



Vigilada Mineducación

PROPUESTA DE ADAPTACIÓN DEL SISTEMA DE BOMBEO DE LA ESTACIÓN  
PLANTA DE POTABILIZACIÓN CALDAS – TANQUE PARAÍSO PARA GENERACIÓN  
DE ENERGÍA

ADAPTATION OF THE PUMPING SYSTEM OF THE CALDAS POTABILIZATION  
PLANT STATION FOR ENERGY GENERATION

DAVID SALDARRIAGA QUINTERO

Proyecto de grado

Asesor, docente

Francisco Javier Botero Herrera

UNIVERSIDAD EAFIT  
ESCUELA DE INGENIERÍAS  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA

## AGRADECIMIENTOS

Poder desarrollar, participar e identificar proyecto, un estudio de la envergadura que este representa al generación de energía eléctrica con motobombas en un mundo donde el objetivo es el transporte y distribución de agua potable para el servicio de la gente; y que a su vez, mientras se cumplen las condiciones operativas, es posible aprovechar los recursos y proyectos que una empresa como EPM, me llena de orgullo y motivación; más, cada vez que analizo y veo los beneficios que este permitirá tener a la empresa, tanto económicos al disminuir los costos por el consumo de energía en la red, como operativos de un sistema que permite de forma alternar transportar el agua para el consumo de la gente o generar energía eléctrica para el consumo o venta a la red según aplique.

Haber entrado en este mega mundo de la hidráulica donde llevo aproximadamente 8 años, llenos de retos, aprendizajes, investigaciones y curiosidades ha sido increíble; más aún cuando te encuentras prestando tus servicios para una empresa que te llena de orgullo como lo es Empresas Públicas de Medellín (EPM), en la cual me ha tocado enfrentarme con sistemas hidráulicos imponentes como estaciones de bombeo de 1500 caballos de potencia para el transporte de agua o sistemas tan pequeños como válvulas para el control hidráulico de caudal y presión para la distribución del agua a cada uno de los hogares del Valle de Aburrá y municipios cercanos donde presta servicio EPM, no solo me hace estar orgulloso de mi labor, sino también estar eternamente agradecido con la empresa que me brindo la oportunidad de desarrollarme y crecer profesional, académica y personalmente con cada uno de los retos que hasta el momento me ha puesto y me facilito la posibilidad de estudiar un componente de sus proyectos que hasta el momento no estaba identificado como lo es el proyecto que se desarrolla a continuación.

Pero si de algo tengo que estar agradecido con EPM, es con la oportunidad que me dio de conocer grandes personas, en especial a un gran ingeniero y ser humano como Guillermo Eusse, mi mentor, tutor, profesor, asesor en todo este trabajo, que me ha enseñado de la hidráulica como nadie, transmitiéndome cada día su conocimiento y su experiencia para ayudarme a crecer; pero

sobre todo lo técnico, un gran amigo que EPM me dio para la vida al cual admiro, respeto y valoro como la gran persona que es.

Es sumamente importante agradecer a quien fue un gran maestro durante mi paso por la universidad EAFIT para desarrollar mi especialización en turbomáquinas y posteriormente poder continuar con esta maestría en ingeniería, el profesor Francisco Javier Botero quien, con sus conocimientos técnicos, su desarrollo profesional y el acompañamiento en las materias que me dicto al igual que la asesoría de este trabajo, me motivo y me oriento bastante para el trabajo aquí desplegado.

Por ultimo y no menos importante, agradecer a mi familia quien siempre ha estado ahí para apoyar y motivar en mi desarrollo personal y laboral, quienes me han dado todas las bases y me han enseñado a alcanzar todo lo que me propongo con el esmero y la rigurosidad que se merece.

# CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS .....	2
CONTENIDO.....	4
LISTA DE ILUSTRACIONES.....	6
LISTA DE TABLAS.....	8
LISTA DE ECUACIONES.....	9
LISTADO DE SIGLAS .....	11
LISTADO DE SIMBOLOS O VARIABLES .....	11
1 INTRODUCCION .....	13
1.1 ALCANCE.....	14
1.2 EXCLUSIONES.....	15
2 UBICACIÓN DEL PROYECTO.....	15
3 ASPECTOS GENERALES .....	17
3.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	17
3.2 OBJETIVOS.....	18
3.2.1. Objetivo general .....	18
3.2.2. Objetivos específicos .....	18
3.3. Guía metodológica .....	20
3.4. JUSTIFICACIÓN .....	21
4. ESTADO DEL ARTE .....	22
4.2. Generación de energía eléctrica a partir de máquinas reversibles. ....	28
4.2.1. Bombas centrifugas. ....	32
4.3. MOTORES ASINCRONOS .....	34

4.4.	BOMBAS COMO TURBINAS .....	35
4.5.	MOTOR COMO GENERADOR .....	39
5.	SISTEMA DE BOMBEO ACTUAL PPAP CALDAS – PARAISO .....	41
5.2.	Diagnóstico de funcionamiento de las motobombas y sistema actual de bombeo PPAP Caldas – Paraíso .....	43
5.2.1.	Levantamiento de campo .....	43
5.2.2.	Levantamiento de datos operativos.....	46
6.	SISTEMA DE APROVECHAMIENTO ENERGETICO – GENERACIÓN CON BOMBAS COMO TURBINAS .....	56
6.2.1.	Ecuación de pérdidas por fricción y accesorios en el tramo entre los TQs Tablaza – Nodo H. 60	
6.2.2.	Ecuación de pérdidas por fricción y accesorios en el tramo entre el Nodo H y el Nodo F. 61	
6.2.3.	Ecuación de pérdidas por fricción y accesorios en el tramo entre el Nodo F y la PPAP Caldas. ....	61
6.2.4.	Ecuación de energía neta total disponible entre los TQs Tablaza y la PPAP Caldas. 62	
6.3.	Escenario operativo 1: Caudal operativo máximo a la salida de los tanques de Tablaza. 63	
6.4.	Escenario operativo 2: Caudal operativo de los tanques Paraíso más PPAP Caldas a la salida de los tanques de Tablaza.....	64
6.5.	Escenario operativo 3: Caudal operativo solo de PPAP Caldas a la salida de los tanques de Tablaza.....	66
7.	COMO DETERMINAR LA POTENCIA HIDRÁULICA.....	67

8.	DISEÑO Y EVALUACIÓN DE LAS BOMBAS EXISTENTES COMO TURBINAS .....	69
8.2.1.	Selección del equipo partiendo a partir de las características hidráulicas.....	70
9.	CONCLUSIONES.....	78
9.2.	Producto académico y apropiación social del conocimiento.....	80
	ANEXOS.....	82
9.3.	Coeficiente de fricción de HAZEN – WILLIAMS. ....	82
9.4.	Resolución de tarifas y costos de energía de EPM para marzo de 2022. ....	83
10.	BIBLIOGRAFIA.....	84

## **LISTA DE ILUSTRACIONES**

Ilustración 1.	Esquema general del proyecto e interconexión con la PPAP de Caldas.....	14
Ilustración 2.	Ubicación geográfica de Colombia. (GOOGLE EARTH).....	16
Ilustración 3.	Ubicación geográfica de Antioquia. (GOOGLE EARTH).....	16
Ilustración 4.	Ubicación geográfica y límites del municipio de Caldas. (GOOGLE EARTH). ....	16
Ilustración 5.	Ubicación geográfica del municipio de Caldas y sus límites. (GOOGLE EARTH). 16	
Ilustración 6.	KMZ trazados de las conducciones, impulsiones y tanques - proyecto Interconexión Caldas - La Estrella. (GOOGLE EARTH - EPM).....	17
Ilustración 7.	Motobombas superficie existentes bombeo Caldas-Paraíso.....	21
Ilustración 8.	Hidráulica Aplicada. (Azevedo Netto, Acosta Álvarez, 1975). ....	22
Ilustración 9.	Oferta hidroeléctrica en Colombia. (La República, 2019).....	24
Ilustración 10.	Costos por kilovatio instalado para Mini CHE en función de la caída. (Ortiz, Sánchez, Collazos, 2015).....	25
Ilustración 11.	Energía hidráulica. (Ortiz, Sánchez, Collazos 2015).....	28
Ilustración 12.	Tipos de bombas. (Hydraulic Institute 2000).....	31

Ilustración 13. Máquinas reversibles operando en modo motobomba y en modo turbina generador. (Ortiz, Sánchez, Collazos 2015).	32
Ilustración 14. Representación esquemática de una bomba centrífuga. (QUIRÓS).	33
Ilustración 15. Curva característica bomba centrífuga PENTAIR PUMPS GROUP, Inc. FAIRBANKS MORSE PUMPS 1800 RPM.	34
Ilustración 16. Motor asíncrono y sus partes (GDM).	35
Ilustración 17. Ángulo $\alpha$ 1BT con el cual ingresa el flujo másico del caudal al rodete de una bomba como turbina. (Ortiz, Sánchez, Collazos, 2015).	37
Ilustración 18. Ilustración de los álabes del impulsor, la succión y descarga de una bomba (Ortiz, Sánchez, Collazos, 2015).	37
Ilustración 19. Curva de eficiencia de la bomba en modo directo e inverso (Ortiz, Sánchez, Collazos, 2015).	38
Ilustración 20. Esquema principal de un generador asíncrono con condensador de excitación. (Ortiz, Sánchez, Collazos, 2015).	40
Ilustración 21. Esquema de distribución de estructuras en la PPAP Caldas de EPM. [Mayo 2008, EPM].	42
Ilustración 22. Esquema de distribución de estructuras en la Tanques Paraíso EPM. [Febrero 2004, EPM].	43
Ilustración 23. Motobomba existente sistema de bombeo PPAP Caldas - Paraíso. [EPM].	45
Ilustración 24. Foto general del sistema de bombeo PPAP Caldas – Paraíso. [EPM].	45
Ilustración 25. Placa de la motobomba actual sistema de bombeo PPAP Caldas - Paraíso. [Agosto 2017, EPM].	46
Ilustración 26. Datos operativos cada 5 minutos de la estación de bombeo parte 1. [SCADA EPM].	47
Ilustración 27. Continuación... Datos operativos cada 5 minutos de la estación de bombeo parte 2. [SCADA EPM].	48

Ilustración 28. Nube de puntos operativos del sistema de bombeo PPAP Caldas - Paraíso. [SCADA EPM].	52
Ilustración 29. Grafica del sistema de bombeo integrada. [EPM].	55
Ilustración 30. Configuración total del proyecto Interconexión Caldas - La Estrella. [EPM].	57
Ilustración 31. Esquema de proyecto entre Tablaza y la PPAP Caldas.	59
Ilustración 32. Curva característica de las motobombas existentes en la estación de bombeo PPAP Caldas - Paraíso. [EPM, información técnica de la estación de bombeo].	70
Ilustración 33. Tarifas y costos de la energía en el mercado regulado para marzo de 2022. (marzo 2022, EPM)	76
Ilustración 34. Resolución de tarifas y costos de energía en el mercado regulado de EPM para marzo de 2022. (2022, EPM).	83

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Listado de siglas.	11
Tabla 2. Listado de símbolos o variables.	11
Tabla 3. La Organización Latinoamericana de Energía (OLADE) ha clasificado los pequeños aprovechamientos hidroeléctricos según su capacidad instalada y el tipo de usuario en las ZNI. (Ortiz, Sánchez, Collazos, 2015).	25
Tabla 4. Distribución porcentual de los costos de construcción de proyectos de generación hidroeléctricos. (Ortiz, Sánchez, Collazos 2015).	26
Tabla 5. Máquinas de fluido. (Quirós).	29
Tabla 6. Información proyectada del proyecto. [Planeación EPM].	57
Tabla 7. Caudales proyectados de entrada a los tanques.	58
Tabla 8. Longitudes de tuberías.	58
Tabla 9. Caudales de distribución desde el TQ Tablaza en etapa 3 – total del proyecto.	63

Tabla 10. Caudales de distribución desde el TQ Tablaza en etapa 2 – inicial del proyecto. ....	65
Tabla 11. Caudales mínimos de distribución desde el TQ Tablaza. ....	66
Tabla 12. Cálculo de potencia hidráulica según los escenarios operativos.....	69
Tabla 13. Coeficientes para caudal, altura y eficiencia en función de eficiencia de la bomba. (Ortiz, Sánchez, Collazos, 2015).....	71
Tabla 14. Coeficientes para las bombas existentes.....	72
Tabla 15. Curva de la bomba existente de la estación como bomba y como turbina. ....	73
Tabla 16. Datos hidráulicos de la bomba como turbina con el diámetro ajustado a los requerimientos de caudal. ....	74
Tabla 17. Potencia generada por la bomba como turbina.....	75
Tabla 18. Ganancia económica por la generación de energía. ....	76
Tabla 19. Costos aproximados de la implementación del proyecto. ....	77
Tabla 20. Coeficiente de fricción de HAZEN - WILLIAMS. [EPM]. ....	82

## LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1. Potencia eléctrica como bomba. ....	26
Ecuación 2. Potencia eléctrica como turbina. ....	27
Ecuación 3. Cálculo factor K de pérdidas - condiciones operativas. ....	53
Ecuación 4. Cálculo factor K de pérdidas de HAZEN - WILLIAMS. ....	53
Ecuación 5. Cálculo de la altura total del sistema.....	54
Ecuación 6. Ecuación de altura total.....	59
Ecuación 7. Ecuación de pérdidas de HAZEN - WILLIAMS.....	59
Ecuación 8. Ecuación de coeficiente de perdidas por HAZEN - WILLIAMS.....	60
Ecuación 9. Cálculo de coeficiente de pérdidas K del tramo entre los TQs Tablaza - Nodo H...	60

Ecuación 10. Ecuación de pérdidas por fricción para el tramo de tubería entre los TQs Tablaza - Nodo H.....	60
Ecuación 11. Cálculo de coeficiente de perdidas K del tramo entre el Nodo H - Nodo F. ....	61
Ecuación 12. Ecuación de pérdidas por fricción para el tramo de tubería entre el Nodo H – Nodo F.....	61
Ecuación 13. Cálculo de coeficiente de pérdidas K del tramo entre el Nodo F – PPAP Caldas. ....	61
Ecuación 14. Ecuación de pérdidas por fricción para el tramo de tubería entre los TQs Tablaza - Nodo H.....	61
Ecuación 15. Cálculo de pérdidas hf total del sistema. ....	62
Ecuación 16. Altura neta disponible en la PPAP Caldas en función de Q y He. ....	62
Ecuación 17. Altura neta disponible en la PPAP Caldas con He máxima en función de Q. ....	63
Ecuación 18. Altura neta disponible en la PPAP Caldas con He mínima en función de Q. ....	63
Ecuación 19. Cálculo de la altura neta disponible con el caudal total a la salida de Tablaza y He máxima. ....	64
Ecuación 20. Cálculo de la altura neta disponible con el caudal total a la salida de Tablaza y He mínima. ....	64
Ecuación 21. Cálculo de la altura neta disponible con el caudal hacia los tanques Paraíso y PPAP Caldas a la salida de Tablaza y He máxima. ....	65
Ecuación 22. Cálculo de la altura neta disponible con el caudal hacia los tanques Paraíso y PPAP Caldas a la salida de Tablaza y He mínima.....	65
Ecuación 23. Cálculo de la altura neta disponible con el caudal hacia la PPAP Caldas a la salida de Tablaza y He máxima.....	66
Ecuación 24. Cálculo de la altura neta disponible con el caudal hacia la PPAP Caldas a la salida de Tablaza y He mínima.....	67
Ecuación 25. Potencia hidráulica como turbina. ....	68

## LISTADO DE SIGLAS

Tabla 1. Listado de siglas.

Listado de siglas	
Sigla	Significado
EPM	Empresas Públicas de Medellín
PPAP	Planta de Producción de Agua Potable
TQ	Tanque de almacenamiento de agua
SCADA	Iniciales del inglés para <i>supervisory control and data acquisition</i> .
Pico CHE	Picocentrales Hidráulicas Eléctricas
Micro CHE	Microcentrales Hidráulicas Eléctricas
Mini CHE	Minicentrales Hidráulicas Eléctricas
PCH	Pequeñas Centrales Hidráulicas

## LISTADO DE SIMBOLOS O VARIABLES

Tabla 2. Listado de símbolos o variables.

Listado de símbolos o variables		
Símbolo o Variables	Significado	Unidad
C	Coeficiente de fricción de HAZEN-WILLIAMS	
D	Diámetros	[mm] o [m] o [in]
Fr	Frecuencia	[Hz]
g	Aceleración de la gravedad	[m/s <sup>2</sup> ]
H	Altura del fluido (medida de presión)	[mca] o [ft]
H <sub>B</sub>	Altura operando como bomba en el BEP	[mca]
H <sub>e</sub>	Altura estática (diferencia de cotas)	[m]
h <sub>f</sub>	Perdidas de energía por fricción y accesorios a lo largo de la red	[mca]
H <sub>t</sub>	Altura total (Es la presión del sistema incluyendo la estática y las pérdidas)	[mca]
H <sub>T</sub>	Altura operando como turbina en el BEP	[mca]
K	Coeficiente geométrico y físico de pérdidas de HAZEN-WILLIAMS.	
K <sub>H</sub>	Coeficiente de altura	
K <sub>Q</sub>	Coeficiente de caudal	
K <sub>η</sub>	Coeficiente de eficiencia	
L	Longitud	[m]
L <sub>eqv</sub>	Longitud equivalente de la tubería por donde pasa el fluido, teniendo en cuenta la longitud real y los accesorios	[m]

Listado de símbolos o variables (Continuación)		
Símbolo o Variables	Significado	Unidad
N	Velocidad de rotación	[RPM]
NPSH <sub>d</sub>	Presión de succión positiva disponible del sistema (presión absoluta)	[mca]
NPSH <sub>r</sub>	Presión de succión positiva requerida por el equipo (presión absoluta)	[mca]
P1	Presión en un punto 1 de bombeo (Datos del SCADA)	[mca]
P2	Presión en un punto 2 de bombeo (Datos del SCADA)	[mca]
POT <sub>ele</sub>	Potencia eléctrica	[KW]
POT <sub>hid</sub>	Potencia hidráulica	[KW]
Q	Caudal del fluido	[m <sup>3</sup> /s] o [l/s] o [GPM]
Q1	Caudal en un punto 1 de bombeo (Datos del SCADA)	[m <sup>3</sup> /s] o [l/s] o [GPM]
Q2	Caudal en un punto 2 de bombeo (Datos del SCADA)	[m <sup>3</sup> /s] o [l/s] o [GPM]
Q <sub>B</sub>	Caudal operando como bomba en el BEP	[m <sup>3</sup> /s] o [l/s] o [GPM]
Q <sub>T</sub>	Caudal operando como turbina en el BEP	[m <sup>3</sup> /s] o [l/s] o [GPM]
V	Velocidad del fluido	[m/s]
Vol	Volumen	[m <sup>3</sup> ]
γ	Peso específico del fluido	[N/m <sup>3</sup> ] o [Kg/m <sup>3</sup> *m/s <sup>2</sup> ]
η <sub>b</sub>	Eficiencia de la bomba	[%]
η <sub>B</sub>	Eficiencia operando como bomba	[%]
η <sub>m</sub>	Eficiencia del motor	[%]
η <sub>T</sub>	Eficiencia operando como turbina	[%]
ρ	Densidad del fluido	[kg/m <sup>3</sup> ]

**Nota:** Las unidades a usar en este documento son con base en el sistema internacional; sin embargo, debido a la información de algunas fabricantes de los equipos, se puede presentar información en sistema de unidades imperiales.

# 1 INTRODUCCION

Actualmente el abastecimiento de agua potable del municipio de Caldas depende únicamente de la PPAP<sup>1</sup> de Caldas de EPM, la cual cuenta con 2 tanques de almacenamiento de agua potable, uno ubicado en la PPAP y otro ubicado en el sector de Paraíso, el cual es alimentado por medio de una estación de bombeo de superficie (bombas centrifugas) que permite transportar el agua entre la planta y el tanque Paraíso.

Dentro de los objetivos principales de EPM se encuentra garantizar el servicio de agua potable a sus usuarios con la continuidad y calidad que siempre lo ha caracterizado. Igualmente, dentro, del crecimiento empresarial y social, busca aumentar la cobertura en la prestación del servicio de acueducto, razón por la cual, se encuentra ejecutando el proyecto de Interconexión Caldas y La Estrella, con el cual se realizará la interconexión del sistema de agua potable del sur del Valle de la Aburrá con la PPAP del municipio de Caldas, el tanque Paraíso y un tanque de succión en el sector de Chuscala (futuro). El alcance general del proyecto se puede observar de forma esquemática en la Ilustración 1.

Esta interconexión se realiza a través de una estación de bombeo de superficie ubicada en el sector de Ancón sur con una capacidad de bombeo 480 l/s. Este bombeo es alimentado en la succión por la conducción del sur proveniente de la PPAP La Ayurá, ubicada en el municipio de Envigado.

La estación de bombeo, permite transportar el agua potable hacia un tanque en el sector de Tablaza, el cual cuenta con una cota de elevación mayor que la de Ancón y que la PPAP de Caldas; estos dos últimos sitios, por alcance del proyecto que actualmente se encuentra en ejecución, quedaran conectados a través de una tubería de conducción a gravedad, lo que permitirá suministrar a la PPAP de Caldas un caudal promedio de 60 l/s utilizando la energía potencial presente por la diferencia de altura entre los dos tanques (altura estática 133m). Esta conexión

---

<sup>1</sup> PPAP: Planta de producción de Agua Potable.

se tiene prevista realizar en un nodo de la tubería de impulsión existente entre PPAP Caldas y el tanque Paraíso.

