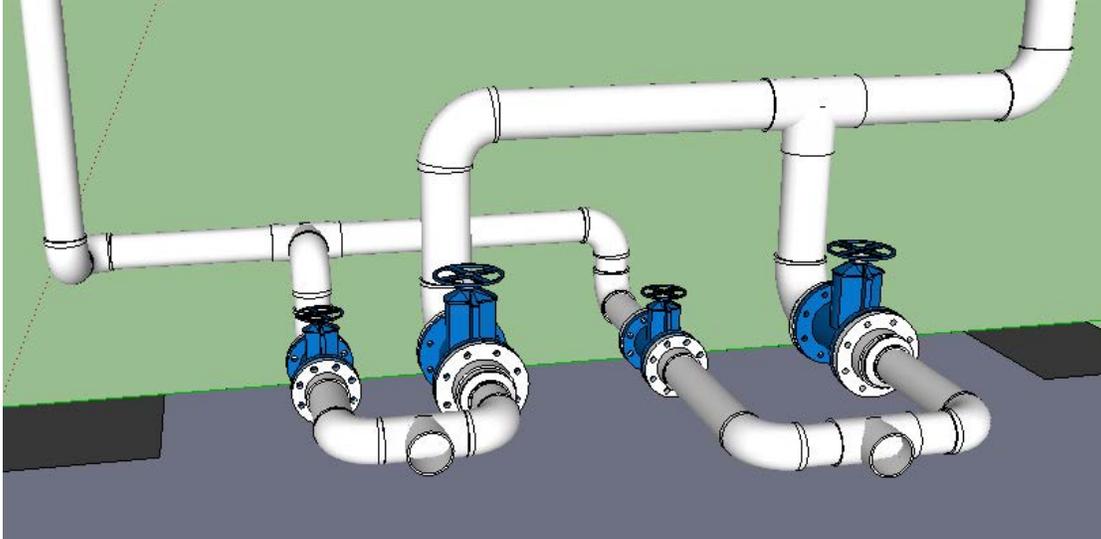
- Garantizará el volumen hídrico mínimo al momento de los ensayos de los equipos micro hidroeléctricos.
- Garantizará la variación de cotas también conocido como salto hidráulico en nuestro tema de estudio, dependiendo de la altura en que estos tanques de almacenamiento se ubiquen en la torre, en la plataforma a 20 metros o en la plataforma situada a 30 metros sobre el nivel de la base de la torre.
- Mediante adecuaciones necesarias para las funciones del banco de pruebas de S.M.H., permitirá variar el diámetro del caudal de entrada, a través de un sistema de válvulas conectadas a un sistema de 4 in o 6 in.

Razones por las cuales se dimensionó el tamaño de los tanques de almacenamiento, y se adecuaron de tal forma que cubran la demanda hidráulica para la evaluación de los equipos micro hidroeléctricos y a su vez la operación del banco de pruebas

### **c) Bifurcación.**



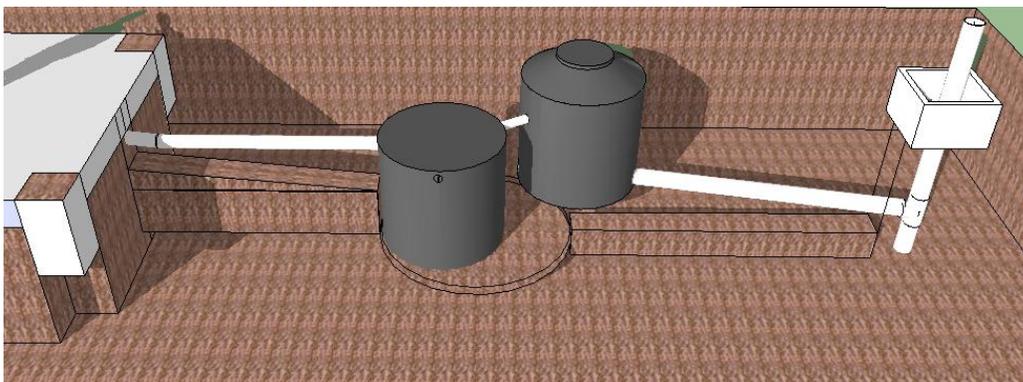
El sistema de bifurcación permitirá seleccionar una tubería de 4 in o de 6 in de diámetro nominal, y dirigir el flujo de la descarga de agua hacia uno u otro S.M.H., así también mediante las válvulas compuerta se podrá regular el caudal.



*Fig. 3.24. Configuración Válvulas compuerta (Medina, Diseños, 2014).*

**d) Desfogue.**

El agua que ha sido aprovechado para los ensayos de los S.M.H. es conducido de retorno al pozo a través de tubería en inclinación la cual a traviesa dos depósitos de 2,500 litros que permiten almacenar el agua previo al acceso al pozo .



*Fig. 3.23. Sistema de Desfogue y retorno al pozo (Medina, Diseños, 2014).*

### **3.3.- DISPOSITIVOS DEL BANCO DE PRUEBAS**

#### **3.3.1.- Sistema Micro Hidroeléctrico Michel Banki.**

El equipo electromecánico del S.M.H. (Fig.3.24) se encuentra compuesto por:

##### **1. Válvula Principal.**

Válvula mariposa tipo Wafer de 4 pulgadas de diámetro, para 150 PSI de presión de operación. Accionamiento por palanca.

##### **2. Junta de Montaje.**

La junta de montaje de 4 pulgadas de diámetro permite el acoplamiento de la parte del ingreso de la Turbina con la Válvula principal.

##### **3. Turbina Hidráulica Michel Banki.**

Diseñado para aprovechar una caída de 30 metros de altura neta, un caudal de diseño : 40 Litros/seg. Potencia a desarrollar de 8 KW en el eje. Desarrollará una velocidad nominal de rotación de 1736 Revoluciones por minuto (RPM) y una velocidad de embalamiento de 3211 RPM, este dispositivo tiene una eficiencia mínima del 75 %. La turbina está compuesta por un rodete, un inyector y mecanismo de regulación de caudal, una carcasa, sellos, y una estructura de anclaje.

##### **4. Generador Eléctrico.**

Un generador tipo Inducción sin escobillas con un banco de condensadores de excitación. El cual opera con las siguientes condiciones: una potencia activa de 5 KW, 220 voltios de Tensión, una frecuencia, de 60 Hz, velocidad de 1800 RPM, Factor de potencia monofásico, Clase de aislamiento, peso aproximado de 60 Kg, de la Marca Eberle-Delcrosa - Brasil.

##### **5. Sistema de transmisión de potencia Mecánica.**



El sistema de transmisión de potencia mecánica es mediante poleas y fajas. Con capacidad de transmitir 15 HP a 1800 rpm.

### 6. Regulador Electrónico de Carga.

El Instrumental del Tablero de Control y los componentes del Regulador de velocidad tipo Electrónico se encuentran instalados sobre un solo modulo.

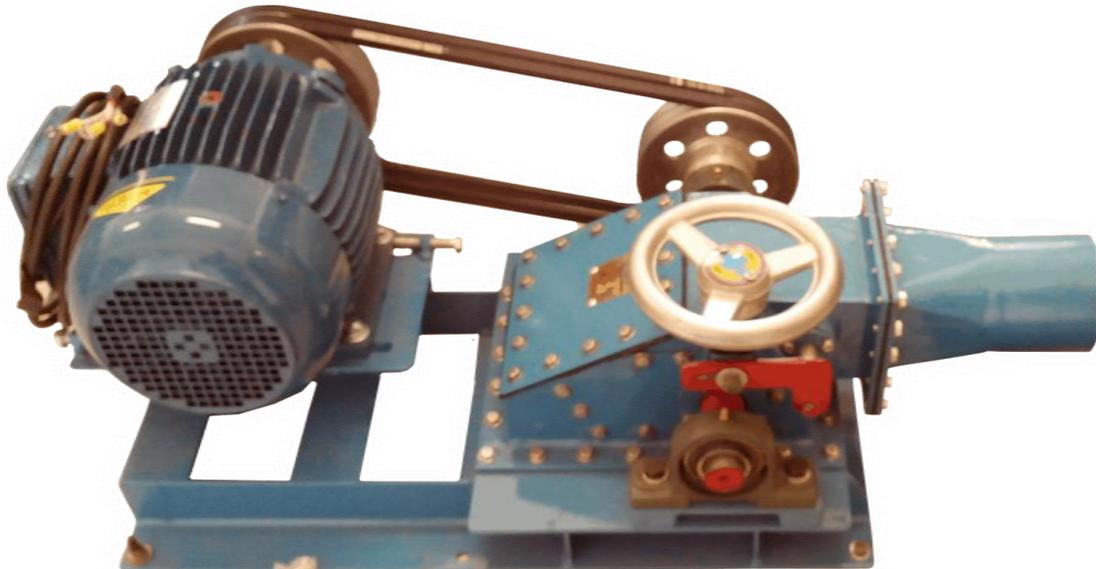


Fig. 3.24. Sistema micro hidroeléctrico Michell Banki (Medina, Fotografía, 2014).

### 3.3.2.- Sistema Micro Hidroeléctrico Turgo

El equipo electromecánico del S.M.H. (Fig.3.25) está compuesto por:

#### 1.- Turbina Hidráulica Turgo.

Turbina Turgo modelo XJ25-3.0 DCTH4-Z, diseñado para aprovechar una caída de 18 a 20 metros de altura neta, y un caudal de diseño de 30 Litros/seg. Potencia a desarrollar de 5 kW en el eje, este dispositivo tiene una eficiencia de 60%. La turbina está compuesta por un rodete, una carcasa, sellos, y una estructura de anclaje.

**2.- Válvula principal.**

Válvula compuerta de 4 pulgadas de diámetro, para 150 PSI de presión de operación.

**3.- Generador eléctrico.**

Generador tipo SF3.0-4, con potencia nominal de 3 Kw, voltaje nominal de 110 Voltios, corriente nominal de 27.3 Amperios, una frecuencia de 60 Hz y una velocidad 1800 r/ min.

**4.- Panel de Control**

El Instrumental del Tablero de Control se encuentran instalados sobre un modulo de 75 x 44 x 52 centímetros, con protección de cortos circuitos, aislamiento, y protección de sobre carga.



*Fig. 3.25.- Sistema micro hidroeléctrico Turgo (Medina, Fotografía, 2014).*

**3.3.3.- Instrumentos de Medición**

La selección de instrumentos de medición se realizó en base a las funciones del banco de pruebas, así también considerando los trabajos previos en el tema y/o las normas internacionales existentes que sean relevantes de acuerdo al tema de trabajo realizado en este proyecto.

Los Instrumentos deberán evaluar características eléctricas y físicas dentro del banco de pruebas, a través de los cuales se podrá obtener indicadores de la eficiencia de los equipos hidroeléctricos evaluados.

**3.3.3.1.- Medidor de Calidad de la Energía**

**Descripción**

Analizador de calidad de la energía Modelo 3945-B es, para medir y realizar trabajo de diagnóstico y calidad de potencia en redes de bajo voltaje mono, bifásicas y trifásicas (Fig. 3.26).

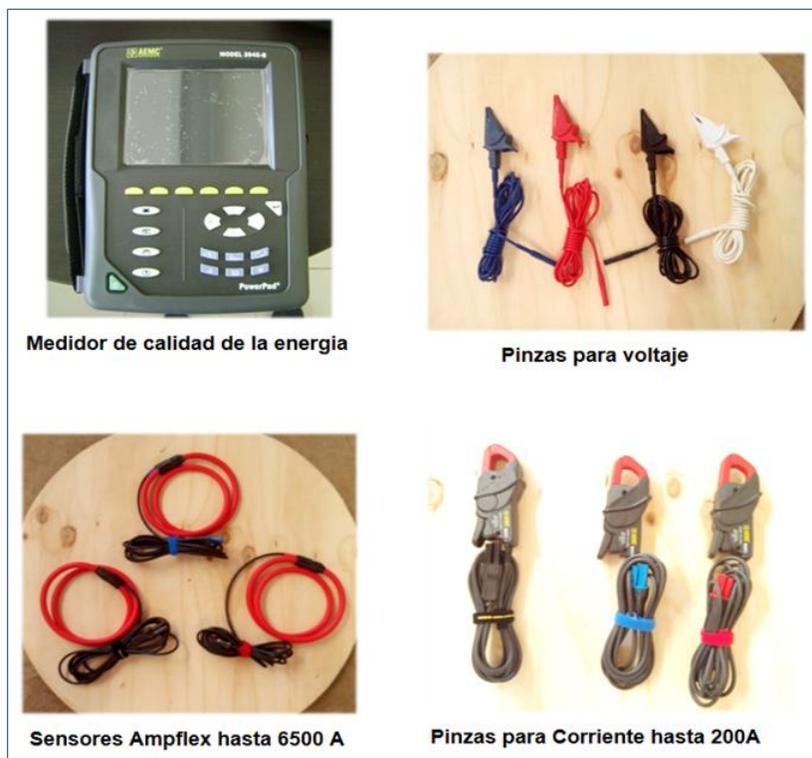


Fig. 3.26. Componentes del Equipo de Medición de Calidad de la Energía (Medina, Fotografía, 2014).

Permite obtener formas de onda instantáneas de las principales características de una red eléctrica y también monitorear sus variaciones en el tiempo. El sistema de medición de multitareas maneja simultáneamente todas las funciones de medición y presentación de formas de onda de las diferentes magnitudes, su detección, su registro continuo y su presentación sin limitaciones.

### 3.3.3.2.- Medidor magnético de caudal

#### Descripción

El medidor magnético de caudal con convertidor es un equipo que realizará el monitoreo de los caudales hidráulicos presentes en la línea hidráulica de 6 pulgadas de diámetros y también e la línea hidráulica de 4 pulgadas de diámetro, a través del modelo MC 308 y MC608 respectivamente. Cuenta con el sistema de resguardo de información, lo cual es un aspecto importante ya que se podrá monitorear y registrar el caudal en los periodos de evaluación de las turbinas.



Fig. 3.27. Equipo de Medición de Caudal (Medina, Fotografía, 2014).

### 3.3.3.3.- Medidor de presión manométrica

Panel inteligente de montaje IMP650, es un display data logger que se puede integrar fácilmente para trabajar con celdas de carga, sensores de torque y sensores de presión. El IPM650 tiene un rango de entrada de hasta  $\pm 500$  mV / V. Al lado de la entrada mV / V, acepta sensores de salida en el rango de  $\pm 12$  VDC o hasta 30 mA. También cuenta con dos relés individuales y dos de tensión analógica y salida de corriente analógica. Este dispositivo proporciona adicional 24 VDC / 5VDC como fuente de alimentación para sensores con amplificador incorporado.



