

# **EVALUACIÓN DE LA PRODUCCIÓN ELÉCTRICA DE UNA TURBINA TURGO**

**LEWIS DE JESÚS PEREZ OCHOA**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
ESCUELA DE INGENIERÍAS  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA  
SECCIONAL BUCARAMANGA  
2019**

**EVALUACIÓN DE LA PRODUCCIÓN ELÉCTRICA DE UNA TURBINA TURGO**

**LEWIS DE JESÚS PEREZ OCHOA**

**TRABAJO DE GRADO COMO REQUISITO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE  
INGENIERO MECÁNICO**

**DIRECTOR:  
EMIL HERNÁNDEZ ARROYO  
INGENIERO MECÁNICO  
M.SC. CONTROLES INDUSTRIALES**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
ESCUELA DE INGENIERÍAS  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA  
SECCIONAL BUCARAMANGA  
2019**

NOTA DE ACEPTACIÓN

---

---

---

---

---

---

FIRMA DEL DIRECTOR

---

FIRMA DEL JURADO

---

FIRMA DEL JURADO

## **DEDICATORIA**

Dedico este proyecto principalmente a Dios por darme la sabiduría, la paciencia y la fortaleza para guiarme a lo largo de la realización de este proyecto de grado, a mis padres Lacides De Jesús Perez Pinto y Nancy Rosario Ochoa Granadillo que son mi mayor fuente de orgullo e inspiración y son la pieza fundamental de que esto fuese posible, a mis hermanos Lacides, Leiner y Elaine Perez por brindarme todo su apoyo incondicional, a mis amigos que fueron parte fundamental a la hora de realizar el proyecto, y por ultimo a todas las personas que indirectamente ayudaron a concretar esto.

(Perez, Lewis)

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco principalmente a Dios por darme vida y permitirme llegar hasta acá y así poder alcanzar una de mis principales metas en la vida.

A la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga por ser mi alma mater y a toda su comunidad de profesores destacando principalmente la labor de mi director de proyecto, el ingeniero Emil Hernández, por la ayuda recibida tanto en conocimientos como en orientación durante todo el trascurso de la realización del proyecto.

Agradezco a todas las personas que se involucraron directa o indirectamente con el proyecto realizado, su ayuda fue fundamental para poder obtener este logro.

Por ultimo agradecer a todas las personas que conocí a lo largo de mi carrera que aportaron para lograr la persona que soy en día.

## Contenido

INTRODUCCIÓN .....	9
1. OBJETIVOS.....	14
1.1. OBJETIVO GENERAL .....	14
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	14
2. MARCO TEÓRICO .....	15
2.1. TURBINAS HIDRÁULICAS.....	15
2.2. CLASIFICACIÓN DE LAS TURBINAS HIDRÁULICAS.....	15
2.2.1. Según la posición de su eje .....	16
2.2.2. Según la dirección en la que entra el agua.....	16
2.2.3. Según el grado de reacción .....	16
2.3. GRADO DE REACCIÓN.....	17
2.4. TURBINA TURGO .....	18
2.5. CONTROLADOR DE CARGA .....	20
2.6. BATERÍAS .....	21
2.7. TABLERO DE CARGAS .....	22
2.8. ESTADO DEL ARTE.....	23
3. METODOLOGÍA.....	25
3.1. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE ADMISIÓN Y RETORNO DE AGUA .....	25
3.1.1. Sistema de admisión de agua.....	25
3.1.2. Sistema de retorno de agua.....	27
3.2. CONSTRUCCIÓN DEL CIRCUITO ELÉCTRICO Y ADECUACIÓN DEL TABLERO DE CARGAS .....	28
3.3. VERIFICACIÓN DE SELECCIÓN DEL DIÁMETRO DE LA TUBERÍA .....	29
4. PRUEBAS.....	33
4.1. PRUEBAS DE TURBINA EN VACÍO.....	33
4.1.1. Graficas.....	33
4.2. PRUEBAS DE TURBINA CON CARGAS .....	36
4.2.1. Graficas.....	37
4.3. PERFIL DE CARGA Y DESCARGA DE LA BATERÍA .....	45
4.3.1. Perfil de carga de la batería. ....	45
.....	45
4.3.2. Perfil de descarga de la batería. ....	46

5. CONCLUSIONES .....	47
6. RECOMENDACIONES.....	48
7. BIBLIOGRAFIA.....	49

### **Tabla de gráficas**

Gráfica 0.1. Oferta hidroeléctrica en Colombia. ....	12
Gráfica 0.2. Turbina instalada en La Candelaria, Guatemala. ....	13
Gráfica 2.1. Sistema de turbina turgo. ....	15
Gráfica 2.2. Turbina Pelton con eje horizontal .....	16
Gráfica 2.3. Dirección de entrada y salida del agua en una turbina. ....	16
Gráfica 2.4. Turbinas de Acción y Reacción. ....	17
Gráfica 2.5. Alabes de una turbina Turgo .....	19
Gráfica 2.6. Turbina turgo empleada en el proyecto. ....	20
Gráfica 2.7. Controlador de carga.....	21
Gráfica 2.8. Batería. ....	22
Gráfica 2.9. Tablero de cargas.....	22
Gráfica 2.10. Modelo de turbina turgo analizado por CFD .....	24
Gráfica 3.1. Sistema de admisión de agua antiguo.....	25
Gráfica 3.2. Nuevo sistema de admisión de agua.....	26
Gráfica 3.3. Sistema de distribución de agua y admisión a turbinas finalizado. (1) Válvula de servicio, (2) Válvula de flujo de agua turbina pelton, (3) Válvulas de flujo de agua turbina turgo.....	26
Gráfica 3.4. Esquema de sistema de recirculación de agua. ....	27
Gráfica 3.5. Sistema de retorno de agua. ....	27
Gráfica 3.6. Tanque elevado.....	28
Gráfica 3.7. Tablero integrado. ....	28
Gráfica 3.8. Tablero de cargas.....	29
Gráfica 3.9. Esquema eléctrico del tablero de cargas.....	29
Gráfica 4.1. Caudal Vs RPM en vacío. ....	33
Gráfica 4.2. Potencia hidráulica VS RPM. ....	34
Gráfica 4.3. Voltaje Vs RPM en vacío.....	34
Gráfica 4.4. Voltaje Vs Caudal. ....	35
Gráfica 4.5. Presión Vs % de apertura de la válvula. ....	36
Gráfica 4.6. Potencia útil del sistema comparado con las RPM a 25% de apertura de la válvula. ....	37
Gráfica 4.7. Potencia útil del sistema comparado con las RPM a 50% de apertura de la válvula. ....	37
Gráfica 4.8. Potencia útil del sistema comparado con las RPM a 75% de apertura de la válvula. ....	38
Gráfica 4.9. Potencia útil del sistema comparado con las RPM a 100% de apertura de la válvula. ....	38
Gráfica 4.10. Eficiencia Vs RPM a 25% de apertura de válvula. ....	39

Gráfica 4.11. Eficiencia Vs RPM a 50% de apertura de válvula. ....	39
Gráfica 4.12. Eficiencia Vs RPM a 75% de apertura de válvula. ....	40
Gráfica 4.13. Eficiencia Vs RPM a 100% de apertura de válvula. ....	40
Gráfica 4.14. Comportamiento del voltaje de la turbina con y sin carga. ....	41
Gráfica 4.15. Potencia consumida por el tablero de cargas. ....	42
Gráfica 4.16. Potencia consumida Vs Potencia disponible. A 25% de apertura de válvula. ....	43
Gráfica 4.17. Potencia consumida Vs Potencia disponible. A 50% de apertura de válvula. ....	43
Gráfica 4.18. Potencia consumida Vs Potencia disponible. A 75% de apertura de válvula. ....	44
Gráfica 4.19. Potencia consumida Vs Potencia disponible. A 100% de apertura de válvula. ....	44
Gráfica 4.20. Perfil de carga de la batería. ....	45
Gráfica 4.21. Perfil de descarga de la batería. ....	46

#### **Tabla de tablas**

Tabla 1 Tabla de especificaciones turbina turgo. ....	19
Tabla 2 Tabla de especificaciones del controlador. ....	20
Tabla 3 Tabla de especificaciones batería. ....	21
Tabla 4 Tabla de pérdidas de cabeza por fricción. ....	31
Tabla 5 Tabla de selección de diámetro. ....	32



## RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

**TITULO:** EVALUACIÓN DE LA PRODUCCIÓN ELÉCTRICA DE UNA TURBINA TURGO

**AUTOR(ES):** LEWIS DE JESÚS PEREZ OCHOA

**PROGRAMA:** Facultad de Ingeniería Mecánica

**DIRECTOR(A):** EMIL HERNÁNDEZ ARROYO

### RESUMEN

En este proyecto se implementó y evaluó una turbina de acción tipo turgo acoplada sobre un banco de pruebas de microgeneración eléctrica con el fin de recolectar información sobre este tipo de turbinas. En el proyecto pudimos encontrar dos sistemas diferentes, el sistema de circulación de agua y el sistema de generación eléctrica; el primer sistema es el de circulación de agua y consta de un tanque de 2000 Litros 30 metros de tubería PVC de 4 pulgadas, 35 metros de manguera de poliuretano, 3 válvulas de bola y 2 bombas centrifugas de la marca pedrollo, cada una de estas bombas poseen una potencia de 2 HP; el segundo sistema es el de generación eléctrica, que consta de una turbina turgo, un controlador de carga de la marca Coleman Air , una batería AGM de 100 Ah y un tablero de cargas, este poseía 11 bombillas de tecnología led de 9 Watts. Se realizó el cálculo de selección de tubería para verificar que esta estuviese seleccionada correctamente y el sistema funcionase de la manera más óptima. Se obtuvieron curvas de desempeño de la turbina con y sin cargas, con el fin de comparar su comportamiento. Por último, se elaboró una guía de laboratorio dirigida al área de máquinas hidráulicas con el objetivo de aportar conocimiento a la comunidad educativa

### PALABRAS CLAVE:

Turbina, microgeneración, turgo, cargas.

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

## GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

**TITLE:** EVALUATION OF THE ELECTRICAL PRODUCTION OF A TURGO TURBINE

**AUTHOR(S):** LEWIS DE JESÚS PEREZ OCHOA

**FACULTY:** Facultad de Ingeniería Mecánica

**DIRECTOR:** EMIL HERNÁNDEZ ARROYO

### ABSTRACT

This project implements and evaluates a turgo-type action turbine coupled on an electric microgeneration test bench in order to collect information on this type of turbines. In the project we could find two different systems, the water circulation system and the power generation system; the first system is the water circulation and constant of a 2000-liter tank, 30 meters of 4-inch PVC pipe, 35 meters of polyurethane hose, 3 ball valves and 2 centrifugal pumps of the Pedrollo brand, each of these pumps possessed a power of 2 HP; the second system is the power generation system, which consists of a turbine turgo, a charge controller of the Coleman Air brand, a 100 Ah AGM battery and a load board, it had 11 bulbs of 9 watt LED technology. The pipe selection calculation was performed to verify that it was selected correctly and that the system worked in the most optimal way. Turbine performance curves with and without loads were obtained, in order to compare their behavior. Finally, he developed a laboratory guide aimed at the area of hydraulic machines in order to provide knowledge to the educational community.

### KEYWORDS:

Turbine, microgeneration, turgo, loads.

V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK

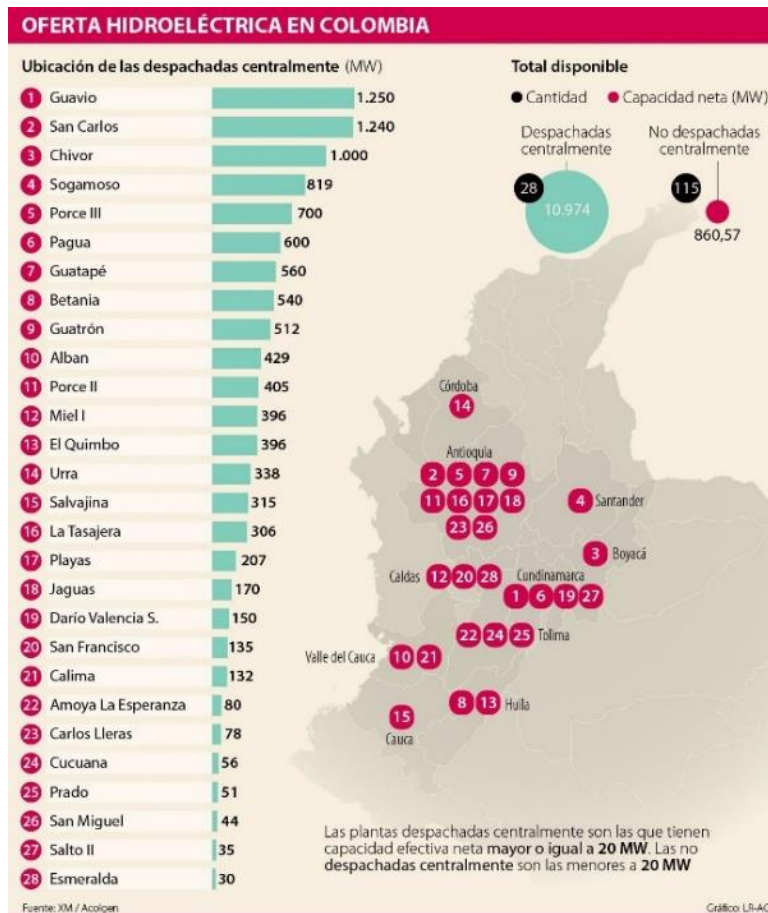
## INTRODUCCIÓN

No se conoce el lugar exacto de donde fueron creadas y utilizadas por primera vez las primeras máquinas hidráulicas en la historia pero se cree que debió ser en algún lugar de Egipto, China o Mesopotamia, alrededor de 1000 A.C, estas cambiarían la manera de realizar algunas tareas a lo largo de la historia, por ejemplo utilizada en molinos como fuerza mecánica para la molienda de granos o en la actualidad aprovechadas de cierta manera para producción eléctrica.