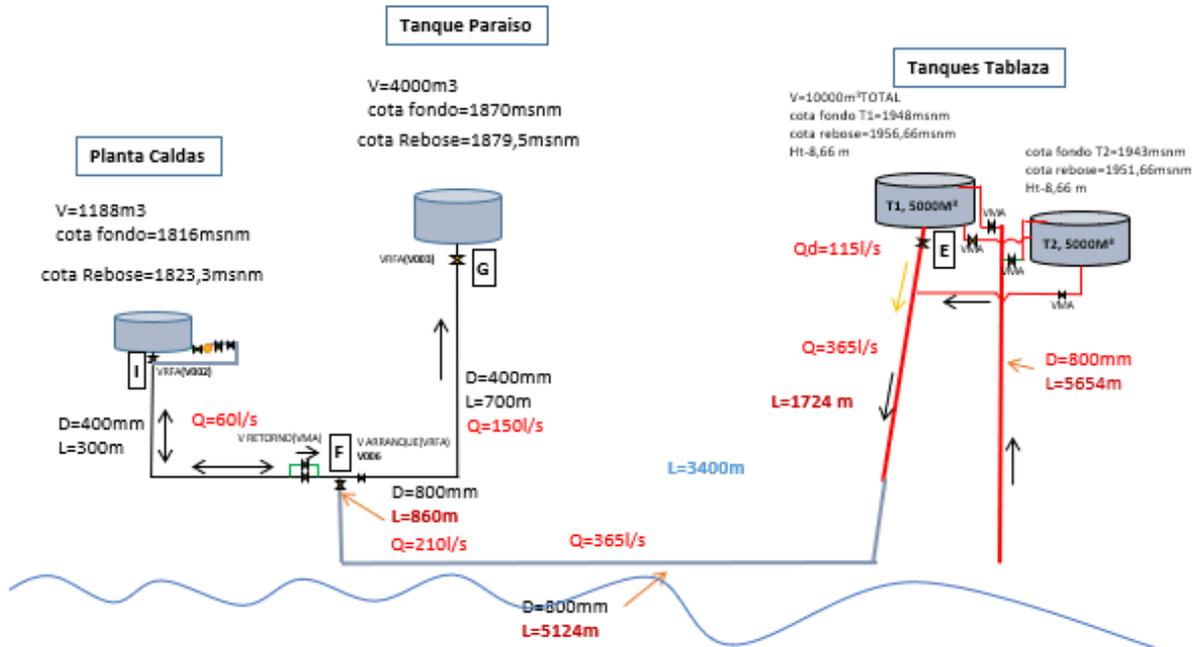


Ilustración 1. Esquema general del proyecto e interconexión con la PPAP de Caldas.

Nota: Esta información es confidencial y propiedad de Empresas Públicas de Medellín.

## 1.1 ALCANCE

Este proyecto tiene como alcance determinar la viabilidad técnica, diseño conceptual e ingeniería de detalla en los cálculos hidráulicos del aprovechamiento energético con generación de energía a través de las motobombas existentes en la estación de bombeo PPAP Caldas – Paraíso; dicha ingeniería, incluye el diagnóstico y análisis operativo actual del sistema operando como bombas, con el fin de determinar su estado actual y posibles acciones a tomar que permita operar la infraestructura en ambas situaciones:

- ✓ Como bombeo
- ✓ Como turbina.

## 1.2 EXCLUSIONES

Este trabajo no incluye el dibujo detallado ni la elaboración de planos constructivos del sistema actual ni la elaboración de planos o modelos del sistema propuesto; de igual forma, no incluye el diseño detallado de sistema de energía y/o tableros eléctricos y de control bien sea equipos nuevos o modificaciones de los tableros existentes; los requerimientos que de este estudio surjan para este sistema serán desarrollados por ingenieros electricistas con la suficiente experiencia y conocimiento en sistemas similares.

## 2 UBICACIÓN DEL PROYECTO

Colombia se encuentra establecida como una república unitaria y descentralizada; la cual, política y administrativamente se encuentra dividida en 32 departamentos; que, a su vez, se están divididos en diferentes municipios.

Para el caso de estudio, se hace referencia al departamento de Antioquia, también dividido en 125 municipios, los cuales son agrupados en diferentes subregiones. Dadas las condiciones geográficas, Antioquia es un departamento rodeado por montañas, ya que es atravesado por la cordillera central y occidental. En medio del departamento y toda su zona montañosa, se encuentra ubicada la subregión Valle de Aburrá, donde se asienta la segunda aglomeración urbana más grande de Colombia, conformando así el Área metropolitana del Valle de Aburrá, la cual es conformada por diez municipios los cuales nombrados de sur a norte son: Caldas, La Estrella, Sabaneta, Itagüí, Envigado, Medellín (capital del departamento y principal ciudad del área metropolitana), Bello, Copacabana, Girardota y Barbosa.

El proyecto Interconexión Caldas – La Estrella, tiene obras e impactos directo sobre los municipios ubicados al sur del Valle de Aburrá, como lo son Sabaneta, La Estrella y Caldas.

Geográfica y espacialmente es posible ubicar el proyecto y los municipios beneficiados por el mismo en las imágenes de radar que se presentan en las siguientes imágenes: Ilustración 2, Ilustración 3, Ilustración 4 e Ilustración 5.



Ilustración 2. Ubicación geográfica de Colombia. (GOOGLE EARTH).



Ilustración 3. Ubicación geográfica de Antioquia. (GOOGLE EARTH).

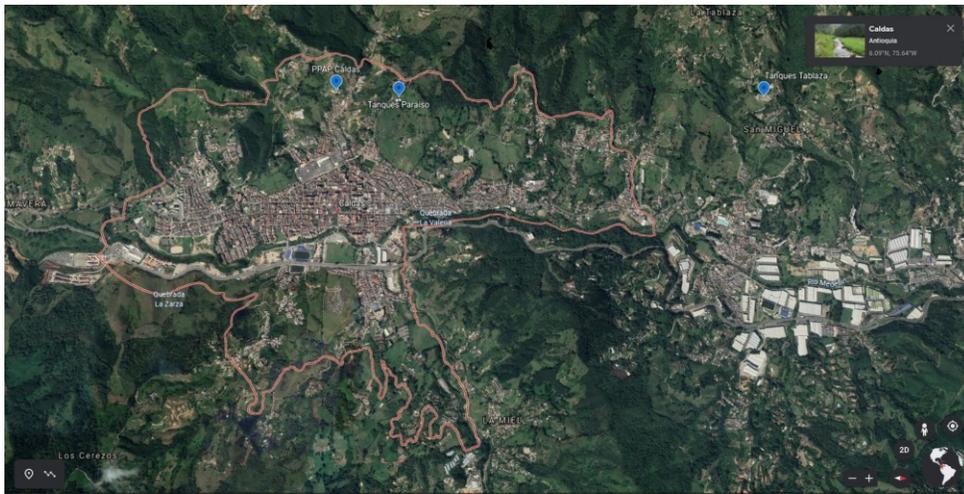


Ilustración 4. Ubicación geográfica y límites del municipio de Caldas. (GOOGLE EARTH).



Ilustración 5. Ubicación geográfica del municipio de Caldas y sus límites. (GOOGLE EARTH).

### 3 ASPECTOS GENERALES

#### 3.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Con el presente proyecto, se evalúa la posibilidad utilizar un sistema de bombeo existente y operativo entre la PPAP Caldas y los tanques Paraíso de forma tal que, pueda operar alternadamente como bombeo o como pico turbina para generar energía eléctrica respetando las consignas operativas del sistema primario de acueducto y circuitos secundarios de los municipios de Caldas y La Estrella.

Este análisis es posible que con la nueva interconexión de la PPAP Caldas, ya que cuenta con una energía potencial disponible en la red primaria que se podría aprovechar con los mismos equipos de bombeo del sistema actual.

En la Ilustración 6, es posible ver desde una toma aérea los alineamientos y recorridos de las diferentes tuberías de acueducto primario que componen el proyecto, por las cuales se transporta el agua potable entre los diferentes tanques de almacenamiento, bien sea por bombeo o a gravedad.

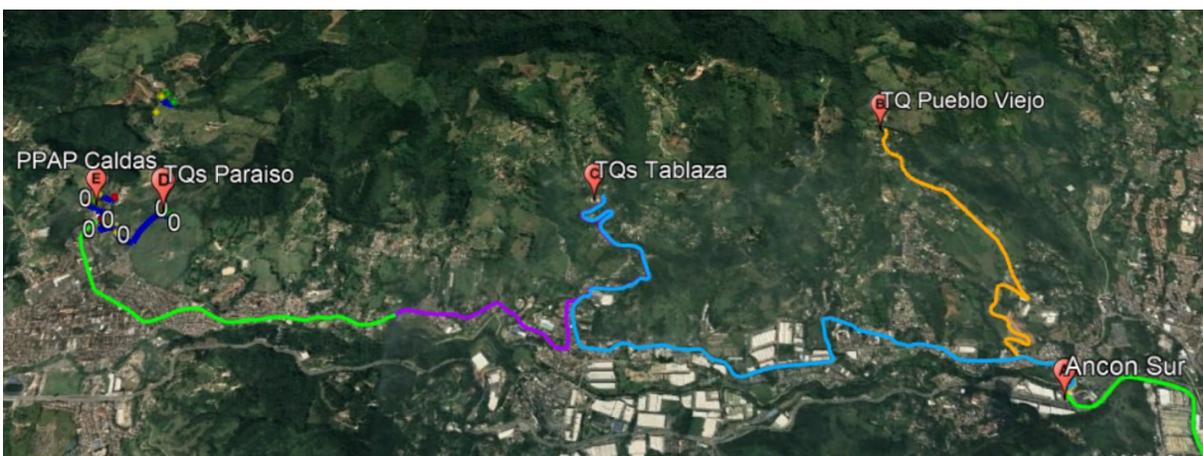


Ilustración 6. KMZ trazados de las conducciones, impulsiones y tanques - proyecto Interconexión Caldas - La Estrella. (GOOGLE EARTH - EPM).

## 3.2 OBJETIVOS

### 3.2.1. Objetivo general

Proponer las adecuaciones necesarias que permitan implementar un sistema de generación de energía en el sistema de bombeo de agua potable de la estación Planta de Potabilización Caldas – Tanque Paraíso del municipio de Caldas – Antioquia.

### 3.2.2. Objetivos específicos

- A. Recopilar información operativa del sistema de bombeo actual de la PPAP Caldas hacia tanque Paraíso.
- B. Diagnosticar las condiciones operativas del sistema de bombeo actual de la PPAP Caldas hacia los tanques Paraíso comparándolas los datos originales de las bombas y el sistema.

*Los objetivos A y B, se desarrollan en el capítulo 5. SISTEMA DE BOMBEO ACTUAL PPAP CALDAS – PARAISO., donde se expone la documentación encontrada al respecto y que sirve como base de información hasta su forma de obtención.*

- C. Proponer los puntos operativos del sistema a la entrada de la PPAP de Caldas, de acuerdo con el potencial de energía aprovechable.

*El desarrollo del objetivo C, es posible encontrarlo capítulo 6. SISTEMA DE APROVECHAMIENTO ENERGETICO – GENERACIÓN CON BOMBAS COMO TURBINAS, donde se exponen las condiciones del trabajo del sistema y el potencial identificado en el proyecto para la generación de energía teniendo en cuenta todos los factores de operación asociados.*

- D. Definir el punto operativo requerido para una motobomba que pueda operar en sentido inverso generando energía de forma más eficiente teniendo en cuenta las condiciones actuales del sistema.

- E. Establecer las acciones requeridas a implementar para poder generar la mayor cantidad de energía con las motobombas actuales del sistema de bombeo PPAP Caldas – Paraíso.

*Los objetivos D y E, se ven expuestos en el capítulo 7. COMO DETERMINAR LA POTENCIA HIDRÁULICA, donde se integra todos los factores- del estudio para encontrar las condiciones del trabajo del sistema.*

- F. Diseñar las condiciones operativas en los regímenes de trabajo tanto como bomba, como turbina, que permitan obtener el mayor provecho a los equipos en las condiciones de demanda exigidas por el sistema.

*Por último, el objetivo F, podrá apreciarse en el capitulo 8. DISEÑO Y EVALUACIÓN DE LAS BOMBAS EXISTENTES COMO TURBINAS, donde se detalla procedimiento, análisis, requerimientos y acciones requeridas para implementar la generación de energía con bombas como turbina con los equipos existentes en este sistema.*

### 3.3. Guía metodológica

#### Proponer las adecuaciones necesarias para implementar en el bombeo de agua potable de la estación Planta de Potabilización Caldas – Tanque Paraíso del municipio de Caldas – Antioquia.

Recopilación de la información del sistema de bombeo actual.

- Buscar en los sistemas de gestión de la información de la empresa manuales, planos, documentación técnica del sistema actual para levantar la línea base.
- A través del sistema de operación SCADA recopilar información operativa actual del sistema de bombeo, datos de caudal y presión por grupo de bombeo.

Diagnóstico y evaluación las condiciones operativas del sistema.

- Realizar levantamiento de campo a través de fotos, medidas.
- Levantamiento de datos operativos actuales del sistema.
- Procesamiento de los datos operativos bajo metodologías hidráulicas.
- Análisis estadístico de la muestra de datos (caudales y presiones).
- Comparar la información actual del sistema con la documentación original de los equipos.

Puntos operativos del sistema a la entrada de la PPAP.

- Se estudian las condiciones de caudal y presión que mejor se ajustan al sistema.
- Ecuaciones de pérdidas por fricción y accesorios entre los tanques Tablaza y el nodo H.
- Ecuaciones de pérdidas por fricción y accesorios entre el nodo H y el nodo F.
- Ecuaciones de pérdidas por fricción y accesorios entre el nodo F y la PPAP Caldas.
- Ecuación de energía neta total disponible entre los tanques Tablaza y la PPAP Caldas.

Punto operativo requerido para que una motobomba pueda operar en sentido inverso generando energía.

- Escenario operativo 1: Caudal operativo máximo a la salida de Tablaza.
- Escenario operativo 2: Caudal operativo de los tanques Paraíso más PPAP Caldas a la salida de los tanques Tablaza.
- Escenario operativo 3: Caudal operativo solo de PPAP Caldas a la salida de los tanques Tablaza.

Acciones requeridas a implementar para poder generar la mayor cantidad de energía con las motobombas actuales del sistema.

- Calcular la potencia hidráulica con base en los puntos operativos definidos.
- Definir los ajustes necesarios en los equipos con el fin de que operen en los puntos de trabajo definidos previamente para bomba y turbina.

Diseño de las condiciones operativas en los regímenes de trabajo tanto como bomba, como turbina, que permitan obtener el mayor provecho a los equipos en las condiciones de demanda exigidas por el sistema.

- Evaluación de las bombas existentes como turbinas.
- Selección del equipo partiendo de las características hidráulicas.
- Definir los ajustes necesarios sobre los equipos para generar energía como turbina.
- Definir las condiciones operativas para el funcionamiento de los equipos como bomba.
- Establecer la cantidad de energía esperada y el ahorro obtenido al realizar los ajustes de los equipos.

### 3.4. JUSTIFICACIÓN

De acuerdo con los alcances del proyecto y la interconexión de la PPAP Caldas y los tanques Paraíso, se tendrá una presión importante a la entra de cada uno. Esta presión, deberá ser regulada y disipada por medio de una válvula de flujo anular que permita controlar las condiciones de ingreso de agua al tanque.

Por lo anterior, se observa una oportunidad de aprovechamiento energético a través de generación de energía eléctrica, utilizando las condiciones del fluido en este punto. En pro de optimizar costos de la inversión, la premisa del proyecto es poder aprovechar los equipos existentes permitiendo el funcionamiento como bomba o como turbina según la necesidad y sin sacrificar la prestación del servicio. (En la Ilustración 7, se puede observar la estación de bombeo actual)

La transformación esta energía hidráulica en energía eléctrica con los mismos equipos, permite tener ahorros de energía por autoconsumo de la PPAP o venta a la red según la capacidad de generación.

Es importante aclarar, que por priorización de los servicios prima la comunidad. Por tal razón, se debe garantizar en todo momento el abastecimiento de agua hacia los tanques de la PPAP y/o los tanques Paraíso así no sea posible su aprovechamiento energético por generación.



*Ilustración 7. Motobombas superficie existentes bombeo Caldas-Paraíso.*

## 4. ESTADO DEL ARTE

Dentro de las diferentes ramas y expresiones de la ingeniería, existen disciplinas de la física fundamental dentro de las cuales se encuentra la mecánica de fluidos, la cual basa sus estudios en las leyes y comportamientos de los fluidos en equilibrio (hidrostática) y en movimiento (hidrodinámica).

Los fluidos se clasifican entre compresibles e incompresibles; sin embargo, este documento solo se enfoca en los fluidos incompresibles; más puntualmente sobre agua. A continuación, se detalla en la Ilustración 8, las diferentes clasificaciones de la hidráulica aplicada y sus principales áreas de influencia.

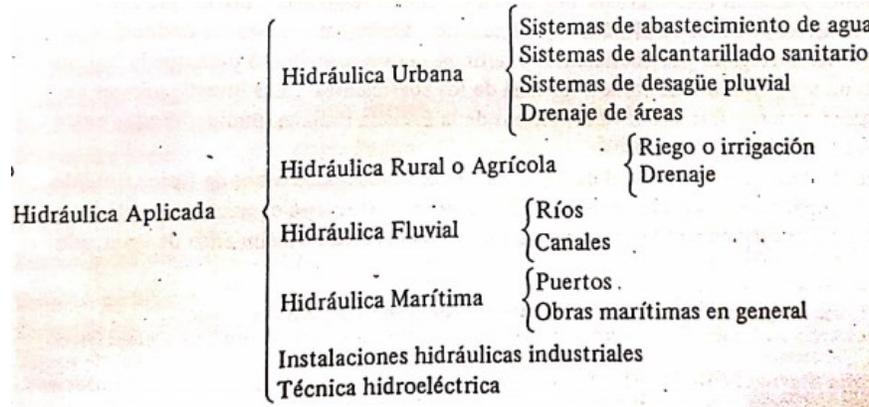


Ilustración 8. Hidráulica Aplicada. (Azevedo Netto, Acosta Álvarez, 1975).

Existen diferentes tipos de energía aprovechables; las cuales se agrupan dentro de las energías renovables y las no renovables. Dentro del primer grupo se encuentra la energía hidráulica o hídrica, sobre la cual se centra el estudio de la mecánica de los fluidos, la cual basa en transformar la potencial o cinética de las fuentes de agua, bien sea ríos, embalses, saltos de agua, olas del mar, entre otros; en energía mecánica y/o eléctrica. Este tipo de energía suele considerarse energía limpia por un bajo impacto al medio ambiente.

La energía potencial, es la energía que almacena un cuerpo o un objeto en su posición relativa con otro. Para el caso de estudio y entender un poco mejor esta situación, es la masa de agua

acumulada o almacenada en un embalse o volumen definido (tanque), que se encuentra a una mayor cota que un punto de referencia a trabajar.

La energía cinética, es la energía asociada al movimiento de algo, este movimiento hace referencia a la velocidad de un cuerpo, masa u objeto se desplaza de un punto a otro. Para el caso de estudio y entender un poco mejor la situación, es la velocidad con la que una masa de agua puede desplazarse a través de un tubo desde un punto a otro.

Ambos tipos de energía es posible encontrarlas en el agua, bien sea potencial, cinética o ambas en forma simultánea.

Las máquinas de fluidos se clasifican en dos, las motoras se encargan de transformar la energía de un fluido en energía mecánica a un eje, con la que es posible producir por ejemplo energía eléctrica mediante un generador acoplado, tal como sucede en una central hidroeléctrica, transformando la energía potencial en cinética y a su vez en energía eléctrica.

Por otro lado, encontramos las máquinas generadoras, las cuales, por el contrario, absorben energía mecánica e incrementan la energía del fluido; como es el caso de las bombas, las cuales por ejemplo conectadas a un eje de un motor que es alimentado eléctricamente, transforman esta energía en mecánica, cinética y potencial.

La energía eléctrica es factor fundamental y determinante en el desarrollo social y económico, convirtiéndose en un elemento clave para la producción, manufactura y confort tanto de la industria como de los hogares.

Al revisar la historia colombiana, las primeras centrales de generación de energía eléctrica fueron hidráulicas de baja potencia, con generadores de corriente continua; luego se logró aumentar la potencia y capacidad de transmisión al utilizar generadores de corriente alterna; esto conllevó a que, hasta mediados de la primera mitad del siglo XX, la mayor parte de la generación se diera con proyectos hidroeléctricos de pequeñas potencias. (Ortiz, Sánchez, Collazos, 2015).

Hoy en día, se encuentran en funcionamiento 28 plantas hidroeléctricas despachadas centralmente y 115 no despachadas centralmente. En las primeras, la capacidad neta asciende a 10.974

MW, mientras que el segundo grupo llega a 860,57 MW. (La República, 2019). Como se puede observar en la Ilustración 9.

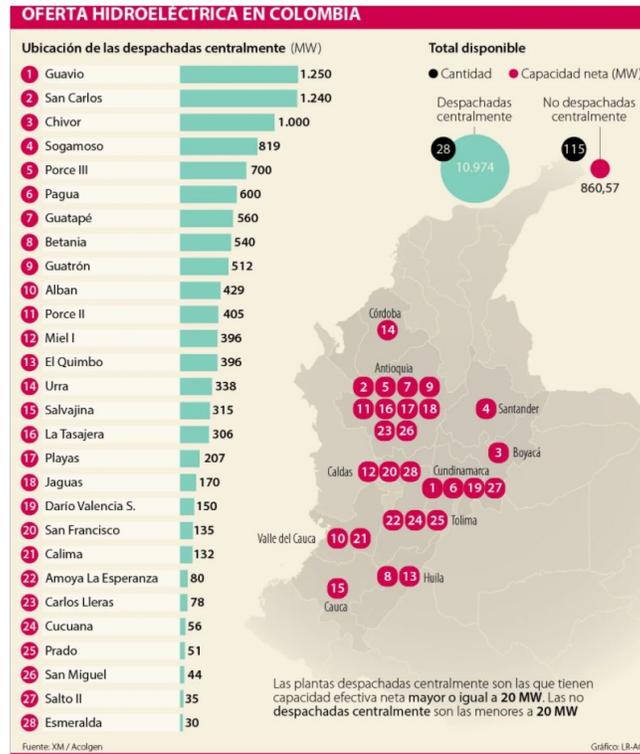


Ilustración 9. Oferta hidroeléctrica en Colombia. (La República, 2019).