Fig. 3.28. Panel Inteligente de Montaje y sensor de presión. (Medina, Fotografía, 2014)

#### Datos del Panel inteligente IPM650

- El IPM650 puede almacenar hasta cerca de 21.000 muestras.
- La longitud de tiempo, en segundos, es igual a 21.000 dividido por la frecuencia de muestreo seleccionada.

- El IPM650 ofrece un modo de velocidad media durante el registro de datos que puede reducir la tasa de muestreo a 2.5sps cuando se selecciona 5sps.
- El IPM650 puede almacenar un archivo de registro de datos a la vez.
- La información de registro de datos se quita cuando se apaga a la IPM650.

### Frecuencia de muestreo máxima para el IPM650

- El IPM650 puede alcanzar hasta 4800sps.
- La menor tasa de muestreo más alta es la resolución.

El sensor de presión PMP621 es un transductor de alta precisión adecuado para mediciones de la presión en entornos de líquido o gas. Aplicaciones específicas incluyen la medición del nivel de líquido , control de bombas , control del compresor , la hidráulica y la neumática . El sensor de presión PMP621 está disponible en mV / V de salida y tiene conector DIN extraíbles y un amplio rango de presión de 3-900 BAR, para el banco de pruebas se seleccionó un rango máximo de 6 bares.



## **CAPITULO 4**

### **CONSTRUCCIÓN DEL BANCO DE PRUEBAS DE TECNOLOGÍAS HIDRÁULICAS DE FUENTES RENOVABLES.**

Este capítulo describe el proceso efectuado para la construcción del banco de pruebas, el cual fue construido a partir del diseño expuesto en el capítulo anterior.

La implementación se realizó a través de 3 etapas; construcción de infraestructura, instalación del sistema hidráulico, y la instalación de dispositivos y equipos de medición, considerando las medidas de seguridad para cada una de las etapas y la operación de la instalación, mediante los cuales quedó conformado el banco de pruebas de tecnologías hidráulicas de fuentes renovables. Se describe a continuación las características y el proceso efectuado en cada etapa.



## **4.1.- CONSTRUCCIÓN DE INFRAESTRUCTURA**

El Banco de pruebas se construyó con 2 componentes fijos que conforman la infraestructura del laboratorio, el primero es una estructura de 30 metros de altura en forma de torre y la segunda es un pozo de 60 metros de profundidad.

### **4.1.1. Construcción de la Torre**

La torre fue construida en base al diseño que se genero previamente, desde la cimentación hasta la estructuración de armazones, pilares, y plataformas. La construcción se ha hecho respetando el diseño de cada componente y, en algunos casos, fue necesario realizar adaptaciones.

#### **a) Zapatas.**

Previamente a la construcción, se señaló el lugar en donde se situará la estructura del banco de pruebas, después usando una retroexcavadora se excavó una fosa de 5 m<sup>2</sup> y 3 m de profundidad para las zapatas, posteriormente fue nivelada con trabajo manual de obreros.



*Fig. 4.1.Excavación fosa de las Zapatas*

*(Medina, Fotografia, 2014).*

Cada zapata se construyó con una armadura de fierro, a partir de un emparrillado conformado por un tejido cruzado de varillas corrugadas sobre un área de 2.2 m<sup>2</sup>; con una separación entre varillas a razón de 30 cm aproximadamente. el cual servirá como refuerzo y transmitirá las cargas verticales al terreno.

Sobre el emparrillado se anclaron pilares conformados de varillas longitudinales y estribos de fierro, con un área de  $0.7 \text{ m}^2$  y un altura de 3.4 m. Posteriormente se cubrió la armadura con madera para cimbra. se rellenaron con cemento hidráulico hasta una altura de 2.9 m, y finalmente se relleno alrededor con tierra de las zapatas, y se nivelo el terreno nuevamente.

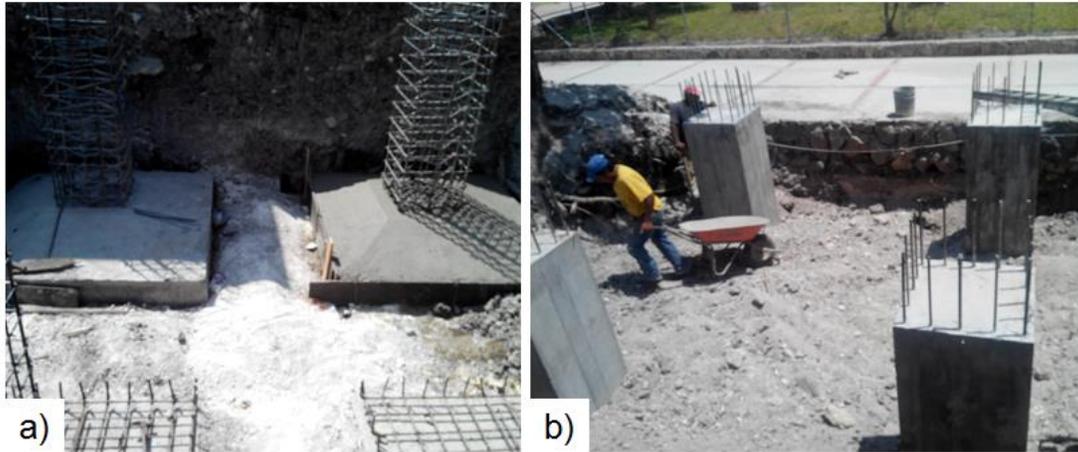


Fig. 4.2. a) Estructura interna de Zapatas, b) Zapatas cementadas  
(Medina, Fotografía, 2014).

### b) Vigas

Los pilares de concreto cementados tienen 0.5 metros de varilla sobresalientes del suelo, los cuales se usaron para anclar 4 vigas de concreto reforzado que entrelazarán los pilares entre sí conformando un marco de concreto. que brindará un soporte uniforme a los elementos de la torre que se instalaran a partir de este nivel y hasta los 30 metros,

Cada viga fue construida con varillas longitudinales y estribos de fierro, en los cuales se insertaron 4 bases de metal de  $0.7 \text{ m}^2$ , que brindarán el primer punto de soporte a los pilares metálicos que conformarán la torre (Fig. 4.3.)

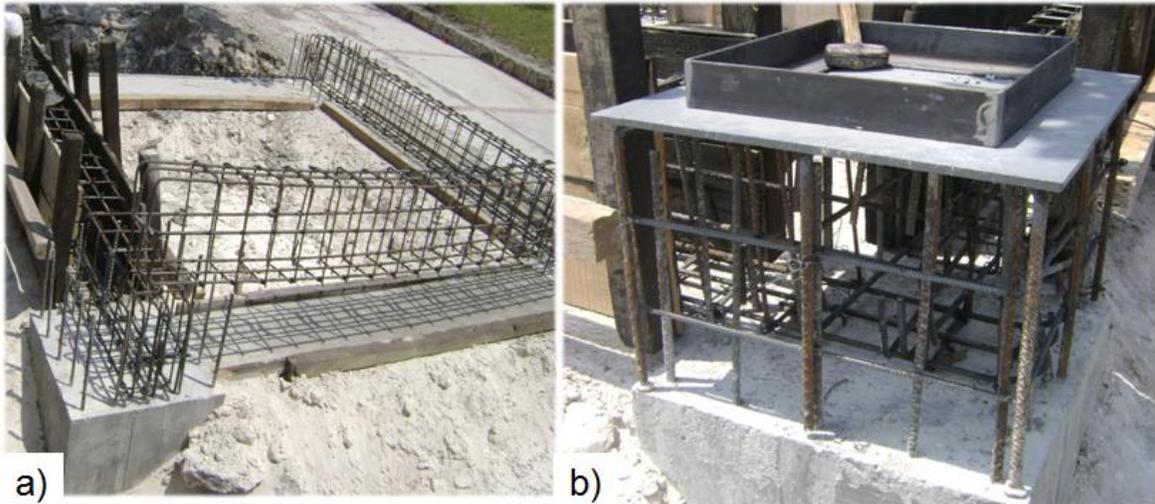


Fig. 4.3. a) Construcción de vigas b) inserción bases de metal (Medina, Fotografía, 2014).

Se cubrió las vigas con madera de cimbra y se rellenaron con cemento hidráulico, posteriormente se retiró la cimbra y se relleno el área interior del marco de las vigas (se instaló previamente el tubo de desfogue para las turbinas), como se puede observar en la fig. 4.4.

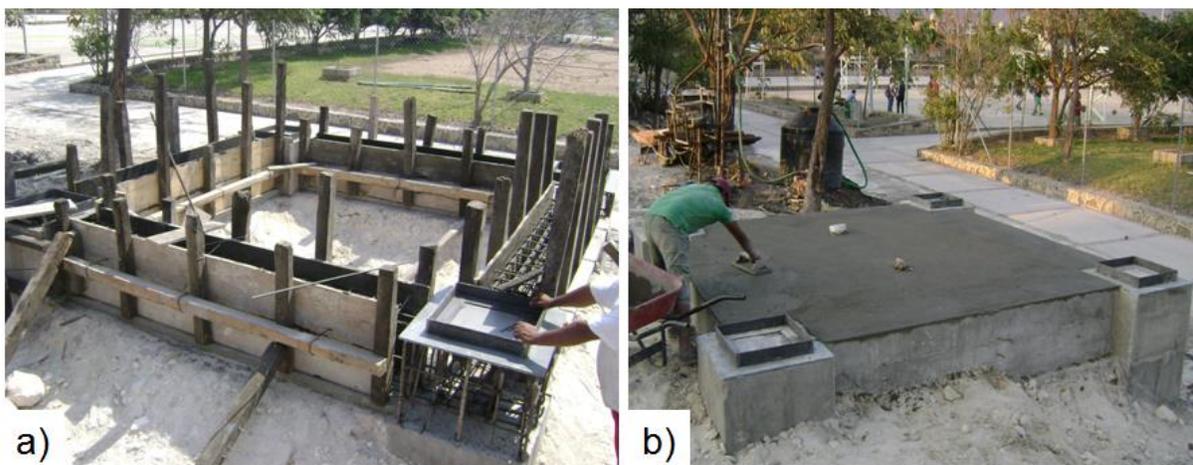


Fig. 4.4. a) Cimbrado de Vigas, b) Vigas Cementadas (Medina, Fotografía, 2014).

### c) Pilares

Como componente principal los pilares fueron contruidos en tramos separados, denominados armazón. Cada armazón metálica tiene las dimensiones propuestas en el diseño, siendo estas de  $0.5 \text{ m}^2$  de base y 2 metros de altura, a través de distintos cortes de ángulos de solera y soldadura, compuesta por 4 tramos verticales, un marco horizontal y tramos en diagonal para reforzar la estructura ante fuerzas verticales y horizontales, los cuales fueron unidos a través de soldadura manual por arco eléctrico con electrodos.



Fig. 4.5. Armazón Metálica (Medina, Fotografía, 2014)

Los pilares se contruyeron mediante el ensamble de las armazones metálicas en secuencia, usando 15 armazones para cada uno de los 4 pilares que conforman la estructura de la torre. Estos se ubicaron sobre los marcos metálicos que se encuentran en el extremo superior de cada zapata, usando soldadura de arco eléctrico.



Fig. 4.6. Instalación de Armazones Metálicas (Medina, Fotografía, 2014).

**d) Adecuación de abrazaderas metálicas.**

La adecuación de abrazaderas se refiere a la adaptación de omegas metálicas distintas a las que fueron propuestas en el diseño, ya que se consideró posteriormente la facilidad de usar 2 omegas comerciales para sustituir las omegas diseñadas. Tanto para las dimensiones de 2, 4 y 6 pulgadas de diámetro. Las omegas fueron fijadas a lo largo de 3 de los 4 pilares de la torre, es decir sobre el marco horizontal en 45 de las 60 armazones metálicas.



*Fig.4.7. Adaptación de abrazaderas e instalación. (Medina, Fotografía, 2014)*

**e) Refuerzo y Tensiones.**

**Refuerzos verticales**

Los refuerzos se refieren a placas de solera que se encuentran fijadas en las extremidades de las armazones, uniéndose entre sí a los pilares para proporcionar mayor cohesión a la estructura.



*Fig.4.8. Refuerzos verticales (Medina, Fotografía, 2014).*

Las tensiones se refieren a cables de acero que se sujetan en las aristas exteriores de la torre y son dirigidas hacia unos aros metálicos provenientes de un eje metálico incrustado en estructuras de concreto en el suelo, desde las cuales son tensadas para reducir la oscilación de la torre.



Fig. 4.9. Zapatas para tensores (Medina, Fotografía, 2014).

### f) Plataformas

- **Estructura de Soporte**

Las plataformas fueron construidas con estructuras metálicas de Perfil tubular rectangular (PTR) de 3.5 in<sup>2</sup>, unidos con soldadura de arco eléctrico, creando un emparrillado de 3.8 m<sup>2</sup>, ubicándose un soporte a 20 metros y otro a 30 metros de altura. Cubiertas con pintura anticorrosiva que reduce la oxidación y deterioro de la infraestructura.



Fig. 4.10. Estructura de PTR de Soporte (Medina, Fotografía, 2014).

- **Lámina Antiderrapante**

Sobre las estructuras de PTR de soporte se ha colocado lámina antiderrapante de 3/16 in de espesor, unida a la estructura por soldadura de arco eléctrico, el cual sirve como un piso aéreo pero a la vez reduce el riesgo de resbalarse. El piso cubre un área de 3.8 m<sup>2</sup> sobre la estructura de PTR de soporte en las plataformas.



*Fig.4.11. Lámina antiderrapante (Medina, Fotografía, 2014)*

- **Barandales en Plataformas**

Los barandales de seguridad fueron fabricados con varillas fijadas a la estructura, estos forman una cerca de 1.2. m de altura alrededor de la plataforma para brindar mayor seguridad al momento de trabajar sobre las plataformas.



*Fig.4.12 Barandales de seguridad en plataformas (Medina, Fotografía, 2014).*

**g) Escalera.**

- **Estructura de soporte**

Se construyó un soporte tipo marina de 31.8 metros de altura, usando para su fabricación varillas metálicas dispuestas en forma vertical, horizontal, y con escalones hechos de la misma varilla dispuestos en forma horizontal a cada 30 cm de separación, unidas con soldadura de arco eléctrico, y fijada a lo largo de un pilar de la torre.