Una turbina hidráulica es el elemento encargado de transformar la energía cinética del agua mediante sus alabes en energía mecánica [1]. Estas se clasifican en 2 grupos importantes: turbinas de acción y de reacción. Nos centraremos en las turbinas de acción debido a que dentro de esta clasificación se encuentra la turbina Turgo, como también lo está la turbina Banki y la Pelton.

Hace exactamente 100 años atrás, en 1919 el Ingeniero de Gilbert Gilkes & Company Ltd, Eric Crewdson, graduado con honores y que además obtuvo una distinción en diseño de máquinas y termodinámica de la Universidad McGill, Canadá. Invento y patento un nuevo diseño de turbina hidráulica de acción, inspirado en la conocida turbina Pelton; esto a partir de la idea de crear una turbina de simple construcción, alta fiabilidad y eficiencia en una amplia gama de flujos, que operara con la misma cabeza de agua y produjese el doble de la velocidad específica que una turbina Pelton. La primera turbina turgo en instalarse fue un modelo capaz de producir 30 HP (Aproximadamente 22,5 KW) y desde ese momento revoluciono el mercado debido a los beneficios que este tipo de turbina ofrecía.

La producción de electricidad por medio de turbinas hidráulicas, también llamadas hidroeléctricas es muy bien vista a nivel mundial debido a los buenos resultados tanto energéticos como ambientales debido a que este tipo de producción eléctrica no es productor de CO<sub>2</sub> ni gases invernaderos por lo que es considerada renovable. Según el Banco Mundial la producción de electricidad a partir de fuentes hidroeléctricas es de aproximadamente 16% de la producción total de energía eléctrica a nivel mundial [2]. En Colombia esta cifra aumenta considerablemente debido a que el país es rico en fuentes hídricas esta pasa a ser la principal fuente de energía eléctrica del país, este tipo generación eléctrica por medios hidráulicos representa un 68% de la gama total de producción energética del país (La Republica, febrero de 2019). Las principales hidroeléctricas se encuentran en Cundinamarca, Antioquia, Boyacá y Santander. (Ver gráfica 0.1)



*Gráfica 0.1. Oferta hidroeléctrica en Colombia.*

*Fuente: Diario La República [1]*

Desde la puesta en marcha de la primera turbina turgo hasta la actualidad, se han realizado sucesivas mejoras que han afectado su eficiencia y la producción energética para este tipo de turbinas, tanto así que son capaces de producir hasta 10MW. Este tipo de turbinas se encuentran trabajando en todo el mundo y produciendo una considerable cantidad de energía eléctrica, un ejemplo de esto a nivel continental es el proyecto hidroeléctrico inaugurado en 2006 en Candelaria, Guatemala (Ver gráfica 0.2). Con una producción neta de 4,456MW es el proyecto de este tipo más grande de Centroamérica. Por otra parte, en Colombia este tipo de turbinas hidráulicas son utilizadas en el área de micro generación, mini generación y pequeñas centrales eléctricas, haciendo uso de riachuelos y ríos pequeños para producir energía destinada a autoconsumo o puesta en venta en la red eléctrica comercial. Por lo que no se está aprovechando en gran medida este método de producción de electricidad y es momento de aprovechar con ayuda de los avances

tecnológicos, las mejoras realizadas a este tipo de turbinas y los conocimientos adquiridos para un óptimo aprovechamiento del uso de agua.



*Gráfica 0.2. Turbina instalada en La Candelaria, Guatemala.*

*Fuente: Gilbert Gilkes & Gordon Ltd [2]*

## 1. OBJETIVOS

### 1.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar la producción eléctrica de un sistema de micro generación utilizando una turbina tipo turgo para realizar prácticas de laboratorio en el área de máquinas hidráulicas.

### 1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar una investigación bibliográfica sobre sistemas de micro generación hidráulica y turbinas turgo.  
**Resultado:** Informe de artículos científicos, informes de investigaciones de instituciones públicas o privadas y bases de datos.  
**Indicador:** Indagar mediante 5 fuentes confiables de investigación donde se obtenga información de sistemas de micro generación y turbinas turgo.
- Realizar el *commissioning* del banco de micro generación diseñando el circuito eléctrico e implementando los componentes necesarios del circuito y construir el sistema de recirculación de agua.  
**Resultado:** Sistema de micro generación hidráulica en completo funcionamiento.  
**Indicador:** El banco será reestablecido de acuerdo a las especificaciones del fabricante.
- Evaluar la producción eléctrica de la turbina turgo en vacío y con carga, realizar el perfil de carga y descarga del banco de baterías.  
**Resultado:** Informe y curvas sobre el comportamiento de la turbina en diferentes estado de cargas.  
**Indicador:** Comparar las curvas de producción eléctrica de la turbina turgo en vacío y con carga.
- Realizar una guía de laboratorio dirigida al área de máquinas hidráulicas.  
**Resultado:** Guía de laboratorio útil para prácticas en el área de máquinas hidráulicas.  
**Indicador:** La guía debe cumplir con los criterios establecidos para la entrega de informes y realización de las prácticas de laboratorios.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. TURBINAS HIDRÁULICAS

Una turbina hidráulica es un tipo de turbomaquina. Según Claudio Mataix. Son aquellas máquinas de fluidos en las que el intercambio de energía es debido a la variación del momento cinético del fluido, al pasar por los conductos de un órgano que se mueve con movimiento de rotación, dotado de alabes o paletas que se denomina rotor [4]. El funcionamiento de estas se encuentran basadas en la ecuación de Euler o ecuación fundamental de las turbomaquinas. En estas se aprovecha el flujo natural del agua o caídas de agua ya sean naturales o artificiales como lo son las represas. Una representación de esto se puede observar en la gráfica 2.1.



*Gráfica 2.1. Sistema de turbina turgo.*

*Fuente: Gilbert Gilkes & Gordon Ltd [3]*

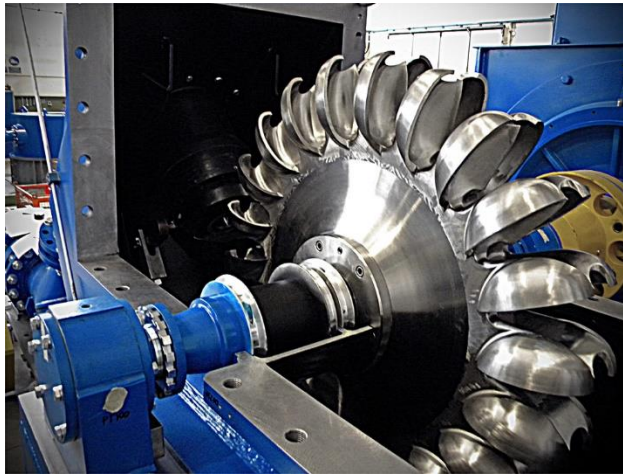
### 2.2. CLASIFICACIÓN DE LAS TURBINAS HIDRÁULICAS

Existen 3 maneras de clasificación importantes en el área de turbinas hidráulicas y estas son:

- Según la posición de su eje
- Según la dirección en la que entra el agua
- Según el grado de reacción



**2.2.1. Según la posición de su eje:** El eje de la turbina se encuentra de manera horizontal o de manera vertical (Ver gráfica 2.2.)

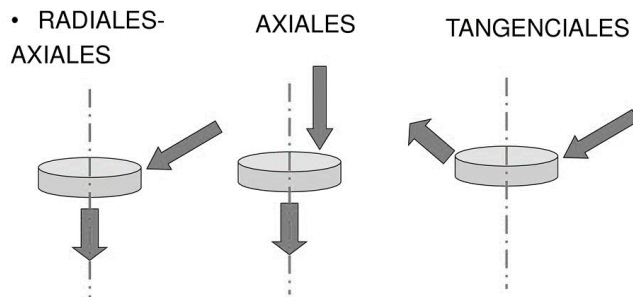


Gráfica 2.2. Turbina Pelton con eje horizontal

Fuente: Zeco Hydropower [4]

**2.2.2. Según la dirección en la que entra el agua:** Aquí encontramos 3 tipos (Ver gráfica 2.3).

- Turbinas axiales
- Turbinas tangenciales
- Turbinas radiales-axiales

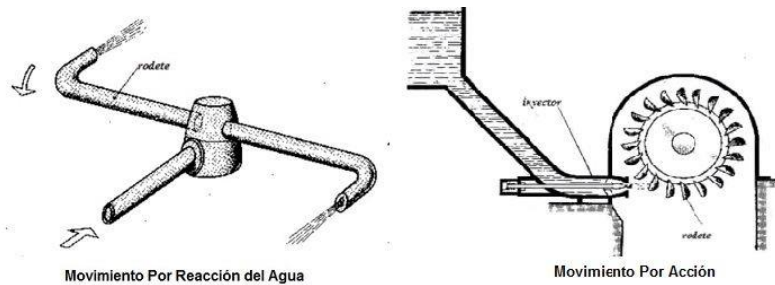


Gráfica 2.3. Dirección de entrada y salida del agua en una turbina.

Fuente: Área Tecnología [5]

**2.2.3. Según el grado de reacción:** Esta quizás es la clasificación más importante debido a que determina el tipo de funcionamiento que posee la turbina. Acá encontramos 2 clasificaciones.





Gráfica 2.4. Turbinas de Acción y Reacción.

Fuente: Área Tecnología [5]

2.2.3.1. **Turbinas de acción:** La incidencia del agua y el sentido del giro del rodete coincide en el punto en el que se produce el choque del agua sobre los álabes. Toda la energía cinética con la que llega el agua a la turbina es utilizada para su giro. La energía de presión que el agua posee a su entrada, al ser dirigida al rodete directamente, se convierte totalmente en energía cinética (movimiento) en el rodete. La presión del agua a la entrada y a la salida es la misma. La más usada es la Pelton [5]. (Ver gráfica 2.4).

2.2.3.2. **Turbinas de reacción:** El sentido de giro del rodete no coincide con la dirección de entrada y salida del agua. Estas turbinas utilizan energía cinética y de presión para mover el rodete y la presión del agua a la salida es inferior a la de entrada. Antes de llegar el agua al rodete parte de la energía de presión que trae el agua en su caída se transforma en energía cinética en el distribuidor, girando alrededor de él. El distribuidor en este caso rodea todo el rodete, llegando el agua por la totalidad de la periferia de éste, siendo por tanto la admisión del agua total [5]. (Ver gráfica 2.4).

### 2.3. GRADO DE REACCIÓN

En las turbomáquinas, el grado de reacción mide la relación entre la altura de presión y la altura total. Esta definición se aplica tanto para máquinas generadoras (bombas) como para máquinas receptoras (turbinas), aunque en el primer caso la máquina proporciona altura de presión y en el segundo caso la recibe.

La altura de presión, por ejemplo en el caso de bombas (análogo razonamiento se puede hacer para las turbinas), es la presión que proporciona directamente el rodete de la bomba, pero existe otra parte de la presión que corresponde a la presión producida por el difusor de la bomba y que transforma la energía cinética del fluido (velocidad) en presión; a esta última se le conoce como presión dinámica [6].

De acuerdo con esto, el grado de reacción R se puede expresar matemáticamente del siguiente modo (Ecuación 1):

$$R = \frac{H_p}{H_u}$$

*Ecuación 1*

*H<sub>p</sub> = Altura de presión que da el rodete a la bomba*

*H<sub>u</sub> = Altura total del rodete (Altura de Euler). Siempre es positivo*

Si R = 0, se trata de una máquina de acción.