Gracias a los grandes recursos y fuentes hídricas con los que cuenta Colombia, la energía hidráulica marca diferencia y se posiciona como la mayor fuente de generación de energía eléctrica para todo el país.

Sin embargo, las grandes fuentes de producción de energía eléctrica (grandes centrales de generación), van alcanzando su límite de implementación dado que las grandes fuentes hídricas del país van siendo copadas, los impactos ambientales que se generan por la acumulación de energía en los embalses (inundaciones); lo que conlleva, que se analicen otros tipos de fuentes de generación de energía renovables y a su vez, fuentes hidroeléctricas de menor generación y menor impacto ambiental como lo son las Microcentrales, las cuales se convierten en un apoyo importante para las zonas aisladas o donde no se cuente con grandes volúmenes de generación hidroeléctrica.

Para tener un marco del alcance del suministro de energía eléctrica utilizando los aprovechamientos hidroenergéticos en pequeña escala, se puede seguir la clasificación de estos, dado por la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE) para pequeños aprovechamientos hidroenergéticos, según la capacidad instalada y el tipo de usuario en las ZNI (Ortiz, Sánchez, Collazos, 2015). Ver Tabla 3.

Tabla 3. La Organización Latinoamericana de Energía (OLADE) ha clasificado los pequeños aprovechamientos hidroeléctricos según su capacidad instalada y el tipo de usuario en las ZNI. (Ortiz, Sánchez, Collazos, 2015).

Tipo	Potencia (kW)	Usuario
<b>Picocentrales (Pico CHE)</b>	0.5 – 5	Finca o Similar
<b>Microcentrales (Micro CHE)</b>	5 – 50	Caserío
<b>Minicentrales (Mini CHE)</b>	50 – 500	Cabecera municipal
<b>Pequeñas Centrales (PCH)</b>	500 - 1000	Municipio

La implementación de equipos mecánicos, eléctricos y de instrumentación y control para aprovechamientos energéticos de este tipo, como turbinas y generadores, no tienen una amplia área de cobertura para requerimientos de altura y caudal de acuerdo con sus potencias; lo que se traduce en costos de instalación. Ver Ilustración 10.

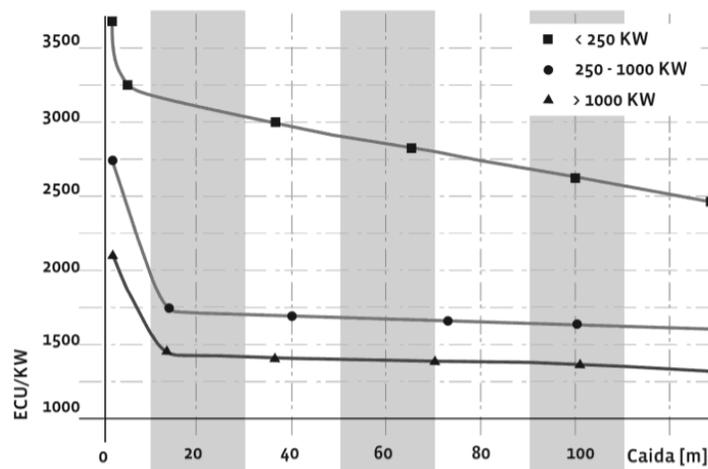


Ilustración 10. Costos por kilovatio instalado para Mini CHE en función de la caída. (Ortiz, Sánchez, Collazos, 2015).

De esta forma, detallando un poco más los costos de la implementación de este tipo de infraestructuras de generación de energía, podemos observar en la Tabla 4 Los porcentajes en función del costo total del proyecto para su correcta implementación; cabe resaltar que falta aún por sumar los costos de transporte, importación, impuestos y demás rubros que por condiciones de logística y normativa sea necesario incurrir; los cuales sirven como una referencia importante para la planeación de los proyectos similares.

*Tabla 4. Distribución porcentual de los costos de construcción de proyectos de generación hidroeléctricos. (Ortiz, Sánchez, Collazos 2015).*

ITEM	PCH (1.5MW, 14m)
<b>Trabajos de montaje y construcción</b>	30% - 35 %
<b>Equipo electromecánico</b>	50% - 60%
<b>Estudios y diseños</b>	10% - 15%

El objetivo de proyectos de generación de energía eléctrica a partir de la hidráulica es poder aprovechar en la mayor proporción posible la energía potencial y/o cinética con la que cuenta el agua en determinada instalación, obteniendo así la máxima potencia; las cuales son proporcionales al caudal y la altura del fluido.

Las ecuaciones de potencia eléctrica, depende directamente de la fuente, bien sea de consumo o generación y como tal presentan algunas diferencias en su estructura como se puede observar a continuación, donde se compara la ecuación de potencia eléctrica requerida por el equipo trabajando como bomba y la potencia eléctrica generada trabajando como turbina.

✓ **Ecuación de potencia para bombas.**

*Ecuación 1. Potencia eléctrica como bomba.*

$$Pot_{ele} = \frac{\gamma QH}{\eta_b \eta_m}$$

- $Pot_{ele}$ : Potencia eléctrica [KW].
- $\gamma$ : Peso específico del fluido. [ $N/m^3$ ] o [ $Kg/m^3 \cdot m/s^2$ ]
- Q: Caudal del fluido [ $m^3/s$ ].
- H: Altura total del fluido [m].
- $\eta_b$ : Eficiencia de la bomba.
- $\eta_m$ : Eficiencia del motor.

✓ **Ecuación de potencia para turbinas.**

*Ecuación 2. Potencia eléctrica como turbina.*

$$Pot_{ele} = gQH\eta_t\eta_g$$

- $Pot_{ele}$ : Potencia eléctrica [KW].
- g: Gravedad [ $m/s^2$ ]
- Q: Caudal del fluido [ $m^3/s$ ].
- H: Altura total del fluido [m].
- $\eta_t$ : Eficiencia de la turbina.
- $\eta_g$ : Eficiencia del generador.

Un sistema de generación de energía hidroeléctrica es un proceso de conversión de energía dinámico; ya que, la energía hidráulica (potencial y cinética) es transformada en mecánica por la turbina y esta a su vez se transforma en energía eléctrica a través de un generador para ser entregada a un sistema de transmisión y distribución para cubrir la demanda energética de determinado sector.

El proceso de generación de energía se realiza manteniendo constantes dos parámetros eléctricos, voltaje y frecuencia. Para lograr esto, se requiere contar con un regulador de tensión y un regulador de velocidad trabajando en perfecta armonía, ya que los cambios presentados en la demanda pueden afectar de forma directa estos dos parámetros. El voltaje es un parámetro



mecanismos que permite transformar una energía eléctrica, hidráulica, eólica, entre otras; para obtener siempre a la salida del motor energía mecánica.

En cuanto al generador, es un aparato capaz de transformar la energía mecánica en otro tipo de energía. De esta forma es posible tener generadores eléctricos, hidráulicos, entre otros.

En resumen, un generador eléctrico, al suministrarle de entrada energía mecánica, se obtiene una diferencia de potencial capaz de entregar corriente eléctrica a la salida. De forma similar, un generador hidráulico, al suministrarle energía mecánica a la entrada, se obtiene una energía potencial elevada, manifestada en forma de aumento de presión, produciendo así corriente hidráulica en la salida.

Para el caso de estudio que se desarrolla en este trabajo, se tienen máquinas de fluido (Tabla 5), en las que el fluido proporciona la energía que absorbe el motor; o el fluido, es el receptor de la energía del generador.

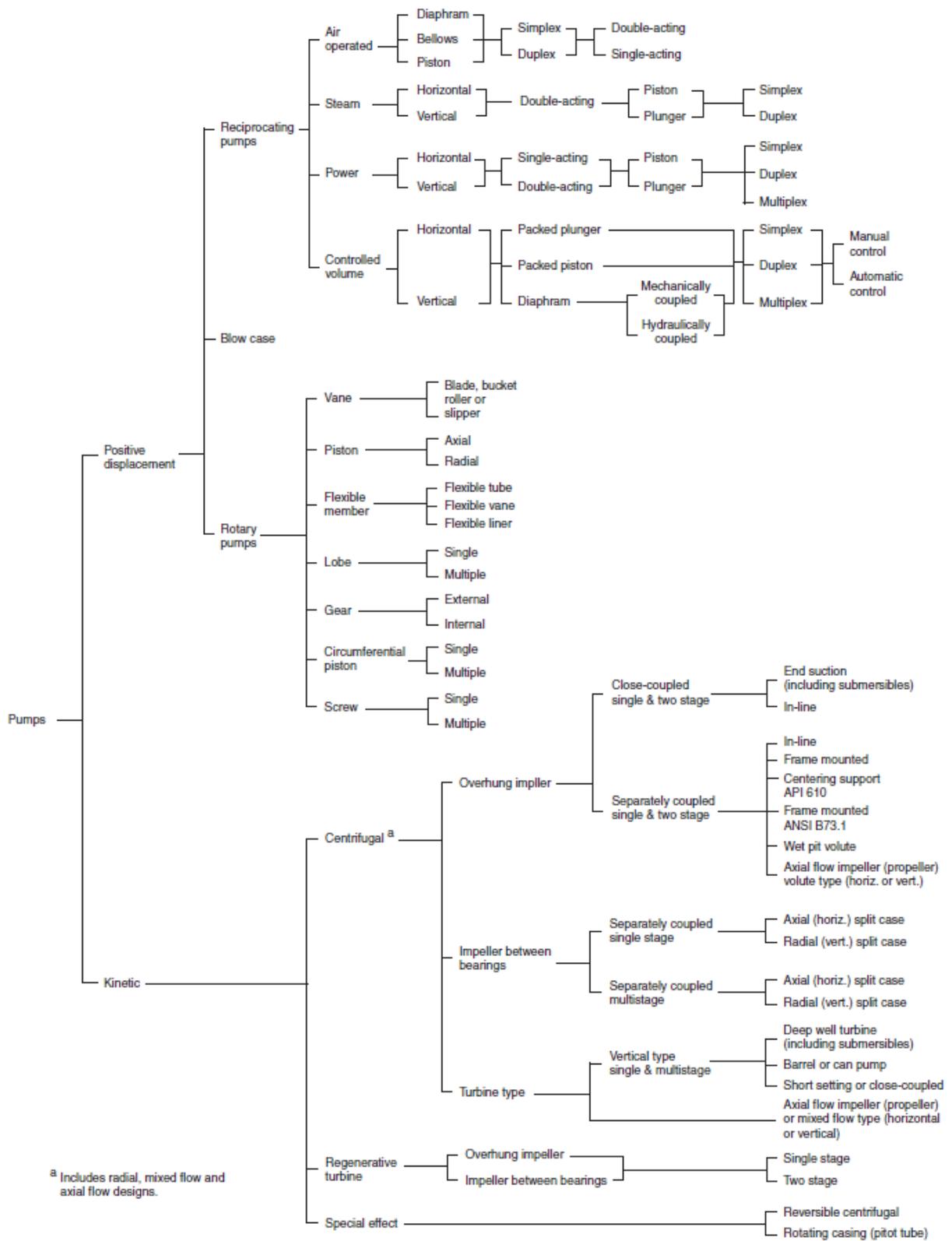
Tabla 5. Máquinas de fluido. (Quirós).

<b>MAQUINAS HIDRAULICAS (DENSIDAD CONSTANTE)</b>			
<b>GENERADORAS</b>		<b>MOTORAS</b>	
<b>Líquidos</b>	<b>Gases</b>	<b>Líquidos</b>	<b>Gases</b>
<b>Bombas</b>	Ventiladores	Turbinas hidráulicas Actuadores hidráulicos	Molinos de viento Turbinas eólicas

De acuerdo con su principio de funcionamiento, las máquinas hidráulicas se pueden clasificar en desplazamiento positivo o cinéticas (donde se encuentran las turbomáquinas).

De acuerdo con el Instituto de Hidráulica, el referente americano y encargado de las normas de fabricación, instalación, montaje, pruebas y buenas prácticas para sistemas hidráulicos. Clasifica las bombas según su función, principio de operación, mecanismos, entre otros factores como se puede observar en la Ilustración 12.

En las turbomáquinas o máquinas de corriente, los cambios de magnitud y dirección de la velocidad del fluido tiene un protagonismo especial; pues su finalidad, es cambiar la energía cinética por energía de presión. De esta forma, si se le suministra energía cinética se trata de un generador o si se aprovecha la energía cinética que trae el fluido se trata de un motor. Estas transformaciones de energía al interior de la máquina se dan por cambios en las secciones por donde circula el fluido.



<sup>a</sup> Includes radial, mixed flow and axial flow designs.

Ilustración 12. Tipos de bombas. (Hydraulic Institute 2000).

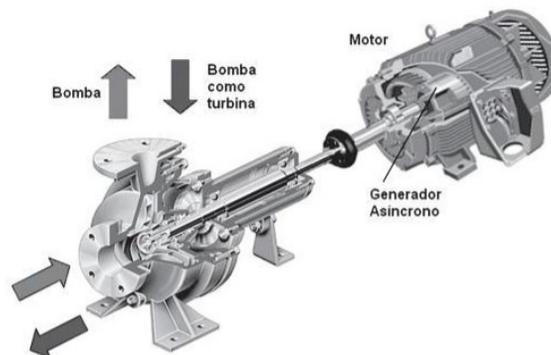
#### 4.2.1. Bombas centrifugas.

De todo el mundo de bombas y sus diferentes formas de clasificarse y agruparse, las bombas cinéticas, en especial las centrifugas, son el centro de atracción y de estudio para sistemas de generación.

Las bombas centrifugas se encuentran diseñadas para transformar la energía cinética de un fluido en energía de presión, haciéndolo pasar de un estado de baja presión a uno de mayor presión.

Las bombas centrifugas conectadas a una fuente de potencia (motor), permiten transformar la energía eléctrica en mecánica a través del motor, el cual a su vez por medio del eje transmite esta potencia mecánica a la bomba, para transformarla finalmente en energía cinética a la corriente de un fluido, desplazándolo desde un punto bajo a un punto más alto (de baja a alta presión).

Una conformación típica para estos equipos hidráulicos se puede apreciar en la Ilustración 13.



*Ilustración 13. Máquinas reversibles operando en modo motobomba y en modo turbina generador. (Ortiz, Sánchez, Collazos 2015).*

Una bomba centrífuga común está conformada por una boca o conducto de admisión o succión, que permite el ingreso del fluido, conduciéndolo hacia el impulsor, el cual está compuesto por un rodete o impulsor con alabes, el cual desplaza el fluido desde el centro (ojo) hacia las partes externas del mismo de forma radial (quien imprime la energía al fluido), expulsando el fluido hacia la carcasa o voluta de la bomba quien se encarga de orientar el fluido hacia el conducto o boca

de salida de la bomba. Al pasar el fluido por el rodete incrementa su velocidad y presión transformando así su energía, como se puede observar en la Ilustración 14.

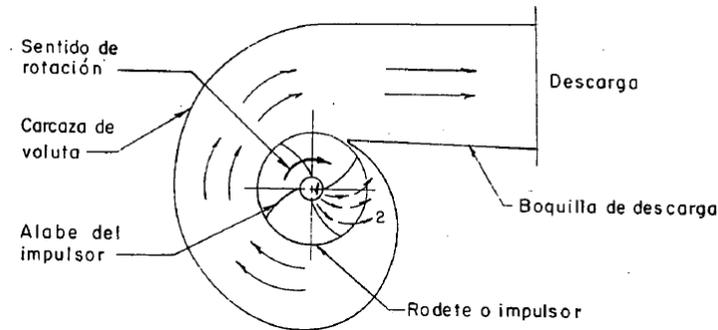


Ilustración 14. Representación esquemática de una bomba centrífuga. (QUIRÓS).

Implementar este tipo de equipos es bastante atractivo debido a su bajo costo de inversión y mantenimiento; son máquinas de construcción fácil y sencilla comparadas con las turbinas hidráulicas de generación, además que poseen una larga vida útil.

Una bomba centrífuga se debe especificar con base en su caudal (l/s), la presión o altura a entregar (mca), altura de succión (con base en el NPSHr del equipo), potencia consumida y presión máxima que puede soportar el equipo.

#### 4.2.1.1. CURVAS CARACTERISTICAS

Las curvas características de una bomba son una representación gráfica de su funcionamiento en la cual se relacionan sus variables más importantes con respecto a el caudal; como es el caso de altura (presión), potencia y eficiencia. Estas curvas, son propias de cada bomba y las hacen únicas, trazadas para una determinada velocidad de giro; haciendo como variable independiente el caudal y las demás dependientes de este.

Las curvas de cada equipo son dadas por el fabricante; estas curvas permiten seleccionar la bomba más adecuada y que mejor se ajuste a las necesidades y requerimientos de un sistema.

En la Ilustración 15, es posible observar las curvas características de la referencia de bombas instaladas en la estación de bombeo Caldas – Paraíso.

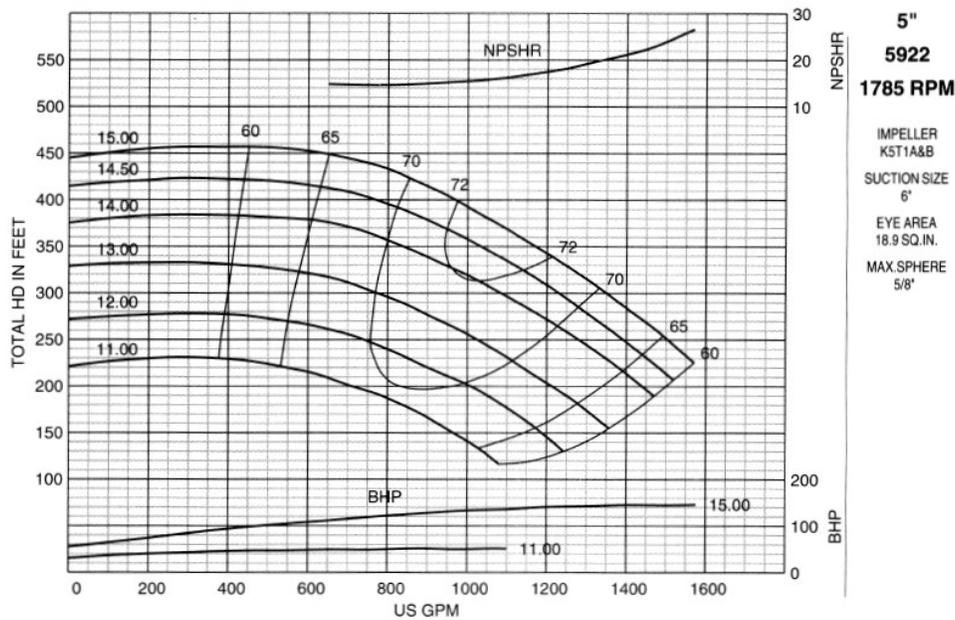


Ilustración 15. Curva característica bomba centrífuga PENTAIR PUMPS GROUP, Inc. FAIRBANKS MORSE PUMPS 1800 RPM.

### 4.3. MOTORES ASINCRONOS

Los motores asíncronos o de inducción, son motores de corriente alterna. dispositivos rotatorios que permiten transformar la energía eléctrica en energía mecánica (rotación, torque). Estos motores tienen muchas ventajas, como sus bajos costos, bajo mantenimiento y vida útil prolongada. El principio de funcionamiento de estos motores se basa en aplicar una corriente eléctrica alterna a las bobinas del estator que están desfasadas entre ellas, esto genera un campo magnético rotacional. La circulación de corriente se da por cortocircuito que se crea en el estator; generando así, un par que se opone a la causa que lo produce, generando un movimiento giratorio del rotor. Este tipo de motores permiten un amplio rango de aplicaciones y en la industria predomina su uso. No requieren de una regulación de tensión, ya que viene impuesta por una red externa. Lo

que lo hace una buena alternativa en centrales de generación donde se presente variación en el fluido.

Los motores asíncronos son reversibles y permiten transformar la energía mecánica en eléctrica. (GDM). En la Ilustración 16, es posible observar un motor asíncrono las partes que lo conforman.

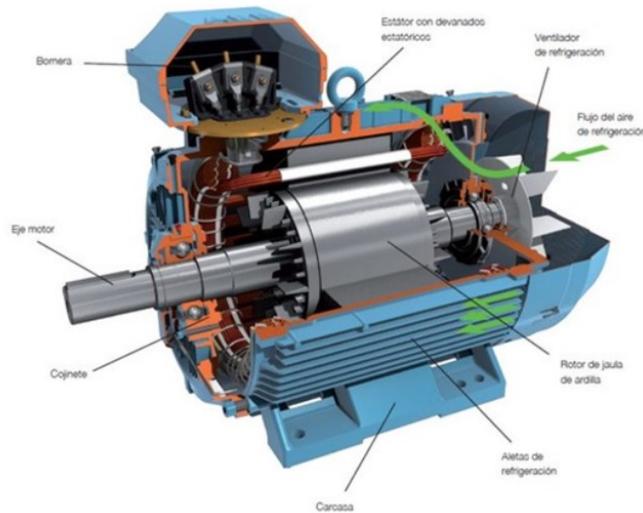


Ilustración 16. Motor asíncrono y sus partes (GDM).