*Fig.4.13. Estructura de soporte (Medina, Fotografía, 2014).*

- **Barandales en Escalera**

En la escalera tipo marina los escalones fueron cubiertos con lija gruesa para reducir las superficies lisas, así también se fabricaron anillos de varilla dispuestos a lo largo de la escalera, como medidas de seguridad ante el riesgo de caídas, algunos de ellos de mayor diámetro dispuestos al llegar a la plataforma de 20 m.



*Fig. 4.14. Barandales de seguridad en Escalera (Medina, Fotografía, 2014).*

- **Reja de Seguridad**

Para restringir el acceso a la escalera del banco de pruebas se ha construido una reja de 2 metros de altura con malla estructural, y una tapa que cubre el área del primer barandal de la escalera, el cual es sujeto por bisagras, y 2 orejas metálicas para colocar un candado, unidas por soldadura de arco eléctrico.



*Fig. 4.15. Reja de Seguridad*  
(Medina, Fotografía, 2014)

### **4.1.2. - Construcción de Pozo Profundo**

- **Instalación de Equipo de excavación.**

Los equipos, accesorios y materiales fueron ubicados en el lugar de trabajo, se seleccionó el diamante de perforación a utilizar, se ajustó el taladro y la tubería de extensión.



*Fig. 4.16 Instalación de Maquinaria para excavación* (Medina, Fotografía, 2014).

- **Fabricación de Represas**

Se construyó un canal de recirculación conformado por 3 represas, que permitió el ahorro de agua y agilizar la jornada de perforación, la excavación se hacía con inyección de agua, la cual arrastraba lodos que sedimentaban en las represas.



*Fig. 4.17. Sistema de represas*  
(Medina, Fotografía, 2014).

- **Perforación y ampliación a 10 pulgadas de diámetro.**

Se situó la perforadora y se inició la excavación, el avance fue determinado por los suelos y rocas que se encontraron, al finalizar la excavación de 60 metros, se amplió el área del hueco hasta un diámetro de 10 in.



*Fig.4.18. Ampliación del pozo*  
(Medina, Fotografía, 2014).

- **Instalación Tubería**

Finalmente se instaló la tubería de 7.5 in de PVC Hidráulico con una longitud de 61.5 metros, a partir de 11 tramos de tubería de 6 metros con terminación tipo campana unidas con cemento para pvc, se construyó un marco de ladrillo y concreto hidráulico, y se relleno con grava, a una profundidad de 2 metros se instaló una conexión tipo Tee que servirá para conectar la tubería del desfogue, proveniente de las turbinas.



*Fig.4.19. Tubería instalada en el Pozo (Medina, Fotografía, 2014).*

### 4.2.- INSTALACIÓN DE SISTEMA HIDRÁULICO

#### a. Depósitos elevados

Los tanques de almacenamiento escogidos son cisternas de 5 mil litros, los cuales fueron preparados con la instalación de bridas de PVC de 4 in y de 6 in en cada cisterna a un costado y con una separación de 90° entre las dos, y usar dichas bridas para la conexión de la tubería de descarga de 4 in o de 6 in , reguladas con una válvula tipo esfera en la tubería de 4 in y una válvula tipo Wafer en la tubería de 6 in, las cuales permitirán el paso o bloqueo de la circulación del agua de descarga según sea el caso del ensayo a realizarse.



*Fig. 4.20. Adecuación de Bridas de 4 y 6 in en Cisternas (Medina, Fotografía, 2014).*

Las cisternas fueron elevadas a las plataformas usando una garrucha con cuerda con la operación de 4 personas, las cisternas se instalaron sobre la plataforma correspondiente, en espera de la conexión de línea hidráulica de descarga y de alimentación proveniente del pozo profundo.



*Fig. 4.21. Instalación de Cisternas en las Plataformas (Medina, Fotografía, 2014).*

## **b. Sistema de circulación hidráulica - Tubería**

- **Línea hidráulica de Descarga**

La línea hidráulica de descarga consta de un sistema de tuberías verticales de 4 in y 6 in de diámetro nominal y 30 metros de longitud, las cuales permiten la circulación del agua proveniente de los tanques de almacenamiento ubicados en las plataformas de 20 y 30 metros (Fig.4.22-). interconectados con las cisternas por conexiones tipo TEE y un codo de 90°. El flujo de descarga es regulado por válvulas (Válvulas tipo esfera de 4 in y Válvula Tipo Wafer Mariposa de 6 in) conectadas a las bridas de 4 in y 6 in en cada cisterna



Fig.4.22. Línea hidráulica de Descarga (Medina, Fotografía, 2014).

- **Caudalímetros**

El caudal que circula por el sistema de descarga es monitoreado a 5 metros de altura con un arreglo de la tubería que garantiza el llenado total del conducto del medidor de caudal electromagnético (Fig.4.23), posteriormente el agua de cada tubería es dirigido a las turbina Michel Banki o Turgo a través de un arreglo de bifurcaciones regulado con un sistema de válvulas compuertas (Fig.4.24).



Fig. 4.23 Instalación de Caudalimetro (Medina, Fotografía, 2014).

- **Sistema de bifurcación y regulación de caudal.**

El sistema de regulación de caudal se encuentra conformado por 4 válvulas compuertas metálicas que se ubican en la base de la torre en el cuarto de maquinas, dos de estas para la tubería de 4 pulgadas y las dos restantes para la tubería de 6 pulgadas.



Fig. 4.24. Sistema de bifurcación y regulación de Caudal (Medina, Fotografía, 2014).

- **Línea hidráulica de desfoque.**

Finalmente el agua que ha sido aprovechado en las turbinas es recuperado en un sistema de recolección de aguas, que permite almacenarla en 2 depositos tipo tanques y/o en caso de superar el límite de almacenamiento drenar el agua hacia el pozo. (Fig.4.25 ). Ensamblado con tubería hidráulica de 6 pulgadas de diámetro.



Fig.4.25.. Línea hidráulica de desfoque (Medina, Fotografía, 2014)

- **Chimenea de Equilibrio**

Se instaló un sistema de chimenea de equilibrio ubicado a 30 metros de altura en la línea de tubería 4 in y de 6 in, con una altura de 2.2. metros, el cual evita que durante la descarga de agua para la evaluación de las turbinas, se formen burbujas de compresión de aire en los cambios de dirección de la tubería, los cuales pueden llegar a aumentar la presión manométrica en el sistema de tuberías, y ocasionar fugas, o el desprendimiento de tramos de tubería de la línea hidráulica de descarga.



Fig. 4.26. Chimenea de Equilibrio de PVC Hidráulico (Medina, Fotografía, 2014).

- **Línea hidráulica de suministro**

El sistema de llenado de los tanques de almacenamiento está conformado por un arreglo de 2 líneas de tuberías hidráulicas de 2 in de diámetro nominal con una altura de 30 metros, los cuales abastecen agua en las cisternas ubicadas en las plataformas de 20 y 30 metros, el suministro es regulado con válvulas tipo esfera de 2 in como se muestra en la Fig. 4.27.



*Fig. 4.27 Línea hidráulica de Alimentación (Medina, Fotografía, 2014).*

### **4.3.- Instalación de dispositivos**

#### **4.3.1.- Instalación de sistemas hidroeléctricos**

Los S.M.H.'s fueron ubicados en el cuarto de máquinas del banco de pruebas, se realizó previamente a la instalación de la línea hidráulica de desfogue la ubicación espacial partir de las dimensiones de los S.M.H. proporcionadas por los proveedores, así como de las dimensiones del sistema de bifurcación y regulación de caudal.

Tomando como referencia los huecos de desfogue se situó la turbina de los S.M.H. sobre cada hueco, se señalaron y perforaron en el suelo los orificios para los tornillos , y para el caso de la turbina Michell Banki se construyó una bóveda de 25 cm x 15 cm de área y 20 cm de profundidad, como se muestra en la 4.28.

Posteriormente se insertaron los taquetes con los tornillos de 3/8 in dejando 4 cm de tornillo expuesto, y se construyó además un marco de 3 cm de altura alrededor del hueco de desfogue de cada turbina, el cual cubrió parte de las puntas de los tornillos.



*Fig. 4.28 Bóveda de desfogue para el sistema micro hidroeléctrico  
Michel Banki (Medina, Fotografía, 2014).*

Se fabricaron y colocaron 2 marcos de neopreno de 3/16 in el cual soportará el marco de desfogue del S.M.H., y reducirá fugas, luego se colocó una capa de silicón (Fig. 4.29), se asentaron los S.M.H. haciendo coincidir los orificios para los tornillos con las puntas de los tornillos del suelo, y se ajustaron con tuercas y rondanas de 3/8 in (Fig. 4.30).

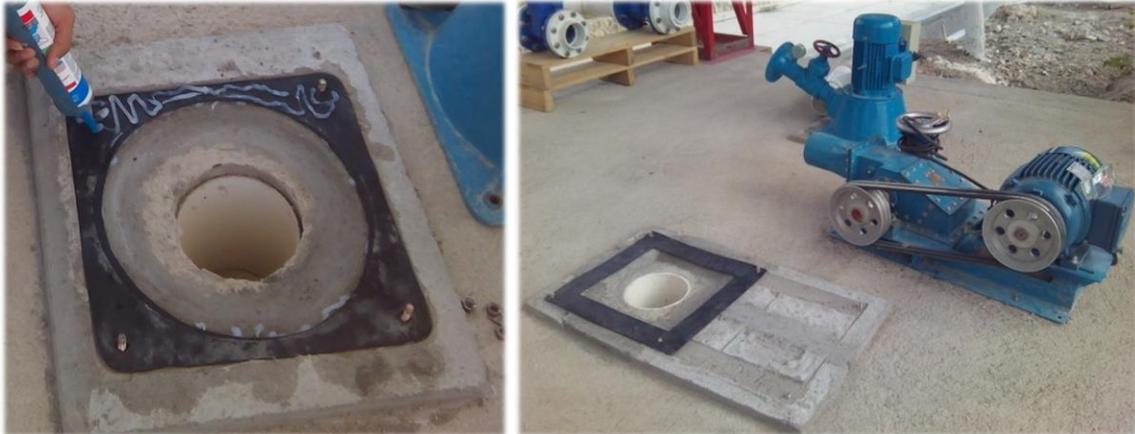


Fig.4.29. Funda marco de Neopreno (Medina, Fotografía, 2014)



Fig.4.30. Sistemas micro hidroeléctricos instalados (Medina, Fotografía, 2014).

**4.3.2.- Instalación bombas fotovoltaicas sumergibles**

Se instalaron dos bombas fotovoltaicas, integradas al pozo y ajustadas a la línea hidráulica de suministro hacía las cisternas, garantizado el llenado de la misma durante el periodo de evaluación.

Se instalaron 18 metros de tubería, en el extremo inferior se encuentra conectada con conexiones hembra y macho de 1 y 1/4 in una bomba fotovoltaica sumergible Grundfos SQ Flex 7. La cual se encuentra alimentada por un sistema fotovoltaico de 1.2. Kw con capacidad para funcionar entre 30 a 300 volts corriente directa. Como medida de seguridad la bomba presenta un Cuando la tubería ha sido sumergida hasta la profundidad determinada de 18 metros, se une una conexión con codo instalada en una tapa de PVC, en la cual el PVC es de 2 in, y se une a la línea de suministro que se dirige en línea horizontal hacia la torre y después en línea vertical hacia las cisternas ubicadas en la plataforma de 20 y de 30 metros.

sensor interno que la protege de falta de agua en el pozo, así como un interruptor independiente para encender y apagar en caso de ser necesario.



*Fig. 4.31. Instalación de Bombas y Tubería dentro del pozo.(Medina, Fotografía, 2014).*



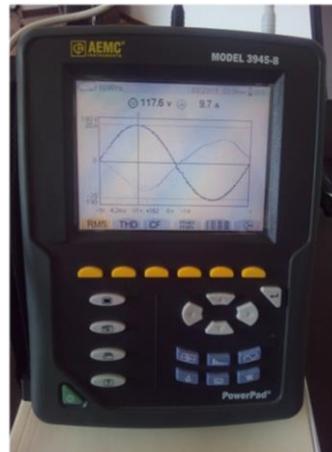
*Fig. 4.32. Conexión a la línea de suministro hacía la torre (Medina, Fotografía, 2014).*

### **4.3.3.- Instalación de Equipos de Medición**

Algunos de los equipos fueron instalados en la ubicación determinada para su función, otros equipos por ser tipo portátil no fue necesario instalarlos para su uso.

#### **4.3.3.1.- Medidor de calidad de energía**

El medidor de calidad de energía se ubicó en el cuarto de maquinas del banco de pruebas, dadas sus características de ser móvil, se acoplará a los cables a través de las pinzas de corriente en el momento en que se realicen los ensayos en uno u otro S.M.H., y a través del sistema data logger se tomará de registro del comportamiento eléctrico del generador de corriente de cada S.M.H.



*Fig.4.33. Power Pad Datalogger*  
(Medina, Fotografía, 2014)

#### **4.3.3.2.- Medidor de presión manométrica**

El sensor de presión manométrica se fijó en el acceso con rosca ubicado sobre la tubería metálica cercano a la armadura del sistema micro hidroeléctrico. El sensor de presión cuenta con cuatro conexiones; una tierra, una de corriente alterna de 10A / 250V, una corriente directa de +5V, y la señal. Estas conexiones fueron

dirigidos al panel inteligente IPM650 el cual cuenta con una bornera en la parte trasera en donde van conectados dichos cables (Fig.4.34).

Desde un ordenador PC conectado al panel inteligente IPM650a través del enlace USB, se obtienen gráficas y los datos instantáneos de la medición en proceso. y Información indispensable para controlar satisfactoriamente los datos requeridos para los S.M.H.