Si R = 1, se trata de una máquina de reacción pura.

Si R < 1, se trata del caso habitual de las maquinas reales.

## **2.4. TURBINA TURGO**

Es una turbina hidráulica de tipo acción, diseñada para saltos medios con un rango de caída máximo hasta 300m y con una capacidad de producción eléctrica de hasta 10MW.

El funcionamiento básico de este tipo de turbina hidráulica es que al ser una turbina de tipo acción el agua no cambia de presión cuando pasa a través de los alabes de la turbina (Ver gráfica 2.5) y es impulsada por medio de cierta cantidad de inyectores convirtiendo así la energía potencial del agua en cinética en la tobera de entrada o inyector. Incrementando el número de inyectores se incrementa la velocidad específica de la turbina a la raíz cuadrada del número de inyectores. El Angulo de incidencia del chorro del inyector con los alabes de la turbina son una diferencia importante con respecto a la turbina Pelton. La eficiencia de este tipo de turbinas va desde los 85 a los 90%.

La característica de velocidad alta específica en general significa que se puede utilizar un generador más compacto y económico en comparación con las turbinas Pelton de inyectores múltiples. La variedad de turbinas Turgo cubre el límite entre las máquinas Pelton y Francis, se ha comprobado que funcionan muy bien con agua

con sedimentación o dicho de otra manera “sucia” sin que esto perjudique el rendimiento.



Gráfica 2.5. Alabes de una turbina Turgo

Fuente: Gilbert Gilkes & Gordon Ltd [6]

El proyecto se empleara una turbina (Ver gráfica 2.6) con las siguientes especificaciones:

Tabla

1

Tabla de especificaciones turbina turgo

<b>ESPECIFICACIONES</b>	
<b>Modelo turbina</b>	2 Nozzle X-SE Plastic Turgo
<b>Fabricante</b>	Energy Systems & Design Ltd.
<b>Potencia</b>	2KW
<b>Sistema de voltaje</b>	12V, 24V, 48V
<b>Rango operativo</b>	3 a 100 metros
<b>Diámetro entrada</b>	1 ½”

Fuente: Energy Systems and Desing [8]



Gráfica 2.6. Turbina turgo empleada en el proyecto.

Fuente: Autor

## 2.5. CONTROLADOR DE CARGA

Un controlador de carga o regulador de carga es el dispositivo encargado de mantener de manera constante y apropiada la alimentación al banco de baterías, regulando la intensidad de la carga de entrada. Una de sus funciones principales es evitar la sobrecarga de las baterías así como prevenir las corrientes inversas. (Ver gráfica 2.7)

Tabla

2

Tabla de especificaciones del controlador

<b>ESPECIFICACIONES</b>	
<b>Modelo controlador</b>	Coleman Air C440-HVM Controller
<b>Máxima corriente nominal</b>	440 amperios
<b>Sistema de voltaje</b>	12V, 24V, 48V
<b>Máxima potencia</b>	10000 Watts
<b>Modelo resistencia</b>	L150W12V

Fuente: Manual del fabricante.



Gráfica 2.7. Controlador de carga.

Fuente: Autor.

## 2.6. BATERÍAS

Las baterías también conocidas como acumuladores, son un dispositivo capaz de almacenar y luego liberar la electricidad que ha sido almacenada dentro de esta, esta electricidad es de tipo continua y estas pueden categorizarse por el tipo de materiales y tecnologías empleados en su construcción. En el proyecto se utilizara una de tipo AGM seca de ciclo profundo. (Ver gráfica 2.8)

Tabla

3

*Tabla de especificaciones batería*

<b>ESPECIFICACIONES</b>	
<b>Modelo batería</b>	MAGNA MA100-12 (12V100AH)
<b>Tipo</b>	AGM
<b>Voltaje nominal</b>	12V
<b>Capacidad nominal (10 HR)</b>	100.0 AH
<b>Máxima corriente de carga</b>	20 <sup>a</sup>

Fuente: Folleto del fabricante.



Gráfica 2.8. Batería.

Fuente: Autor

## 2.7. TABLERO DE CARGAS

Un tablero de cargas es el circuito eléctrico encargado de consumir la potencia suministrada por el generador que se encuentra acoplado a la turbina, esto mediante la utilización de bombillos. En este caso el tablero de cargas contara con 11 bombillos de tecnología led con una potencia de 9 Watts cada bombillo. Estos bombillos tienen un funcionamiento a 12V debido a que el sistema está diseñado para funcionar a esa tensión. (Ver gráfica 2.9)



Gráfica 2.9. Tablero de cargas.

Fuente: Autor.

## 2.8. ESTADO DEL ARTE

La turbina hidráulica turgo de acción fue creada hace 100 años, en 1919 por la compañía de Reino Unido llamada Gilbert Gilkes & Gordon Ltd, este proyecto fue dirigido por Eric Croudson quien patentó este tipo de turbina. El ingeniero inglés se basó en la Turbina Pelton para desarrollarla y mediante algunas modificaciones obtuvo este resultado.

Este mismo año fue instalada la primera turbina Turgo de la historia, este hecho ocurrió en el reino unido, específicamente en la localidad de Invergeldie Lodge, cerca de Crieff en Escocia, esta turbina contaba con una potencia máxima de 30 caballos de fuerza.

A partir de esta primera instalación aumentaron las ventas de este producto debido a que los clientes se dieron cuenta de los beneficios únicos que este tipo de turbina ofrecía con respecto a sus pares, por lo que en 1934 la compañía Gilbert Gilkes & Gordon Ltd decidió realizar una instalación en una planta de pruebas en el reino unido para así recopilar información de esta y poder realizar algunas mejoras para aumentar su eficiencia y rendimiento [7].

Las primeras exportaciones de las turbinas turgo hacia el continente americano, precisamente en 1925 hacia Canadá.

Estas mejoras llegaron en 1936, dos años después de la puesta en marcha de su planta de pruebas, estas mejoras fueron patentadas por la compañía. Las mejoras siguieron llegando hasta el año 1960.

Hasta la década los 70 esta compañía del reino unido era la única en el mundo en diseñar y construir este tipo de turbinas hidráulicas, las demás compañías al ver el potencial de este tipo de turbinas ingresaron al mercado.

Actualmente, mediante la utilización e implementación de programas computacionales como lo es el CFD (Ver gráfico 2.10) podemos analizar y obtener piezas de diseño más complejas que aumente la eficiencia y rendimiento de este tipo de turbinas, estas exhiben un diseño 3D más complejo que sus antecesoras [1].



*Gráfica 2.10. Modelo de turbina turgo analizado por CFD*

*Fuente: Gilbert Gilkes & Gordon Ltd [7]*



### 3. METODOLOGÍA

#### 3.1. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE ADMISIÓN Y RETORNO DE AGUA

##### 3.1.1. Sistema de admisión de agua.

Debido a que el sistema de admisión de agua que va del tanque elevado hasta el banco turbinas se encontraba en condiciones no óptimas para su uso, se decidió rediseñar el sistema de admisión de agua; se optó por utilizar algunos tramos de la instalación antigua (Ver gráfica 3.1) para así lograr una reducción de costos en la construcción, además de que estos tramos eran aprovechables.



*Gráfica 3.1. Sistema de admisión de agua antiguo.*

*Fuente: Autor.*

Luego de realizar el nuevo diseño del sistema de admisión de agua se estimó la cantidad de materiales que se utilizarían para la construcción de esta. Debido a que se utilizó un tramo del diseño antiguo dependíamos del diámetro de tubería que ya se encontraba instalado, este diámetro de tubería correspondía a una dimensión de 4", por lo tanto el diseño se realizó contemplando el hecho estas dimensiones.

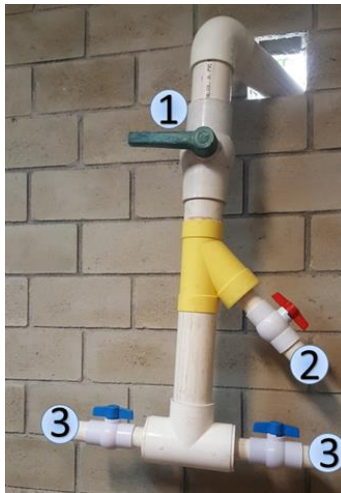


Gráfica 3.2. Nuevo sistema de admisión de agua.

Fuente: Autor.

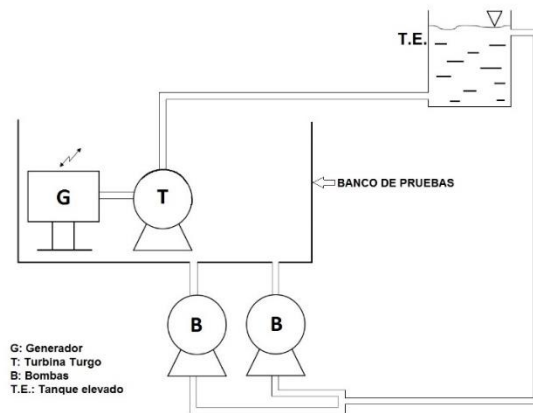
Los materiales que se utilizaron en la construcción del sistema fueron de tipo PVC, tanto como la tubería como sus accesorios (Válvulas de bola de 4" y 2") que se requirieron en la ejecución.

Debido a que la tubería debía quedar por el interior del salón de máquinas hidráulicas se realizó un agujero en una de las paredes para así poder ingresar la tubería (Ver gráfica 3.3).



Gráfica 3.3. Sistema de distribución de agua y admisión a turbinas finalizado. (1) Válvula de servicio, (2) Válvula de flujo de agua turbina pelton, (3) Válvulas de flujo de agua turbina turgo.

Fuente: Autor.



*Gráfica 3.4. Esquema de sistema de recirculación de agua.*

*Fuente: Autor.*

### **3.1.2. Sistema de retorno de agua.**

El banco de turbinas estaba equipado con dos bombas de 2HP de la marca Pedrollo. Se decidió que la forma más provechosa para cumplir con el objetivo de llevar el agua del tanque del banco de turbinas hasta el tanque elevando fuese mediante la utilización de una manguera de 2" de material poliuretano (Ver gráfica 3.5), esta estaría soportada por toda la tubería en ayuda de alambre de amarre.



*Gráfica 3.5. Sistema de retorno de agua.*

*Fuente: Autor.*



*Gráfica 3.6. Tanque elevado.*

*Fuente: Autor.*

### **3.2. CONSTRUCCIÓN DEL CIRCUITO ELÉCTRICO Y ADECUACIÓN DEL TABLERO DE CARGAS**

Se optó por rediseñar parte del circuito eléctrico con el fin de lograr una reducción de espacio en el área de trabajo, debido a que en el diseño antiguo se utilizaban dos tableros, uno de carga y el otro de potencia. Esto se logró mediante la integración del tablero de potencia al tablero de cargas.

Se agregó un breaker de 32 amperios con el fin de proteger las dos bombas y el cableado del circuito de bombas (Ver gráfica 3.7).



*Gráfica 3.7. Tablero integrado.*

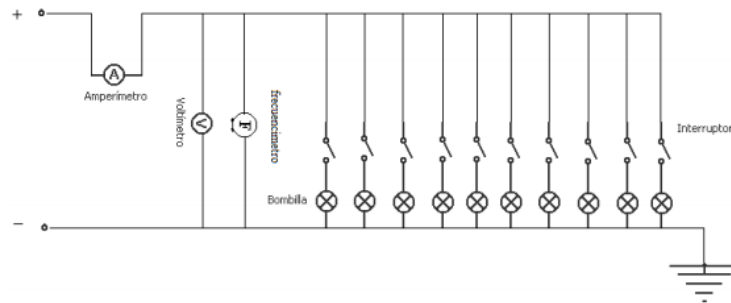
*Fuente: Autor.*

Por último, luego de lograr la integración de los tableros se procedió a pintar el tablero de cargas para darle un mejor aspecto (Ver gráfica 3.8).



Gráfica 3.8. Tablero de cargas.

Fuente: Autor.



Gráfica 3.9. Esquema eléctrico del tablero de cargas.