#### 4.4. BOMBAS COMO TURBINAS

Usar bombas centrífugas como turbinas ofrece una alternativa técnica, ya que cubre una gran gama de caudales y alturas de operación; además, de ser una ventaja económica importante para la aplicación en sistemas de generación de energía como pequeñas centrales; razón por la cual el uso de estas máquinas como una solución de generación de energía viene en alza en sitios aislados o en casos, conectados a la red. (Audisio, 2011)

La principal diferencia entre una PATs<sup>2</sup> y una turbina convencional radica en que las PATs carecen de un dispositivo de control hidráulico. Esta carencia ayuda a explicar el bajo costo de las PATs, significa que las mismas necesitan condiciones de operación constantes. De igual forma,

<sup>2</sup> PATs: Bombas como turbinas por sus siglas en inglés (Pumps as Turbines)

los rendimientos no son los mismos. La altura y el caudal en su punto óptimo en el modo turbina es mayor que en el modo bomba; la principal razón de esta diferencia radica en las pérdidas hidráulicas de la máquina operando como bomba, para su punto de mayor eficiencia donde, a la velocidad de rotación nominal, el fluido presenta en aspecto óptimo a través de la máquina, pérdidas hidráulicas por fricción y volumétricas, que reducen la presión o altura en la brida de salida; esto haciendo una comparación con las condiciones ideales de acuerdo con la teoría. Por otro lado, al operar en modo turbina y a la misma velocidad de rotación que en el modo bomba, la cabeza de presión requerida en la entrada de la máquina para operar en el punto de máxima eficiencia debe ser incrementada en una magnitud equivalente a las pérdidas hidráulicas. De este modo la cabeza en el modo bomba difiere de la cabeza en el modo turbina aproximadamente el doble de las pérdidas hidráulicas. (Quintero, Villamizar, 2011)

El principio de funcionamiento de conversión de energía en máquinas hidráulicas rotativas en términos generales es igual tanto para una turbina como para una bomba; esta condición hace que las máquinas rotodinámicas centrífugas sean reversibles; esto significa que una bomba puede operar como turbina en el instante en que se invierte el flujo. (Ortiz, Sánchez, Collazos, 2015)

En esta condición, una bomba en modo turbina realiza un proceso de conversión de energía hidráulica en mecánica, transfiriendo la energía del fluido al rotor; esta transferencia está ligada directamente a la geometría de la voluta de la bomba y el impulsor. Por lo tanto, diferentes detalles de diseño y fabricación de estas piezas afectan el desempeño de la máquina; ejemplo, dos máquinas pueden tener desempeño similar en el modo bomba (similar impulsor) pero no necesariamente el mismo desempeño como turbina. Configuraciones que puede ser apreciadas en la Ilustración 17 e Ilustración 18.

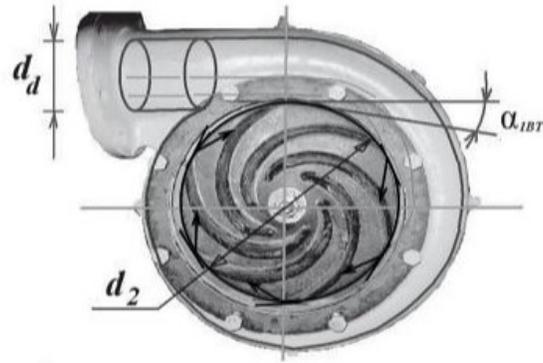


Ilustración 17. Ángulo  $\alpha_{IBT}$  con el cual ingresa el flujo másico del caudal al rodete de una bomba como turbina. (Ortiz, Sánchez, Collazos, 2015)

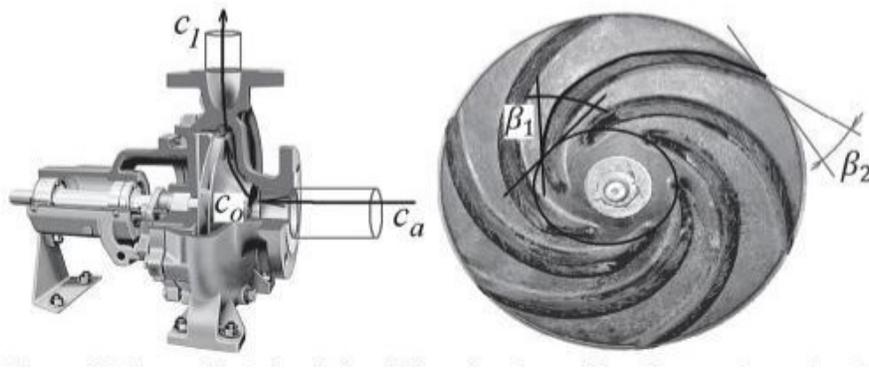


Ilustración 18. Ilustración de los álabes del impulsor, la succión y descarga de una bomba (Ortiz, Sánchez, Collazos, 2015)

La curva de la Ilustración 19, muestra la característica “Altura total en función del flujo” de una bomba y una bomba operando como turbina, para una misma velocidad de rotación en los dos modos de trabajo. En ella se visualiza que el punto de mejor eficiencia en el modo bomba no corresponde para la misma combinación de valores de altura y caudal para el punto de mejor eficiencia en el modo turbina. Sin embargo, para determinar el punto de máxima eficiencia en el modo turbina no es suficiente con trasladar los valores de caudal y altura, dado que la eficiencia también depende del flujo a través de la máquina.

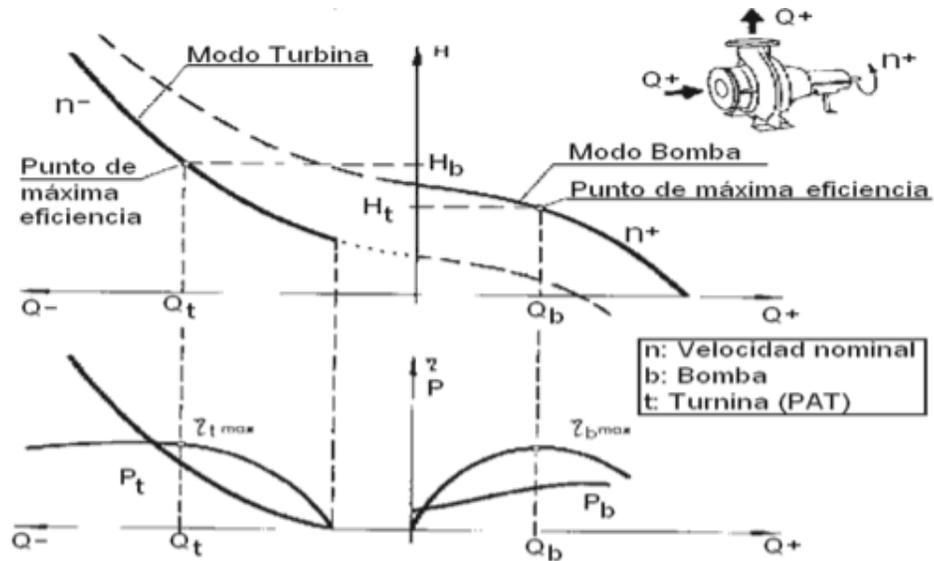


Ilustración 19. Curva de eficiencia de la bomba en modo directo e inverso (Ortiz, Sánchez, Collazos, 2015)

Sin embargo, hay una dificultad por resolver, tal vez la más importante para la implementación de este tipo de equipos: la falta de información sobre las características de funcionamiento de la bomba operando como turbina y en especial las particularidades del trabajo conjunto con el motor asíncrono operando como generador. Es por ello por lo que se necesita, además de analizar los métodos para la implementación de máquinas hidráulicas y eléctricas reversibles, validar los resultados teóricos obtenidos en cada uno de los casos estudiados y consolidar un método para la selección adecuada de los conjuntos de equipos que entreguen mejores eficiencias. (Ortiz, Sánchez, Collazos, 2015)

Cuando se va a implementar una bomba como turbina, no es común realizar cambios o adecuaciones mayores al sistema; sin embargo, cuando se selecciona el equipo, es sumamente importante realizar una evaluación ex-post del diseño, ya que, durante la operación de la bomba como turbina, las condiciones de operación del equipo cuando opera como turbina, por lo general son mayores que cuando opera como bomba, como por ejemplo sucede con la altura y la potencia.

Puntos importantes para evaluar cuando se instala una bomba como turbina:

- Velocidad, régimen operativo, torques de arranque máximo y de trabajo, sentido de giro del equipo, entre otros parámetros de operación pueden afectar algunos componentes de las máquinas; por lo que es sumamente importante validar y ajustar que elementos pueden verse afectados por una rotación en sentido inverso u otro régimen como lo son ejes, roscas, cojinetes, tapas entre otros componentes.
- Validar presiones de trabajo del equipo; presiones máximas que soporte la carcasa de bomba de tal forma que la máxima presión estática, no exceda la máxima resistencia del equipo y pueda afectar la máquina. En caso de ser requerido, se deben cambiar el material de la carcasa o reforzar su estructura para de esta forma garantizar su condición más extrema.

#### **4.5. MOTOR COMO GENERADOR**

Gracias a su robustez y bajo costo por unidad de potencia la máquina asíncrona es por excelencia la máquina motriz de los procesos industriales; a esta particularidad se le suma la propiedad de ser una máquina reversible, tal que puede ser utilizada como generador exclusivo de potencia activa en el instante en que es conectada a una fuente de reactivos capacitivos variable y acoplada mecánicamente a un primomotor, que hace que su rotor supere la velocidad sincrónica. Como generador se destaca, porque no requiere equipo de sincronización, posee capacidad de sobrevelocidad y protección inherente contra cortocircuitos; no obstante, su principal desventaja es que no dispone de instrumentos para regular la potencia reactiva, por lo tanto, esta debe ser suministrada externamente, bien sea conectándole un banco regulado de condensadores en sus terminales o acoplándola directamente a la red. (Ortiz, Sánchez, Collazos, 2015). Ver Ilustración 20.

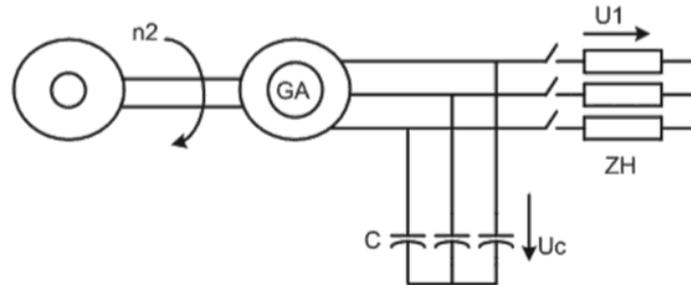


Ilustración 20. Esquema principal de un generador asíncrono con condensador de excitación. (Ortiz, Sánchez, Collazos, 2015).

Cuando una máquina asíncrona trabaja como generador, tiene un desplazamiento rotacional negativo, opuesto a su sentido normal de operación y por la tanto presenta una fuerza electromotriz inducida en el devanado del rotor por el cambio de dirección. El trabajo de la máquina bajo esta condición transforma la energía mecánica en potencia activa, lo que, a su vez, genera potencias reactivas las cuales son variables dependiendo de estado operativo en que se encuentre en cada momento de operación, ya que las condiciones del sistema son variables.

Dada la variación del régimen operativo por las condiciones del sistema, las potencias activas y reactivas son variables y deben ser compensadas con un banco de condensadores variables en paralelo con la máquina. Esta conexión es necesaria siempre y cuando la máquina generadora se encuentre aislada de la red y operando de forma autónoma; de lo contrario la misma red se encargará de compensar y regular las condiciones operativas del generador.

De esta forma, para que una máquina asíncrona opere en régimen de generador autónomo, es necesario que se cumplan las siguientes condiciones: existencia de un flujo magnético residual en el rotor, una velocidad mecánica superior a la sincrónica y una fuente externa de reactivos. (Ortiz, Sánchez, Collazos, 2015).

El método de conexión directo a la red consiste en conectar el equipo a una red eléctrica de forma directa; para lo cual se deberá contar con equipos de medición de variables tanto eléctricas como voltaje, corriente, entre otros; como las variables mecánicas como la velocidad. Este arreglo o

montaje eléctrico, permite llevar el motor como generador hasta una velocidad próxima a la nominal del equipo; momento en el cual se incrementa la velocidad del equipo hasta ponerlo en el régimen operativo como generador asíncrono, el cual, al incrementar la velocidad, aumenta el deslizamiento en el generador y a su vez la potencia activa entregada a la red. Este proceso exige un consumo proporcional de reactivos que son suministrados por la red y registrados por el equipo de medida. (Ortiz, Sánchez, Collazos, 2015).

## **5. SISTEMA DE BOMBEO ACTUAL PPAP CALDAS – PARAISO**

*Este capítulo contine el desarrollo de los objetivos específicos A y B que fueron definidos al inicio de este documento.*

Como se ha presentado y desarrollado a lo largo de este documento, y en el contexto general del sistema y el problema, la PPAP Caldas, para garantizar la prestación del servicio de agua potable en su zona de influencia, cuenta con un sistema de potabilización del agua, donde produce agua apta para el consumo humano con los estándares requeridos por la norma; donde a su vez, se tienen unos tanque de distribución de agua a la comunidad; sin embargo, el volumen de estos tanques no son lo suficientemente grandes para cubrir la alta demanda del municipio y su potencial crecimiento, razón por la cual hace unos años fue necesario construir un sistema de almacenamiento de agua potable, el cual a través de un proyecto, se realizó la instalación de un sistema de bombeo tipo superficie, el cual cuenta con 2 motobombas centrifugas carcasa partida de 2 etapas marca PENTAIR - FAIRBANKS MORSE PUMPS que permitiera llevar un caudal total de 60 l/s a los tanques Paraíso (2 tanques de almacenamiento y distribución de agua potable); para de esta forma poder aumentar la cobertura total del sistema de distribución de agua.

Dado que el proyecto original del sistema de bombeo fue entregado y construido en el 2006, fecha desde la cual las maquinas han operado de forma continua y a pesar los mantenimientos, los equipos con el pasar de los tiempos presentan desgastes, para poder conocer las condiciones

actuales del equipo en su funcionamiento como bomba y posterior análisis como turbina como se describe en la DEFINICIÓN DEL PROBLEMA, lo primero que se requiere es un diagnóstico de las máquinas y el sistema, para de esta forma poder evaluar su estado y determinar acciones necesarias para la implementación propuesta.

Con el fin de reconocer la distribución de PPAP Caldas y ubicar el bombeo y sus redes, se presenta Ilustración 21, la cual muestra un esquema en vista de planta.

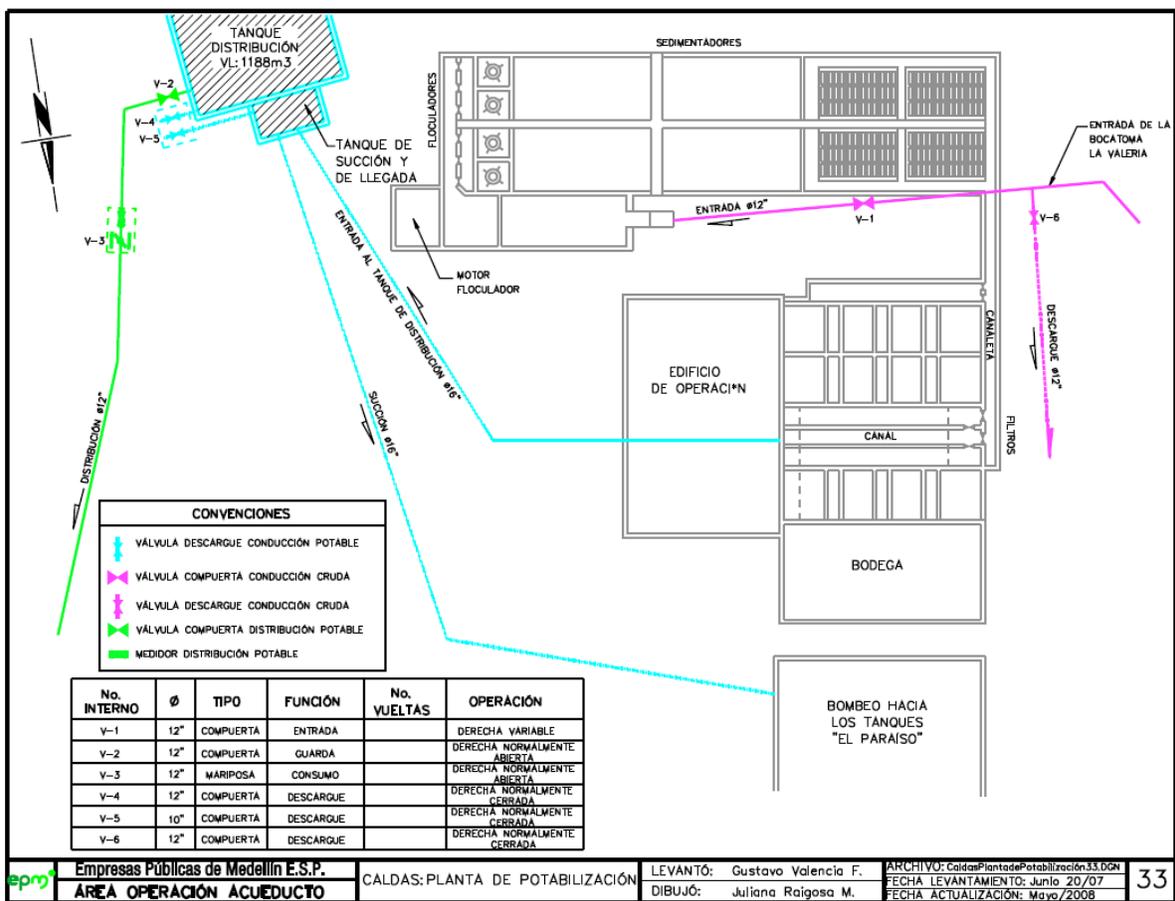


Ilustración 21. Esquema de distribución de estructuras en la PPAP Caldas de EPM. [Mayo 2008, EPM].

De igual forma, en la Ilustración 22, es posible observar en planta el esquema con la ubicación de los tanques Paraíso, sus redes e información más relevante.

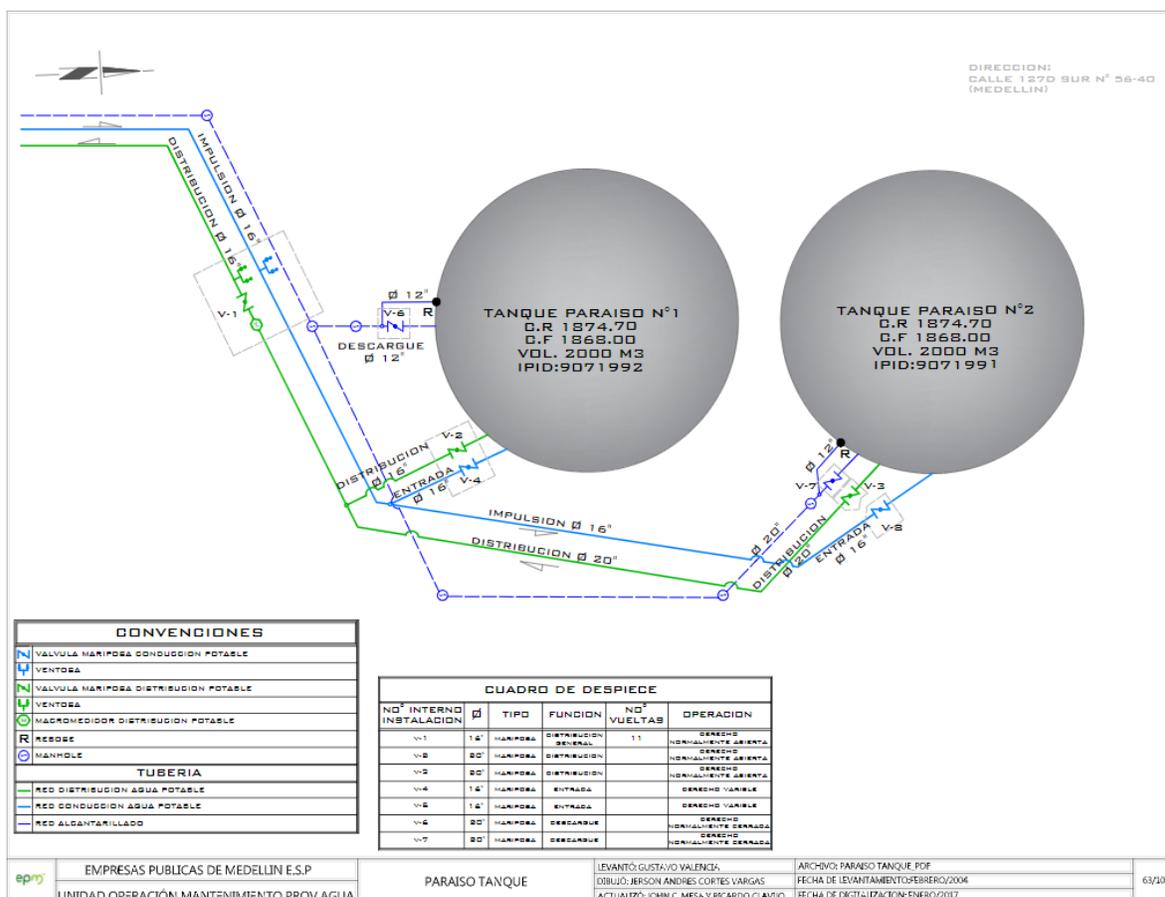


Ilustración 22. Esquema de distribución de estructuras en la Tanques Paraíso EPM. [Febrero 2004, EPM].

## 5.2. Diagnóstico de funcionamiento de las motobombas y sistema actual de bombeo PPAP Caldas – Paraíso

Para realizar el diagnóstico del sistema; lo primero que se debe tener en cuenta y analizado, es el funcionamiento actual y normal de las motobombas y todo conjunto; para esto, se requiere hacer un levantamiento de campo tanto físico como de datos operativos.