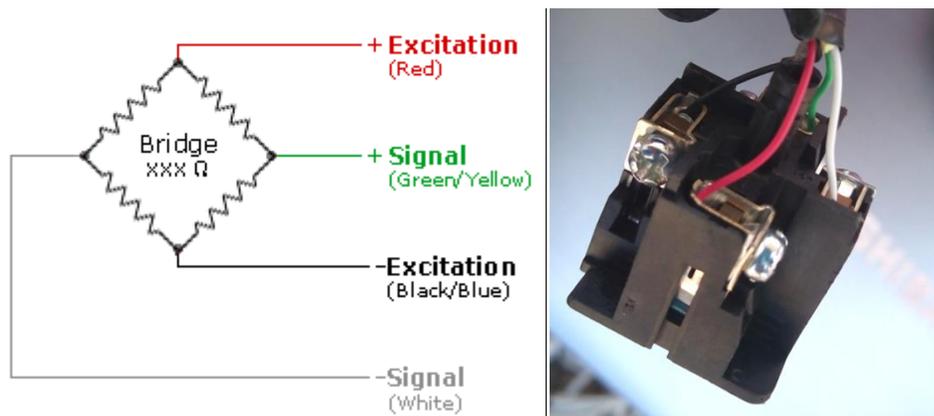


Fig. 4.34. Conexión del Sensor de Presión (FUTEK ) & (Medina, Fotografía, 2014).

#### **4.3.3.3.- Medidor de Caudal (medidor magnético de caudal)**

Los medidores magnéticos de caudal fueron ubicados en la línea hidráulica correspondiente, estando ubicados a 5 metros de altura en referencia a las válvulas compuertas. La línea hidráulica en posición horizontal fue diseñada con la forma de omega, con base en las especificados del fabricante.

Se realizó la conexión del medidor magnético de caudal entre las tuberías hidráulicas tomando en cuenta el sentido del flujo del líquido. El medidor magnético fue equipado con 2 bridas a los costados, las cuales permiten el acoplamiento hacia los tubos. Así también se integraron juntas aislantes de neopreno, y anillos de tierra los cuales eviten cualquier descarga eléctrica (Fig. 4.36).



Fig. 4.36. Instalación de anillos de tierra, juntas aislantes y bridas en el medidor de flujo magnético (Medina, Fotografía, 2014)& (FUTEK).

#### 4.3.3.3.1.- Convertidor MC308c

Los convertidor MC 308c y Mc608a fueron instalados en la parte inferior de la torre (Fig. 4.37), estos convertidores cuenta con dos entradas para sensores provenientes del medidor magnético de caudal. Las entradas para los sensores (Fig. 4.38) cuentan con siete terminales, una entrada de alimentación que puede ser de DC o AC, una tierra física la cual es necesaria para el buen funcionamiento de este y unas salidas de comunicación RS 485 la cual descarga la información hacia un PC y son leídos por medio de un software.



Fig. 4.37. Montaje de convertidor MC308c (Medina, Fotografía, 2014).

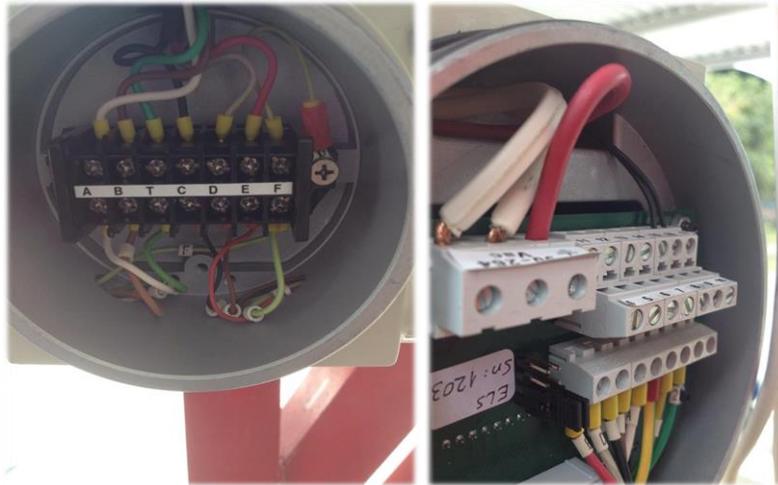


Fig.4.38.- Conexión del Medidor al Convertidor Euromag. (Medina, Fotografía, 2014)

## **CAPITULO 5.**

### **ENSAYOS DE SISTEMAS MICRO HIDROELÉCTRICOS Y RESULTADOS PRELIMINARES.**

En este capítulo se describe el procedimiento general de operación del banco de pruebas de forma integral, el uso de los equipos de medición, así como los resultados preliminares de ensayos realizados a los sistemas micro hidroeléctricos bajo diferentes configuraciones de caudal y salto hidráulico.



**5.1.- PROCEDIMIENTO DE OPERACIÓN DEL BANCO DE PRUEBAS.**

Los primeros ensayos se realizaron desde la plataforma de 20 metros de altura, variando la tubería de descarga en cada ensayo, comenzando con la tubería de 4 in, configuración denominada "sistema 20 m 4 in". Posteriormente se realizaron ensayos usando la tubería de descarga de 6 in, configuración denominada "sistema 20 m 6 in".

De la misma manera se realizaron ensayos desde la plataforma de 30 metros de altura, se realizaron ensayos usando la tubería de 4 in, configuración denominada "sistema 30 m 4 in". Y finalmente se realizaron ensayos usando la tubería de 6 in, configuración denominada "sistema 30 m 6 in". Para cada configuración hidráulica se realizaron 3 repeticiones, realizándose un total de 12 ensayos.

El desarrollo de cada ensayo realizado en el banco de pruebas, requirió de una etapa de preparación del sistema hidráulico y posteriormente se realizó el registró de los parámetros; Potencia, Presión y Caudal.

Previo al desarrollo de los ensayos de evaluaciones de rendimiento de los sistemas micro hidroeléctricos se realizó el llenado de cisterna, de la plataforma seleccionada, siendo las primeras pruebas realizadas en la plataforma de 20 metros. El procedimiento que se describe a continuación se repitió de la misma manera al llenar la plataforma de 30 metros, variando la tubería de desfogue para cada ensayo.

Fue importante revisar que las 4 válvulas compuerta (Fig. 5.1), ubicadas en el cuarto de máquinas se encuentren cerradas completamente al comenzar el llenado de las cisternas para evitar el desfogue del agua o el accionamiento de las turbinas.



*Fig. 5.1.- Válvulas compuertas (Medina, 2014).*

El llenado de las cisternas se reguló haciendo uso de las válvulas tipo esfera (Fig. 5.2). ubicadas en los extremos de la tubería de 2 in en la plataforma. Para el caso de la plataforma de 30 metros fue necesario cerrar las válvulas situadas en la plataforma de 20 metros.



Fig. 5.2.- Válvulas de llenado (Medina, 2014).

Cuando el sistema de válvulas permitió el paso de agua a la cisterna seleccionada, se inició el funcionamiento de la bomba fotovoltaica sumergible. A la cual se monitoreó el tiempo de operación, así como la demanda eléctrica que el equipo requirió para la plataforma de 20 metros y posteriormente para la plataforma de 30 metros.

Al momento de llenar la cisterna para cada ensayo, se mantuvo abierto el flujo a través de la válvula en la plataforma (a 20 ó 30 mts de altura) correspondiente a la tubería de 4 in o de 6 in, según la que se desee emplear. El grado de abertura debe ser de 10% del total de abertura de la válvula (Fig. 5.3).



Fig. 5.3.- Válvula tipo esfera para 4 in y Válvula tipo Wafer para 6 in (Medina, 2014).

La tubería de descarga debe llenarse poco a poco hasta alcanzar la altura de la plataforma, y continuar el llenado hasta el nivel superior de la cisterna seleccionada. Cuando la tubería seleccionada alcanzó el nivel de llenado en referencia a la cisterna en uso, se procedió a encender el caudalímetro y a calibrar el flujo en Cero (Fig. 5.4). Esto se realizó cada vez que la tubería se llenaba nuevamente.

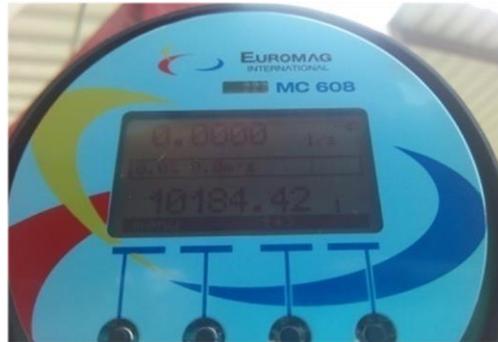


Fig. 5.4.- Caudalímetros en "Cero" (Medina, 2014).

La primer vez que se usó un sensor nuevo en el Medido Futek, fue necesario realizar la creación de un perfil para dicho sensor, según lo especifica el manual del producto. Posteriormente a la configuración inicial, el sensor se insertó en el orificio que el S.M.H. Turgo tiene en la tubería, destinado para tal función.



Fig. 5.5.- Medidor Futek y sensor de presión (Medina, 2014).

Se conectaron un conjunto de equipos de consumo eléctrico, equivalente a la potencia eléctrica máxima que el sistema es capaz de ofrecer. Para el caso del sistema micro hidroeléctrico Turgo se requieren 3 Kw de consumo. Las pinzas de corriente del medidor de calidad de energía, se conectaron a los cables destinados para el abastecimiento domestico, provenientes del tablero de control del S.M.H. Turgo.

Para las mediciones a través de los equipos de medición de presión, potencia y caudal se encendió el medidor correspondiente, y en cada equipo se seleccionó la función "datalogger", la cual realiza el registro de la información monitoreada. En dicha función se expresó el tiempo considerado a grabar, así como la hora de inicio de dicho periodo. Para los ensayos del Sistema Turgo se ocupó un tiempo estándar de registro de 12 minutos.

### **Procedimiento de Ensayo de S.M.H. Turgo.**

Al comenzar el ensayo, se ubicaba la válvula compuerta proveniente de la tubería de 4 in o 6 in dependiendo la "configuración" a realizar. Dicha válvula dirigía el agua hacia la turbina Turgo (Fig.5.6).



Fig. 5.6.- Válvula compuerta (Medina, 2014).

Posteriormente, a la hora señalada el inicio de grabación en los equipos de medición, se dio apertura a la válvula del inyector de las turbina en el caso de la turbina Turgo (Fig. 5.7). Se inició gradualmente la apertura de la válvula hasta alcanzar un voltaje promedio de (110 -120v).



Fig. 5.7.- Válvula del inyector (Medina, 2014)

Esto daba inicio a la operación del S.M.H. Turgo, paralelamente a ello, se verificaba la estabilidad de frecuencia en el generador, a través del tablero de control o en el Medidor de Calidad de la Energía (fig. 5.8).



Fig. 5.8.- Tablero de control y medidor de Calidad de Energía. (Medina, 2014).

*Nota:* En caso necesario cerrarla válvula lentamente para evitar el golpe de ariete sobre las válvulas compuertas y de esa manera evitar el frenado instantáneo de los rotores de la turbina.

### **5.2.- RESULTADOS PRELIMINARES DE ENSAYOS EN LOS SISTEMAS MICRO HIDROELÉCTRICOS.**

Se realizaron 12 ensayos (pruebas) en el sistema micro hidroeléctrico Turgo con la finalidad de obtener valores de potencia eléctrica, así como las variables de caudal, presión y potencia que se registraron a través de los equipos de medición antes descritos.

La finalidad de los ensayos fue conocer las condiciones que el banco de pruebas finalmente ofreció como variable de salto hidráulico neto, medido a través de la presión hidrostática registrada con el sensor de presión, así como el caudal ofrecido al sistema en las diferentes configuraciones de la línea hidráulica de desfogue y comportamiento de la potencia en relación a estos.

### 5.2.1.- Configuración: Sistema 20 m y 4 in - Turgo.

Realizando 3 ensayos en el S.M.H. Turgo, a través de una descarga en la línea hidráulica de 4 in de diámetro y haciendo uso del almacén de agua situado a 20 metros de altura sobre la base de la torre, se obtuvieron los siguientes resultados promedios.

La potencia eléctrica registrado en el S.M.H. a través del equipo de medición de calidad de energía se expresa en la siguiente gráfica (fig. 5.9.), en donde además se compara con la potencia hidráulica que las condiciones registradas de presión y caudal generarían si se tuviera una eficiencia del 100%, así también se expresa la potencia que el sistema debe ofrecer según la eficiencia del 60% expuesta por el fabricante. La potencia eléctrica máxima obtenida fue 366.45 Watts.

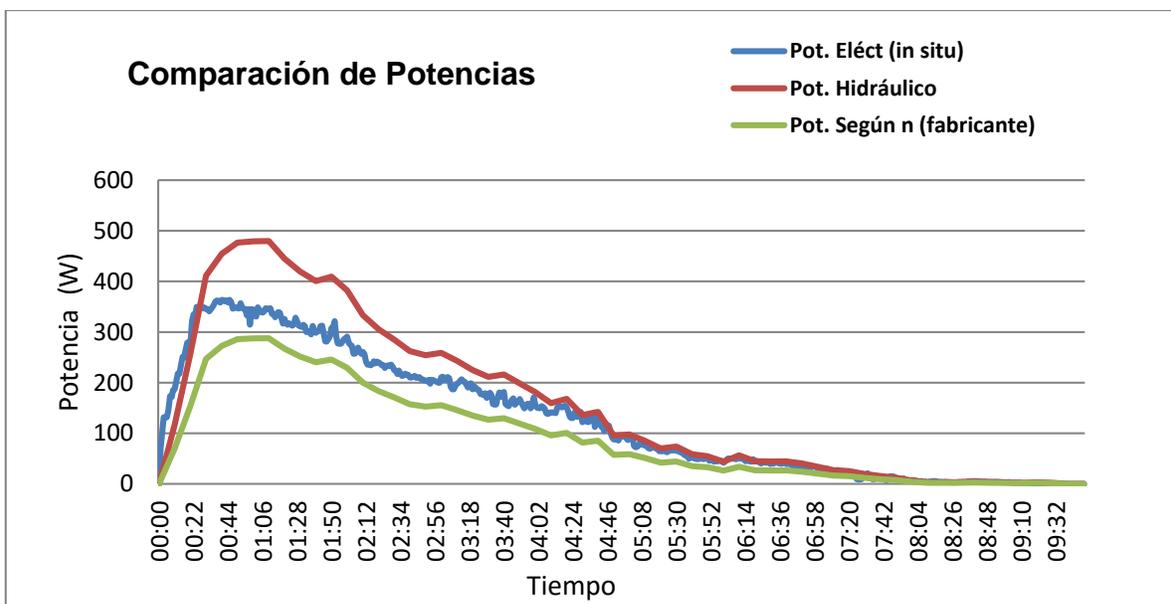


Fig. 5.9. Comparación de Potencias Eléctricas - 20 m 4 in Turgo.