Fuente: [8]

### 3.3. VERIFICACIÓN DE SELECCIÓN DEL DIÁMETRO DE LA TUBERÍA

Mediante la ayuda de un manómetro acoplado a la tubería se obtuvo el valor de la presión dinámica a un porcentaje de apertura de la válvula del 100%, este valor fue de 114453,016 Pascales, este valor nos ayudara a conocer la cabeza neta del sistema utilizando las ecuaciones correspondientes (Ecuación 2).

$$Hn = \frac{\text{Presion neta}}{\text{Peso especifico del agua } (\varphi)}$$

*Ecuación 2*

$$Hn = \frac{114453,016 \text{ Pa}}{9800 \frac{\text{N}}{\text{m}^3}}$$

$$Hn = 11,67887918 \approx 11,7 \text{ metros}$$

Se obtuvo un resultado de cabeza neta de 11,7 metros, este resultado es necesario para conocer el valor óptimo de pérdidas del sistema de manera ideal, para lograr esto la altura neta (**Hn**) según datos empíricos aceptados por la sociedad de ingenieros debe ser el 75% de la altura geométrica (**Hg**) (Ecuación 3), por lo tanto:

$$Hg = \frac{Hn}{0,75}$$

*Ecuación 3*

$$Hg = \frac{11,7 \text{ metros}}{0,75} = 15,6 \text{ metros}$$

Ya que conocemos los dos valores de cabeza, tanto geométrica como neta procederemos a calcular las pérdidas del sistema (Ecuación 4):

$$Hf = Hg - Hn$$

*Ecuación 4*

$$Hf = 15,6 - 11,7 = 3,9 \text{ metros}$$

Se obtuvo un valor de 3,9 metros, esta altura de pérdidas (**Hf**) se deben principalmente a la fricción del agua con la tubería y la cantidad de accesorios que se estén utilizando en el sistema. Este valor será utilizado para calcular el porcentaje de pérdidas de la tubería, con el fin de determinar si la selección de tamaño de la tubería fue el adecuado, debido a que al momento de realizar la construcción del sistema y realizar pruebas una gran parte del sistema de admisión de agua se encontraba construido con cierta dimensión de tubería, esta dimensión de tubería era de 4" PVC.

La longitud la tubería desde el tanque elevado al lugar donde se encuentra ubicado el banco de turbinas es de 30 metros aproximadamente. Utilizando la ecuación

correspondiente de porcentaje de pérdidas (Ecuación 5) obtendremos el valor necesario para verificar la selección de la tubería.

$$\% \text{ de pérdidas} = \frac{H_f}{\text{Longitud de la tubería}} * 100$$

Ecuación 5

$$\% \text{ de pérdidas} = \frac{3,9 \text{ m}}{30 \text{ m}} * 100$$

$$\% \text{ de pérdidas} = 13\%$$

El valor obtenido fue de 13%, este valor se utilizara para entrar a la siguiente tabla:

Tabla

4

Tabla de pérdidas de cabeza por fricción

PERDIDAS DE CABEZA POR FRICCIÓN										
Flujo en US GPM	1"	1.25"	1.5"	2"	3"	4"	5"	6"	8"	10"
3	1.0	3	.1							
4	1.7	.6	.2	.1						
5	2.5	.9	.4	.1						
10	9.2	3.1	1.3	.3						
15	19.5	6.6	2.7	.7	.1					
20	33.1	11.2	4.6	1.1	.2					
30	70.1	23.7	9.7	2.4	.3	.1				
40		40.3	16.6	4.1	.6	.1				
50		60.9	25.5	6.2	.9	.2	.1			
60		85.3	35.1	8.6	1.2	.3	.1			
70			46.7	11.5	1.6	.4	.1	.1		
80			59.8	14.7	2.0	.5	.2	.1		
90			74.3	18.3	2.5	.6	.2	.1		
100			90.3	22.2	3.1	.8	.3	.1		
150				47.1	6.5	1.6	.5	.2	.1	
200				80.2	11.1	2.7	.9	.4	.1	
20					16.8	4.1	1.4	.6	.1	
300					23.6	5.8	2.0	.8	.2	.1
400					40.1	9.9	3.3	1.4	.3	.1
500					60.7	14.9	5.0	2.1	.5	.2
600					85.0	20.9	7.1	2.9	.7	.2

Fuente: [9]

Para una tubería de 2"

$$70 \text{ gpm} \rightarrow 11,5\%$$

$$X \rightarrow 13\%$$

$$80 \text{ gpm} \rightarrow 14,7\%$$

Realizando una interpolación lineal encontraremos el caudal con 13% de pérdidas, este valor fue de 74,68 gpm, que son aproximadamente 0.004711 m<sup>3</sup>/s.

Utilizando este valor de caudal podremos calcular la potencia teórica que proporcionaría el sistema con esta selección de tubería, utilizando la ecuación de potencia hidráulica (Ecuación 6) obtendríamos el siguiente valor:

$$PotH = Q * \varphi * Hn$$

*Ecuación 6*

$$PotH = 0.004711 \frac{m^3}{s} * 9800 \frac{N}{m^3} * 11,7 \text{ m}$$

$$PotH = 540,16326 \text{ Watts}$$

Este procedimiento fue realizado para diámetros de tubería de 3" y 4". Los resultados de estas operaciones fueron plasmadas en la siguiente tabla.

Tabla 5

*Tabla de selección de diámetro*

<b>DIÁMETRO TUBERÍA</b>	<b>CAUDAL (M<sup>3</sup>/S)</b>	<b>POTENCIA HIDRÁULICA (WATTS)</b>
<b>2"</b>	0,004711	540,16326
<b>3"</b>	0,013668	1567,1729
<b>4"</b>	0,029144	3341,6510

Fuente: Autor

El diámetro adecuado para el sistema sería de 3" debido a que teóricamente esta aprovecha en mejor medida la cabeza neta que el sistema tiene, y generaría un aumento en la potencia hidráulica de aproximadamente en un 60%. Además de esto los costos en la construcción del sistema de admisión de agua se reducirían debido a que este tipo de tubería y accesorios es más barata y de más fácil acceso. Por lo tanto la selección de dimensión del sistema actual es errónea en cierta medida.

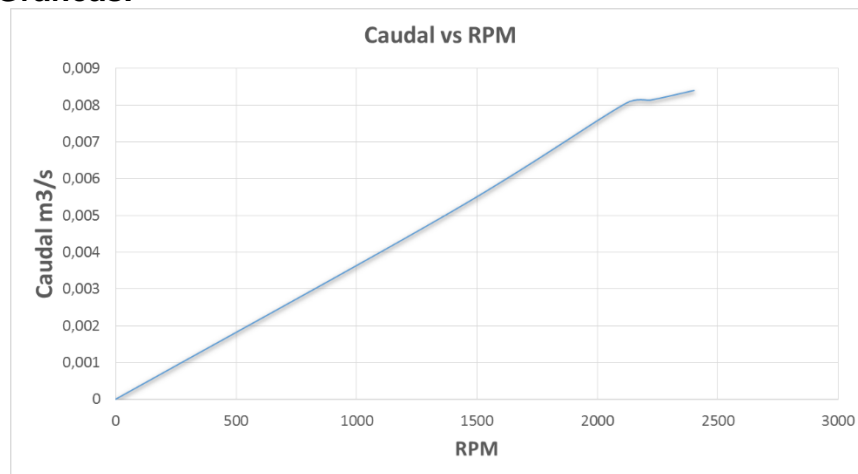


## 4. PRUEBAS

### 4.1. PRUEBAS DE TURBINA EN VACÍO

Esta prueba se realizó con el fin obtener datos de producción máxima de voltaje de la turbina, así como a que revoluciones se logran estas. Con el fin de luego compararlos con el rendimiento de la turbina con cargas.

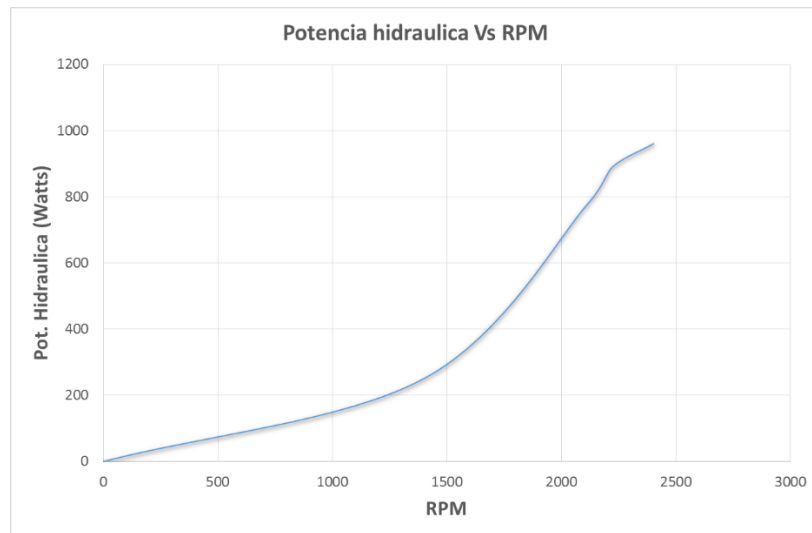
#### 4.1.1. Graficas.



Gráfica 4.1. Caudal Vs RPM en vacío.

Fuente: Autor.

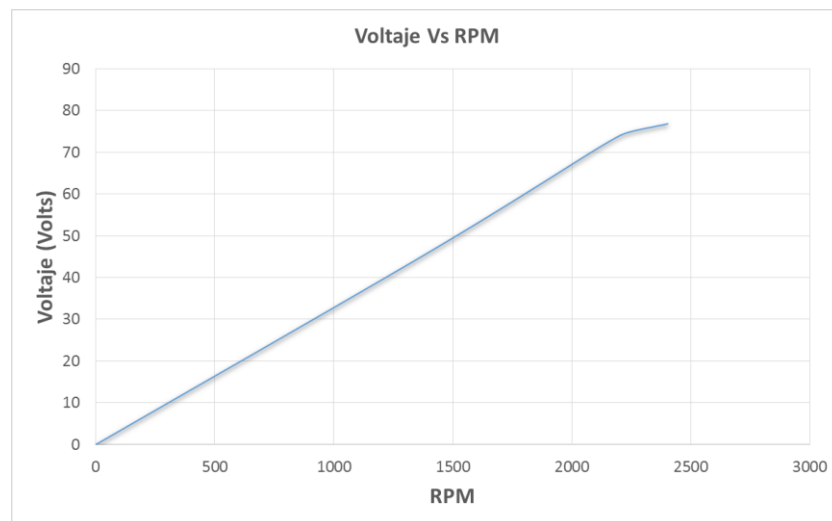
En la gráfica 4.1 podemos observar el aumento directamente proporcional de las revoluciones de la turbina a medida de que más caudal pasa por los alabes de esta. Las dos primeras aperturas de válvulas, al 25% y 50% presentan un ajuste lineal casi perfecto muy cercano al 1, este valor es de 0,999; en las aperturas del 75% y 100% esta tendencia disminuye pero no afecta en gran medida al ajuste lineal final de esta, ya que el valor de del ajuste sería de 0,9954 que sigue siendo un ajuste casi perfecto. El valor máximo de RPM alcanzado fue de 2402,33 a un máximo de caudal de 0,00839 m<sup>3</sup>/s, estos valores son el resultado de la apertura al 100% de la válvula.



*Gráfica 4.2. Potencia hidráulica VS RPM.*

*Fuente: Autor.*

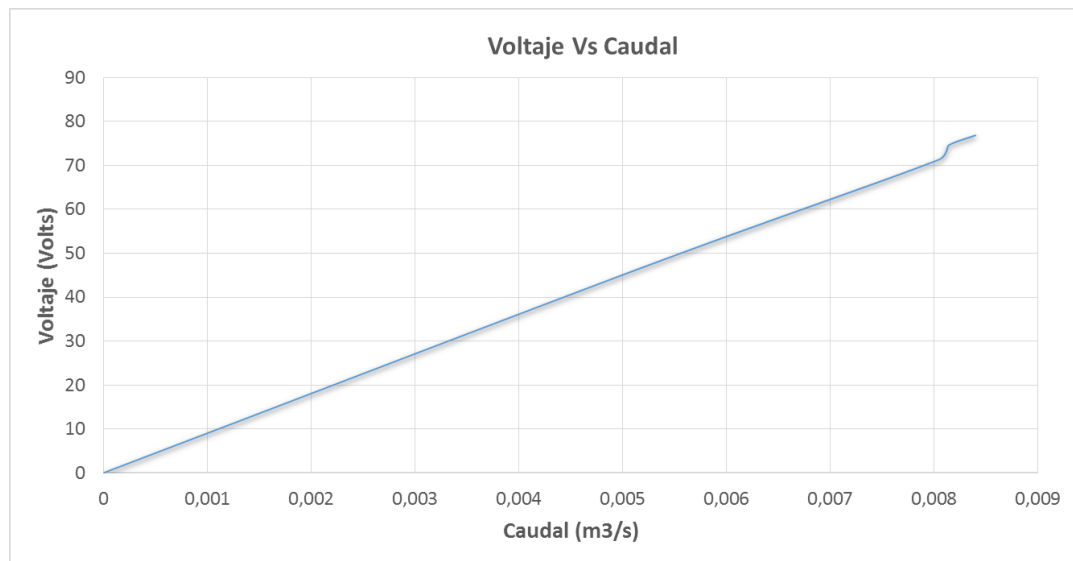
En la gráfica 4.2 se puede observar el aumento de la potencia hidráulica de manera rápida a medida que la velocidad angular de la turbina comienza a aumentar, este comportamiento es característico del tipo exponencial. A partir de las 1700 RPM la potencia hidráulica que obtendremos será mayor a 500 Watts. La máxima potencia hidráulica o disponible que se logró obtener en el sistema fue de 960,784 Watts a 2402,33 revoluciones por minuto, esto se logró con una apertura del 100% de la válvula.