### 5.2.1. Levantamiento de campo

Se realiza una inspección física del sitio de bombeo, en la cual se toman fotos de los equipos, se analiza todo el sistema de redes, ingreso y salida del agua, número de grupos instalados (2),

operando en simultaneo (1), placa de los equipos y demás aspectos físicos importantes y relevantes del sistema que soportan todo el análisis y estudio a realizar de las condiciones actuales. Dentro de esta inspección, es sumamente importante identificar los puntos de medición de variables hidráulicas, como lo son la presión de succión, nivel del tanque de succión, presión de descarga de la bomba, medición de caudal de bombeo, planta – perfil de la tubería de succión y descarga del sistema, identificar posibles restricciones o condiciones operativas especiales del sistema que deban ser analizadas.

Para este caso se evidencia una condición operativa especial que beneficia el bombeo y debe ser analizada en su funcionamiento; pues, la succión del bombeo se da con un tanque de carga preferencial ubicado en el mismo tanque de distribución en la planta de la siguiente forma; el agua potabilizada, ingresa al tanque de distribución por una cámara de carga por la parte superior, pero solo ingresa al tanque al rebosar por la parte superior a través de un vertedero lo que hace que la cámara de paso, siempre se encuentre con niveles altos y un carga hidráulica importante, sin importar el nivel del tanque de distribución. Como la succión del bombeo se encuentra alimentada por esta cámara de paso en la parte inferior, significa, que el bombeo siempre en su succión, vera una cabeza de presión mayor que le reflejada en el tanque de distribución, permitiéndole a este, trabajar en un rango seguro para las condiciones de NPSH requerido por las máquinas.

A continuación, se presentan las imágenes de los equipos existentes en la estación de bombeo PPAP Caldas – Paraíso, donde, en la Ilustración 23, se observa la motobomba en conjunto con sus líneas de succión e impulsión por grupo.



*Ilustración 23. Motobomba existente sistema de bombeo PPAP Caldas - Paraíso. [EPM].*

En la Ilustración 24, Se puede apreciar una foto general de la estación de bombeo, conformada por dos grupos que operan en paralelo.



*Ilustración 24. Foto general del sistema de bombeo PPAP Caldas – Paraíso. [EPM].*

Y, por último, en la Ilustración 25, se presenta la foto con la placa de fabrica del equipo, en la cual reposan datos importantes de la motobomba como lo son nombre del fabricante, modelo y seria.



Ilustración 25. Placa de la motobomba actual sistema de bombeo PPAP Caldas - Paraíso. [Agosto 2017, EPM].

### 5.2.2. Levantamiento de datos operativos

El sistema operativo de EPM, cuenta con un sistema de operación, control y diagnóstico remoto, desde la cual se puede realizar seguimiento de todo el sistema de distribución de aguas tanto primarias como secundarias de EPM llamado SCADA<sup>3</sup>, en la cual se albergan todos los datos del funcionamiento de todos y cada uno de los diferentes sistema de EPM que requieren un monitoreo especial, control o vigilancia permanente; para el caso de estudio actual, el sistema de bombeo PPAP Caldas – Paraíso, es una infraestructura primaria de aguas, la cual permite transportar grandes volúmenes de agua desde un tanque a otro tanque, dada su relevancia e importancia, todas las variables operativas del sistema como lo son presión de impulsión, caudal de impulsión, grupo operando, frecuencia o velocidad de operación, se encuentra registrados en el PLC de control de la estación de bombeo y a su vez, enviado a la central de operaciones de acueducto y almacenado en el SCADA de EPM.

Con ayuda de los operadores del sistema de acueducto y el software que maneja el SCADA de EPM, se obtiene una base de datos operativos cada 5 minutos, en las cuales se observan variables hidráulicas importantes como lo son grupo que se encuentra en operación, caudal de bombeo, presión de succión y presión de descarga. Estos datos y los planos constructivos de toda la

<sup>3</sup> Siglas en inglés para *supervisory control and data acquisition*.

infraestructura con cotas, distancias, diámetros de tubería y demás datos físicos de todo el sistema, permite hacer un diagnóstico real operativo tanto de las máquinas (motobombas), como del sistema y sacar así un estado real a la fecha que permita analizar lo existente con lo propuesto en el estudio y proyecto.

Un ejemplo de cómo se presentan y organizan las tablas de datos operativos, se puede apreciar en Ilustración 26 y en la Ilustración 27; las cuales presentan información importante, integrada y real del sistema capturada cada 5 minutos.

Estas tablas, permiten obtener de forma organizada y completa los datos operativos de la estación de bombeo de forma real; convirtiéndolos en una muestra estadística significativa la cual será procesada analizada y estudiada para determinar el estado actual de los equipos y el sistema.

	FT742.PA5M.	R74:G1F740.IN.	R74:G2F740.IN.	R74:PIT741.F.	R74:PIT742.F.	$V_d$	$V_s$	$H_v=(V_d^2-V_s^2)/2g$	$H_t=P_d-P_s+H_v$	Valor K
	Impulsión	Grupo 1	Grupo 2	Succión	Impulsión	[m/s]	[m/s]	[m]	[m]	Calculado
	[L/s]			[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]
Promedio	75.65			2.31	60.14	0.58	0.58	0.00	57.83	0.000389
Fecha/Hora										
2020/01/01 00:00	108.81	1.00	1.00	2.31	60.80	0.8388	0.8388	0.0000	58.49	
2020/01/01 00:05	108.76	1.00	1.00	2.07	60.72	0.8385	0.8385	0.0000	58.65	
2020/01/01 00:10	108.83	1.00	1.00	2.15	60.80	0.8390	0.8390	0.0000	58.65	
2020/01/01 00:15	108.72	1.00	1.00	2.15	60.72	0.8382	0.8382	0.0000	58.57	0.000458
2020/01/01 00:40	79.19	1.00	0.00	2.31	59.69	0.6105	0.6105	0.0000	57.37	
2020/01/01 00:45	79.24	1.00	0.00	2.39	60.00	0.6108	0.6108	0.0000	57.61	
2020/01/01 00:50	79.22	1.00	0.00	2.39	60.00	0.6107	0.6107	0.0000	57.61	
2020/01/01 00:55	79.22	1.00	0.00	2.39	59.85	0.6107	0.6107	0.0000	57.45	
2020/01/01 01:00	79.18	1.00	0.00	2.31	59.92	0.6104	0.6104	0.0000	57.61	
2020/01/01 01:05	79.17	1.00	0.00	2.39	60.08	0.6103	0.6103	0.0000	57.69	
2020/01/01 01:10	79.21	1.00	0.00	2.39	59.77	0.6106	0.6106	0.0000	57.38	
2020/01/01 01:15	79.19	1.00	0.00	2.31	60.00	0.6105	0.6105	0.0000	57.69	
2020/01/01 01:20	79.18	1.00	0.00	2.31	59.92	0.6104	0.6104	0.0000	57.61	
2020/01/01 01:25	79.19	1.00	0.00	2.15	60.00	0.6105	0.6105	0.0000	57.85	
2020/01/01 01:40	79.15	1.00	0.00	2.31	59.85	0.6102	0.6102	0.0000	57.53	
2020/01/01 01:45	79.21	1.00	0.00	2.39	60.00	0.6107	0.6107	0.0000	57.61	
2020/01/01 02:00	79.25	1.00	0.00	2.31	60.00	0.6109	0.6109	0.0000	57.69	

Ilustración 26. Datos operativos cada 5 minutos de la estación de bombeo parte 1. [SCADA EPM].

...

2020/05/06 22:20	56.34	1.00	0.00	2.47	59.77	0.4343	0.4343	0.0000	57.30	
2020/05/06 22:25	56.26	1.00	0.00	2.15	59.61	0.4337	0.4337	0.0000	57.45	
2020/05/06 22:30	56.26	1.00	0.00	2.47	59.53	0.4337	0.4337	0.0000	57.06	
2020/05/06 22:35	56.30	1.00	0.00	2.39	59.77	0.4340	0.4340	0.0000	57.38	
2020/05/06 22:40	56.32	1.00	0.00	2.47	59.77	0.4341	0.4341	0.0000	57.30	
2020/05/06 22:45	56.31	1.00	0.00	2.47	59.69	0.4341	0.4341	0.0000	57.22	
2020/05/06 22:50	56.32	1.00	0.00	2.39	59.69	0.4342	0.4342	0.0000	57.30	
2020/05/06 22:55	56.34	1.00	0.00	2.39	59.77	0.4343	0.4343	0.0000	57.38	
2020/05/06 23:00	56.27	1.00	0.00	2.47	59.69	0.4338	0.4338	0.0000	57.22	
2020/05/06 23:05	56.34	1.00	0.00	2.47	60.00	0.4343	0.4343	0.0000	57.53	
2020/05/06 23:10	56.33	1.00	0.00	2.55	59.69	0.4342	0.4342	0.0000	57.14	
2020/05/06 23:15	56.27	1.00	0.00	2.39	59.53	0.4338	0.4338	0.0000	57.14	
2020/05/06 23:20	56.32	1.00	0.00	2.47	59.69	0.4342	0.4342	0.0000	57.22	
2020/05/06 23:25	56.26	1.00	0.00	2.39	59.77	0.4337	0.4337	0.0000	57.38	
2020/05/06 23:30	56.31	1.00	0.00	2.79	59.53	0.4341	0.4341	0.0000	56.74	
2020/05/06 23:35	56.31	1.00	0.00	2.47	59.69	0.4341	0.4341	0.0000	57.22	
2020/05/06 23:40	56.27	1.00	0.00	2.15	59.69	0.4338	0.4338	0.0000	57.53	0.000296
2020/05/06 23:50	113.03	1.00	1.00	2.39	61.28	0.8713	0.8713	0.0000	58.89	
2020/05/06 23:55	113.08	1.00	1.00	2.07	61.36	0.8717	0.8717	0.0000	59.29	

*Ilustración 27. Continuación... Datos operativos cada 5 minutos de la estación de bombeo parte 2. [SCADA EPM].*

Para el caso de estudio actual se tomó como base el periodo comprendido entre el primero de enero de 2020 y el 6 de mayo del mismo año, de esta forma se pueden obtener más de 32966 datos operativos del sistema de bombeo que permite hacer un diagnóstico y determinar el estado del sistema, tanto de la bomba como de las tuberías y su operación en conjunto.

Esta muestra se obtiene de forma cruda. Se recomienda filtrar algunos datos de instantes de transición, cambios de estados críticos o saltos operativos que se dan en un periodo corto pero que afectan el estudio. La intención del análisis y del diagnóstico es poder tener los datos más depurados y acertados dentro de un régimen operativo estable y constante que permita sacar conclusiones.

Luego de filtrar los datos, se obtiene una muestra de 32947, correspondiente a los datos operativos capturados cada 5 minutos durante un periodo de tiempo de 4 meses, comprendido entre el 1ro de enero y el 6 de mayo de 2020; donde tan solo se descartó el 0.06% de los datos que se encontraban erróneos dentro del periodo evaluado.

Con los datos filtrados y analizados previamente y luego de validar que son datos coherentes y válidos para el sistema, se surten una serie de pasos que permiten evaluar el sistema tanto con gráficas, como con fórmulas de diagnóstico y diseño tal se describen a continuación:

1. Llevar los datos operativos del SCADA a una gráfica H vs Q<sup>4</sup>; de esta forma se tendrá una nube de puntos inicial o base, sobre la cual se puede determinar el comportamiento del sistema y los diferentes modos operativos que tiene la estación de bombeo.

Esta gráfica permite sacar las primeras conclusiones del estudio y encaminar los análisis operativos.

De la Ilustración 28, se puede observar 3 grandes grupos de puntos de la siguiente forma:

- ✓ **Nube de puntos de negro a la izquierda de la gráfica:** se observa un grupo pequeño de puntos 1.210 datos en los cuales representan el 3,67% de los valores analizados en la muestra. Estos valores permiten determinar la altura estática del sistema en todo su rango de operación. La altura estática está dada por los niveles en el tanque de succión y la llegada en los tanques Paraíso.

Para comprobar la validez de los datos, se evalúa con la altura estática física del sistema que se obtiene con la diferencia de cotas reales entre el nivel del agua en el tanque de succión y cota de llega a los tanques Paraíso, ya que en este sistema la impulsión llega al tanque por la parte superior.

- Cota máxima de succión= 1816,50 msnm
- Cota de llegada o rebose de los tanques Paraíso= 1874,70 msnm.

$$H_e = \text{Cota max succion} - \text{Cota llega}$$

$$H_e = 1874,70 - 1816,50$$

$$H_e = 58,20$$

Esta altura estática, es el punto de partida para la operación de sistema de bombeo y su interacción con las motobombas.

*Nota: En la nube de puntos con la evaluación estática, se aprecia mucha variación en el valor de la altura, esto se puede dar por intervenciones en la planta, falta de nivel en el tanque de succión*

---

<sup>4</sup> H vs Q: Curva de altura dinámica total versus Caudal.

*por baja producción de agua que pueden limitar la operación del bombeo y por ende sacarlo de servicio, razón por la cual el caudal (Q) es 0 l/s.*

- ✓ **Nube de puntos centrales de la gráfica:** En el grupo central de puntos de la Ilustración 28, se observa 2 tipos de grupos. Unos graficados de color amarillo, los cuales agrupan los puntos operativos del grupo 2 de bombeo, con lo cual en la muestra analizada se tiene un total de 921 datos, que representan el 2,80% del total de la muestra, lo que indica que este grupo de bombeo es el menos utilizado por operación de forma individual para transportar el agua hacia los tanques Paraíso.

Caso contrario sucede con la nube de puntos de color naranja, la cual hace referencia a la operación del grupo 1 de bombeo, de la cual se tienen 29.897 datos operativos, lo que representa el 81,64% del total de la muestra analizada, lo que quiere decir que es el modo y grupo operativo preferente por operación para transportar el agua hacia los tanques Paraíso desde esta estación de bombeo.

Con el grupo 1 de bombeo, se observa una particularidad en su funcionamiento y que la gráfica lo evidencia. Ese sistema de bombeo, cuenta con un variador de velocidad de baja tensión para cada motobomba, y sus equipos asociados son aptos para este funcionamiento y modo operativo; lo cual permite desplazar la curva de la motobomba a lo largo del sistema por puntos de caudal como se observa en la gráfica entre 52 y 80 l/s aproximadamente; este rango, se logra variando su velocidad y frecuencia entre 58 y 63Hz; así, si el equipo cuenta con las condiciones de trabajo adecuadas y un sistema generoso que cumpla sus requisitos operativos, con la misma motobomba es posible obtener más caudal del nominal y satisfacer la necesidad volumétrica del sistema.

- ✓ **Nube de puntos a la derecha de la gráfica:** más a la derecha de la Ilustración 28, Se puede observar de color gris, los puntos operativos del sistema operando con los 2 grupos en simultaneo; aunque no es modo operativo permitido por la normativa para este tipo de sistemas, ante eventuales situaciones y emergencias operativas es permitido implementarlo con el fin de garantizar la correcta operación del sistema con continuidad, calidad y cantidad requerida por el sistema y los usuarios.

Como se observa en la gráfica, estos puntos tienen un patrón de dispersión horizontal similar al presenta la operación del grupo 1 de bombeo, esto se debe a la variación de frecuencia en este grupo y que permite entregar más caudal de descarga en los tanques.

*Nota: Es importante aclarar, para realizar un procedimiento de variación de frecuencia se debe desarrollar la ingeniería, el análisis operativo tanto del sistema como de las motobombas para garantizar su valides operativa y no poner en riesgo o deterioro acelerados los equipos; no se debe generalizar esta práctica sin su debido análisis.*

En la Ilustración 28, se puede observar cómo se distribuyen los puntos operativos sobre la gráfica H vs Q, agrupándolos en segmentos agrupados según la operación de los equipos y su cruce con el sistema, esto depende de cuantas motobombas opera a la vez y su condición de trabajo.

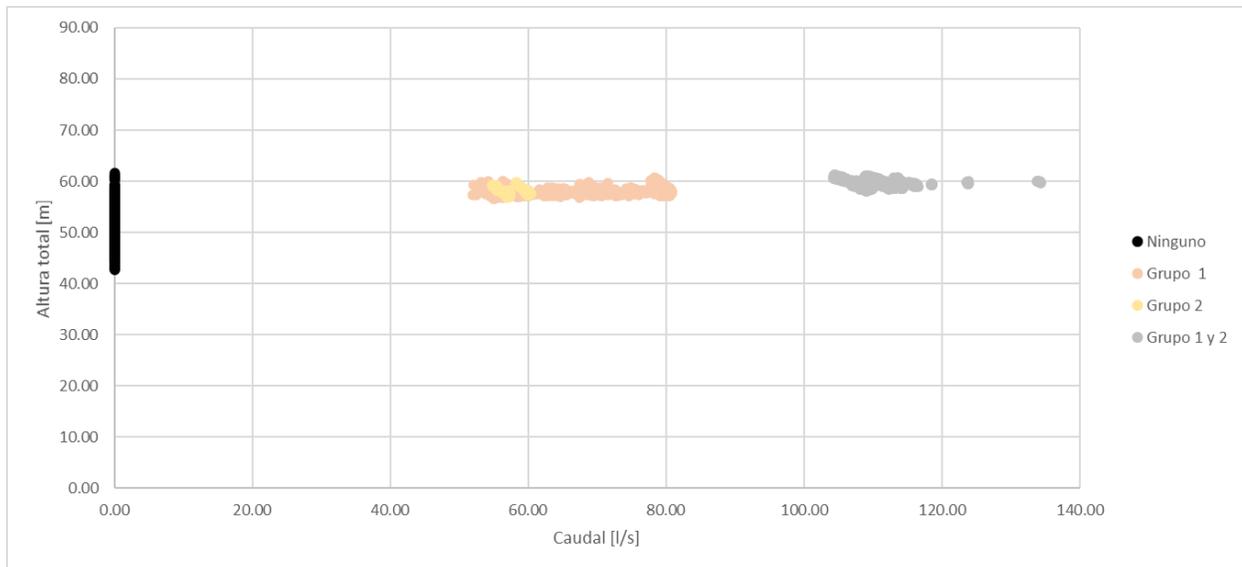


Ilustración 28. Nube de puntos operativos del sistema de bombeo PPAP Caldas - Paraíso. [SCADA EPM].

2. Para determinar las ecuaciones del sistema; de una infraestructura existente, se cuenta de varios puntos operativos a lo largo del tiempo. La mejor forma evaluar el estado actual del sistema es de forma práctica, con datos reales de campo puesto que la tubería con el paso del tiempo y el funcionamiento continuo de la red hace que presenten deterioros por corrosión, incrustaciones, asentamientos en el tubo, presencia de biopelículas en las paredes del tubo que pueden afectar las condiciones físicas de la red como lo son el diámetro del tubo, coeficiente de fricción del material, entre otras variables. Por esta razón, con ayuda de las ecuaciones de HAZEN-WILLIAMS, se puede determinar la ecuación real operativa del conjunto y realizar los respectivos análisis y proyecciones.

En primer lugar, se debe encontrar la constante K, que incluye variables como el diámetro, longitud equivalente total del sistema y coeficiente de fricción de la tubería. Este valor se obtiene con la siguiente ecuación:

Ecuación 3. Cálculo factor K de pérdidas - condiciones operativas.

$$K = \frac{P_1 - P_2}{Q_1^{1,851} - Q_2^{1,851}}$$

5

Ecuación 4. Cálculo factor K de pérdidas de HAZEN - WILLIAMS.

$$K = \frac{L_{eqv}}{0,28 * 1000 * C^{1,851} * D^{4,86}}$$

Donde:

- L<sub>eqv</sub>** Longitud equivalente de la tubería por donde pasa el fluido, teniendo en cuenta la longitud real y los accesorios. [m].
- Q** Caudal que pasa por la red. [l/s].
- P** Presión a la salida del sistema de bombeo [mca]
- C** Coeficiente de fricción de HAZEN – WILLIAMS.<sup>6</sup>
- D** Diámetro de la tubería. [m].
- K** Coeficiente geométrico y físico de pérdidas de HAZEN – WILLIAMS.

Para poder usar esta ecuación, se requieren dos puntos operativos del sistema, para lo cual se toma el total de datos operativos del sistema (datos sacados del SCADA de EPM), y se aplica esta ecuación cada que se presente un cambio de régimen, lo que quiere decir que se presente un cambio en el caudal o en la presión de operación del bombeo para poder obtener una diferencia operativa y determinar la constante K.

Para este caso, donde se tienen 32.947 datos operativos, se tienen 197 cambios de estado válidos para aplicar la ecuación. Como el análisis de datos es un tratamiento operativo estadístico, de estos 197 valores obtenidos para K, se debe sacar el promedio, valor

---

<sup>5</sup> Los datos de P1, P2, Q1 y Q2 son tomados de los puntos operativos reales del sistema según información del SCADA, estos deben tener correspondencia entre sí.

<sup>6</sup> Ver Anexos: Tabla 20. Coeficiente de fricción de HAZEN - WILLIAMS. [EPM].

con el cual se hará el análisis global y total del sistema y sobre el cual se aplicará la ecuación de HAZEN – WILLIAMS para trazar la curva real operativa del sistema de bombeo.

Así, luego de aplicar la metodología descrita con anterioridad a la muestra, se obtiene un valor para K.

$$K = 0.000388581$$

Teniendo este valor y aplicando la ecuación de HAZEN – WILLIAMS, se obtiene finalmente la ecuación total real del sistema.