La presión máxima obtenida en la configuración de 20 m y 4 in es de 0.84 Bar. puede observarse el descenso de la presión y la influencia de este en la potencia eléctrica del S.M.H.(Fig.5.10), del mismo modo se observa el comportamiento del Caudal durante los ensayos realizados y su influencia en la generación de potencia eléctrica (Fig. 5.11).

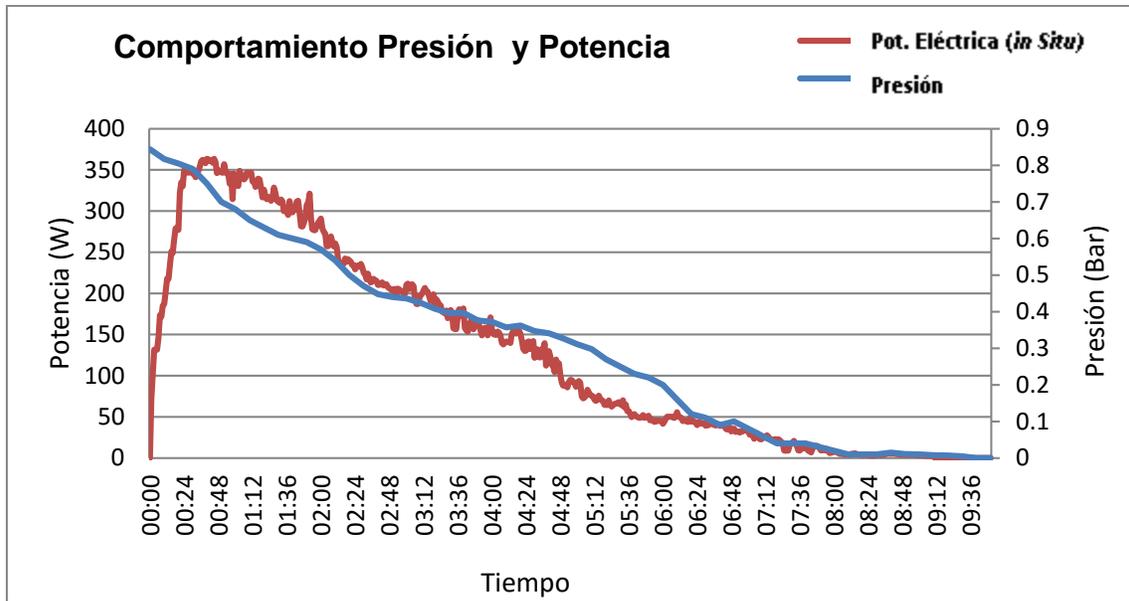


Fig.5.10.- Comportamiento Presión y Potencia Eléctrica - 20 m4 in Turgo.

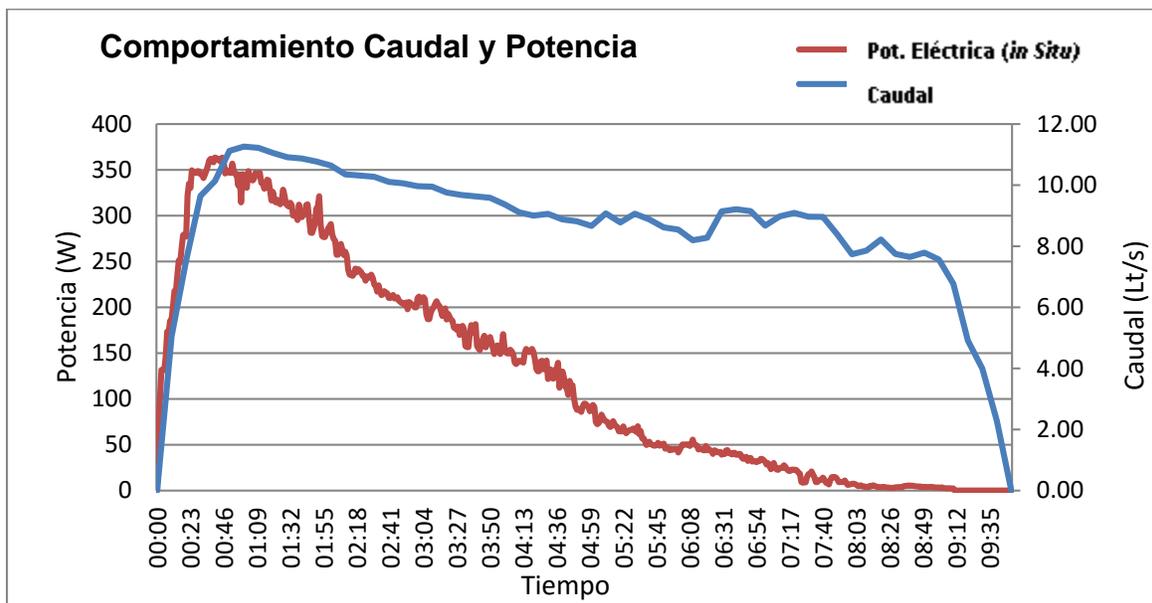


Fig. 5.11.- Comportamiento Caudal y Potencia - 20m 4 in Turgo.

El caudal máximo obtenido fue de 10.59 Lts/s, el cual descendía durante el ensayo realizado en el S.M.H. El tiempo promedio de descarga fue de 9 min 50 seg.

**5.2.2.- Configuración: Sistema 20 m y 6 in - Turgo.**

Realizando 3 ensayos en el S.M.H. Turgo, a través de una descarga en la línea hidráulica de 6 in de diámetro y haciendo uso del almacén de agua situado a 20 metros de altura sobre la base de la torre, se obtuvieron los siguientes resultados promedios.

La potencia eléctrica registrado en el S.M.H. a través del equipo de medición de calidad de energía se expresa en la siguiente gráfica (fig. 5.12.), en donde además se compara con la potencia hidráulica que las condiciones registradas de presión y caudal generarían si se tuviera una eficiencia del 100%, así también se expresa la potencia que el sistema debe ofrecer según la eficiencia del 60% expuesta por el fabricante. La Potencia eléctrica máxima obtenida fue de 608.46 Watts.

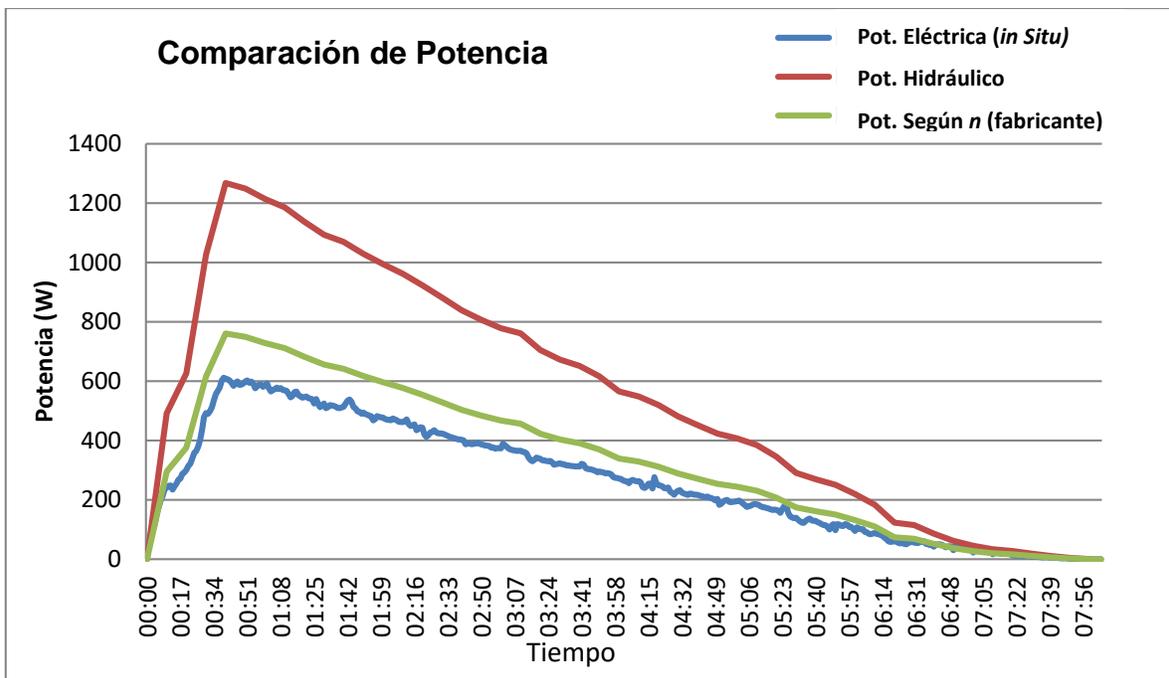


Fig.5.12. Comparación de Potencias Eléctricas 20m 6 in - Turgo

La presión máxima obtenida en la configuración de 20 m y 6 in fue 0.86 Bar. Puede observarse el descenso de la presión y la influencia de este en la potencia eléctrica del S.M.H.(Fig.5.13), del mismo modo se observa el comportamiento del caudal durante los ensayos realizados y su influencia en la generación de potencia eléctrica (Fig. 5.14).

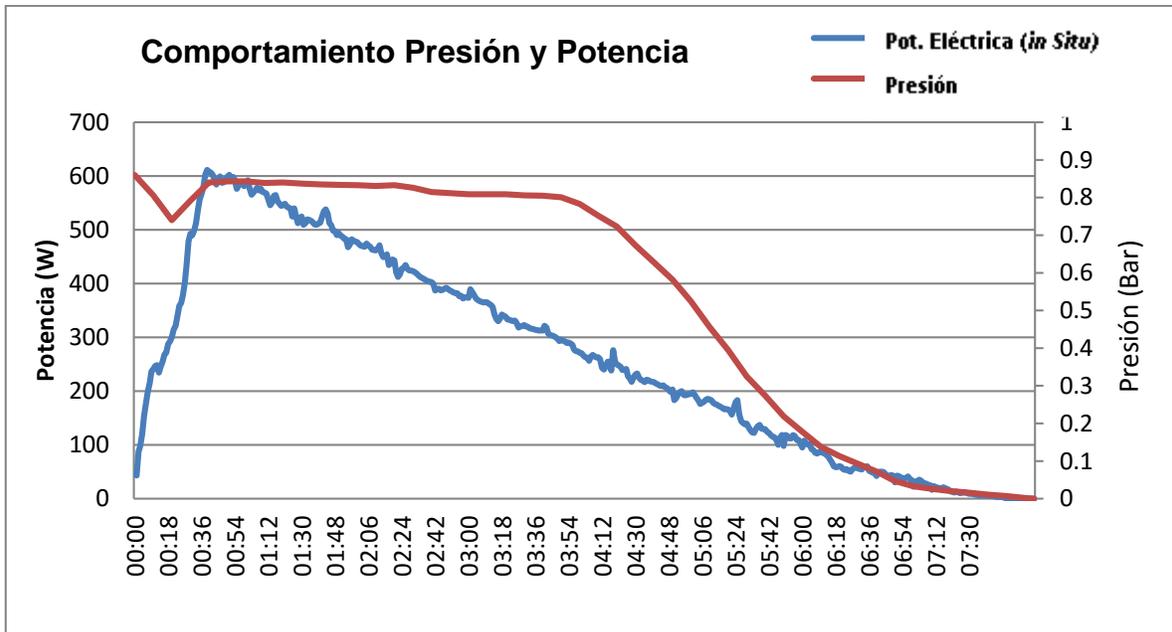


Fig.5.13.- Comportamiento Presión y Pot. Eléctrica - 20 m 6 in Turgo

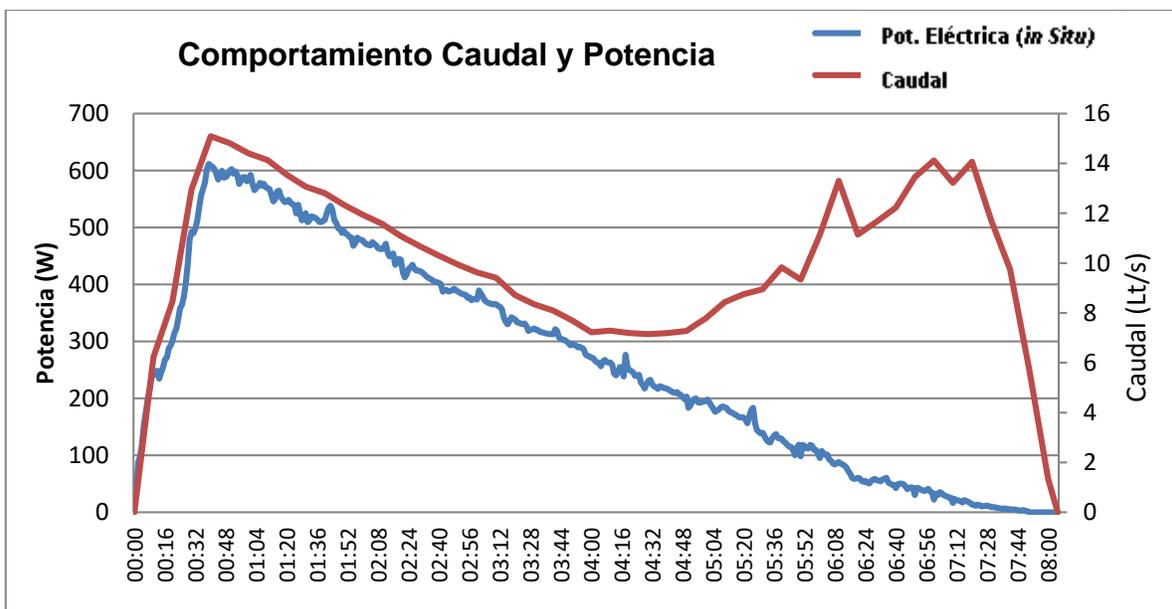


Fig.5.14.- Comportamiento Caudal y Pot. Eléctrica - 20m 6 in Turgo.

El caudal máximo obtenido fue de 14.07 Lts/s, el cual descendía durante el ensayo realizado en el S.M.H. el tiempo promedio de descarga fue de 8 min 5 seg.

### 5.2.3.- Configuración: Sistema 30 m y 4 in - Turgo.

Realizando 3 ensayos en el S.M.H. Turgo, a través de una descarga en la línea hidráulica de 4 in de diámetro y haciendo uso del almacén de agua situado a 30 metros de altura sobre la base de la torre, se obtuvieron los siguientes resultados promedios.