*Gráfica 4.3. Voltaje Vs RPM en vacío.*

*Fuente: Autor.*

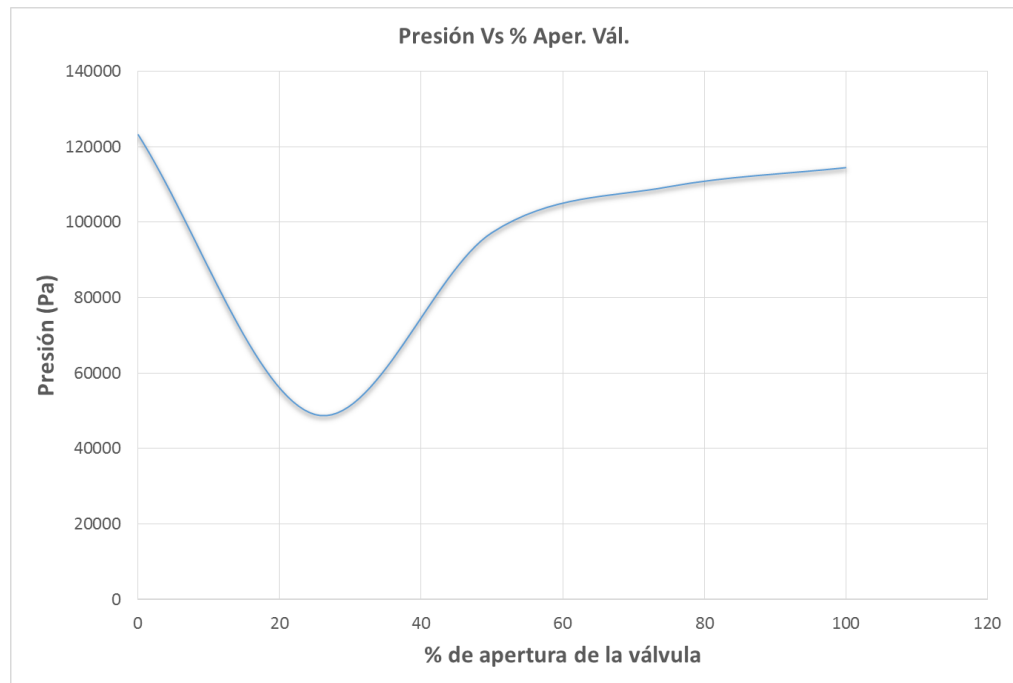
Como podemos observar en la gráfica 4.3 el voltaje producido por el generador acoplado a la turbina posee un comportamiento de tipo directamente proporcional, el voltaje aumenta debido a que este depende de la velocidad a la que gire el rotor de la turbina. La grafica posee un ajuste lineal del 0,9978, un ajuste casi perfecto que confirma el tipo de comportamiento que anteriormente se nombró. El voltaje máximo alcanzado fue de 76,7667 Voltios a una velocidad angular de 2402,33 revoluciones por minuto, este valor fue alcanzado con una apertura del 100% de la válvula.



*Gráfica 4.4. Voltaje Vs Caudal.*

*Fuente: Autor.*

En la gráfica 4.4 se puede observar claramente el comportamiento que el trazado posee, esta es de tipo directamente proporcional, esto debido a que a mayor caudal se le entregue a la turbina que a su vez esta acoplada al generador esta generara un voltaje mayor, por lo tanto el máximo valor alcanzado en el generador fue cuando la apertura de la válvula fue del 100%, este valor fue de 76,7667 Voltios a un máximo caudal de 0,00839 m<sup>3</sup>/s.



*Gráfica 4.5. Presión Vs % de apertura de la válvula.*

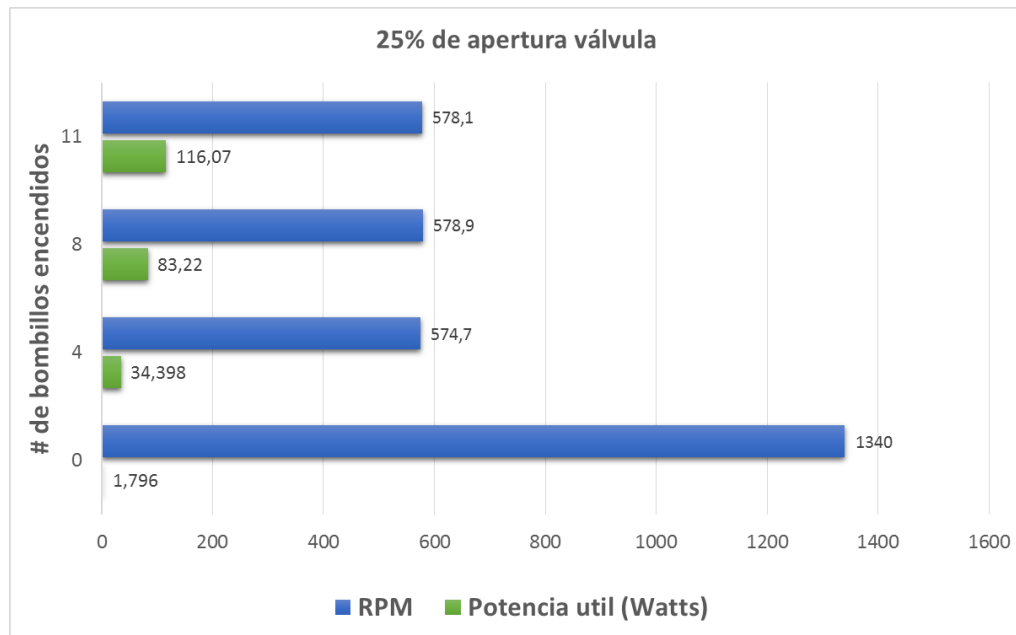
*Fuente: Autor.*

En la gráfica 4.5 podemos observar la transición de presión estática a presión dinámica en los diferentes porcentajes de aperturas de válvula que se realizó en las pruebas. La presión estática del sistema fue de 123186,3787 Pascales o 17,8667 PSI, y una presión dinámica máxima de 114453,016 Pascales o 16,6 PSI obtenida a un flujo máximo de caudal. Se observa una caída abrupta en la presión al iniciar la prueba con un porcentaje de 25% de apertura de válvula, se presume que esto podría ser por el tipo de válvula utilizada en el proyecto.

## **4.2. PRUEBAS DE TURBINA CON CARGAS**

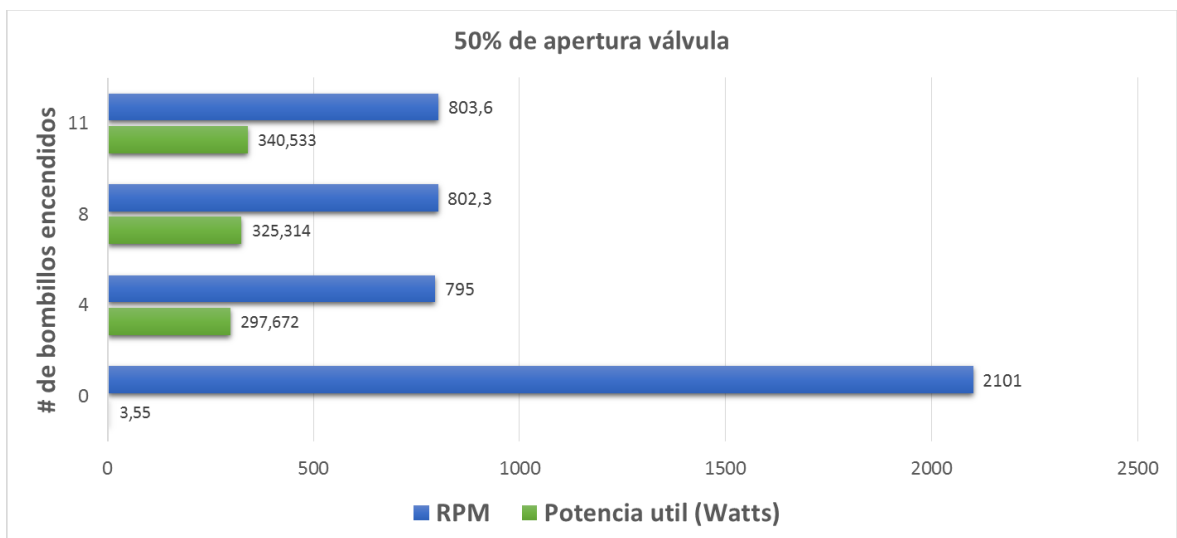
Esta prueba se realizó con el fin de obtener datos y observar el comportamiento de la turbina cuando este está sometido a diferentes intensidades de cargas. Para esta prueba se utilizó un controlador de carga, una batería y un tablero de cargas equipado con 11 bombillos de 9W a 12V.

#### 4.2.1. Graficas.



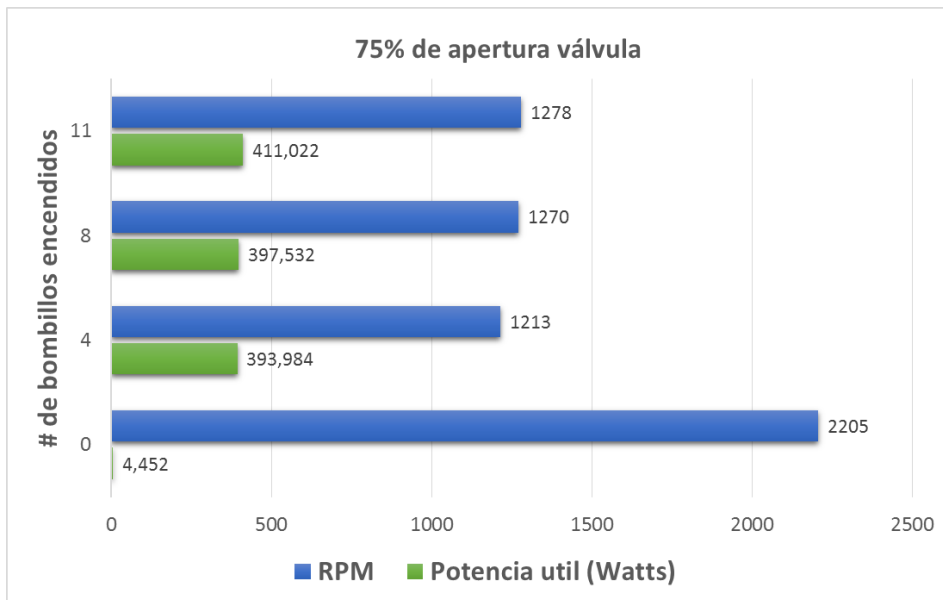
Gráfica 4.6. Potencia útil del sistema comparado con las RPM a 25% de apertura de la válvula.

Fuente: Autor



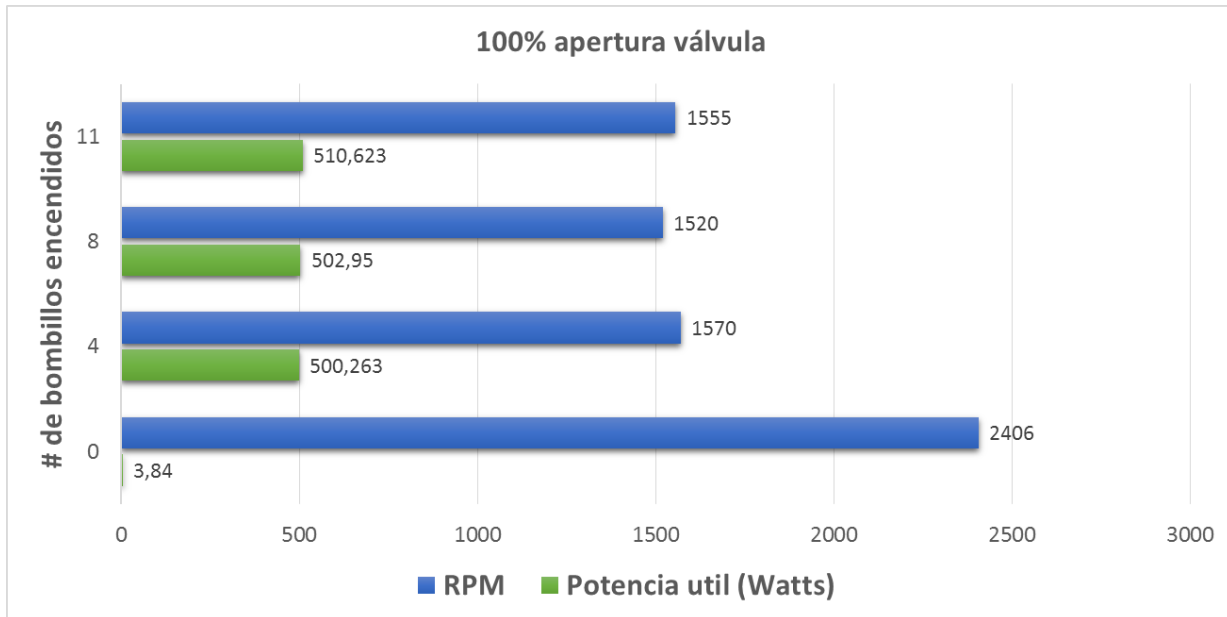
Gráfica 4.7. Potencia útil del sistema comparado con las RPM a 50% de apertura de la válvula.