*Ecuación 5. Cálculo de la altura total del sistema.*

$$H_T = H_e + K * Q^{1,851}$$

$$H_T = 58,20 + 0,000388581 * Q^{1,851}$$

Donde:

- H<sub>t</sub>** Altura total entre los puntos a evaluar. [m]
- H<sub>e</sub>** Altura estática – Diferencia de cotas entre los puntos a evaluar. [m].
- hf** Pérdidas de energía por fricción y accesorios a lo largo de la red. [m].
- Q** Caudal que pasa por la red. [l/s].
- K** Coeficiente geométrico y físico de pérdidas de HAZEN – WILLIAMS.

3. Gráfica final del sistema con las curvas de las motobombas; finalmente, se debe graficar la ecuación del sistema variando el caudal dentro de los rangos obtenidos por la nube de puntos inicial, donde se podrá observar que la curva trazada con los datos hallados con las diferentes ecuaciones pasa por el medio de los puntos operativos.

Por último y con el fin de validar el estado de las motobombas, se trazan las curvas de las motobombas y sus modos operativos sobre la misma gráfica, integrando totalmente su

operación y variabilidades. Estas intersecciones, permiten evaluar el estado del conjunto y su afectación en el tiempo por funcionamiento de forma gráfica en la Ilustración 29.

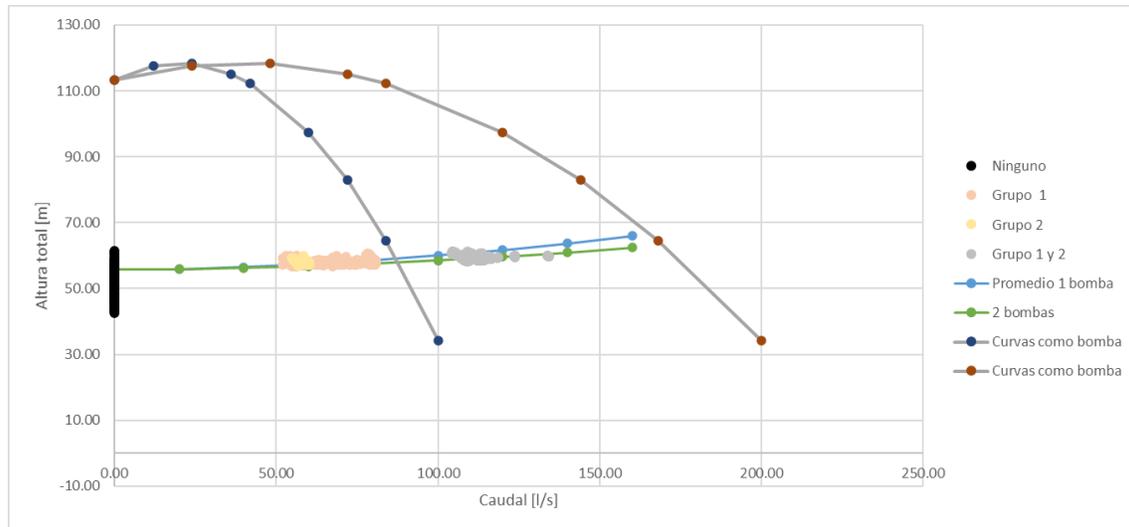


Ilustración 29. Gráfica del sistema de bombeo integrada. [EPM].

Del gráfico es posible concluir, que las máquinas, tienen un desgaste importante en su operación actual versus las curvas originales de las bombas y el sistema. Sin embargo, la operación actual de los equipos no afecta su funcionamiento ni la prestación del servicio a los clientes del municipio de Caldas y La Estrella, más aún, teniendo en cuenta la entrada en operación del proyecto total. De igual forma, y pensando en maximizar la operación de los equipos, ponerlos a operar en condiciones de máxima eficiencia como bombas (BEP<sup>7</sup>), se recomienda a operación y mantenimiento, realizar un mantenimiento overhaul, que permita llevar los equipos a su máximo desempeño tanto como bombas, como para la propuesta planteada en este estudio de trabajar como turbinas y generar energía.

<sup>7</sup> BEP: Punto de máxima eficiencia por sus siglas en inglés (Best Efficiency Point)

Así, se conoce de forma práctica y real estado de los equipos y sistema que son una pieza fundamental para el estudio y aplicación propuesta de este sistema al ponerlo a trabajar en doble modo operativo según la demanda, bien sea como bomba o como turbina.

Conocer el estado actual de los equipos de bombeo que se encuentran en operación de este sistema es una pieza clave para el informe y el estudio realizado, ya que lo que se busca, es potenciar lo existente, con el fin de realizar una inversión baja que permita aprovechar la energía disponible, en este caso la potencial por trabajar a gravedad.

## **6. SISTEMA DE APROVECHAMIENTO ENERGETICO – GENERACIÓN CON BOMBAS COMO TURBINAS**

*Este capítulo contiene el desarrollo del objetivo específico C que fue definido al inicio de este documento.*

Para realizar el estudio y análisis del aprovechamiento energético con generación a través del sistema de bombeo actual, es necesario analizar el funcionamiento total del proyecto; para el cual es necesario puntualizar en la cadena de interconexión, el tanque de partida del agua donde se encuentra la energía potencial, para este caso en el tanque Tablaza y el punto de interconexión o llegada a la PPAP Caldas, donde se encuentra el bombeo; de esta forma y analizando la capacidad máxima del sistema, es posible analizar la altura mínima aprovechable en el punto del bombeo de acuerdo con los caudales máximos de entrada a la planta y derivación hacia los demás tanques.

En la Ilustración 30, Se puede apreciar un esquema integral del proyecto, con sus datos y elementos más relevantes.

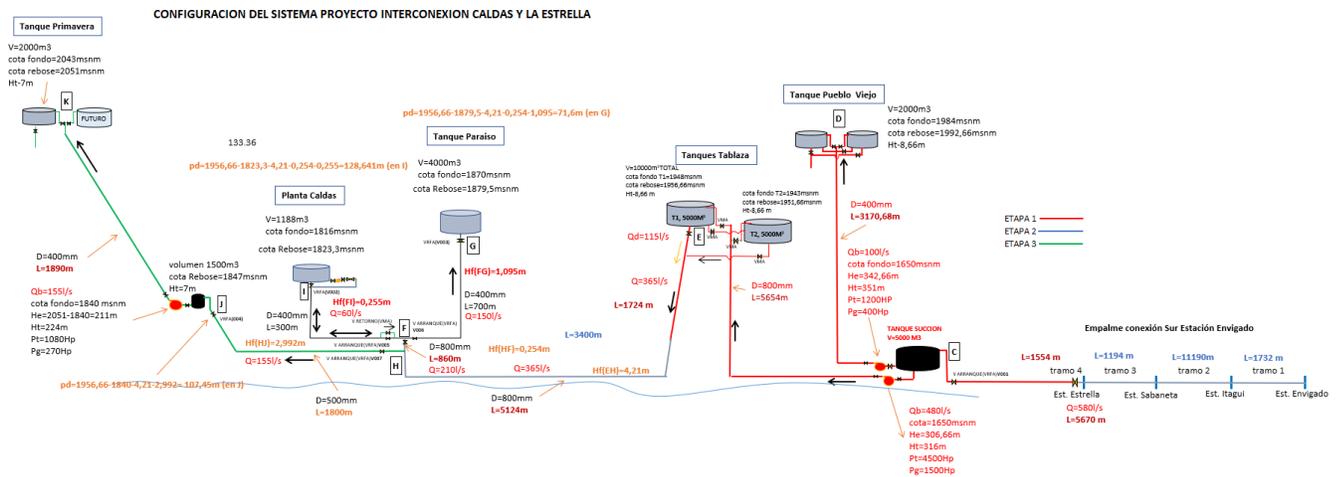


Ilustración 30. Configuración total del proyecto Interconexión Caldas - La Estrella. [EPM].

En la Tabla 6, se presentan los datos más importantes del proyecto en cuanto a su localización, cotas de implantación (fondo y rebose) de los tanques del proyecto. Así, como en la Tabla 7, Se encuentran los caudales de ingreso proyectados a cada uno de los tanques. Esta información es importante para los cálculos.

Para poder determinar las condiciones máximas de energía disponible en presión a la entrada de PPAP Caldas y teniendo en cuenta el caudal proyectado que ingrese al sistema, se determina las condiciones operativas del sistema en este punto, por ende, las condiciones operativas a las que será sometida la motobomba para operar como turbina y generar la energía.

Tabla 6. Información proyectada del proyecto. [Planeación EPM].

COTAS DE LOS TANQUES		
Cota fondo tanque Tablaza 1	1948.00	msnm
Cota rebose tanque Tablaza 1	1956.66	msnm
Cota fondo tanque Tablaza 2	1943.00	msnm
Cota rebose tanque Tablaza 2	1951.66	msnm
Cota fondo tanque PPAP Caldas	1816.00	msnm
Cota rebose tanque PPAP Caldas	1823.30	msnm
Altura estática Tablaza - PPAP Caldas min	128.36	m
Altura estática Tablaza - PPAP Caldas máx.	133.36	m

Tabla 7. Caudales proyectados de entrada a los tanques.

CAUDALES PROYECTADOS		
Caudal PPAP Caldas	60	l/s
Caudal TQ Paraíso	150	l/s
Caudal TQ Chuscala	155	l/s

Así, con base en las informaciones geográficas, la ubicación real de los tanques, el alineamiento de las tuberías, la distribución de los caudales en todo el sistema desde los tanques Tablaza, los cuales sirven como embalse para la interconexión hacia el sur, es posible tener la energía disponible a la entrada a la PPAP Caldas de la siguiente forma:

Tabla 8. Longitudes de tuberías.

LONGITUDES Y DIAMETROS DE TUBERIA <sup>8</sup>				
Tramo	Longitud	Unidades	Diámetro	Unidades
Tramo de tubería entre TQ Tablaza nodo H	5124	m	0.8	m
Tramo de tubería entre nodo H y nodo F	860	m	0.8	m
Tramo de tubería entre nodo F y la entrada a la PPAP CALDAS	300	m	0.4	m

Con base en lo descrito previamente, en la Ilustración 31, se hace un zoom al esquema del proyecto donde se tiene mayor impacto; de esta forma, es posible apreciar los datos mencionados previamente.

<sup>8</sup> Las longitudes de tubería son aproximadas y con base en los diseños de detalle de la red, los cuales pueden variar en etapas constructivas.

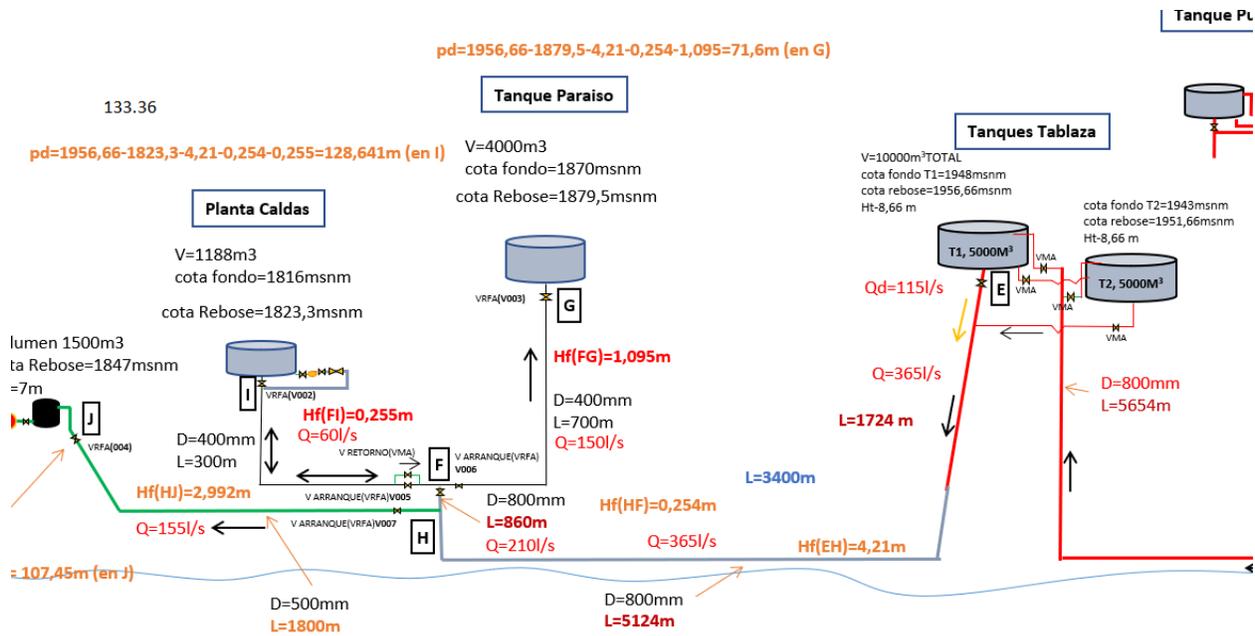


Ilustración 31. Esquema de proyecto entre Tablaza y la PPAP Caldas.

Para poder determinar la energía neta al ingreso de las motobombas, se deben tener en cuenta las pérdidas por fricción y accesorios en toda la tubería, para lo cual, se realizan los cálculos con la metodología de HAZEN – WILLIAMS.

Ecuación 6. Ecuación de altura total.

$$H_t = H_e \pm h_f$$

9

Ecuación 7. Ecuación de pérdidas de HAZEN - WILLIAMS.

$$h_f = L_{eqv} * \left( \frac{Q}{1000 * 0,28 * C * D^{2,63}} \right)^{1,851}$$

$$h_f = K * Q^{1,851}$$

<sup>9</sup> La suma o resta de las pérdidas depende si el sistema es a gravedad o por bombeo.

*Ecuación 8. Ecuación de coeficiente de pérdidas por HAZEN - WILLIAMS*

$$K = L_{eqv} * \left( \frac{1}{1000 * 0,28 * C * D^{2,63}} \right)^{1.851}$$

El material de la tubería a implementar en estas líneas de tubería primaria es ACERO con recubrimiento interno en pintura epóxica apta para alimentos o transporte de agua potable.

Teniendo en cuenta la metodología de HAZEN – WILLIAMS para el cálculo de pérdidas por fricción y accesorios en las tuberías, se realizará el análisis de la energía neta disponible para generar con base en 3 escenarios desarrollados a continuación.

De acuerdo con la descripción y el procedimiento anterior, para cada tramo de tubería que interviene en esta red primaria, es posible determinar una ecuación que dependa únicamente del caudal y así poder calcular para cualquier tipo de escenario la energía neta disponible.

### **6.2.1. Ecuación de pérdidas por fricción y accesorios en el tramo entre los TQs Tablaza – Nodo H.**

Partiendo de Ecuación 7 y Ecuación 8, es posible determinar la ecuación para este tramo.

*Ecuación 9. Cálculo de coeficiente de pérdidas K del tramo entre los TQs Tablaza - Nodo H.*

$$K = 6148,8 * \left( \frac{1}{1000 * 0,28 * 120 * 0,800^{2,63}} \right)^{1.851}$$

10

$$K = 0,00007626$$

*Ecuación 10. Ecuación de pérdidas por fricción para el tramo de tubería entre los TQs Tablaza - Nodo H.*

$$h_f = 0.00007626 * Q^{1.851}$$

---

<sup>10</sup> La  $L_{eqv}$  es un cálculo aproximado con los datos de planta perfil que se tienen en el diseño de detalle del sistema, lo cuales se pueden ver afectados en la construcción y desarrollo del proyecto.

### 6.2.2. Ecuación de pérdidas por fricción y accesorios en el tramo entre el Nodo H y el Nodo F.

Partiendo de Ecuación 7 y Ecuación 8, es posible determinar la ecuación para este tramo.

*Ecuación 11. Cálculo de coeficiente de pérdidas K del tramo entre el Nodo H - Nodo F.*

$$K = 1032 * \left( \frac{1}{1000 * 0,28 * 120 * 0,800^{2,63}} \right)^{1.851}$$

11

$$K = 0,00001280$$

*Ecuación 12. Ecuación de pérdidas por fricción para el tramo de tubería entre el Nodo H – Nodo F.*

$$h_f = 0,00001280 * Q^{1.851}$$

### 6.2.3. Ecuación de pérdidas por fricción y accesorios en el tramo entre el Nodo F y la PPAP Caldas.

Partiendo de Ecuación 7 y Ecuación 8, es posible determinar la ecuación para este tramo.

*Ecuación 13. Cálculo de coeficiente de pérdidas K del tramo entre el Nodo F – PPAP Caldas.*

$$K = 360 * \left( \frac{1}{1000 * 0,28 * 120 * 0,400^{2,63}} \right)^{1.851}$$

12

$$K = 0,00013040$$

*Ecuación 14. Ecuación de pérdidas por fricción para el tramo de tubería entre los TQs Tablaza - Nodo H.*

$$h_f = 0,00013040 * Q^{1.851}$$

---

<sup>11</sup> La Leqy es un cálculo aproximado con los datos de planta perfil que se tienen en el diseño de detalle del sistema, lo cuales se pueden ver afectados en la construcción y desarrollo del proyecto.

<sup>12</sup> La Leqy es un cálculo aproximado con los datos de planta perfil que se tienen en el diseño de detalle del sistema, lo cuales se pueden ver afectados en la construcción y desarrollo del proyecto.

#### 6.2.4. Ecuación de energía neta total disponible entre los TQs Tablaza y la PPAP Caldas.

Para poder determinar la energía neta total disponible en la PPAP Caldas y determinar la capacidad de generación del sistema, es necesario realizar una sumatoria de pérdidas de cada tramo por donde pasa el agua entre el punto de partida y de llegada, por lo cual es necesario realizar el cálculo de forma individual para cada tramo, ya que el caudal varía en los diferentes tramos y posterior a ello, si poder sumar las pérdidas totales de la siguiente forma:

*Ecuación 15. Cálculo de pérdidas hf total del sistema.*

$$h_{ft} = \sum h_{f \text{ tramo}}$$

$$h_f = 0,00007626 * Q_1^{1,851} - 0,00001280 * Q_2^{1,851} - 0,00013040 * Q_3^{1,851}$$

13

$$h_f = 0,00007626 * Q_1^{1,851} - 0,00001280 * Q_2^{1,851} - 0,00013040 * Q_3^{1,851}$$

Si el caudal fuera el mismo para todos los tramos, solo bastaría con sumar los coeficientes de pérdidas K para cada tramo.

De acuerdo con lo anterior, se obtiene la ecuación de todo el sistema en función del caudal, el cual puede variar por el sistema y determinar así la altura neta disponible. Teniendo en cuenta que la altura estática puede variar también según los niveles de agua en los tanques de Tablaza, se dejara planteada también en función de He y descrita para las condiciones extremas de nivel que son cota de fondo mínima y cota de rebose máxima de los tanques Tablaza.

*Ecuación 16. Altura neta disponible en la PPAP Caldas en función de Q y He.*

$$H_t = H_e - K_1 * Q_1^{1,851} - K_2 * Q_2^{1,851} - K_3 * Q_3^{1,851}$$

---

<sup>13</sup> El signo es negativo ya que es un sistema a gravedad, ósea a medida que el agua pasa por la tubería va perdiendo energía por la fricción y por los accesorios.

$$H_t = H_e - K_1 * Q_1^{1,851} - K_2 * Q_2^{1,851} - K_3 * Q_3^{1,851}$$

$$H_t = H_e - 0,00007626 * Q_1^{1,851} - 0,00001280 * Q_2^{1,851} - 0,00013040 * Q_3^{1,851}$$

*Ecuación 17. Altura neta disponible en la PPAP Caldas con He máxima en función de Q.*

$$H_t = 133,36 - 0,00007626 * Q_1^{1,851} - 0,00001280 * Q_2^{1,851} - 0,00013040 * Q_3^{1,851}$$

*Ecuación 18. Altura neta disponible en la PPAP Caldas con He mínima en función de Q.*

$$H_t = 128,36 - 0,00007626 * Q_1^{1,851} - 0,00001280 * Q_2^{1,851} - 0,00013040 * Q_3^{1,851}$$

### 6.3. Escenario operativo 1: Caudal operativo máximo a la salida de los tanques de Tablaza.

En este escenario, se tiene la condición operativa del sistema a su máxima capacidad, lo que quiere decir que, desde los tanques de Tablaza (Tabla 9), que funcionan como embalse, se está sacando todo el caudal posible para todos los tanques que se encuentran hacia el sur que el proyecto y el sistema tiene proyectados de la siguiente forma:

*Tabla 9. Caudales de distribución desde el TQ Tablaza en etapa 3 – total del proyecto.*

CAUDALES PROYECTADOS ETAPA 3		
Caudal PPAP Caldas	60	l/s
Caudal TQ Paraíso	150	l/s
Caudal TQ Chuscala	155	l/s

Así, como se observa en Ilustración 31, por el tramo común de tubería comprendido entre los TQs Tablaza y el nodo H, pasa un caudal total de 365 l/s, que corresponden al máximo caudal de salida del sistema.

De acuerdo con lo anterior, se realizan los cálculos de pérdidas respectivos para obtener en este escenario la presión neta disponible para generación, tanto con la altura estática máxima como mínima entre los TQs Tablaza y la PPAP Caldas.