La potencia eléctrica registrado en el S.M.H. a través del equipo de medición de calidad de energía se expresa en la siguiente gráfica (fig. 5.15.), en donde además se compara con la potencia hidráulica que las condiciones registradas de presión y caudal generarían si se tuviera una eficiencia del 100%, así también se expresa la potencia que el sistema debe ofrecer según la eficiencia del 60% expuesta por el fabricante. La Potencia eléctrica máxima obtenida fue de 964.74 Watts.

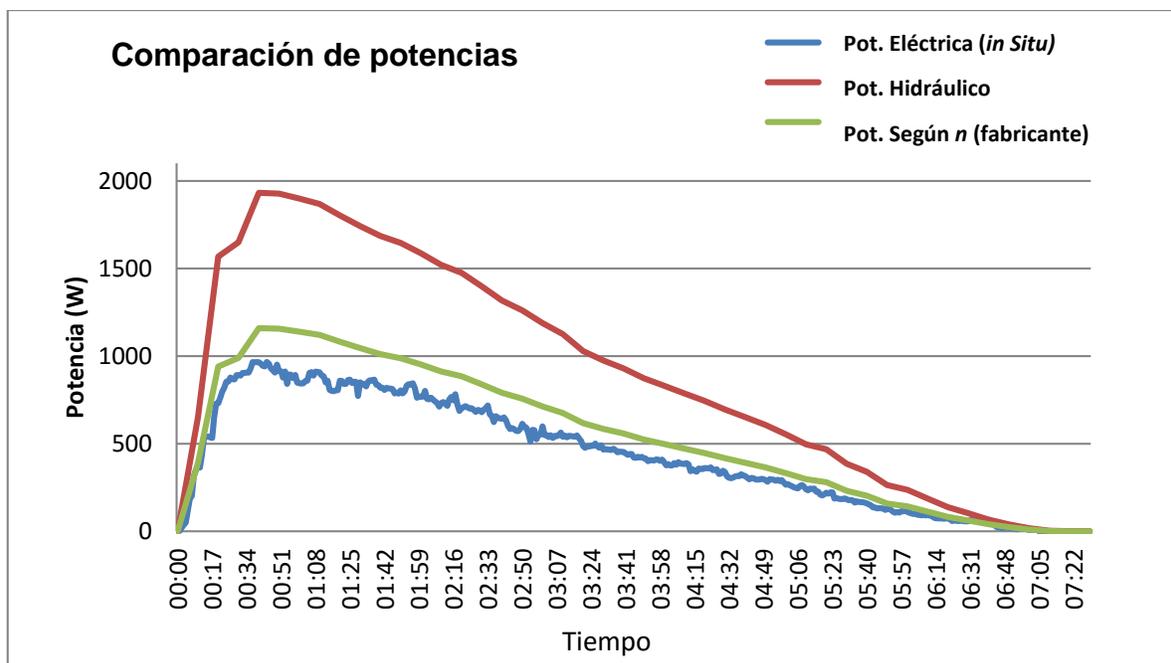


Fig.5.15.- Comparación de Potencias Eléctricas - 30 m 4 in Turgo.

La presión máxima obtenida en la configuración de 30 m y 4 in es de 1.6 Bar, puede observarse el descenso de la presión y la influencia de este en la potencia eléctrica del S.M.H. (Fig.5.16), del mismo modo se observa el comportamiento del Caudal durante los ensayos realizados y su influencia en la generación de potencia eléctrica (Fig. 5.17).

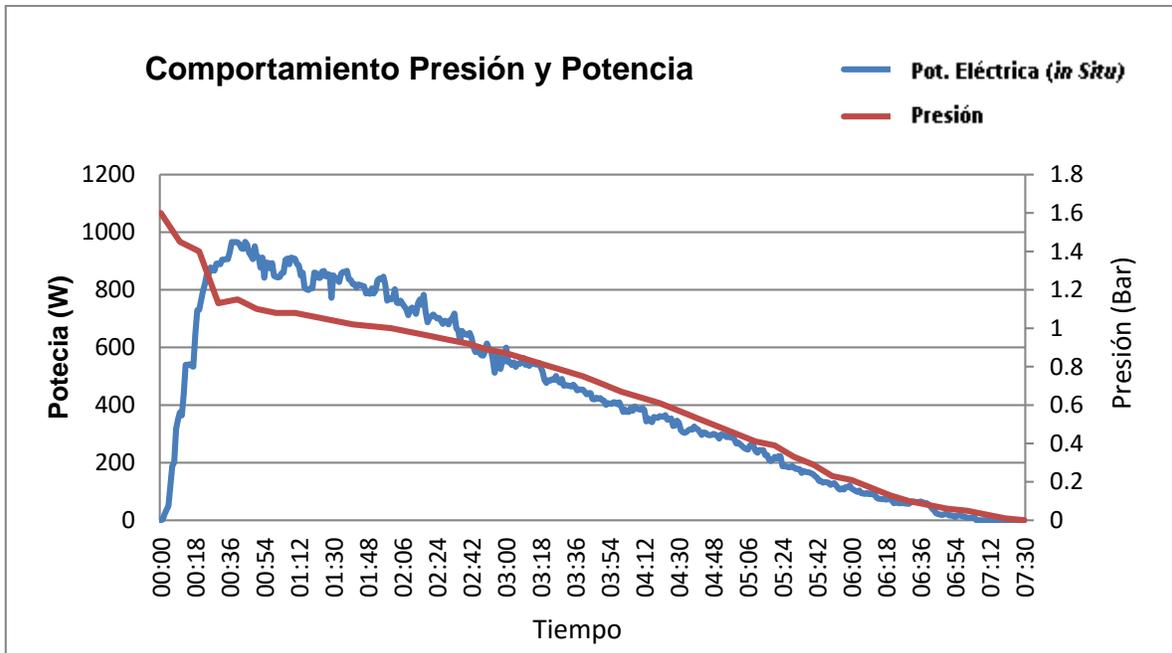


Fig.5.16.- Comportamiento Presión y Potencia - 30 m 4 in Turgo.

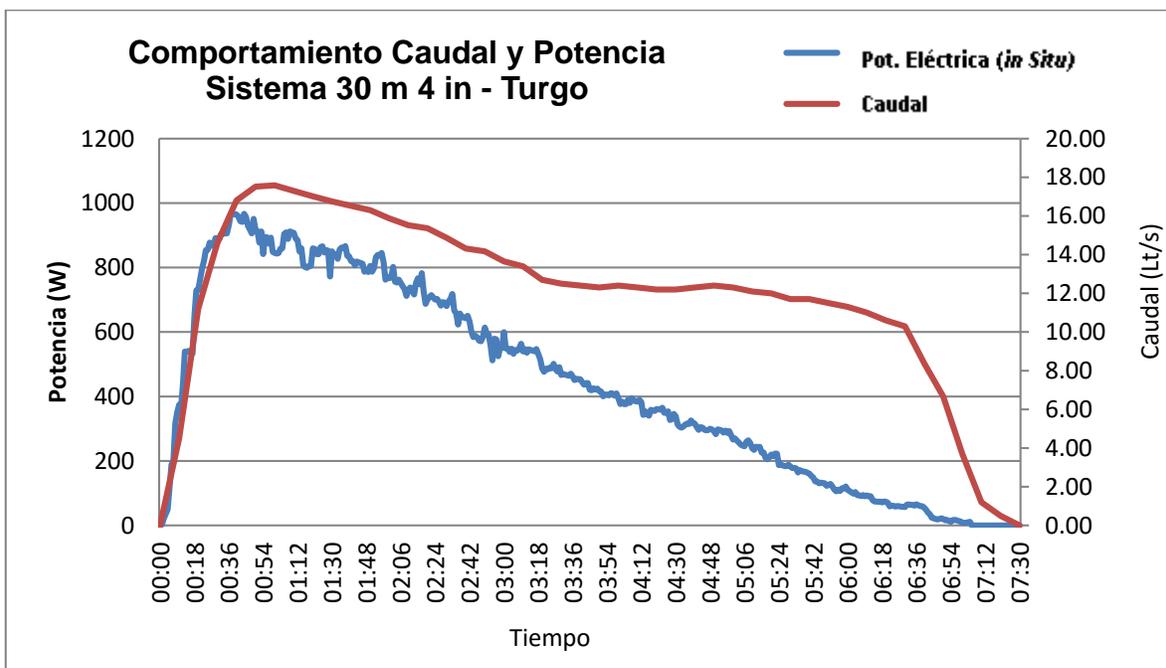


Fig.5.17.- Comportamiento Caudal y Potencia - 30 m 4 in Turgo.

El caudal máximo obtenido fue de 16.75 Lts/s, el cual descendía durante el ensayo realizado en el S.M.H. el tiempo promedio de descarga fue de 7 min 30 seg.

**5.2.4.- Configuración: Sistema 30 m 6 in - Turgo.**

Realizando 3 ensayos en el S.M.H. Turgo, a través de una descarga en la línea hidráulica de 6 in de diámetro y haciendo uso del almacén de agua situado a 30 metros de altura sobre la base de la torre, se obtuvieron los siguientes resultados promedios.

La potencia eléctrica registrado en el S.M.H. a través del equipo de medición de calidad de energía se expresa en la siguiente gráfica (fig. 5.18.), en donde además se compara con la potencia hidráulica que las condiciones registradas de presión y caudal generarían si se tuviera una eficiencia del 100%, así también se expresa la potencia que el sistema debe ofrecer según la eficiencia del 60% expuesta por el fabricante. La Potencia eléctrica máxima obtenida fue de 1381.01 Watts.

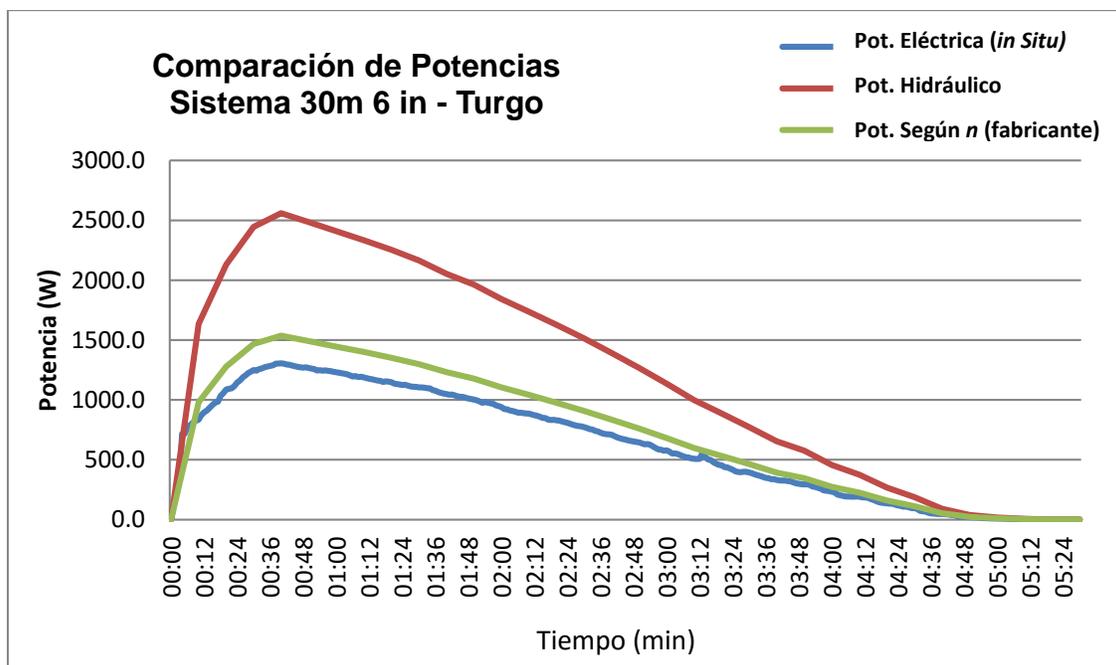


Fig.5.18. Comparación de Potencias Eléctricas 20m 6 in - Turgo

La presión máxima obtenida en la configuración de 30 m y 4 in es de 1.7 Bar. Puede observarse el descenso de la presión y la influencia de este en la potencia eléctrica del S.M.H. (Fig.5.19), del mismo modo se observa el comportamiento del caudal durante los ensayos realizados y su influencia en la generación de potencia eléctrica (Fig. 5.20).

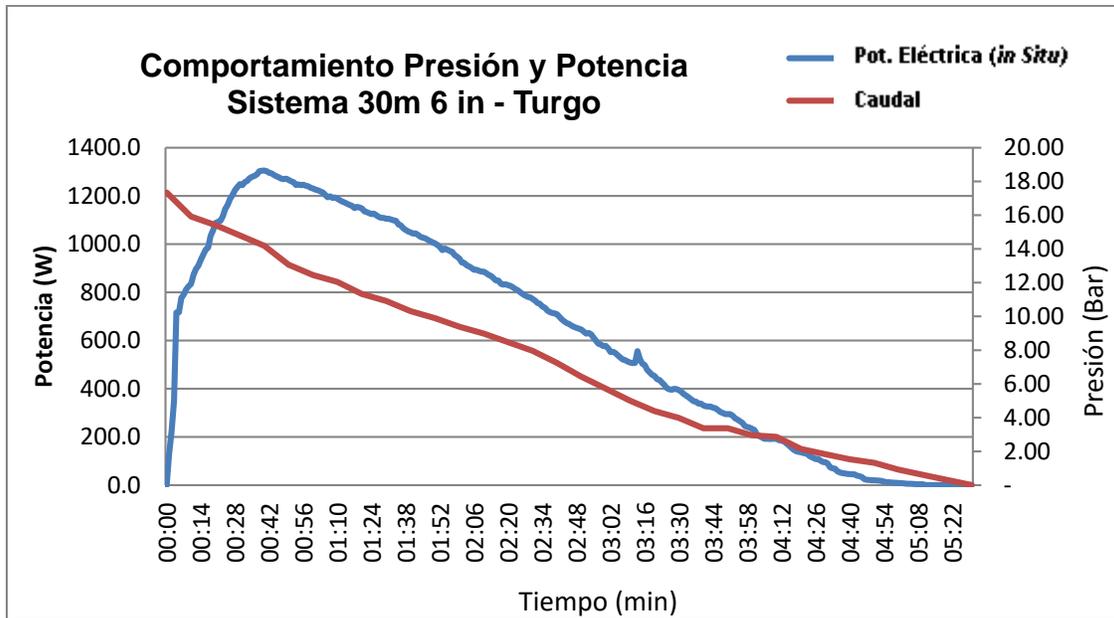


Fig.5.19.- Comportamiento Presión y Potencia - 30 m 4 in Turgo.