Fuente: Autor.



Gráfica 4.8. Potencia útil del sistema comparado con las RPM a 75% de apertura de la válvula.

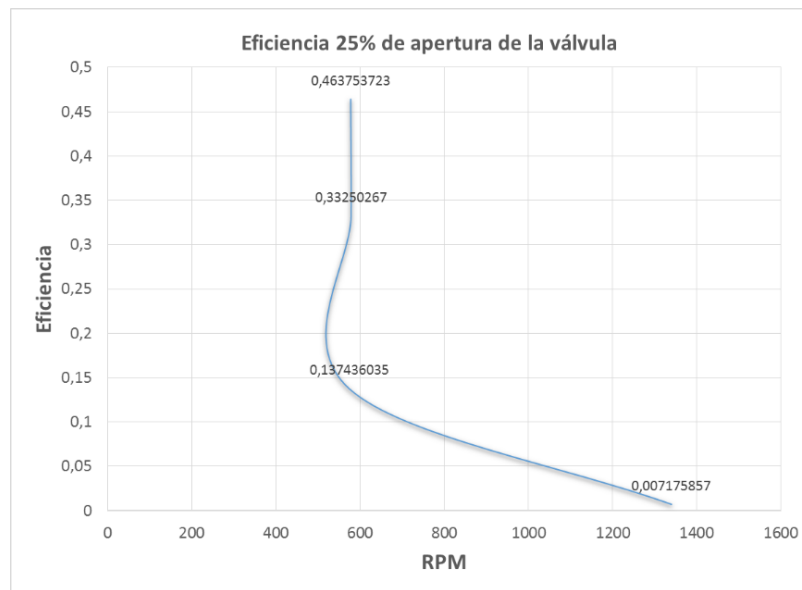
Fuente: Autor.



Gráfica 4.9. Potencia útil del sistema comparado con las RPM a 100% de apertura de la válvula.

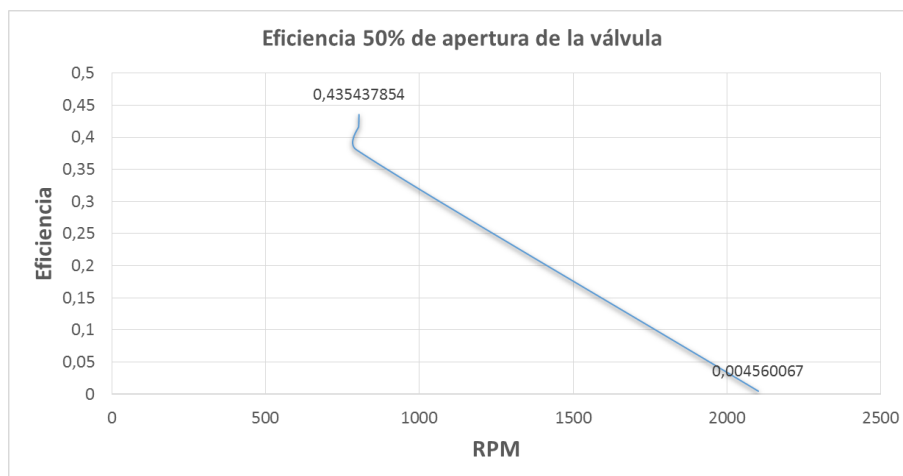
Fuente: Autor.

En las gráficas anteriores de 4.6 a 4.9 podemos observar en los diferentes porcentajes de apertura de válvula, las caídas de velocidad angular que presenta la turbina debido a que en conjunto con el generador entran en el sistema de micro generación y a su vez también ingresa el tablero de cargas; con este se aprovecha la producción eléctrica generada por el generador eléctrico. También se puede observar el consumo en potencia o también descrita como potencia útil, esta potencia es utilizada mediante diferentes cantidades de bombillos tipo led de 9W.



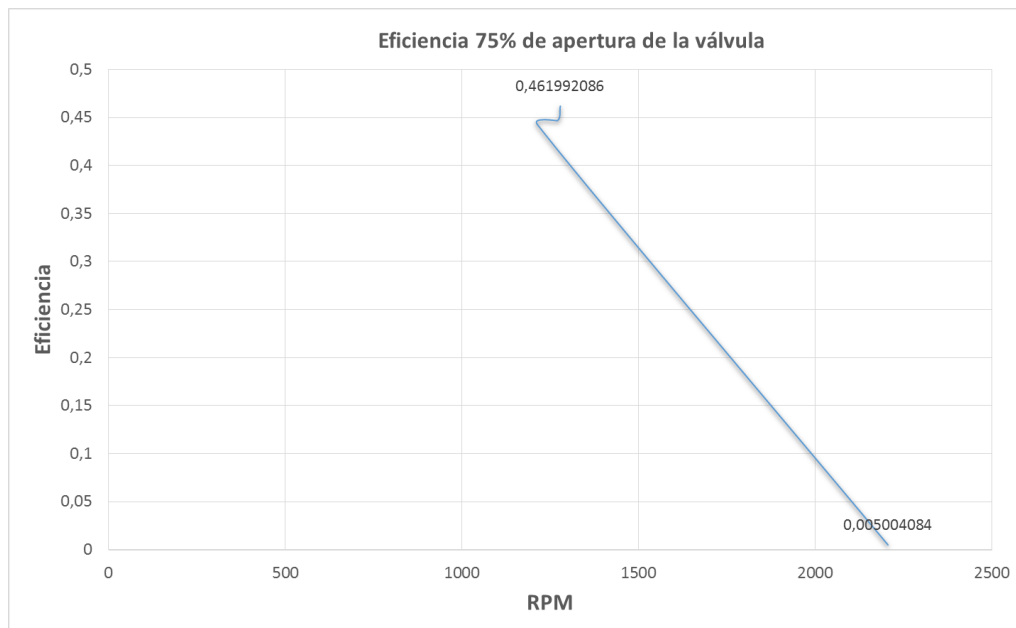
Gráfica 4.10. Eficiencia Vs RPM a 25% de apertura de válvula.

Fuente: Autor.



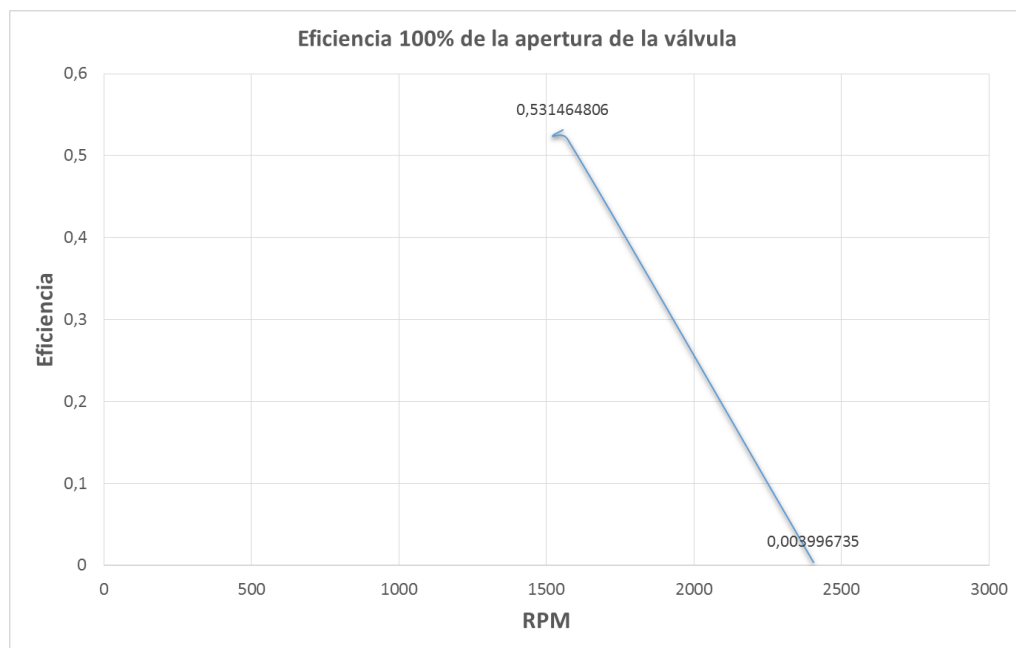
Gráfica 4.11. Eficiencia Vs RPM a 50% de apertura de válvula.

Fuente: Autor.



Gráfica 4.12. Eficiencia Vs RPM a 75% de apertura de válvula.

Fuente: Autor.



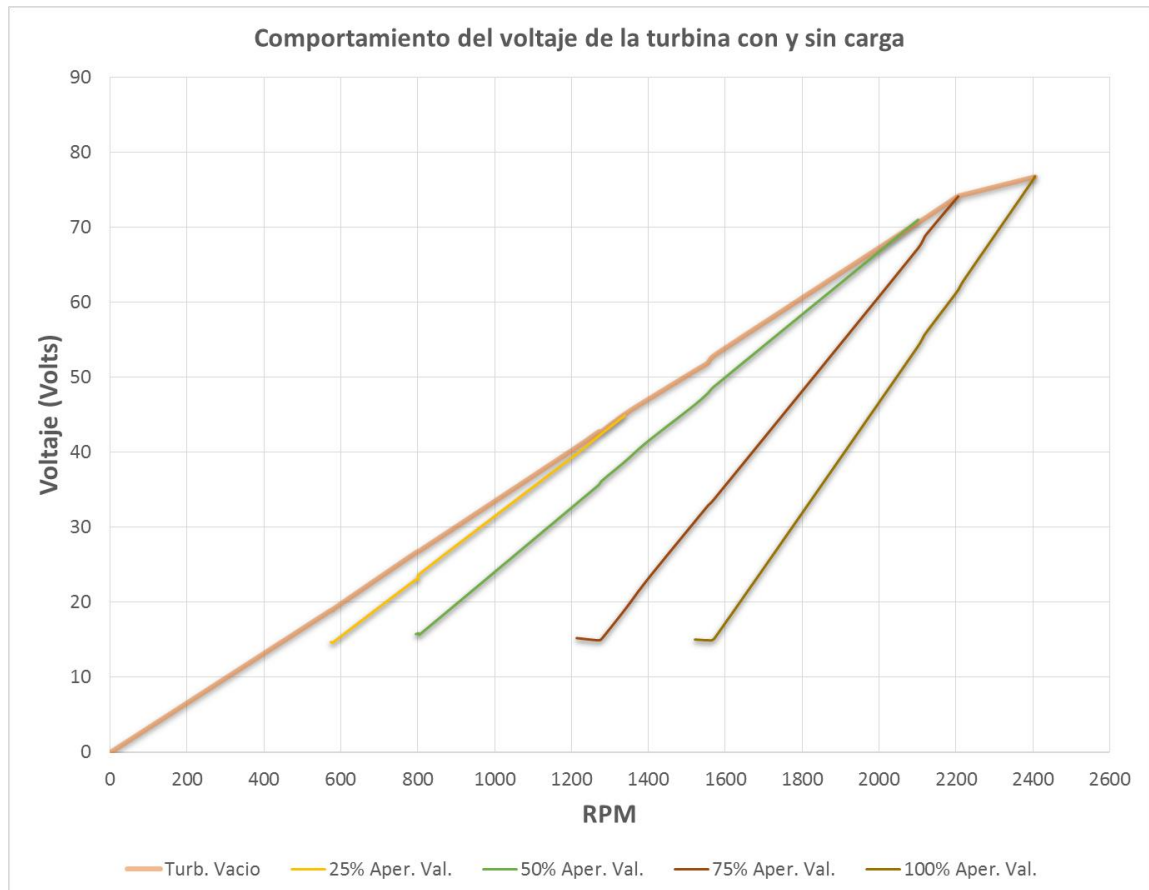
Gráfica 4.13. Eficiencia Vs RPM a 100% de apertura de válvula.