Con la Ecuación 17, es posible obtener la máxima altura neta disponible en este escenario cuando los niveles en los tanques de Tablaza son máximos ( $H_e$  máxima) así:

*Ecuación 19. Cálculo de la altura neta disponible con el caudal total a la salida de Tablaza y  $H_e$  máxima.*

$$H_t = 133,36 - 0,00007626 * 365^{1,851} - 0,00001280 * 210^{1,851} - 0,00013040 * 60^{1,851}$$

14

$$H_t = 128,63 \text{ m}$$

Con la Ecuación 18, es posible obtener la mínima altura neta disponible en este escenario cuando los niveles en los tanques de Tablaza son mínimos ( $H_e$  mínima) así:

*Ecuación 20. Cálculo de la altura neta disponible con el caudal total a la salida de Tablaza y  $H_e$  mínima.*

$$H_t = 128,36 - 0,00007626 * 365^{1,851} - 0,00001280 * 210^{1,851} - 0,00013040 * 60^{1,851}$$

$$H_t = 123,63 \text{ m}$$

#### **6.4. Escenario operativo 2: Caudal operativo de los tanques Paraíso más PPAP Caldas a la salida de los tanques de Tablaza.**

En este escenario, se tiene la condición operativa del sistema en la condición de operación máxima inicial, la cual no incluye la etapa 3 del proyecto (se excluye el caudal de Chuscala), lo que quiere decir que, desde los tanques de Tablaza (Tabla 10), que funcionan como embalse, se distribuye solo hacia 2 tanques que se encuentran hacia el sur que el proyecto y el sistema tiene proyectados en la etapa 2 de la entrada en operación de la siguiente forma:

---

<sup>14</sup> Se restan las pérdidas, ya que al ser un sistema a gravedad por la fricción del paso del agua se pierde energía al pasar de un punto al otro.

Tabla 10. Caudales de distribución desde el TQ Tablaza en etapa 2 – inicial del proyecto.

CAUDALES PROYECTADOS ETAPA 2		
Caudal PPAP Caldas	60	l/s
Caudal TQ Paraíso	150	l/s
Caudal TQ Chuscala	0	l/s

Así, como se observa en Ilustración 31, por el tramo común de tubería comprendido entre los TQs Tablaza y el nodo H, pasa un caudal total de 210 l/s, que corresponden al máximo caudal de salida del sistema en la etapa 2 del proyecto, donde no se incluye el caudal hacia Chuscala.

De acuerdo con lo anterior, se realizan los cálculos de pérdidas respectivos para obtener en este escenario la presión neta disponible para generación, tanto con la altura estática máxima como mínima entre los TQs Tablaza y la PPAP Caldas.

Con la Ecuación 17, es posible obtener la máxima altura neta disponible en este escenario cuando los niveles en los tanques de Tablaza son máximos ( $H_e$  máxima) así:

*Ecuación 21. Cálculo de la altura neta disponible con el caudal hacia los tanques Paraíso y PPAP Caldas a la salida de Tablaza y  $H_e$  máxima.*

$$H_t = 133,36 - 0,00007626 * 210^{1,851} - 0,00001280 * 210^{1,851} - 0,00013040 * 60^{1,851}$$

15

$$H_t = 131,33 \text{ m}$$

Con la Ecuación 18, es posible obtener la mínima altura neta disponible en este escenario cuando los niveles en los tanques de Tablaza son mínimos ( $H_e$  mínima) así:

*Ecuación 22. Cálculo de la altura neta disponible con el caudal hacia los tanques Paraíso y PPAP Caldas a la salida de Tablaza y  $H_e$  mínima.*

$$H_t = 128,36 - 0,00007626 * 210^{1,851} - 0,00001280 * 210^{1,851} - 0,00013040 * 60^{1,851}$$

$$H_t = 126,33 \text{ m}$$

<sup>15</sup> Se restan las pérdidas, ya que al ser un sistema a gravedad por la fricción del paso del agua se pierde energía al pasar de un punto al otro.

### 6.5. Escenario operativo 3: Caudal operativo solo de PPAP Caldas a la salida de los tanques de Tablaza.

En este escenario, se tiene la condición operativa del sistema en la condición de operación mínima, la cual sólo contempla el caudal requerido por la PPAP Caldas, lo que quiere decir que, desde los tanques de Tablaza (Tabla 11), que funcionan como embalse, se distribuye solo hacia la PPAP Caldas en operación de la siguiente forma:

Tabla 11. Caudales mínimos de distribución desde el TQ Tablaza.

CAUDALES PROYECTADOS MINIMOS		
Caudal PPAP Caldas	60	l/s
Caudal TQ Paraíso	0	l/s
Caudal TQ Chuscala	0	l/s

Así, como se observa en Ilustración 31, para este escenario, por todos los tramos sólo pasaría el caudal requerido por la PPAP Caldas, punto en el cual las pérdidas serían menores sobre cualquiera de los demás escenarios analizados.

De acuerdo con lo anterior, se realizan los cálculos de pérdidas respectivos para obtener en este escenario la presión neta disponible para generación, tanto con la altura estática máxima como mínima entre los TQs Tablaza y la PPAP Caldas.

Con la Ecuación 17, es posible obtener la máxima altura neta disponible en este escenario cuando los niveles en los tanques de Tablaza son máximos ( $H_e$  máxima) así:

Ecuación 23. Cálculo de la altura neta disponible con el caudal hacia la PPAP Caldas a la salida de Tablaza y  $H_e$  máxima.

$$H_t = 133,36 - 0,00007626 * 60^{1,851} - 0,00001280 * 60^{1,851} - 0,00013040 * 60^{1,851}$$

16

$$H_t = 132,93 \text{ m}$$

<sup>16</sup> Se restan las pérdidas, ya que al ser un sistema a gravedad por la fricción del paso del agua se pierde energía al pasar de un punto al otro.

Con la Ecuación 18, es posible obtener la mínima altura neta disponible en este escenario cuando los niveles en los tanques de Tablaza son mínimos ( $H_e$  mínima) así:

*Ecuación 24. Cálculo de la altura neta disponible con el caudal hacia la PPAP Caldas a la salida de Tablaza y  $H_e$  mínima.*

$$H_t = 128,36 - 0,00007626 * 60^{1,851} - 0,00001280 * 60^{1,851} - 0,00013040 * 60^{1,851}$$

$$H_t = 127,93 \text{ m}$$

Con base en lo descrito y estudiado en los diferentes escenarios operativos analizados, el caudal a considerar en el estudio de generación de energía es 60 l/s y la altura neta aprovechable del sistema, podrá variar entre los 132,93 mca y 123,63 mca; datos con los cuales se deberán llevar a cabo todos los cálculos de generación.

Sin embargo, como es un proyecto de aprovechamiento energético, para este caso, solo se analizará el escenario más desfavorable de generación, el cual se da cuando el sistema cuenta con la mínima presión disponible por las condiciones operativas, el cual se da cuando el proyecto culmine la etapa 3 y entre en operación el sistema de distribución de Chuscala.

## **7. COMO DETERMINAR LA POTENCIA HIDRÁULICA**

*Este capítulo contiene el desarrollo de los objetivos específicos D y E que fueron definidos al inicio de este documento.*

De acuerdo a lo expuesto en la DEFINICIÓN DEL PROBLEMA, este estudio busca analizar la viabilidad técnica y diseño de un sistema de generación de energía con motobombas existentes en el sistema de bombeo PPAP Caldas hacia el tanque paraíso; el cual con el desarrollo del proyecto Interconexión Caldas – La Estrella, se verá repotenciado e interconectado con sistema a gravedad desde la PPAP La Ayurá, sistema que cuenta con una energía potencial importante al ingresar a la planta; razón por la cual se considera el aprovechamiento directo de esta energía haciendo pasar el caudal requerido por el sistema a través de las motobombas existentes y

dejando la posibilidad de que el sistema funcione de forma alternada como bomba o como turbina según se requiera para la prestación del servicio de agua potable.

Para ellos es importante enmarcar y tener siempre presente las necesidades del sistema, las cuales fueron las que abrieron la puerta a este estudio y hacen parte de un proyecto de la empresa que actualmente se encuentra en ejecución.

El proyecto interconexión Caldas – La Estrella, debe llevar a los tanques de distribución de la PPAP Caldas un caudal de 60 l/s, este caudal tiene como finalidad suplir las deficiencias de producción de agua en la planta por mala calidad en las fuentes naturales (quebradas y ríos que sirven como aducción) y/o deficiencia en el caudal de los afluentes. Todo lo anterior tiene como objetivo poder garantizar los compromisos del servicio que presta EPM a sus clientes tanto en cantidad, calidad y continuidad en el servicio de agua potable.

Teniendo en cuenta en lo anterior, y evaluando los diferentes escenarios operativos del sistema, donde la altura neta de generación varía dependiendo tanto del caudal de salida y el nivel en los tanques de Tablaza; de acuerdo con estos valores hallados para estas operaciones, se procede con el cálculo de la potencia hidráulica como turbina de acuerdo con la Ecuación 25

✓ **Ecuación de potencia hidráulica para turbinas.**

*Ecuación 25. Potencia hidráulica como turbina.*

$$Pot_{hidra} = \rho g Q H_{neta}$$

Donde:

- Pot<sub>hidra</sub>** Potencia hidráulica [w].
- ρ** Densidad [Kg/m<sup>3</sup>]
- Q** Caudal del fluido [m<sup>3</sup>].
- g** Gravedad [m/s<sup>2</sup>]
- H** Altura total del fluido [m].

De la cual se obtienen los siguientes resultados consignados en la Tabla 12.

Tabla 12. Cálculo de potencia hidráulica según los escenarios operativos.

Condición de trabajo	Caudal de entrada a la PPAP CALDAS [l/s]	Altura neta [mca]	Potencia hidráulica [kW]
Caudal total a la salida de Tablaza (Q=365l/s) nivel máximo.	60	128.63	75.63
Caudal total a la salida de Tablaza (Q=365l/s) nivel mínimo.	60	123.63	72.69
Caudal hacia PPAP Caldas y Paraíso a la salida de Tablaza (Q=210l/s) nivel máximo.	60	131.33	77.22
Caudal hacia PPAP Caldas y Paraíso a la salida de Tablaza (Q=210l/s) nivel mínimo.	60	126.33	74.28
Caudal hacia PPAP Caldas a la salida de Tablaza (Q=60l/s) nivel máximo.	60	132.93	78.16
Caudal hacia PPAP Caldas a la salida de Tablaza (Q=60l/s) nivel mínimo.	60	127.93	75.22

## 8. DISEÑO Y EVALUACIÓN DE LAS BOMBAS EXISTENTES COMO TURBINAS

*Este capítulo contiene el desarrollo del objetivo específico F que fue definido al inicio de este documento.*

Para el caso de estudio que estamos realizando, el objetivo es optimizar los recursos y los equipos con los que se cuenta, para lo cual, como se encuentra una estación de bombeo existente con dos máquinas centrifugas carcasa partida horizontalmente marca FAIRBANKS MORSE con referencia 5922 de 5", impeler K5T1A&B de 375mm de diámetro [EPM, información técnica del bombeo] Ilustración 32.

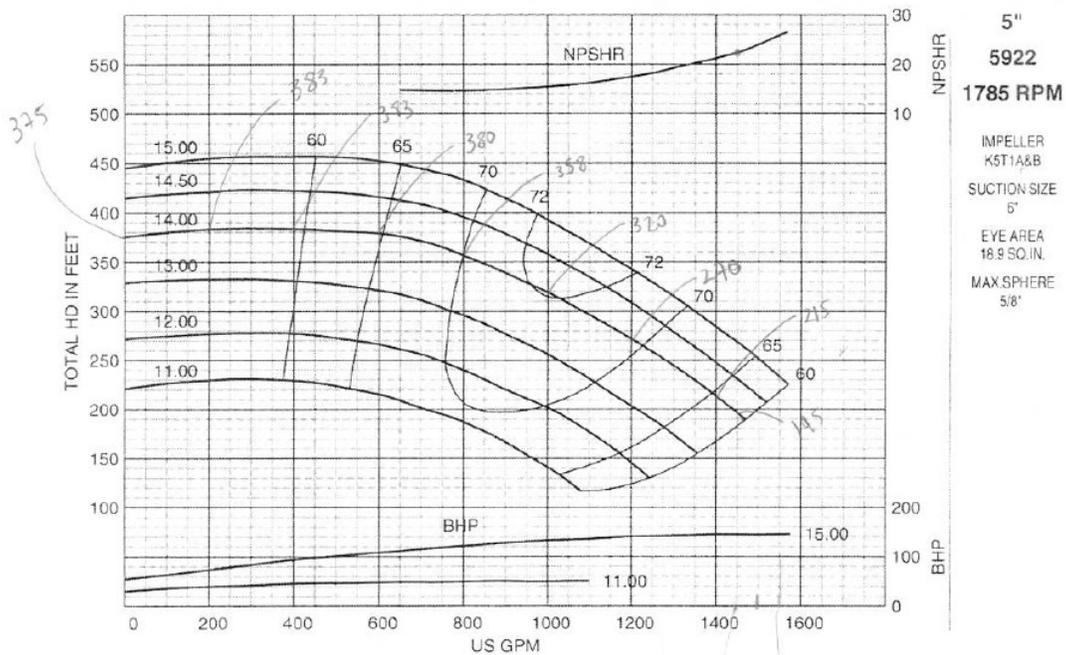


Ilustración 32. Curva característica de las motobombas existentes en la estación de bombeo PPAP Caldas - Paraíso. [EPM, información técnica de la estación de bombeo].

Razón por la cual, se debe determinar el funcionamiento de estos equipos en el cuarto cuadrante de las curvas características; ósea, como turbina.

Para hacer el análisis de las bombas operando como turbinas, diferentes autores han desarrollado bajo estudios prácticos y de laboratorio, fórmulas que relacionan el comportamiento de la bomba con el comportamiento como turbina en el punto de máxima eficiencia tomando como datos hidráulicos de cálculo la altura, el caudal y la velocidad específica.

### 8.2.1. Selección del equipo partiendo a partir de las características hidráulicas

Para realizar este estudio, se relacionan los modos de funcionamiento de un mismo equipo como bomba o como turbina; dicha relación se da a partir de unos coeficientes para cada condición hidráulica.

$$Q_T = K_Q Q_B$$

$$H_T = K_H H_B$$

$$\eta_T = K_\eta \eta_B$$

Donde:

**Q<sub>T</sub>** Caudal operando como turbina en el BEP

**Q<sub>B</sub>** Caudal Operando como bomba en el BEP

**H<sub>T</sub>** Altura operando como turbina en el BEP

**H<sub>B</sub>** Altura operando como bomba en el BEP

**η<sub>T</sub>** Eficiencia operando como turbina

**η<sub>B</sub>** Eficiencia operando como turbina

**K<sub>Q</sub>, K<sub>H</sub>, K<sub>η</sub>** Son coeficientes de caudal, altura y eficiencia que relacionan los dos modos operativos del equipo y que pueden variar de acuerdo con cada autor.

A continuación, se relaciona la Tabla 13, con la que cada autor expone sus factores **K<sub>Q</sub>, K<sub>H</sub>, K<sub>η</sub>** Para relacionar cada uno de los parámetros hidráulicos en ambos modos operativos. Por lo general varían entre 2,1 a 1,1 para los coeficientes **K<sub>Q</sub>, K<sub>H</sub>,**

Tabla 13. Coeficientes para caudal, altura y eficiencia en función de eficiencia de la bomba. (Ortiz, Sánchez, Collazos, 2015).

Referencia	K <sub>Q</sub>	K <sub>H</sub>	K <sub>η</sub>
<b>Stephanoff</b>	$\frac{1}{\sqrt{\eta_B}}$	$\frac{1}{\eta_B}$	1
<b>McClaskey</b>	$\frac{1}{\eta_B}$	$\frac{1}{\eta_B}$	1
<b>Sharma-Williams</b>	$\frac{1}{\eta_B^{0,8}}$	$\frac{1}{\eta_B^{1,2}}$	1
<b>BUTU</b>	$\frac{0,85\eta_B^5 + 0,385}{2\eta_B^{9,5} + 0,205}$	$\frac{1}{0,85\eta_B^5 + 0,385}$	$1 - \frac{0,03}{\eta_B}$
<b>MICI</b>	0,9 – 1,0	1,56 – 1,78	0,75 – 0,80

Los métodos de cálculo de la Tabla 13, están basados en la eficiencia del equipo como bomba, que, para este estudio, son las bombas existentes en la estación; para lo cual se obtienen los datos de la curva Ilustración 32, de la cual se observa, que el valor de máxima eficiencia para este equipo es de 76%, dato que permitirá sacar los datos para cada autor y con base en los valores que se hallen determinar la metodología a seleccionar para el cálculo total.

Los datos obtenidos para estas variables bajo las diferentes teorías se encuentran registrados en la Tabla 14.

*Tabla 14. Coeficientes para las bombas existentes.*

<b>Eficiencia de la bomba</b>			<b>0.76</b>
<b>Referencia</b>	<b>K<sub>Q</sub></b>	<b>K<sub>H</sub></b>	<b>K<sub>η</sub></b>
<b>Stephanoff</b>	1.14	1.31	1.00
<b>McClaskey</b>	1.31	1.31	1.00
<b>Sharma-Williams</b>	1.24	1.38	1.00
<b>BUTU</b>	1.69	1.65	0.96
<b>MICI</b>	0.95	1.67	0.78

Como se observa en la Tabla 14, los valores que relacionan las variables hidráulicas son bastante variables entre sí; sin embargo, se observa cierta similitud en los valores de los autores McClaskey y Sharma-Williams; dado que solo se debe seleccionar una metodología, en vista que los valores de Sharma-Williams son más conservadores, se toma la decisión de trabajar con esta relación para los demás cálculos.

Como se conoce la curva H vs Q de las bombas existentes, usando la metodología para la conversión de las curvas de Sharman-Williams, se obtiene la curva como turbina.

De acuerdo con la Tabla 15, y con la metodología seleccionada, para poner a trabajar las bombas actuales como turbinas en su máxima eficiencia, se necesitarían condiciones hidráulicas de 74,46 l/s y 134,85 mca; lo que quiere decir que la motobomba con la que cuenta el sistema actual es

muy grande para las necesidades como turbina; y con una bomba de menores capacidades hidráulicas sería posible satisfacer la necesidad.

Tabla 15. Curva de la bomba existente de la estación como bomba y como turbina.

Curvas como bomba			Factores de conversión			Curvas como turbina		
I/S	m	Eficiencia	KQ	KH	K $\eta$	I/S	m	Eficiencia
0.00	114.30	3.14%	15.94	63.63	1	0.00	7273.29	3.14%
12.00	116.74	29.30%	2.67	4.36	1	32.04	509.30	29.30%
24.00	116.74	49.70%	1.75	2.31	1	41.99	270.14	49.70%
36.00	115.82	64.34%	1.42	1.70	1	51.23	196.62	64.34%
48.00	109.12	73.22%	1.28	1.45	1	61.59	158.61	73.22%
60.00	97.54	76.34%	1.24	1.38	1	74.46	134.85	76.34%
72.00	82.30	73.70%	1.28	1.44	1	91.91	118.69	73.70%
84.00	64.01	65.30%	1.41	1.67	1	118.13	106.74	65.30%

Como las condiciones hidráulicas se ven afectadas por las condiciones operativas definidas por el proyecto Interconexión Caldas – La Estrella, a ingreso a la PPAP Caldas, sólo se requiere ingresar 60 l/s, para lo cual en todos los escenarios operativos posibles, se cuenta con una presión que varía entre 123,63 mca y 132,93 mca; razón por la cual se requieren modificar la operación de los equipos que permita ajustarse a las condiciones de campo reales, para lo cual, por medio de las leyes de semejanza hidráulicas se realiza un ajuste sobre las condiciones físicas del impulsor (reducción de diámetro) simulando una bomba de menor capacidad que cumpla con los requerimientos hidráulicos bajo el escenario operativos de aprovechamiento energético o generación.

$$\frac{H_1}{H_2} = \frac{D_1^2}{D_2^2}$$

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{D_1^3}{D_2^3}$$

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{Q_1}{Q_2}$$

Con el fin de obtener la curva de la bomba ajustadas, en la Tabla 16, se agrupan los valores de la curva del equipo operando como bomba y como turbinar con la reducción de diámetro de impulsor.

Tabla 16. Datos hidráulicos de la bomba como turbina con el diámetro ajustado a los requerimientos de caudal.

D1 [m]	0.375	D2 [m]	0.349					
Curvas como bomba			Factores de conversión			Curvas como turbina		
I/S	m	Eficiencia	KQ	KH	K $\eta$	I/S	m	Eficiencia
0.00	98.97	3.14%	15.94	63.63	1	0.00	6297.94	3.14%
9.67	101.08	29.30%	2.67	4.36	1	25.82	441.00	29.30%
19.34	101.08	49.70%	1.75	2.31	1	33.83	233.91	49.70%
29.01	100.29	64.34%	1.42	1.70	1	41.28	170.25	64.34%
38.68	94.49	73.22%	1.28	1.45	1	49.63	137.34	73.22%
48.35	84.46	76.34%	1.24	1.38	1	60.00	116.77	76.34%
58.01	71.26	73.70%	1.28	1.44	1	74.06	102.77	73.70%
67.68	55.42	65.30%	1.41	1.67	1	95.18	92.43	65.30%

Teniendo en cuenta que la bomba actual tiene un diámetro de impulsor de 375 mm, y que se encuentra de mayor tamaño para los requerimientos hidráulicos del sistema como turbina, se puede reducir el diámetro del impulsor a 349 mm, de esta forma poder tener las condiciones de caudal requeridas por la PPAP Caldas en el modo operativo como turbina, y así aprovechar al máximo como turbina sin necesidad de tener que cambiar las motobombas existentes.

Sin embargo, realizar esta reducción del diámetro del impulsor, afecta directamente el funcionamiento de la motobomba hacia los tanques Paraíso, disminuyendo el caudal nominal de impulsión de 60 l/s a 48 l/s; por esta razón, se debe compensar esta deficiencia de capacidad en caudal con velocidad en la maquina recurriendo nuevamente a las curvas de semejanza y así hallar a que valor de velocidad de rotación deben operar los equipos para poder transportar el agua requerida desde la PPAP Caldas hacia los tanques Paraíso. Para esto tomamos la siguiente ecuación:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{Q_1}{Q_2}$$

De la cual se despeja  $N_2$

$$N_2 = N_1 \frac{Q_2}{Q_1}$$

$$N_2 = 1780 \text{ RPM} \frac{60 \text{ l/s}}{48,35 \text{ l/s}}$$

$$N_2 = 2215 \text{ RPM}$$

De esta forma, teniendo el impulsor de la bomba ajustado al diámetro requerido como turbina, para poder satisfacer las condiciones del sistema como bomba, se debe incrementar la frecuencia del equipo de 60Hz a 75Hz aproximadamente para alcanzar una velocidad de rotación de los equipos de 2215 rpm, lo que corresponde a un 124% de la velocidad nominal de operación; condición para la cual fueron adquiridos los equipos originalmente; de igual forma se debe validar que todos los componentes del equipo soporten esta condición de trabajo como lo son motor, pero en especial cojinetes y rodamientos, acoples, entre otros; en caso tal de que no soporten este régimen de trabajo, deberán ser ajustados y repotenciados.