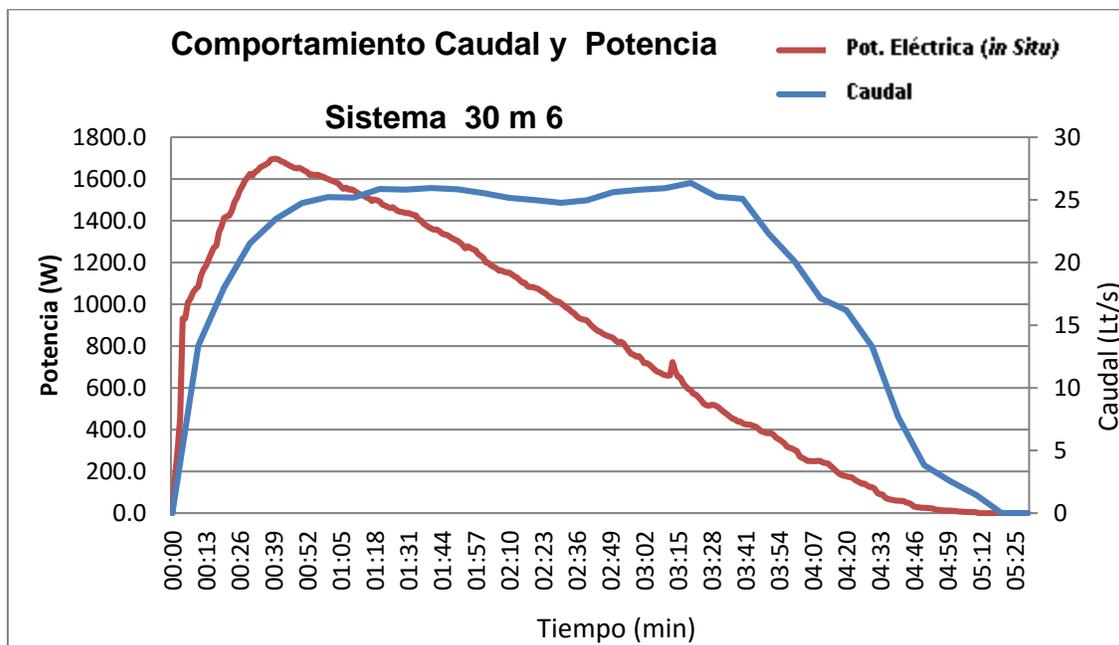


Fig.5.20.- Comportamiento Caudal y Potencia - 30 m 4 in Turgo.

El caudal máximo obtenido fue de 25.94 Lts/s, el cual descendía durante el ensayo realizado en el S.M.H. el tiempo promedio de descarga fue de 5 min 30 seg.

**5.2.5.- Condiciones generales observadas en los sistemas hidráulicos.**

El sistema de bombeo fue monitoreado, obteniéndose resultados del consumo de voltaje, corriente y caudal para las condiciones de 18 metros de profundidad más 20 metros y 30 metros respectivamente para la plataforma a la cual se elevó el agua durante los ensayos, como se muestra en la tabla 5.1.

Bombeo Fotovoltaico		
Altura	20 m + 18 m	30 m+ 18 m
Corriente Promedio	8.6 A	8.7 A
Voltaje inicial	135.7 V	134.6 V
Voltaje promedio	120.5 V	120.4 V
Tiempo (hora:min:seg)	01:10:00	01:40:00
Caudal promedio	1.31 Lt/s	0.92 Lt/s

Tabla 5.1.- Comportamiento del Sistema de Bombeo FV

En los ensayos realizados al sistema micro hidroeléctrico Turgo a través de la tubería de 4 in y 6 in desde la plataforma de 20 metros se registraron los siguientes comportamientos de la presión a la entrada de la turbina (fig. 5.21).

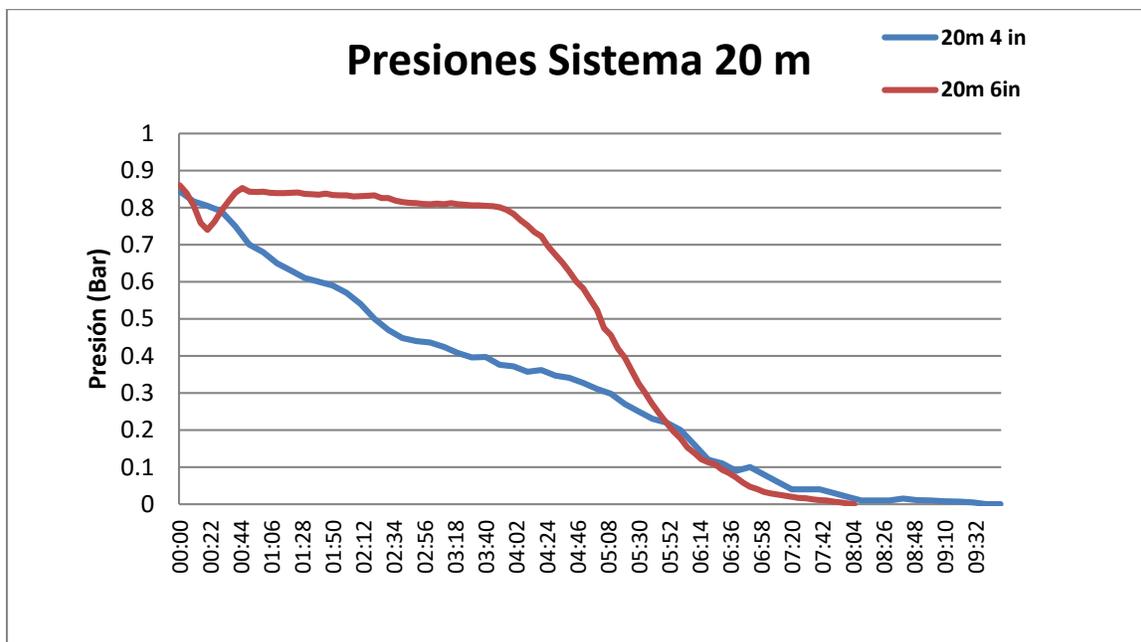


Fig.5.21.- Comportamiento Caudal y Potencia - 30 m 4 in Turgo.

Del mismo modo se obtuvo el registro de la presión en el sistema hidráulico de 4 in y de 6 in de diámetro de tubería, desde la plataforma de 30 metros de altura (Fig. 5.22). Se puede observar una disminución gradual en las caídas correspondientes de las tuberías de 4 in, a diferencia de las tuberías de 6 in en las cuales se observan descensos grandes en la presión en corto tiempo.



Fig.5.22.- Comportamiento Caudal y Potencia - 30 m 4 in Turgo.

Se seleccionaron de los registros los siguientes datos a manera de *muestra*, para describir las diferencias de potencia eléctrica registradas en los ensayos en cada una de las condiciones establecidas para los ensayos, para compararlos contra la potencia eléctrica calculada por formula con un 100% de Eficiencia a la cual se le conoce como potencia hidráulica, y también se calculo a partir de la Pot. Hidráulica el valor correspondiente a una eficiencia del 60% el cual es expuesto por el fabricante del sistema micro hidroeléctrico Turgo (Tabla 5.2.).

Sistema	Caudal	Presión	Frec	Pot. Eléct	Pot. Hidr.	Pot. Según n
	(Lt/s)	(Bar)	(Hertz)	(W)	(W)	(W)
20m 4 in	11.26	0.68	44.60	344.43	732.82	439.69
20m 6 in	15.09	0.84	49.98	608.47	1267.64	760.58
30m 4 in	16.80	1.15	53.24	964.74	1932.00	1159.20
30m 6 in	18.42	1.39	57.27	1305.40	2560.00	1536.00

Tabla 5.2.- Comparación de Potencias Eléctricas - Turgo

Se elaboro una gráfica de Potencias Eléctricas en relación a las condiciones de Presión y Caudal registrados para tal potencia (fig. 5.23), en la cual es posible observar la interacción y el aumento gradual entre la presión y el caudal para la obtención de mayores potencias eléctricas en el sistema.

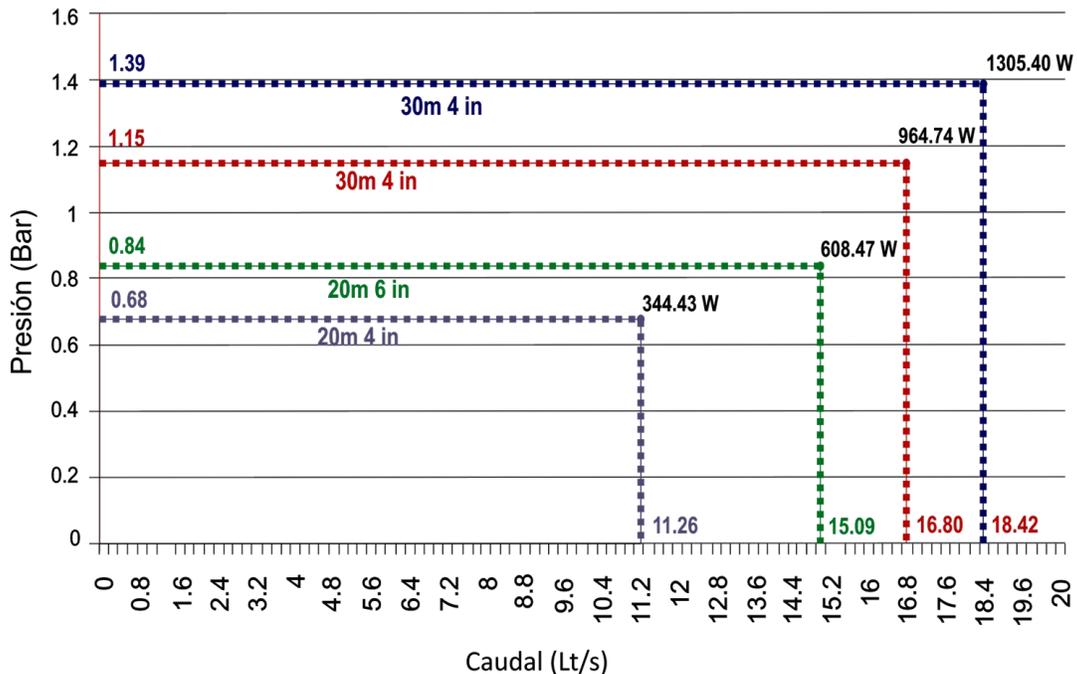


Fig.5.23.- Comportamiento de la Potencia con relación al Caudal y la Presión

Aplicando la ecuación para eficiencia eléctrica, la cual es cociente de la división de la potencia eléctrica entre la potencia hidráulica, se obtuvieron los siguientes resultados expuestos en la Tabla 5.3. en conjunto con parámetros característicos de cada condición de ensayo.

Sistema	20 m			30 m		
	Q máx	Pres max	% n	Q máx	P prom	% n
4 in	10.59	0.84	0.47	16.75	1.6	0.5
6 in	14.07	0.86	0.49	25.94	1.7	0.52

Tabla 5.3.- Parámetros Característicos en los Ensayos.

Producto del cálculo de las eficiencias se elaboraron proyecciones de potencia considerando una producción límite de 3 Kw, para 4 condiciones de uso referentes a 20 y 30 metros, así como 4 y 6 in de diámetro de tubería (Fig. 5.24).

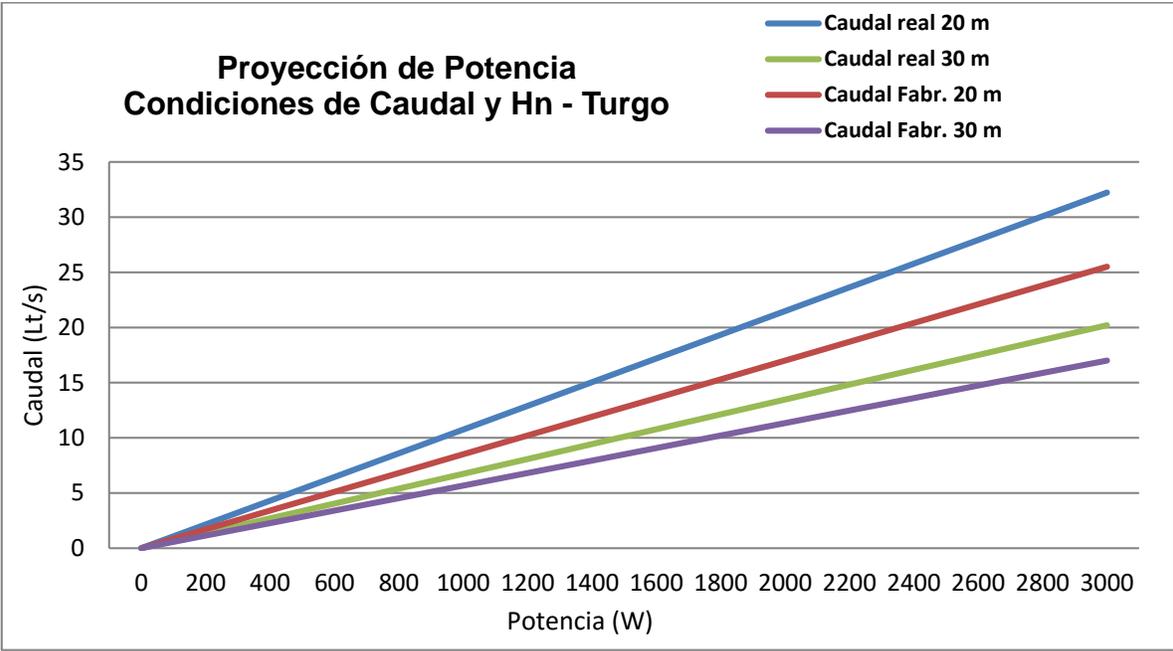


Fig.5.24.- Proyección de Potencias en el Sistema Turgo.

**CAPITULO 6****CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.**

Se diseñó y construyó un banco de pruebas de tecnologías hidráulicas de fuentes renovables que cumple con las características técnicas y de seguridad para evaluar el desempeño de sistemas micro hidroeléctricos.