Fuente: Autor.

En las gráficas anteriores de 4.10 a 4.13 podemos observar la eficiencia máxima alcanzada en los diferentes porcentajes de apertura de la válvula. Se puede



contemplar una caída considerable de la velocidad angular, esto sucede debido a que la potencia comienza a ser aprovechada por el sistema en general, principalmente por el tablero de cargas. La máxima eficiencia del sistema fue obtenida con el máximo porcentaje de apertura de la válvula y el valor es de 0,531464806.

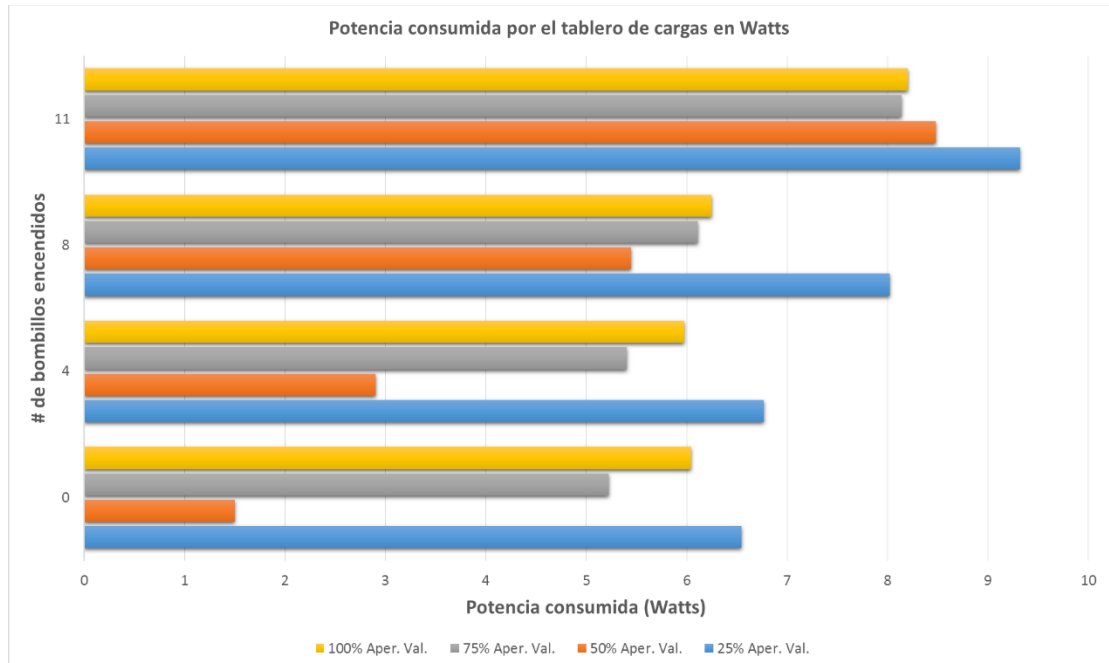


**Gráfica 4.14. Comportamiento del voltaje de la turbina con y sin carga.**

*Fuente: Autor.*

En la gráfica 4.14 podemos observar el comportamiento de la turbina en cuanto a producción eléctrica se refiere; el voltaje producido por el generador va ligado a la velocidad angular a la que gira el rotor de la turbina ya que estos poseen una relación directa, en el momento de que el voltaje es utilizado en el sistema de micro generación como lo es el controlador de carga y el tablero de cargas utilizado para encender las diferentes cantidades de bombillos, el voltaje disminuye considerablemente debido a que se produce una caída de velocidad angular en el generador. En el gráfico se observan 4 caídas de voltaje y velocidad angular, estas van relacionada a los diferentes porcentajes de apertura de válvula y la cantidad de

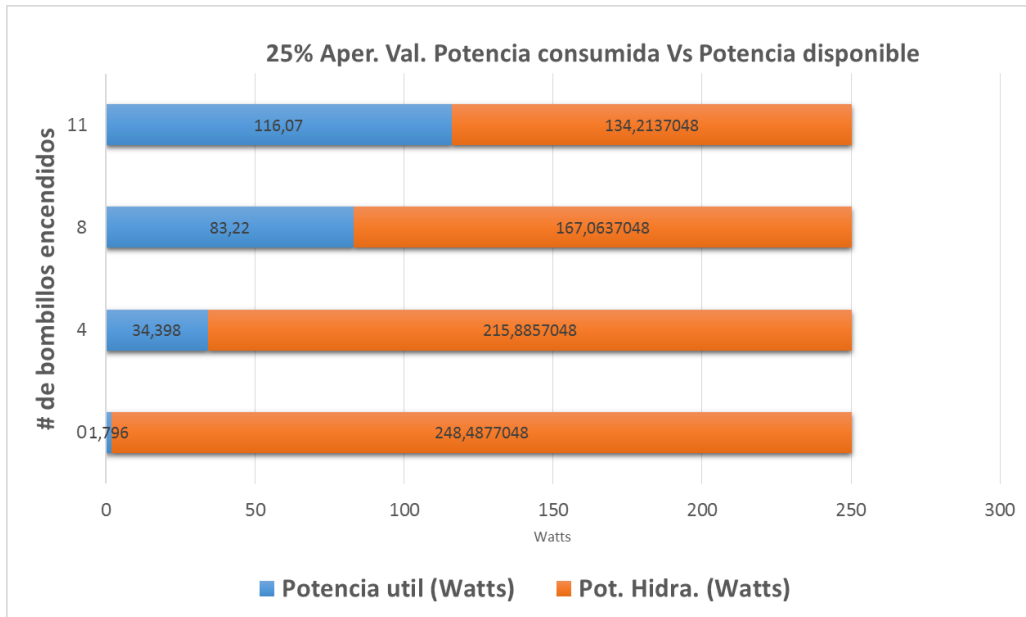
bombillos encendidos. El voltaje tiende a normalizarse en valores cercanos a los 15 Voltios, esto cuando se encuentra en uso el tablero de cargas.



*Gráfica 4.15. Potencia consumida por el tablero de cargas*

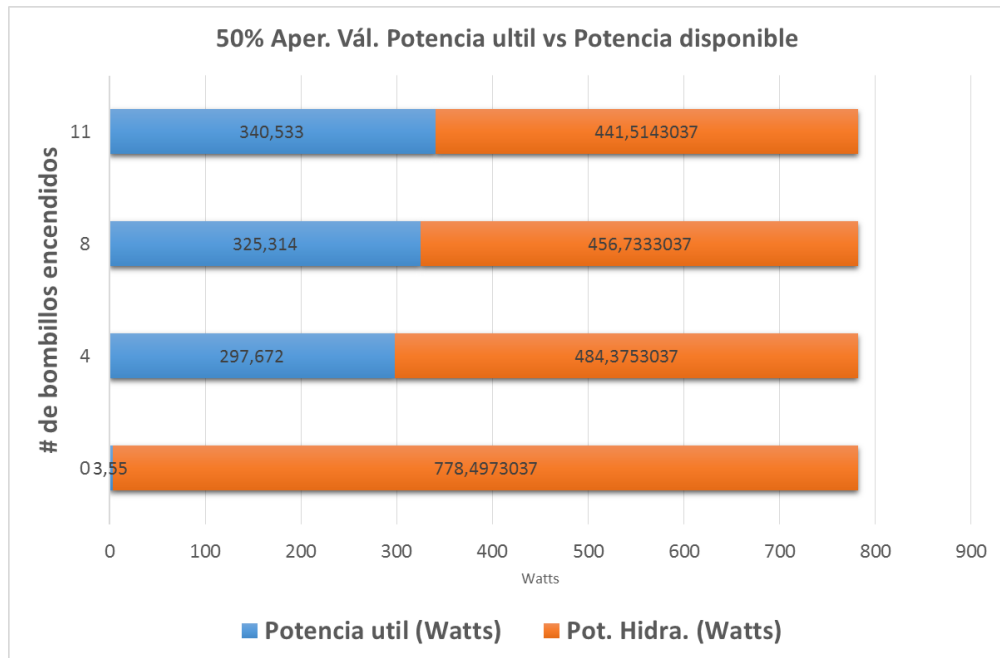
*Fuente: Autor*

En la gráfica 4.15 de barras podemos observar una relación de la potencia consumida, la cantidad de bombillos encendidos y el porcentaje de apertura de la válvula. Se puede ver una tendencia que entre más bombillos estén encendidos mayor es la potencia consumida por el tablero, este es el comportamiento esperado debido a que a mayor cantidad de bombillos se encuentren en uno mayor es la corriente consumida por estos.



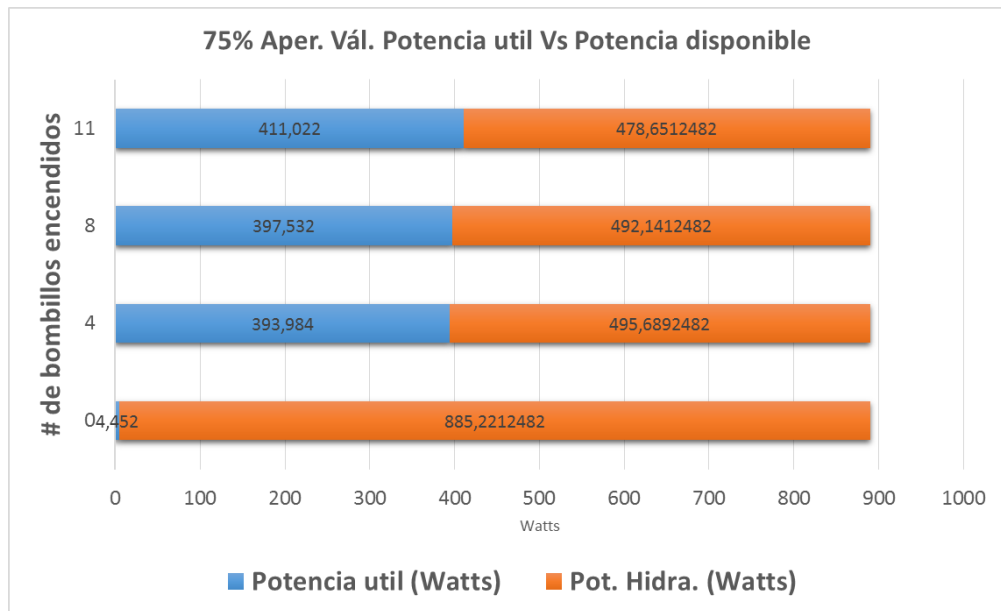
Gráfica 4.16. Potencia consumida Vs Potencia disponible. A 25% de apertura de válvula.

Fuente: Autor.



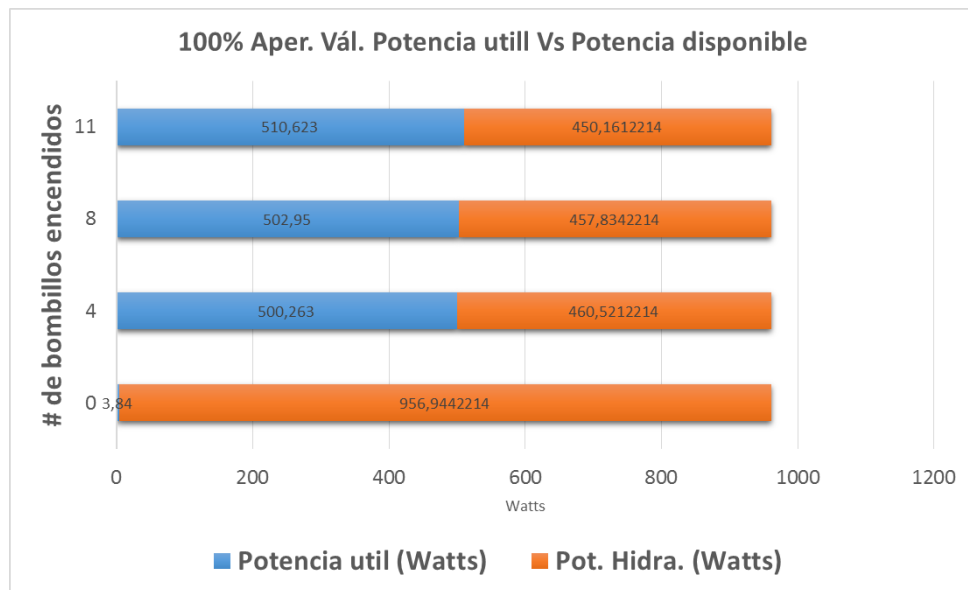
Gráfica 4.17. Potencia consumida Vs Potencia disponible. A 50% de apertura de válvula.

Fuente: Autor.