Luego de todos los estudios y análisis realizados para el sistema, se encuentra una condición favorable para el aprovechamiento energético directo con generación de energía usando y ajustando las motobombas existentes según lo descrito previamente; obteniendo los siguientes beneficios, como se puede apreciar la Tabla 17.

Tabla 17. Potencia generada por la bomba como turbina.

POTENCIA GENERADA		
$\rho$	1000	Kg/m <sup>3</sup>
$g$	9.8	m/s <sup>2</sup>
$Q$	60	l/s
$H$	116.77	m
$\eta_b$	76%	
$\eta_m$	95%	
<b>Pot<sub>Hidra</sub></b>	<b>68.66</b>	<b>kW/h</b>
<b>Pot<sub>elect</sub></b>	<b>49.57</b>	<b>kW/h</b>

Al analizar los datos de potencial de energía a generar y llevándolos a factores monetarios, es posible tener un ahorro al año de aproximadamente COP 194.000.000/año, como se puede apreciar en la Tabla 18, teniendo en cuenta el costo de la energía del mercado regulado según su uso registrado en la Ilustración 33.

Tabla 18. Ganancia económica por la generación de energía.

GANANCIA ECONOMICA		
\$kW	\$ 604.66	COP
Pot <sub>elect</sub>	49.57	kW/h
Horas/día	18	h
Pot día	892	kW/día
\$ día	\$ 539,546	COP/día
Pot mes	26,769	kW/mes
\$ mes	\$ 16,186,378	COP/mes
Pot año	321,233	kW/año
<b>\$ año</b>	<b>\$ 194,236,539</b>	<b>COP/año</b>

Realizar los ajustes a la estación de bombeo, implica una inversión inicial de mantenimiento, reposición, ajustes de partes y/o elementos que se encuentran desgastados. Al igual, que la inclusión de otros elementos que por diseño del proyecto deberán ser ajustados para satisfacer la necesidad. Estos ajustes se encuentran agrupados y descritos de forma resumida en la Tabla 19, donde también se podrá apreciar los costos estimados tanto por ítems como el total de la inversión al implementar la solución.

Información Horaria				
Tarifa Horaria No Residencial		Nivel I - \$/kWh		
Industrial y Comercial	Punta	791.76	759.66	727.56
	Fuera de Punta	789.52	757.42	725.32
Oficial y Exentos	Punta	659.80	633.05	606.30
	Fuera de Punta	657.93	631.18	604.44

Ilustración 33. Tarifas y costos de la energía en el mercado regulado para marzo de 2022. (marzo 2022, EPM)

Tabla 19. Costos aproximados de la implementación del proyecto.<sup>17</sup>

<b>COSTOS DE LA IMPLEMENTACION DE LA SOLUCION</b>			
<b>Concepto</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Valor U</b>	<b>Valor Total</b>
Válvula Mariposa de 16" con actuador eléctrico para el control de ingreso a las motobombas.	1	\$40,000,000	\$40,000,000
Accesorios de tuberías y reparaciones para la instalación de los equipos requeridos.	1	\$28,000,000	\$28,000,000
Cuadrilla de mantenimiento para realizar mantenimiento a los equipos de bombeo y la instalación de los elementos adicionales requeridos. (Un mes de trabajo)	1	\$6,000,000	\$6,000,000
Kit de repuestos y consumibles para la implementación como rodamientos, grasas, lubricantes, sellos, entre otros (no incluye overhaul de las motobombas)	1	\$5,000,000	\$5,000,000
Tablero de control nuevo para albergar equipos eléctricos y de control para la implementación de la solución; incluye la programación de control y protecciones del sistema para su correcto funcionamiento. Incluye el diseño de detalle de este, con sus cables, cajas de paso, interruptores, contador, acoples y demás elementos para su interconexión.	1	\$250,000,000	\$250,000,000
<b>TOTAL</b>			<b>\$329,000,000</b>

<sup>17</sup> Los costos allí reflejados son aproximados en el 2022, los cuales fueron tomados de procesos de contratación y contratos actuales de proyectos similares que actualmente se adelantan en EPM.

## 9. CONCLUSIONES

De acuerdo con todo lo descrito en el desarrollo del documento y lo estudiado durante la elaboración del trabajo, se encuentra una enorme ventaja en la implementación de equipos de bombeo en estaciones de aprovechamiento energético hidráulicas o como generadoras de energía; que aunque su eficiencia de generación sean menores, por usar motores asíncronos que una turbina convencional que usa generadores, los costos de adquisición de las motobombas son mucho menores puesto que representa un mercado mucho más diverso y comercial para satisfacer diferentes requerimientos; de igual forma al ser un mercado más competitivo, los precios tienen a ser más favorables, al igual que los costos operativos por mantenimiento y consecución de repuestos.

En el caso de estudio seleccionado, se puede observar como con equipos existentes, que actualmente operan como bombas para transportar el agua de un lugar a otro, es posible ajustarlos, optimizarlos y aprovecharlos en doble vía como generadores de energía, aprovechando las condiciones hidráulicas de un proyecto de interconexión en curso que desarrolla la empresa EPM y que traería beneficios operativos al poder con los mismo equipos y la misma infraestructura transportar agua hacia tanques de distribución cuando se requiera, o como en la mayoría del tiempo (de acuerdo a los proyecciones de planeación) trabajar como generadores de energía para el auto consumo de la PPAP Caldas o si la demanda así lo indica entregarlo a la red de distribución, permitiendo así disminuir los gastos operativos de toda la planta por consumo de energía.

El uso de motobombas como equipos de generación de energía eléctrica es un práctica creciente en el mundo y cada vez, son más las aplicaciones a pequeña escala que se inclinan por presentar soluciones de este tipo, entregando prestaciones importantes como se ha descrito a lo largo de todo este documento; sin embargo, realizar un proyecto o un análisis de un sistema combinado entre motobomba (para transporte de agua de un punto inferior a un punto superior) y generador de energía (aprovechamiento de la energía potencial hidráulica de un sistema) con la misma

infraestructura, no es una práctica muy común en el mundo y son pocas las instalaciones donde permite dicho beneficio y maximiza las prestaciones que una solución como esta presenta.

Ahora bien, si se detalla mejor el estudio aquí realizado, se habla de aprovechar una infraestructura existente (motobombas, válvulas, redes de tubería, tableros eléctricos, instrumentación, control, entre otros elementos) de un sistema de acueducto urbano, el cual tiene como principal función garantizar a la comunidad el suministro de un servicio fundamental como es el agua potable en cada uno de sus hogares con la calidad y continuidad que merecen, hace que el proyecto y el estudio gane más relevancia y maximice de verdad sus beneficios, puesto que es un sistema que presenta variaciones operativas incontables, que depende de factores externos como climáticos, fuentes de agua cruda para tratar en la PPAP Caldas, el comportamiento ambiental de los recursos naturales (agua cruda), el comportamiento social, demográfico y de consumo de agua potable por parte de los habitantes de una ciudad; entre otros montos de factores en torno del proyecto que hace más importante tener el beneficio de con una misma infraestructura (estación de bombeo), pueda ser adaptada como una central de generación o de transporte de agua hacia la comunidad según el comportamiento variable de su entorno sacando provecho al máximo en pro siempre de la prestación y la garantía del servicio, condición y principio fundamental de una empresa como EPM.

Tener costos de inversión mínimos para un proyecto que trae consigo beneficios tanto económicos como energéticos para una empresa como EPM (autogeneración y autoconsumo), donde sus recursos son públicos y sus inversiones deben ser efectivas y eficientes es fundamental para ampliar su cobertura en la prestación del servicio de agua conservando a su vez costos justos para los usuarios por un servicio de calidad y continuo.

El costo de implementación de la solución es relativamente bajo, ya que con una inversión de aproximadamente trescientos millones de pesos (COP 330.000.000) podría ajustarse la infraestructura actual del bombeo PPAP Caldas – Paraíso para poder generar energía.

La implementación de la solución descrita permitirá generar aproximadamente 49 kW/h de energía, durante un tiempo de trabajo de 18 horas puede generar al día 892 kW/d, lo que significa que por 30 días que tiene un mes en promedio en los 12 meses del año sería un total de generación o ahorro de energía de 321,233 kW/año lo que se traduce en pesos colombianos en COP 194,236,539 año teniendo un costo del kW de energía de COP 604/kW. De acuerdo con lo anterior, aproximadamente en 2 años se cubriría el costo total de la inversión por la implementación de la solución.

## 9.2. Producto académico y apropiación social del conocimiento

El trabajo de grado fue presentado y aceptado para ser presentado en el “V Latin American Hydro Power & Systems Meeting” que se llevará a cabo en el Centro Cultural Universitario de la UMSNH en Ciudad de Morelia, Michoacán, México, del 12 al 14 de Septiembre del presente año.

A continuación, presento el abstract del artículo que fue presentado para el congreso, de igual forma, como anexo se incluye el artículo completo.

**“Abstract:** This paper presents a proposal for the adaptation of an existing pumping system in the drinking water network of the public service company of Medellín, Colombia, for power generation. The Caldas – La Estrella Interconnection project transports drinking water from the Ayurá drinking water treatment plant to the south of the Aburra Valley. In particular, a potential for energy use was detected in the Caldas drinking water treatment plant. It is proposed to adapt an existing pumping system so that it can also work as a turbine (PAT). For this, all technical information is gathered and classified. A statistical technical diagnosis of the equipment working as a pump is carried out based on the analysis of historical samples acquired during operation. Thus, the current state is determined and the actions are established to calculate the behavior of the pumps as a turbine. An approximate generation capacity of 50KW of electrical energy was calculated as PAT, which at the current energy cost in Colombia represents USD 44,000 per year. The energy can be used for self-consumption or delivered to the distribution network for a fairly low investment

cost in equipment (approximately USD 74,000). In this way, the system can work alternately as a pump or turbine according to the needs and requirements of the aqueduct operation without jeopardizing the provision of the service.”<sup>18</sup>

---

<sup>18</sup> ADAPTATION OF THE PUMPING SYSTEM OF THE CALDAS POTABILIZATION PLANT STATION FOR ENERGY GENERATION. Autor: David Saldarriaga, artículo propuesto y aceptado para ser presentado en el V congreso latinoamericano de equipos y sistemas hidráulicos

## ANEXOS.

### 9.3. Coeficiente de fricción de HAZEN – WILLIAMS.

De las normas de diseño de sistemas de acueducto de EPM, se obtiene la siguiente tabla, la cual es con la que se estandarizan los diseños bajo esta metodología.

*Tabla 20. Coeficiente de fricción de HAZEN - WILLIAMS. [EPM].*

<i>Material</i>	<i>Condición</i>	<i>Diámetro (in)</i>	<i>CHW</i>
Acero soldado	Constante	$d \geq 12$	120
		$8 \leq d \leq 10$	119
		$4 \leq d \leq 6$	118
Acero bridado	Constante	$d \geq 24$	113
		$12 \leq d \leq 20$	111
		$4 \leq d \leq 10$	107
Concreto	Formaleta de acero	Todos	140
	Formaleta de madera	Todos	120
	Centrifugado	Todos	135
PVC	Constante	Todos	150
Hierro dúctil	Con revestimiento interior de cemento		140
			150
Polietileno <sup>3</sup>			150
GRP <sup>4</sup>			150

## 9.4. Resolución de tarifas y costos de energía de EPM para marzo de 2022.

En cumplimiento de la Leyes 142 de 1994 y 1865 de 2018, resoluciones CREG 068/2000, 118/2007, 106/2008, 173/2011, 188/2016, 030, 162 de 2018, 128 y 168 de 2019, 012, 104, 162 de 2020, 214 de 2021 y 101-002 de 2022

Empresas Públicas de Medellín E.S.P. informa:

Tarifas y Costo de Energía Eléctrica - Mercado Regulado - marzo de 2022

Información Monomía							
Activos B.T. / Conectados a nivel II		Propiedad EPM	Propiedad Compartida	Propiedad Cliente			
<b>Tarifa Residencial</b>		<b>Nivel I - \$/KWh</b>					
Estrato 1.	Rango 0 - CS	263.26	252.56	241.86			
	Rango > CS	658.16	631.41	604.66			
Estrato 2.	Rango 0 - CS	329.08	315.70	302.33			
	Rango > CS	658.16	631.41	604.66			
Estrato 3.	Rango 0 - CS	559.43	536.59	513.96			
	Rango > CS	658.16	631.41	604.66			
Estrato 4.	Todo el consumo	658.16	631.41	604.66			
Estrato 5 y 8.	Todo el consumo	789.79	757.69	725.59			
<b>Tarifa No Residencial</b>		<b>Nivel I - \$/KWh</b>					
Industrial y Comercial		789.79	757.69	725.59			
ESPD*		723.97	694.55	665.12			
Oficial y Eventos de Contribución		658.16	631.41	604.66			
<b>Tarifa Áreas Comunes</b>		<b>Nivel I - \$/KWh</b>					
Con contribución		789.79	757.69	725.59			
Sin contribución		658.16	631.41	604.66			
<b>Costo unitario: <math>CU = G_{(0,1)} + T_{(0)} + D_{(0,1)} + CV_{(0,1)} + PR_{(0,1)} + R_{(0,1)}</math></b>		<b><math>CU = C_{(0,1)}</math></b>					
CU CREG 012 de 2020		868.16	831.41	804.66			
CU total		727.11	701.83	678.74			
Costo compra: Gm,j		284.24	284.24	284.24			
Cargo transporte STN: Tm		43.11	43.11	43.11			
Cargo transporte 3DL: Dn,m		267.77	242.59	217.40			
Margen comercialización: Cv,m,jj		55.59	55.59	55.59			
Costo G, T, pérdidas: PRn,m		58.15	58.15	58.15			
Restricciones: Rm		18.25	18.25	18.25			
B.T. - Baja Tensión (Nivel 1, < 1 kV)	Ctm,j (\$/faclura)	8,871					
Información Horaria							
<b>Tarifa Horaria No Residencial</b>		<b>Nivel I - \$/KWh</b>					
Industrial y Comercial	Punta	791.76	759.66	727.56			
	Fuera de Punta	789.82	757.42	725.32			
Oficial y Eventos	Punta	659.80	633.05	606.30			
	Fuera de Punta	657.93	631.18	604.44			
<b>Costo unitario: <math>CU = G_{(0,1)} + T_{(0)} + D_{(0,1)} + CV_{(0,1)} + PR_{(0,1)} + R_{(0,1)}</math></b>		<b><math>CU = C_{(0,1)}</math></b>					
CU CREG 012 de 2020		868.80	833.05	808.30			
Total CUnmt Punta		798.28	771.10	746.91			
Costo compra: Gm,j		290.15	290.15	290.15			
Cargo transporte STN: Tm		46.82	46.82	46.82			
Cargo transporte 3DL: Dn,m		267.77	242.59	217.40			
Margen comercialización: Cv,m,jj		55.59	55.59	55.59			
Costo G, T, pérdidas: PRn,m		59.31	59.31	59.31			
Restricciones: Rm		16.54	16.54	16.54			
CU CREG 012 de 2020		867.80	831.18	804.44			
Total CUnmt Fuera de Punta		723.80	698.82	673.43			
Costo compra: Gm,j		281.82	281.82	281.82			
Cargo transporte STN: Tm		41.97	41.97	41.97			
Cargo transporte 3DL: Dn,m		267.77	242.59	217.40			
Margen comercialización: Cv,m,jj		55.59	55.59	55.59			
Costo G, T, pérdidas: PRn,m		57.78	57.78	57.78			
Restricciones: Rm		18.87	18.87	18.87			
		<b>Nivel II</b>		<b>Nivel III</b>		<b>Nivel IV</b>	
		<b>Punta</b>	<b>Fuera de Punta</b>	<b>Punta</b>	<b>Fuera de Punta</b>	<b>Punta</b>	<b>Fuera de Punta</b>
<b>Tarifa</b>							
Industrial y Comercial		646.93	645.07	533.44	531.61	483.92	482.12
Oficial y Eventos		539.11	537.56	444.53	443.00	403.27	401.77
<b>Costo</b>							
CU CREG 012 de 2020		639.11	637.68	444.63	443.00	403.27	401.77
Total CU		688.77	687.78	602.80	481.80	468.66	446.77
Costo compra: Gm,j		290.15	291.82	290.15	281.82	290.15	281.82
Cargo transporte STN: Tm		46.82	41.97	46.82	41.97	46.82	41.97
Cargo transporte 3DL: Dn,m		171.46	171.46	77.81	77.81	35.09	35.09
Margen comercialización: Cv,m,jj		55.59	55.59	55.59	55.59	55.59	55.59
Costo G, T, pérdidas: PRn,m		18.11	18.07	15.79	15.84	12.26	12.43
Restricciones: Rm		16.54	18.87	16.54	18.87	16.54	18.87
CU CREG 012 de 2020		637.78		443.17		401.85	
CU Monomía		680.88		484.78		448.83	
<b>Tarifa Horaria - Franjas Aplicadas:</b>		Hores de punta: 9 a.m. - 12 m; 6 p.m. - 9 p.m. Hores fuera de punta: 0 a.m. - 9 a.m.; 12 m - 6 p.m. y 9 p.m. - 12 p.m.					
<b>Consumo Subsidado</b>		Rango subsidiado (0-173 kWh)					
Alturas superiores o iguales a 1,000 mts sobre el nivel del mar		Alturas inferiores 1,000 mts sobre el nivel del mar (0-173 kWh)					
ESPD* - E.S.P. Domicilios de acueducto y alcantarillado, consumo de energía en actividades operativas inherentes a la propia prestación del servicio.							

Ilustración 34. Resolución de tarifas y costos de energía en el mercado regulado de EPM para marzo de 2022. (2022, EPM).

## 10. BIBLIOGRAFIA

**R. Ortiz Flórez, V.H. Sánchez Barón y A. Collazos Pino 2015.** *Microcentrales Hidroeléctricas con aplicación de máquinas reversibles*: Programa Editorial Universidad del Valle, 2015.

**J.M. de Azevedo Netto y G. Acosta Álvarez. 1975.** *Manual de Hidráulica sexta edición*: EDITORA EDGARD BLUCHER LTDA, Sao Pablo, Brasil 1975.

**Claudio Mataix 1982.** *Mecánica de fluidos y maquinas hidráulicas* segunda edición.

**L.F. Quirós Morales.** Bombas y sistemas de bombeo.

**Audisio, Orlando. 2011.** BOMBAS UTILIZADAS COMO TURBINAS. [En línea]

Mayo de 2011. <https://carlosmartinezc.files.wordpress.com/2012/01/bombcomo-turb.pdf>

**Hydraulic Institute. 2000. ANSI/HI 9.1-9.5-2000.** American National Standard for Pumps – General Guidelines for Types, Definitions, Applications, Sound Measurement and Decontamination.

**Hydraulic Institute. 2000. ANSI/HI 1.4-2000.** American National Standard for Centrifugal Pumps for installation, Operation and Maintenance.

**A. Carravetta, S. D. Houreh, H. M. Ramos 2018.** Pumps as Turbines fundamentals and applications, Springer International Publishing AG, Cham, Switzerland, 2018.

<http://fainweb.uncoma.edu.ar/centraleshidraulicas/archivos/PCHBOMBAS%20COMO%20TURBINAS.PDF>.

**LA REPUBLICA edición digital 19 de febrero de 2019.** Las plantas hidroeléctricas representan 68% de la oferta energética en Colombia, 2019.

[https://www.larepublica.co/especiales/efecto-hidroituango/las-plantas-hidroelectricas-representan-68-de-la-oferta-energetica-en-colombia-](https://www.larepublica.co/especiales/efecto-hidroituango/las-plantas-hidroelectricas-representan-68-de-la-oferta-energetica-en-colombia-2829562#:~:text=Hoy%20en%20d%C3%ADa%2C%20se%20encuentran,llega%20a%20860%2C57%20MW)

[2829562#:~:text=Hoy%20en%20d%C3%ADa%2C%20se%20encuentran,llega%20a%20860%2C57%20MW](https://www.larepublica.co/especiales/efecto-hidroituango/las-plantas-hidroelectricas-representan-68-de-la-oferta-energetica-en-colombia-2829562#:~:text=Hoy%20en%20d%C3%ADa%2C%20se%20encuentran,llega%20a%20860%2C57%20MW).

**KSB.** [Catalogo en línea] [citado el 13 de enero de 2022.] <https://www.ksb.com/es-co>

**PENTAIR PUMPS GROUP, Inc.** [Performance data 5900 Multi-Stage Horizontal Split Case Pumps] [Junio de 2011].

**GENERAL DRIVER MOTOR.** Motores asíncronos y síncronos.

<https://www.generaldrivermotor.com/motores/motores-asincronos-y-sincronos/>

**J. C. Quintero Ramirez, A Villamizar Llano 2011.** *Viabilidad técnica-económica de implementar una bomba como pico turbina para suministrar energía eléctrica a una escuela rural. Universidad EAFIT, 2011.*

**EPM.** [Bases de datos internas de operación y sistemas de bombeo de EPM] [2022]

**EPM.** [Normas de diseño de sistemas de acueducto de EPM] [2009].

**EPM.** [Publicación de tarifas marzo 162022] [marzo 2022].