Durante el proceso de ensayo del sistema micro hidroeléctrico Turgo, se determinó que la configuración hidráulica incorpora pérdidas de casi un 40 % del salto hidráulico proyectado en la instalación de las plataformas. Dichas pérdidas se presentaron ante la inclusión de la bifurcación de tuberías hacia las válvulas compuertas, mismo que fue el modelo que permitía realizar el intercambio de tuberías hacia las turbinas. Se demostró el funcionamiento de regulación de caudal de operación mediante la adaptación de válvulas; tipo esfera, tipo wafer, y tipo compuerta, simulación de salto hidráulico como propuesta de banco de pruebas de tecnologías hidráulicas de fuentes renovables.

Se obtuvieron las curvas de potencia eléctrica y eficiencia global en función de los caudales máximos de operación 11.26 lt/s, y 15.09 lt/s obteniéndose una eficiencia global promedio de 48% aproximadamente para el salto hidráulico de la plataforma a 8.33 metros correspondiente a la plataforma de 20 metros de altura, así también caudales máximos de operación de 16.75 Lts/s a 25.94 Lt/s una eficiencia global promedio de 51% para el salto hidráulico de 17 mts correspondiente a la plataforma de 30 metros de altura.

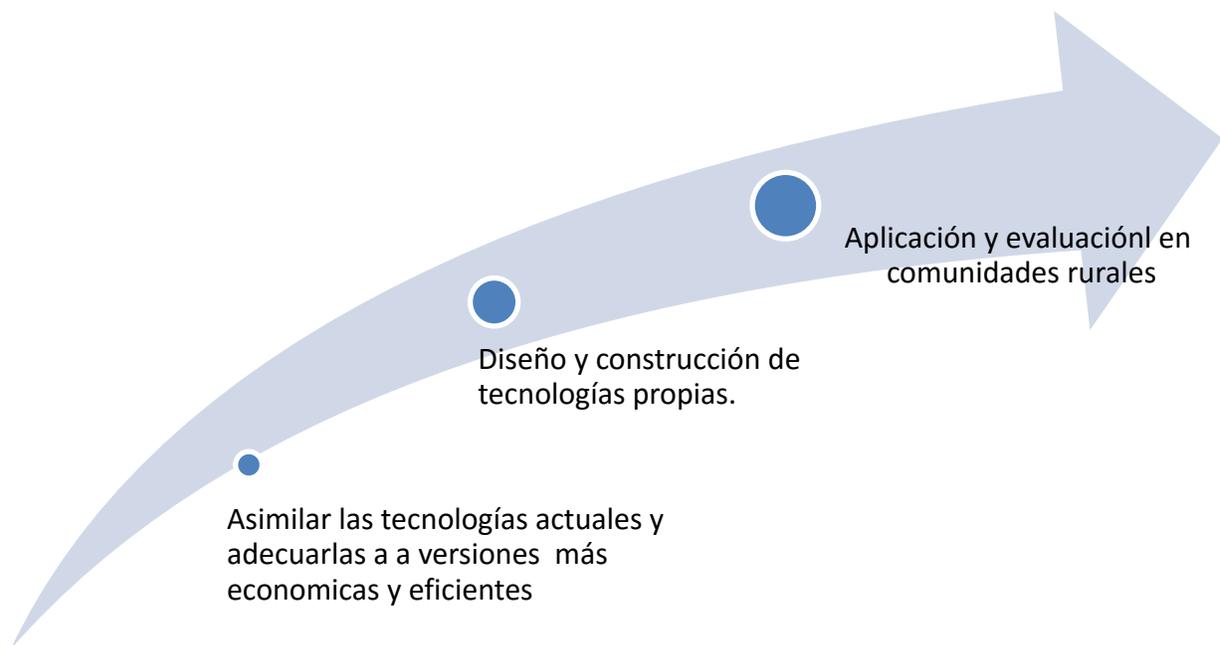
El diagrama de potencias eléctricas, muestra diferencias significativas entre los puntos de operación nominal proyectados en base a los ensayos y los que entrega el fabricante, se observan diferencias de rendimiento cercanas a un 9%, por debajo de lo que el fabricante expone.

El resultado de esta investigación permite conocer la eficiencia real (49%), que el S.M.H. Turgo desarrollaría en condiciones similares en campo, lo cual servirá para adaptar los sistemas hidráulicos, y estimar el dimensionamiento de los S.M.H. necesarios para las condiciones de las zonas con potencial aprovechable en el estado de Chiapas.



Recomendaciones a trabajos futuros, se sugiere desarrollar y enfocar la investigación de los sistemas micro hidroeléctricos hacia:

- Modelación de ecuaciones de los sistemas micro hidroeléctricos.
- Realizar ensayos del S.M.H. Michell Banki, haciendo uso del procedimiento propuesto en esta tesis.
- Automatizar el sistema de ensayos del Banco de Pruebas de Tecnologías Hidráulicas de Fuentes Renovables.
- Promover la vinculación con otros centros de investigación en sistemas hidroeléctricos en América Latina.
- Establecer un programa de desarrollo en base a los resultados de este proyecto, donde se tengan en cuenta 3 etapas fundamentales.



Así mismo se destaca la necesidad de tener un espacio que permita fortalecer el estudio de fenómenos hidráulicos de forma académica e investigación científica, en el Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico de Energías Renovables.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. Alatorre Frenk, C. (1997). VII encuentro latinoamericano en pequeños aprovechamientos hidroenergéticos. *Hacia un futuro energetico sostenible en América Latina*. (pág. 29). Cajamarca, Perú.: Intermediate technology Development Group.
2. Audisio, O. A., Marchegiani, A. R., & Kurtz, V. H. (s.f.). *Bombas Centrifugas Operando como turbinas Hidráulicas (1o. Parte)*. Recuperado el 24 de Agosto de 2014, de Centro Nacional de Referência em Pequenas Hidrelétricas: <http://www.cerpch.unifei.edu.br/arquivos/artigos/hidro-hydro-52-pag26a31.pdf>
3. Benzon, S. (2013). *State of the arte & current research on Turgo impulse turbines*. Cape Town: Lancaster University Renewable Energy Group.
4. CEC, C. p. (2010). *CEC.org*. Recuperado el 15 de Febrero de 2014, de Guía para el Desarrollo de Proyectos Comunitarios de Energía Renovable: [http://www.cec.org/storage/88/8462\\_guide\\_to\\_a\\_developing\\_a\\_re\\_project\\_s\\_p.pdf](http://www.cec.org/storage/88/8462_guide_to_a_developing_a_re_project_s_p.pdf)
5. Clamberauz Correa, J. L. (2012). *Diseño y estudio de una Turbina Turgo para condiciones de flujo diversas*. Caracas, Venezuela: Universidad Simón Bolívar.
6. Depto. de Hidráulica, F. d. (2009). *ensayo de Maquinas Hidráulicas, Guía de Laboratorios*. Argentina: Universidad de la Plata.
7. Díez Fernández, P. (2009). *Turbinas Hidráulicas*. Santander, España.: Universidad de Cantabria.
8. Egúsqüiza Goñi, J. C., & Sánchez Camones, J. C. (2009). *Diseño de un Banco de Pruebas para Turbinas Michel Banki para el Laboratorio de Energía de la Pontifíca Universidad Católica del Perú*. Tesis de Licenciatura, Pontificia Universidad Católica del Perú.
9. EUITACR. (s.f.). *Escuela Universitaria de Ingeniería Agrícola de Ciudad Real*. Obtenido de El golpe de ariete: [https://www.uclm.es/area/ing\\_rural/Trans\\_hidr/Tema10.PDF](https://www.uclm.es/area/ing_rural/Trans_hidr/Tema10.PDF)



10. Farrera, N. (2011). *Tecnologías Termosolares y Bionergéticas y su contribución al desarrollo sustentable de comunidades rurales marginadas de Chiapas*. Tesis de Doctorado., Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas., Facultad de Ingeniería.
11. Fernández Santamaría, M. (s.f.). *Sistema de Monitorización y control del Rendimiento de Centrales Hidroeléctricas*. Recuperado el 2014 de Junio de 03, de SINAIS: <http://www.sinais.es/Hoja%20de%20especificaciones%20MCRHidro.pdf>
12. Hamburt, G. (2005). *G.U.N.T.* Recuperado el 10 de Noviembre de 2013, de [http://www.gunt.de/static/s4202\\_3.php?p1=&p2=&pN=;](http://www.gunt.de/static/s4202_3.php?p1=&p2=&pN=;)
13. Hernández Flores, O., Márquez Sánchez, J. A., & Nieto Avila, B. (2014). *Banco de pruebas para máquinas rotatorias de corriente continua de imán permanente*. México: Tesis de Licenciatura.
14. IEA. (2015). *FAQs: Renewable Energy*. Recuperado el 03 de Enero de 2015, de International Energy Agency: <http://www.iea.org/aboutus/faqs/renewableenergy/>
15. Interior, U. D. (2004). *Cavitation detection in hydraulic turbines*. Recuperado el Septiembre de 2014, de Bureau of Reclamation: [http://www.usbr.gov/pmts/hydraulics\\_lab/hydstructures/cavitate.html](http://www.usbr.gov/pmts/hydraulics_lab/hydstructures/cavitate.html)
16. IRENA. (Febrero de 2015). *Hydropower Technology Brief*. Recuperado el 05 de Febrero de 2015, de International Renewable Energy Agency: [http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA-ETSAP\\_Tech\\_Brief\\_E06\\_Hydropower.pdf](http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA-ETSAP_Tech_Brief_E06_Hydropower.pdf)
17. LAERFTE. (07 de 06 de 2013). *Ley para el aprovechamiento de Energías Renovables y el financiamiento de la transición energética*. México.
18. Larios Lagos, J. I. (2007). *Diseño, Montaje y Pruebas de un prototipo de microcentral hidroeléctrica con turbina peltón*. Tesis de Licenciatura, Universidad de Chile., Departamento de Ingeniería Mecánica.
19. Marchegiani, A. R. (18 de Mayo de 2011). *Simulación numérica del flujo en una turbina tipo Banki*. Recuperado el 25 de Agosto de 2014, de Centro Nacional de Referência em Pequenas Centrais Hidrelétricas.: <http://www.cerpch.unifei.edu.br/arquivos/artigos/11bb7896d3f70b07eadc56f3a6aed164.pdf>



20. Marchegiani, A. R., & Audisio, O. A. (18 de Mayo de 2011). *Diseño, Construcción y Ensayo de una turbina de Flujo Transversal para Generación Eléctrica en Sitios Aislados*. Recuperado el 25 de Agosto de 2014, de Centro Nacional de Referencia em Pequenas Hidrelétricas.: <http://www.cerpch.unifei.edu.br/arquivos/artigos/d9b9c2e9319fbb81e79d7c65884c0303.pdf>
21. Mataix, C. (1982). *Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas*. México: Alfaomega.
22. Medina, E. (2015). *Energías hidráulicas*. Mexico: Universidad...
23. Medina, E. F. (2014). Diseños. *Elaboración a través del programa Sketchup Pro 2013*. Chiapas, México.
24. Medina, E. F. (2014). Fotografía. *Implementación del Banco de Pruebas de Tecnologías Hidráulicas Renovables*. Chiapas, México.
25. Menéndez Pérez, E. (1997). *Las energías renovable: un enfoque político - ecológico*. Madrid.
26. Muguerza, D. (30 de Junio de 2014). *Micro Centrales Hidroeléctricas*. Recuperado el 24 de Agosto de 2014, de Manual del Instalador Digital: [http://sistemamid.com/panel/uploads/biblioteca/2014-05-30\\_04-34-30103746.pdf](http://sistemamid.com/panel/uploads/biblioteca/2014-05-30_04-34-30103746.pdf)
27. Pérez Ramirez, R. (Agosto de 2005). *Energía Renovable para la Electrificación Rural de Comunidades Indígenas de la Región Chatina*. Recuperado el 08 de Agosto de 2014, de Geocities: [http://www.geocities.ws/isf\\_mx/Documentos/proyecto\\_solar.pdf](http://www.geocities.ws/isf_mx/Documentos/proyecto_solar.pdf)
28. Pérez Ramírez, R., Pérez López, A., & Martínez Arremilla, J. C. (2011). *Optimización de Sistemas Híbridos de Energía para la Electrificación Rural de Comunidades Indígenas de México*. Recuperado el 23 de Abril de 2014, de Universidad Autónoma Chapingo: <http://www.chapingo.mx/revistas/phpscript/download.php?file=completo&id=MTkwOQ==>
29. R. Marchegiani, A. (1997). VII encuentro Iationamericano en pequeños aprovechamientos hidroenergéticos. *Metodología de diseño preliminar para pequeñas turbinas de reacción* (pág. 161 ). Cajamarca, Perú: Intermediate Technology Development Group.

30. Ramírez del Barrio, P. A. (2012). *Diseño e implementación de Sistema de Control para micro hidráulica plug & play*. Chile: Universidad de Chile.
31. Rogers, P. P., Jalal, K. F., & Boyd, J. A. (2008). *An introduction to Sustainable Development*. United States: Earthscan.
32. Roldán Vilorio, J. (2013). *Energías Renovables. Lo que hay que saber*. España: Paraninfo.
33. Sanz Osorio, J. F. (2008). *Energía Hidroeléctrica*. Universidad de Zaragoza.
34. SENER. (2014). *Inventario Nacional de Energías Renovables*. Recuperado el 8 de Enero de 2015, de <http://inere.energia.gob.mx/publica/version3.1/>
35. SENER. (2014). *Programa Especial para el Aprovechamiento de Energías Renovables*. México.
36. SENER. (2012). *Prospectiva de Energías Renovables 2012 - 2026*. México.
37. Suescún Monsalve, I. (s.f.). *Centrales Hidráulicas, La tubería de Presión*. Recuperado el 7 de Septiembre de 2014, de Universidad de Antioquia, Facultad de Ingeniería.: <http://jaibana.udea.edu.co/grupos/centrales/files/capitulo%203.pdf>
38. Velasco González, J. (2009). *Energías Renovables*. Barcelona: Reverté.
39. Vicente, M. M. (1995). *Tuberías a presión*. Universidad Católica Andres.
40. Viedma Robles, A., & Amora Parra, B. (1997). *Teoría de máquinas hidráulicas*. Murcia, España: Universidad de Murcia.