Gráfica 4.18. Potencia consumida Vs Potencia disponible. A 75% de apertura de válvula.

Fuente: Autor.



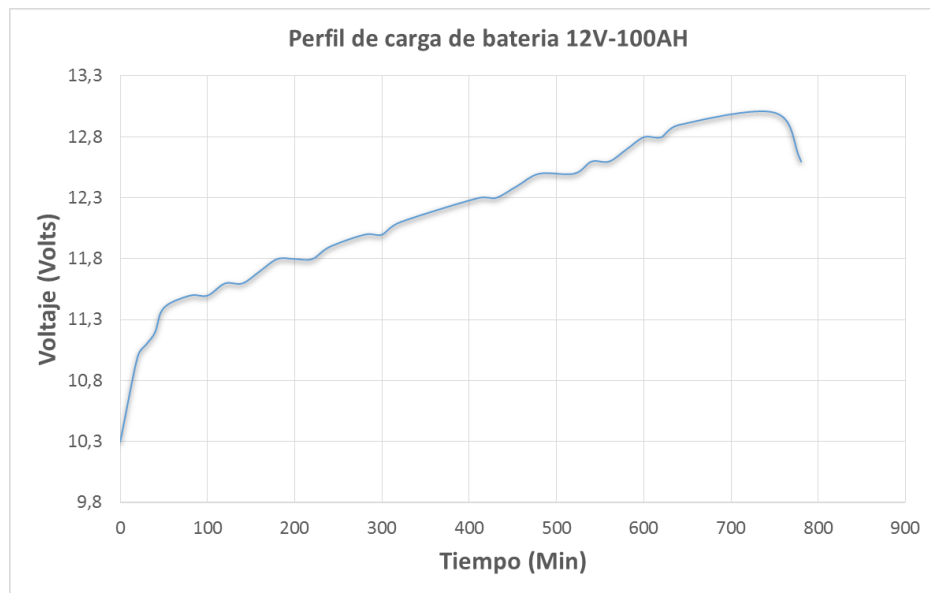
Gráfica 4.19. Potencia consumida Vs Potencia disponible. A 100% de apertura de válvula.

Fuente: Autor.

En los gráficos anteriores de 4.16 a 4.19 se puede observar una relación entre la potencia útil, la potencia total disponible y la cantidad de bombillos que están encendidos, esto relacionándolo con los diferentes porcentajes de apertura de la válvula. El comportamiento del consumo es el esperado, ya que al requerir mayor corriente el tablero de cargas para suministrar a los bombillos por encender, mayor será la potencia consumida o útil. A mayor porcentaje de apertura de la válvula mayor es la potencia disponible. El consumo de potencia tiende a ser aproximadamente la mitad de la potencia disponible en los diferentes porcentajes de apertura de la válvula.

### 4.3. PERFIL DE CARGA Y DESCARGA DE LA BATERÍA

#### 4.3.1. Perfil de carga de la batería.



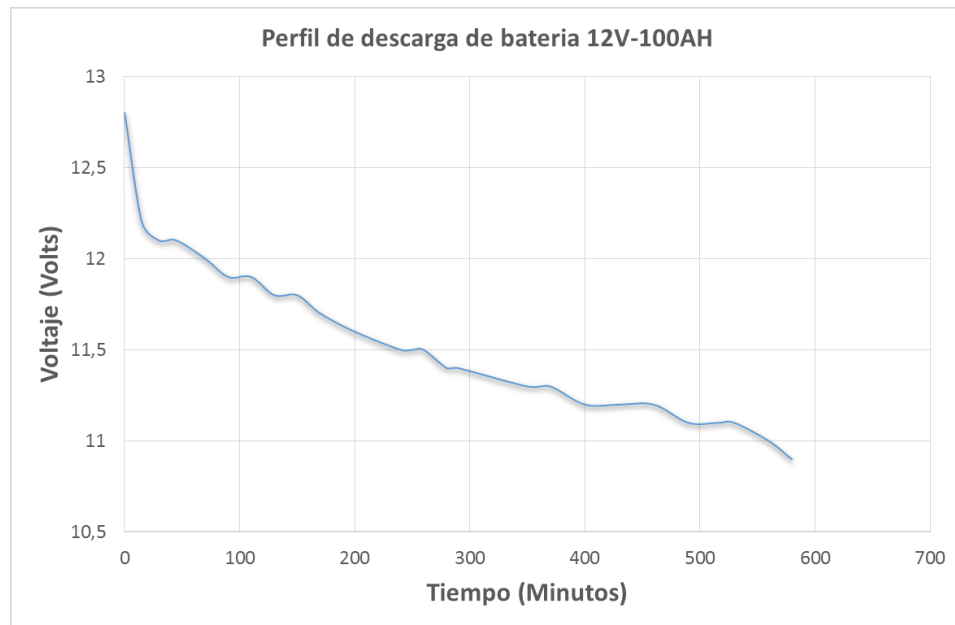
Gráfica 4.20. Perfil de carga de la batería.

Fuente: Autor

En el gráfico 4.20 se muestra el perfil de carga de la batería utilizada en el proyecto, se puede observar las 3 etapas de carga que una batería posee, la primera etapa posee el nombre de bulk, en esta se le suministra a la batería corriente a máxima intensidad esto nos da un aumento considerable en el voltaje de la batería en un corto tiempo, este voltaje aumento de 10,3 Volts a 11,5 Volts aproximadamente. La

próxima etapa en observarse es la etapa de absorción, en esta etapa la batería se le suministra menos intensidad de corriente por lo tanto el aumento de voltaje es más lento y alcanza su máxima capacidad de carga en este caso fue de 13,1 Volts. La última etapa en apreciarse es la de flotación, en esta etapa se observa una pequeña disminución en el voltaje debido a que suministra cierta cantidad de corriente para compensar el auto descarga.

#### 4.3.2. Perfil de descarga de la batería.



Gráfica 4.21. Perfil de descarga de la batería.

Fuente: Autor.

En el gráfico 4.21 podemos ver la disminución de voltaje de la batería con respecto al transcurso del tiempo, esto debido a que la batería está sometida a una carga constante, esta carga se encuentra ubicada en el tablero de cargas con una potencia de 99W proporcionada por 11 bombillos de tecnología led. Al iniciar la prueba se notó una caída de voltaje que de 12,8 Volts a 12,1 Volts aproximadamente, luego de esto se notó una disminución de voltaje más lenta. La batería disminuyó su voltaje de 12,8 Volts a 10,9 Volts, una disminución de voltaje de 1,9 en aproximadamente 10 horas.

## 5. CONCLUSIONES

- Se realizó la indagación bibliográfica utilizando libros, manuales, tesis de grados y artículos científicos para obtener información confiable sobre el tema para así lograr un mejor panorama con respecto al tema de la tesis. Esta información fue valiosa a la hora de realizar la tesis de grado.
- El *commissioning* del banco de micro generación eléctrica se completó logrando acoplar e implementar la turbina turgo al banco de pruebas; se diseñó y construyó el nuevo sistema de admisión y retorno de agua con el fin de realizar pruebas con la turbina a diferentes porcentajes de apertura de válvula.
- Se diseñó e implemento el nuevo tablero de cargas y potencia, integrando el tablero de potencia al tablero de cargas, se agregaron algunos elementos de protección eléctrica como lo fue un totalizador.
- Se evaluó el comportamiento de la turbina turgo en diferentes estados de cargas, obteniendo así curvas sobre la producción eléctrica, voltaje, velocidad angular y eficiencia de la turbina, como así también se logró obtener datos para construir las curvas de carga y descarga de la batería utilizada para las pruebas. La producción máxima de voltaje de la turbina fue de aproximadamente 77 Voltios a una velocidad angular máxima de 2400 RPM.
- El caudal máximo alcanzado por el sistema fue de  $0,008394573 \text{ m}^3/\text{s}$  obteniendo así una potencia hidráulica del sistema de 960,7842214 Watts.
- Se realizó una guía de laboratorio dirigida al área de máquinas hidráulicas con el fin de generar conocimiento práctico para así complementar el conocimiento teórico adquirido en la asignatura.

## 6. RECOMENDACIONES

- El tamaño de la tubería fue mal seleccionada por lo tanto no se aprovecha de manera óptima la cabeza que provee el sistema, por lo que se recomienda reemplazar la tubería de admisión de agua hacia las turbinas a un diámetro menor del actual, el diámetro óptimo del sistema sería de 3”.
- Se recomienda la implementación de una válvula de servicio a la salida del tanque elevado con el fin de reducir los riesgos de fallas en el sistema y evitar desperdiciar el agua.
- Se recomienda la implementación de un filtro en el sistema de admisión de agua y retorno de agua para evitar que entre suciedad como hojas, piedras y demás para así alargar la vida útil de las bombas del sistema de retorno de agua.



## 7. BIBLIOGRAFIA

- [1] Benzon, D., Aggidis, G. and Anagnostopoulos, J. (2016). Development of the Turgo Impulse turbine: Past and present. Applied Energy, 166, pp.1-18. Tomado de: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.12.091>
- [2] Datos.bancomundial.org. (2019). Producción de electricidad a partir de fuentes hidroeléctricas (% del total) | Data. [online] Available at: <https://datos.bancomundial.org/indicador/EG.ELC.HYRO.ZS?end=2015&start=1960> [Accessed 26 Jul. 2019].
- [3] European Commission. (2017, 16 febrero). Acuerdo de París - Acción por el Clima - European Commission. Recuperado 26 julio, 2019, de [https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris\\_e](https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris_e)
- [4] Mataix, C. (2009). Turbomáquinas hidráulicas. Madrid: Universidad Pontificia Comillas, pp.37-41.
- [5] Areatecnologia. (s.f.). Turbinas Hidraulicas. Funcionamiento y Tipos: Francis, Kaplan, Pelton.. Recuperado 27 julio, 2019, de <https://www.areatecnologia.com/mecanismos/turbinas-hidraulicas.html>
- [6] Wikimedia foundation. (s.f.). Grado de reacción en turbomáquinas. Recuperado 27 julio, 2019, de <https://esacademic.com/dic.nsf/eswiki/539276>
- [7] Gilbert Gilkes & Company Ltd. (s.f.). 100 Years, Turgo. Recuperado 26 julio, 2019, de <https://www.gilkes.com/100-Years-of-the-Turgo>
- [8] Energy Systems and Desing. (s.f.). Stream Engines. Recuperado 16 noviembre, 2019, de <https://microhydropower.com/our-products/stream-engine/>
- [9] Scott D. (2003). Microhydro: Clean power from water. Victoria BC: New society publishers, pp157.

### Referencias ilustraciones

- [1] Editorial La República S.A.S. (2019, 20 febrero). Las plantas hidroeléctricas representan 68% de la oferta energética en Colombia. Recuperado 30 julio, 2019, de <https://www.larepublica.co/especiales/efecto-hidroituango/las-plantas-hidroelectricas-representan-68-de-la-oferta-energetica-en-colombia-2829562>

- [2] Gilbert Gilkes & Gordon Ltd. (s.f.). Gilkes - Water Flow Engineering & Pumping Systems Specialists. Recuperado 30 julio, 2019, de <https://www.gilkes.com/case-studies/Candelaria>
- [3] Gilbert Gilkes & Gordon Ltd. (s.f.-b). Gilkes - Water Flow Engineering & Pumping Systems Specialists. Recuperado 30 julio, 2019, de <https://www.gilkes.com/case-studies/Carter-Lake>
- [4] Zeco Hydropower. Turbina Pelton. Recuperado 30 julio, 2019, de <https://www.zeco.it/zeco-turbinas/turbina-pelton?lang=es>
- [5] Areatecnologia. (s.f.). Turbinas Hidraulicas. Funcionamiento y Tipos: Francis, Kaplan, Pelton.. Recuperado 27 julio, 2019, de <https://www.areatecnologia.com/mecanismos/turbinas-hidraulicas.html>
- [6] Gilbert Gilkes & Gordon Ltd. (s.f.-c). Gilkes - Water Flow Engineering & Pumping Systems Specialists. Recuperado 30 julio, 2019, de <https://www.gilkes.com/case-studies/Brandywine>
- [7] Robinson, A., & Scott, J. (2018). Development of the Turgo turbine. Gilbert Gilkes & Gordon Ltd. Recuperado de [https://www.gilkes.com/user\\_uploads/development%20of%20the%20turgo%20turbine%20-%20hpd%20editorial..pdf](https://www.gilkes.com/user_uploads/development%20of%20the%20turgo%20turbine%20-%20hpd%20editorial..pdf)
- [8] Mantilla, J, (2012). Construcción de un banco de pruebas para una turbina hidráulica LH 100 (Tesis de pregrado). Universidad pontificia bolivariana, Bucaramanga, Colombia.